

MACIERZOWA METODA PLANOWANIA PRZEDSIĘWZIĘĆ TECHNICZNYCH W BUDOWIE MASZYN

Innovative method of the planning new projects in mechanical engineering

Roman KIELEC, Michał SAŚIADEK

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę macierzową do planowania nowatorskich przedsięwzięć w MSP. Przedstawiono oryginalny, zaczerpnięty z przemysłu przebieg procesu planowania, projektowania i wytwarzania modułu obudowy frezarki, pod branżową nazwą Kabina M10, od momentu wpłynięcia zapytania od klienta po wysyłkę gotowego produktu. W analizowanym przedsiębiorstwie planowanie produkcji realizowane było przy pomocy tradycyjnych metod graficznych takich jak PERT lub GANTT. Autorzy pracy zaproponowali do rozwiązania problemu planowania nowych przedsięwzięć innowacyjną metodę bazującą na kwadratowej macierzy zależności. Do automatyzacji procesu optymalizacji przebiegu procesu projektowania i wytwarzania wykorzystali autorski program Mag Project, w którym to zaimplementowano własne opracowanie Algorytmu Genetycznego. Do analizy realizacji zadań w macierzy wykorzystano ideologię inżynierii współbieżnej oraz przedstawiono zalety jej stosowania. Po zapoznaniu się z funkcjonowaniem firmy opracowano dla omawianego modułowego produktu nowy proces planowania produkcji. Nową procedurę realizacji Kabiny M10 przedstawiono w formie zoptymalizowanej macierzy sprzężeń.

Słowa kluczowe: budowa maszyn, zarządzanie projektem, planowanie, macierz sprzężeń

Abstract: The paper presents a matrix method for planning of the innovative ventures in the SMEs sector. The article presents the original process of designing and manufacturing the milling enclosure module taken from the industry, under the trade name of the 'M10 cabin', from the moment of receiving the inquiry from the customer to the shipment of the finished product. In the analyzed company, production planning was implemented by use of traditional graphic methods such as PERT or GANTT. The authors of the work proposed an innovative method based on a quadratic dependence matrix to solve the problem of planning new ventures. For the automation of the optimization process of the design and production processes, the proprietary program Mag Project was used, in which the own development of the Genetic Algorithm was implemented. The ideology of concurrent engineering and the advantages of its application were used to analyze the implementation of tasks in the matrix. After becoming familiar with the company's operation, a new production planning process was developed for this modular product. The new 'M10' booth implementation procedure is presented in the form of an optimized coupling matrix.

Keywords: mechanical engineering, project management, planning, coupling matrix

Wstęp

Produkty wytwarzane w firmach uzyskują większą konkurencyjność m.in. dzięki wprowadzaniu nowych technologii, standaryzacji projektowania modułowego, podnoszeniu kwalifikacji pracowników czy modernizacjom zakładu produkcyjnego. Zleceniodawcy wymagają, aby produkty były jak najtańsze, jak najszybciej wyprodukowane i charakteryzowały się wysoką jakością [1]. Autorzy artykułu wyznaczyli sobie za cel wdrożenie nowatorskiej metody macierzowej do planowania projektów technicznych w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym. Zrealizowano go na podstawie procesu wytwarzania jednego produktu – modułowej obudowy do frezarki o nazwie branżowej Kabina M10.

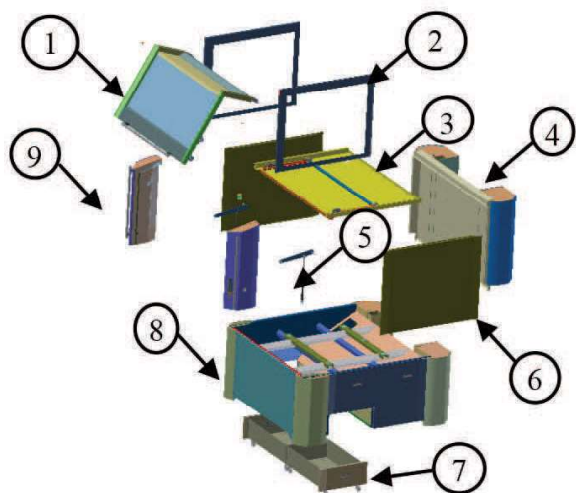
W pracy przedstawiono zastosowanie metody macierzowej do racjonalizacji realizowanych w przedsiębiorstwie procesów projektowo-wytwórczych. Założono, że racjonalizacja analizowanego procesu polegać będzie na skróceniu czasu i zmniejszeniu kosztu jego wytwarzania. Na podstawie informacji o aktualnie realizowanej w procesie kolejności realizacji zadań, zbudowano macierz zależności. Przy pomocy autorskiego programu

komputerowego MagProject [2], wykorzystującego do optymalizacji przedsięwzięć Algorytm Genetyczny (AG), zdefiniowano przebieg analizowanego procesu produkcyjnego.

Dekompozycja modułu obudowy frezarki – Kabina M10

Wybrane do analizy przedsiębiorstwo otrzymało zlecenie na zaprojektowanie i wykonanie Kabiny M10 – obudowa do frezarki (rys. 1). Na podstawie tego projektu przedstawiono rzeczywisty proces planowania i produkcji, od złożenia zamówienia przez klienta do wysyłki gotowego produktu. Kabina M10 została wybrana ze względu na zaangażowanie w realizacji wszystkich działań przedsiębiorstwa. Dzięki temu powstała dogłębna analiza, wpływająca na ocenę efektywności firmy, będąca podstawą do wniosków i prezentacji nowych rozwiązań, w założeniu mających poprawić funkcjonowanie firmy.

Czynności związane z konstrukcją, planowaniem technologii i wszelkimi zmianami występującymi podczas produkcji wykonywane są przez jedną osobę – kierownika działu konstrukcyjnego. Spotkanie działów – jakościowego, handlowego, konstrukcyjnego, technologicznego,



Rys. 1. Zdekomponowana kabina frezarki [4]
Fig. 1. Decomposed cabin of the milling machine [4]

metalowego i lakierni – następuje po montażu całościowym obudowy. Na spotkaniu zostaje omówiony projekt i proces produkcyjny wraz z błędami, które wystąpiły podczas realizacji zlecenia. Na tej podstawie sporządza się sprawozdanie. Na rys. 1. przedstawiono dekompozycję Kabiny M10 składającej się z: 1 – kłapa, 2 – rama, 3 – dach, 4 – ściana tylna, 5 – dźwignia, 6 – ściany boczne, 7 – kosz, 8 – rama, 9 – słupki.

Analizowany proces planowania i wytwarzania Kabiny M10 w przedsiębiorstwie

W tab. I. zestawiono sekwencyjnie zadania częściowe, niezbędne do wytworzenia produktu. Trzecia kolumna odnosi się do skrótów zadań, które zastosowano w macierzy zależności. Kolejne dwie kolumny to czas realizacji zadań oraz ich koszt podany w jednostkach umownych. W ostatniej kolumnie wpisano dane wejściowe, wymagane do realizacji poszczególnego zadania.

Tabela I. Kolejność operacji dla realizacji analizowanego produktu (opracowanie własne)
Table I. The order of operations for implementation of the analyzed product (own study)

Lp.	Nazwa	Skrót	Czas [min]	Koszt [ju]	Wyjście informacji
1.	Zapytanie i wysyłka dokumentacji	ZO	120	120	2
2.	Tłumaczenie dokumentacji	TD	60	70	1,3,4
3.	Opracowanie konstrukcji	KO	12000	16000	2,4,5
4.	Kalkulacja i dane szczegółowe	KDS	1920	2240	3,5
5.	Oferta	O	60	70	4,6
6.	Negocjacje handlowe	NH	900	1050	3,4,5,7
7.	Zamówienie od klienta na prototyp	ZP	77760	0	8,9,10,11
8.	OZ – zlecenie handlowe	WZH	10	10	9,11,13
9.	OZ – zlecenie produkcyjne	WZP	10	10	8,10,13
10.	Lista pobrań – magazyn	LPM	5	5	9,11,13
11.	Lista pobrań – dział zakupów	LPZ	5	5	8,10,12,13,16,17
12.	Realizacja prototypu	RP	60	70	13
13.	Tworzenie drzewa materiałowego	TDM	60	60	10,11,14,15
14.	Tworzenie protokołu– operacje	OE	10	10	13,15
15.	Wykonanie detali	WD	4740	6320	11,13,16,18,21
16.	ZM – lista dostawców	ZMD	90	90	11,17
17.	ZM – lista kooperacji	ZMK	120	120	11,18
18.	Potwierdzenie terminu realizacji	PTR	60	60	19
19.	Wykonanie prototypu	WP	7860	10480	3,13,14,20
20.	Wykonanie instrukcji montażowych	ZIM	1440	1680	21
21.	Montaż zespołów	MZ	2220	2960	15,20,22
22.	Przekazanie na magazyn	PM	60	70	23
23.	Spotkanie działów	SD	60	60	3,14,24
24.	Protokół końcowy i karta technolog.	PKKT	60	70	25
25.	Dokumentacja do wysyłki	DW	60	60	26
26.	Zatwierdzenie prototypu przez klienta	ZPK	120	140	3,5,14,15,19,27
27.	Zamówienie transportu	ZT	60	60	28
28.	Załadunek i wysyłka	ZW	120	140	-

Zastosowanie macierzy zależności do racjonalizacji planowania produkcji modułu obudowy frezarki – Kabina M10

Na podstawie opracowanej wspólnie z pracownikami firmy tab. 1 przedstawiono realizowany obecnie przebieg procesu planowania i produkcji Kabiny M10. Na rys. 2 zaprezentowano macierz zależności stanu obecnego, zaś kolejnym krokiem było wykonanie optymalizacji macierzy wraz z jej analizą. Metoda macierzowa polega na zapisie zadań częściowych w postaci macierzy strukturalnej, w której zadania reprezentowane są przez numerowane pola mieszczące się na głównej przekątnej. Istniejące pomiędzy tymi zadaniami relacje informacyjne zapisuje się w postaci sprzężeń. Zadanie może generować dane lub je absorbować [2]. Przykład takiej macierzy pokazano na rys. 2.

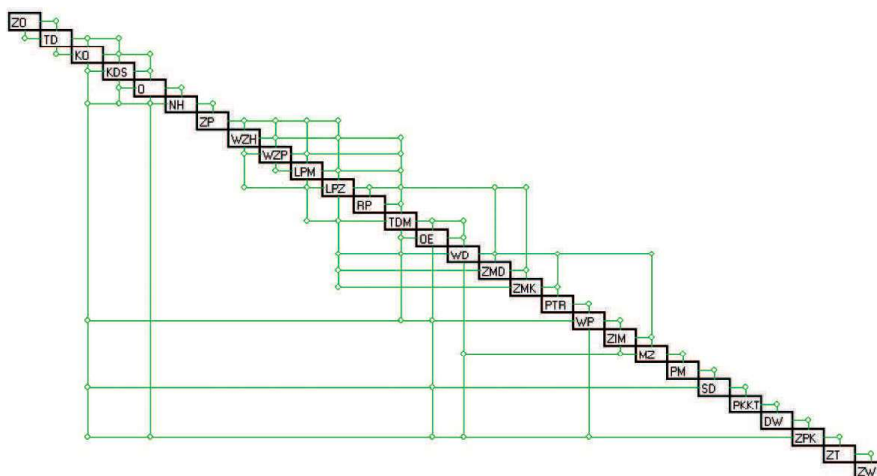
Analizowany proces rozpoczyna się od zadania w górnym lewym polu i postępuje do ostatniego zadania częściowego, w prawym dolnym polu. Połączenia zaznaczone są liniami: wyjście zadania (wynik) to linia pozioma, a wejście – linia pionowa. Zależności powyżej głównej przekątnej przedstawiają sprzężenia progresywne, natomiast poniżej przekątnej – sprzężenia zwrotne. Szczegółową analizę macierzy zależności z podziałem na moduły realizacyjne (bloki iteracyjne) przedstawiono w pracach [2, 3].

Na macierzy sprzężeń można zidentyfikować wszystkie znane połączenia pomiędzy zadaniami, jak również ujawnić konfigurację sprzężeń zwrotnych, generujących dodatkowe koszty i zwiększających czas realizacji projektu. Z rys. 3 można odczytać całkowity koszt procesu

(„Total Cost”) z uwzględnieniem sprzężeń zwrotnych i skrzyżowań, który wynosi 242986 [ju], całkowity czas procesu („Total Time”) to 431741 [min]. Przy liczbie dwudziestu ośmiu komórek („tasks”) liczba sprzężeń zwrotnych („Feedbacks”) to 30, a liczba skrzyżowań („Feedback Crossovers”) – 31. Z powodu licznych skrzyżowań i sprzężeń zwrotnych generowany jest dodatkowy koszt („Feedbacks’Cost”) rzędu 200956 [ju] i czas („Feedbacks’Time”) 321691 [min].

Ze względu na fakt, iż konstrukcją, technologią oraz nadzorem nad procesem produkcyjnym zajmuje się jedna osoba (konstruktor), nie istnieje możliwość pominięcia komórki KO w żadnej fazie procesu. Dostarczenie informacji w celu zmiany projektu wiąże się ze stałym zaangażowaniem konstruktora. Tak liczne powiązania pomiędzy komórkami generują powstanie sprzężeń zwrotnych na macierzy, będących konsekwencją nielogicznego układu zadań. Wszelkie modyfikacje wynikające z negocjacji handlowych z klientem (NH) czy z kalkulacji kosztu (KDS) mogą wiązać się ze zmianami konstrukcyjnymi. Zastosowanie innych narzędzi podczas wykonywania prototypu (WP) czy zatwierdzenie protokołu końcowego (ZPK) zawierającego modyfikacje niezbędne do dalszej produkcji muszą być zaakceptowane i wprowadzone przez konstruktora. Nie istnieją odrębne komórki mogące przejąć część obowiązków wynikających z konieczności wprowadzania zmian.

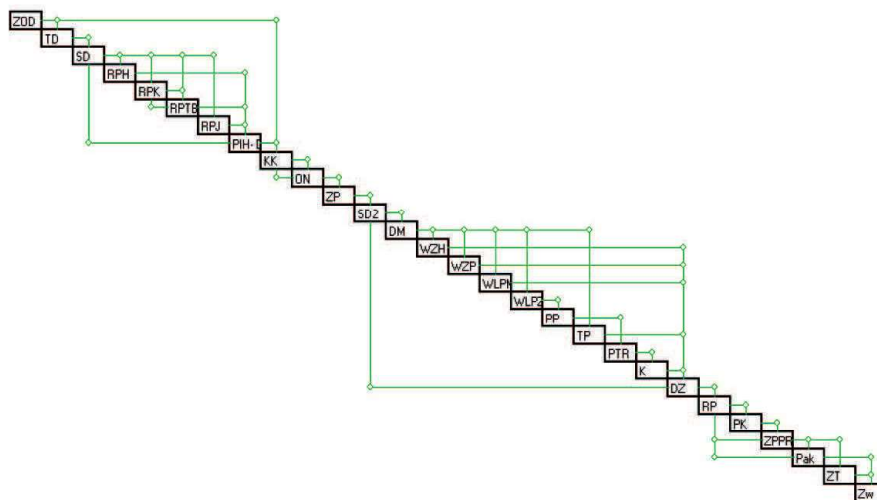
Kolejna bardzo ważna cecha macierzy to sekwencyjność realizacji zadań. Odpowiednie czynności muszą zostać wykonane po poprzedniej. W firmie nie uwzględnia się idei inżynierii współbieżnej, co znacznie wydłuża czas



Rys. 2. Macierz zależności procesu planowania przedsiębiorstwa przed racjonalizacją
Fig. 2. The matrix of the enterprise planning process prior to rationalization

Information/Statistic		Evolution - Result		Evolution - Progress		Communicator	
Project title:				No. of tasks: 28			
Total Cost: 242986		Total Time: 431741		Fitness: 1.3396E-023			
Feedbacks' Cost: 200956		Feedbacks' Time: 321691		Feedbacks: 30		Feedback Crossovers: 31	

Rys. 3. Prezentacja wyników z programu Mag Project
Fig. 3. Presentation of the results from the Mag Project programme



Rys. 4. Propozycja zoptymalizowanego procesu planowania produkcji
 Fig. 4. Proposal of an optimized production planning process

Informatory/Statistic		Evolution - Result		Evolution - Progress		Communicator	
Project title:				No. of tasks:	28		
Total Cost:	61200	Total Time:	124914	Fitness:	1.3163E-019		
Feedbacks' Cost:	29740	Feedbacks' Time:	22754	Feedbacks:	6	Feedback Crossovers:	0

Rys. 5. Parametry programu Mag Project dla wynikowej macierzy (opracowanie własne)
 Fig. 5. Parameters of the Mag Project program for the resulting matrix (own study)

realizacji całego projektu [3]. Sekwencyjna realizacja zadań znacznie wydłuża wymianę informacji w zespołach multidyscyplinarnych. Dodatkowo istnieje możliwość powstawania konfliktów przez niejasne dedykowanie zadań i zakresu obowiązków [5]. Zbyt duża odpowiedzialność i obciążenie zadaniowe spoczywające na jednej komórce obarczone jest większym ryzykiem popełnienia błędu lub pominięcia istotnych szczegółów w ostateczności wpływających na jakość produktu. Firma opracowała proces planowania, który nie gwarantuje powodzenia realizacji projektu. Gdyby, ze względów losowych, zabrakło osoby odpowiadającej za konstrukcję, nastąpiłoby niepowodzenie projektu. Kolejną wadą omawianego procesu planowania jest duża liczba skrzyżowań, tj. linii pod przekątną przecinających się. Skrzyżowania w macierzy zależności skutkują tym, że czynność występująca na skrzyżowaniu musi zostać wykonana ponownie.

Omawiany proces planowania to jeden duży blok iteracyjny. Nie istnieje podział na mniejsze bloki, które umożliwiłyby sprawniejszą kontrolę. Gdyby istniało kilka mniejszych bloków – dodanie po każdym z nich komórki decyzyjnej nie stanowiłoby problemu. Zadaniem takiej komórki jest sprawdzenie wszystkich wykonanych zadań i podjęcie decyzji o zakończeniu prac w danym module, a następnie przekazanie informacji o możliwości rozpoczęcia pracy w kolejnym. Realizacja zadań w nowym bloku skutkowałaby skróceniem sprzężeń zwrotnych, gdyż nie byłoby konieczności powrotu do poprzedniego bloku iteracyjnego.

Zastosowanie macierzy zależności do racjonalizacji planowania analizowanego procesu

Metoda oparta na macierzy zależności zawiera wszystkie znane połączenia pomiędzy zadaniami realizacyjnymi, które powinny występować w analizowanym procesie. Jako jedna z nielicznych metod odwzorowuje zarówno sprzężenia progresywne jak i zwrotne oraz skrzyżowania biorące udział przy wyliczaniu całkowitego czasu i kosztu realizacji przedsięwzięcia.

Zoptymalizowany pod względem kosztu, czasu, sprzężeń zwrotnych i skrzyżowań proces planowania produkcji Kabin M10 przedstawiono na rys. 4. Różni się od dotychczas realizowanej procedury kolejnością realizacji zadań oraz sposobem ich wykonywania. Dzięki zmianie kolejności oraz dodatkowym komórkom organizacyjnym uzyskano zmniejszenie liczby sprzężeń zwrotnych oraz ich znaczne skrócenie. Ponadto można zauważyć wyodrębnienie dwóch dużych modułów iteracyjnych. Moduły są zamkniętą częścią procesu, których działania kończą się wraz z podjęciem decyzji o otrzymaniu wszystkich informacji lub wykonaniu w pełni zadań, przez komórkę do tego wyznaczoną. Wyjście z modułu zamyka możliwość powrotu do którejkolwiek komórki należącej do danego bloku. Zwiększa to odpowiedzialność komórki decyzyjnej, jednak dla całości procesu jest to korzystne rozwiązanie. Przy stosowaniu takiego procesu planowania każda komórka ma sprecyzowane zadania i cele konieczne do jej efektywnego wykonania.

W omawianej wynikowej macierzy zależności zachodzi równoległość, którą można zaobserwować na przykładzie komórek RPH oraz RPJ. Obie te komórki są niezależne od siebie i wykonywane zadania mogą być realizowane w tym samym czasie. Czas realizacji wszystkich wyznaczonych celów przez komórkę RPH wynosi 120 [min], a przez RPJ – 1920 [min]. Gdyby obie czynności były wykonywane szeregowo czas całości wyniósłby 2040 [min]. Dzięki zastosowaniu równoległości pod uwagę należy wziąć najdłuższy z dwóch czasów, czyli 1920 [min]. Przy rozwiązaniu równoległym tylko dla dwóch zadań zyskuje się 120 [min], a w macierzy będącej propozycją realizacji nowego procesu planowania występuje więcej czynności równoległych.

Kolejny przykład różniący dotychczasowe planowanie od nowej procedury to zastosowanie współbieżności, zapewniającej wymianę informacji, gwarantującą efektywną współpracę pomiędzy komórkami. Przykład współbieżności zachodzi między komórkami RPK oraz RPTB, podobnie jak w równoległości za czas wykonania przyjmuje się najdłuższy czas jednego z omawianych zadań. Zastosowanie w nowym procesie planowania dwóch opisanych wyżej rozwiązań – równoległości i współbieżności znacznie wpływa na skrócenie czasu realizacji i zmniejszenie kosztu procesu. W porównaniu z wynikiem macierzy planowania stosowanego w przedsiębiorstwie i przedstawionego na rys. 2, zauważono znaczne zmniejszenie liczby sprzężeń zwrotnych i skrzyżowań wpływających na czas i koszt realizacji zlecenia. Czas został zmniejszony o 306827 [min] a koszt całkowity zmalał o 181786 [ju].

Podsumowanie i wnioski

Macierze planowania procesu produkcyjnego zarówno przed jak i po optymalizacji należy przeanalizować pod względem realnego czasu i kosztu realizacji zlecenia.

Czas realizacji procesu planowania i produkcji po racjonalizacji wynosi 124914 [min]. W porównaniu z czasem dotychczas realizowanego procesu przed optymalizacją wynoszącym 431741 [min] zaoszczędzono zatem 306827 [min].

Rzeczywisty koszt realizacji procesu planowania po racjonalizacji wynosi 61200 [ju] – jednostek umownych podanych przez producenta. W porównaniu z kosztem aktualnie realizowanego procesu – 242986 [ju] oszczędza się 181786 [ju].

Cel główny – wdrożenie nowej metody macierzowej do planowania nowych przedsięwzięć w analizowanym przedsiębiorstwie został osiągnięty. Dowodzi temu macierz nowego procesu planowania produkcji, którą zbudowano na podstawie już istniejącego procesu i przedstawiono na rys. 4. Macierz zależności odzwierciedla przepływ informacji i kolejność wykonywania czynności przez poszczególne komórki zadaniowe. Nowe procedury są możliwe do zrealizowania, ponieważ ich budowa polegała na wykorzystaniu już istniejących i funkcjonujących stanowisk pracy. Nowy proces planowania ma zastosowanie uniwersalne, nie tylko do jednego realizowanego przedsięwzięcia. Większa część produktów wytwarzanych w firmie przechodzi przez fazę planowania i proces produkcji. Macierze zależności w programie MagProject można w dowolny sposób modyfikować, tj. dodawać lub usuwać poszczególne komórki zadaniowe. Przy pomocy takiej funkcji programu omawiane macierze procesu planowania zlecenia można dostosować do wielu produktów, bez konieczności budowy jej od podstaw. Dzięki modyfikacji istnieje możliwość doprowadzenia procesów planowania produkcji do racjonalnej i efektywnej realizacji.

LITERATURA

- [1] Durlik I. 2000. „Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych. Część I”. Warszawa: Wydawnictwo Placet.
- [2] Kielec R. 2013. “New method for engineering projects management with the use of evolutionary algorithm”. 7th International Conference on Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems, CONFENIS 201, Prague.
- [3] Kielec R., M. Sasiadek. 2014. „Macierzowe planowanie procesów produkcyjnych w inżynierii współbieżnej”. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego.
- [4] Materiały wewnętrzne firmy (niepublikowane).
- [5] Mazur L. 2005. “Project task-member assignment using design structure matrix and genetic algorithm in concurrent engineering: project management”. Wydawnictwo Montana State University, Bozeman.

dr inż. Roman Kielec – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: r.kielec@iizp.uz.zgora.pl

dr hab. inż. Michał Sasiadek, prof. UZ – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: m.sasiadek@iizp.uz.zgora.pl