

ZESZYTY NAUKOWE
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

SCIENTIFIC LETTERS
OF RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NR 298

(e-ISSN 2300-5211)

MECHANIKA

Kwartalnik

tom XXXV

zeszyt 4/2018

październik-grudzień



WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. Grzegorz OSTASZ

Rada Naukowa ZN PRz Mechanika

Sergei ALEXANDROV (Rosja), Helmut BOEM (Austria), Józef GAWLIK (Polska),
Rudolf KAWALLA (Niemcy), Yaroslav KOVAČIK (Słowacja), Krzysztof KUBIAK (Polska),
Volodymyr KUSHCH (Ukraina), Hirpa G. LEMU (Norwegia), Thomas G. MATHIA (Francja),
Tadeusz MARKOWSKI (Polska), Pavlo MARUSCHAK (Ukraina), Paweł PAWLUS (Polska),
Andrea PICCOLROAZ (Włochy), Igor SEVOSTIANOV (USA)
Jarosław SĘP (Polska), László SIKOLYA (Węgry), Emil SPISÁK (Słowacja)
Feliks STACHOWICZ (Polska), Marian SZCZEREK (Polska),
Nicolae UNGUREANU (Rumunia), Elena VILCHEVSKAYA (Rosja)

Komitet Redakcyjny
(afiliacja: Polska)

redaktor naczelny
prof. dr hab. inż. Feliks STACHOWICZ
redaktorzy tematyczni (naukowi)
dr hab. inż. Andrzej BURGHARDT, prof. PRz
dr hab. inż. Tomasz ROGALSKI, prof. PRz
prof. dr hab. inż. Jarosław SĘP
redaktor statystyczny
prof. dr hab. inż. Paweł PAWLUS
sekretarz redakcji
dr hab. inż. Tomasz TRZEPIECIŃSKI, prof. PRz
członkowie
dr hab. inż. Tadeusz BALAWENDER, prof. PRz
dr hab. inż. Piotr STRZELCZYK, prof. PRz

Redakcja językowa
Marzena TARAŁA, Mateusz SZAL

Przygotowanie matryc
Mariusz TENDERA

e-ISSN 2300-5211
p-ISSN 0209-2689

Wersja drukowana Kwartalnika jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów (e-mail: tomtrz@prz.edu.pl)
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/mechanika>

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów (e-mail: oficyna@prz.edu.pl)
<http://oficyna.prz.edu.pl>

Informacje dodatkowe i stopka – str. 529

SPIS TREŚCI

Marek BETIUK, Zbigniew ŁATAŚ: Modyfikacja wewnętrznych powierzchni luf moździerza metodą magnetronową	401
Wojciech BŁAŻEJEWSKI, Adrianna FILIPIAK, Michał BARCIKOWSKI, Karolina ŁAGODA, Paweł STABLA, Marek LUBECKI, Michał STOSIAK, Cezary ŚLIWIŃSKI, Zbigniew KAMYK: Design and implementing possibilities of composite pontoon bridge	411
Rafał CHATYS, Kacper KUTA, Alexander PANICH: Composite body construction optimization and technological design of an electrically powered race car	421
Olha DVIRNA: Analiza stosowanych technologii obróbki powierzchni zamka tarczy sprężarki i turbiny gazowej	433
Wiesław FRĄCZ, Grzegorz JANOWSKI: Selected properties of biocomposites on the basis of PHBV with cellulose fillers	441
Rafał GAŁEK, Paweł GIL, Mariusz SZEWCZYK, Franciszek WOLAŃCZYK: Efficiency of micro combined heat and power unit in real conditions	453
Piotr GIERLAK: Singularity robust trajectory generator for robotic manipulator based on genetic algorithm with dynamic encoding of solutions	465
Adam KALINA, Aleksander MAZURKOW, Stanisław WARCHOŁ: Wyznaczanie luzu obwodowego w zazębieniu kół przekładni falowej	481
Stanisław NOGA: Drgania giętne w płaszczyźnie kół modelowanych jako układy pierścieniowe z warstwą sprężystą	491
Andrzej SKRZAT, Marta WÓJCIK: The application of fuzzy logic in engineering applications	505
Piotr STRZELCZYK, Mariusz SZEWCZYK, Rafał GAŁEK, Paweł GIL: Measurement of solar radiation properties and thermal energy of the atmosphere in Rzeszów	519
Wykaz recenzentów	527

Marek BETIUK¹
Zbigniew ŁATAŚ²

MODYFIKACJA WEWNĘTRZNYCH POWIERZCHNI LUF MOŹDZIERZA METODĄ MAGNETRONOWĄ

W publikacji przedstawiono wyniki badań technologią próżniowo-plazmową CMS PVD (ang. *Cylindrical Magnetron Sputtering Physical Vapour Deposition*) z wykorzystaniem magnetronu cylindrycznego – liniowego – wewnątrz przewodu lufy. Inspiracją rozpoczęcia badań przy udziale Huty Stalowa Wola jest próba rozwiązania problemu zwiększenia trwałości eksploatacyjnej konstrukcji obciążonych zmiennym polem ciśnienia w warunkach silnego oddziaływania chemicznego. Analizowana technologia może stanowić alternatywę dla bardzo uciążliwych ekologicznie i zdrowotnie technik galwanicznych wytwarzania powłok chromu technicznego. Powierzchniami modyfikowanymi są ściany wewnętrzne rur stalowych ferrytycznych o średnicach od 45 do 100 mm, w tym lufy moździerza 98 mm, udostępnionej przez Hutę Stalowa Wola. W pracy przedstawiono zarys procedury technologicznej wytwarzania powłok TiN, CrN, TiCN na stali lufowej 38HN3MFA.

Słowa kluczowe: magnetron cylindryczny, plazma, lufa, powłoka

1. Wprowadzenie

Prace nad zastosowaniem nowych technologii materiałowych, w tym techniki magnetronowej do modyfikacji powierzchni luf strzeleckich, były prowadzone w Stanach Zjednoczonych w laboratorium firmy Benet. Projekt [1] zakładał rozpoznanie i opracowanie alternatywnych czystszych ekologicznie technologii w stosunku do obecnie stosowanego procesu chromowania galwanicznego powierzchni wewnętrznych luf małych, średnio i wysoko kalibrowych z nowymi materiałami powłokowymi. W ramach projektu analizowano technologie: modyfikacji procesu galwanicznego przez stosowanie niskolotnych związków organicznych eliminujących oddziaływanie środowiskowe Cr^{+6} [2], chemiczne i plazmochemiczne procesy CVD, CVD-UV, PA-CVD-rf opierające się na syntezie powłoki Ta [3], platerowanie detonacyjne wkładką rurową ze stopu Ta90W10 [4], magnetronowe osadzanie powłok na bazie Ta, W, Zr, Nb o grubościach do 200 μm w lufach dużych kalibrów z zastosowaniem cylindrycznego źródła

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Marek Betiuk, Instytut Mechaniki Precyzyjnej, ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa, tel.: (22) 5602600, e-mail: betiuk@imp.edu.pl

² Zbigniew Łataś, Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, e-mail: latas@imp.edu.pl

plazmy i autonomicznego systemu czyszczenia jonowego targetu i podłoża [3, 5, 6]. Wymogiem jakościowym nowych materiałów powłokowych było uzyskanie lepszych cech eksploatacyjnych z zastosowaniem nowej generacji ładunków prochowych i materiałów płaszcza pocisku, w stosunku do powszechnie stosowanego chromu technicznego, posiadającego już w fazie wytwarzania siatkę licznych pęknięć kohezyjnych. Istnienie pierwotnej siatki pęknięć chromu będących wynikiem procesu galwanicznego nawodorowania i niekorzystnych naprężeń w powłoce ulegających samoistnej relaksacji w trakcie jej wzrostu i obróbki cieplnej (odwodowania) jest źródłem inicjacji i narastania błędów balistycznych w czasie użytkowania broni. Narastające pęknięcia i odwarstwienia powłoki chromu w trakcie eksploatacji broni są powodem utraty jej właściwości ochronnych oraz narastającej degradacji struktury materiałowej i geometrii lufy doprowadzających do zaburzeń kinetyki ruchu pocisku i ostatecznego jej zniszczenia [7-9].

Wynikiem prac badawczych prowadzonych w IMP w latach 2012-2017 nad technologią magnetronową, dedykowaną powłokom azotkowym i węglazotkowym chromu i tytanu, było opracowanie i wykonanie prototypowej konstrukcji długiego magnetronu cylindrycznego [10, 11]. Zebrane doświadczenia badawcze związane z zapłonem i stabilizacją magnetronowego wyładowania jarzeniowego pozwoliły na opracowanie i wykonanie nowej konstrukcji magnetronu cylindrycznego przeznaczonego do pracy w standardowych komorach próżniowych. Rozwiązanie to objęto procedurą ochrony patentowej [12-16]. Prowadzone w latach 2016-2017 prace badawczo-konstrukcyjne umożliwiły budowę prototypowej konstrukcji poziomej komory próżniowej stosowanej w technologii syntezy powłok PVD na powierzchni wewnętrzne długich do 1600 przewodów rurowych o masie do 60 kg i średnicy do 150 mm. Wraz z komorą zaprojektowano i zbudowano magnetron cylindryczny o długości 2000 mm. Praca ta stanowi kontynuację badań rozpoczętych w latach 90. XX w. przez Miernika [17]. Badania te prowadzono w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu.

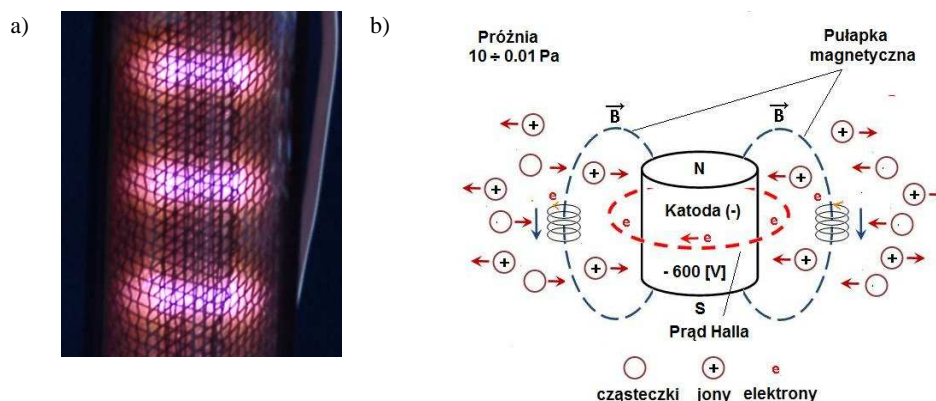
2. Technologia magnetronowa – magnetron cylindryczny

Magnetron cylindryczny z wewnętrznym układem dynamicznego pola magnetycznego jest źródłem plazmy stanowiącej środowisko technologiczne syntezy materiałów powłokowych, w tym faz wysokotopliwych węglkowych i zatokowych. Cechę znaną tego typu źródła stanowi to, że plama jarzeniowa jest generowana jednocześnie w wielu zamkniętych obszarach powierzchni katody. Plama przybiera kształt licznych pierścieni, okalających katodę (rys. 1a).

Cechą praktyczną magnetronów cylindrycznych z toroidalną geometrią plazmy jest zastosowanie wielu sekcji magnetycznych wytwarzających serię pierścieni plazmowych, w których zachodzą podstawowe procesy fizykochemiczne wytwarzania środowiska plazmy reaktywnej (rys. 1b). Długość robocza magnetronu jest limitowana liczbą sekcji magnetycznych i sprawnością zastosowanego systemu chłodzenia źródła plazmy. W prowadzonych badaniach wartość indukcji

magnetycznej była zmienna w zakresie 25-250 mT i zależała od konstrukcji systemu magnetycznego oraz cech fizycznych i geometrycznych katody magnetronowej.

Kontrola zmian intensywności emisyjnego widma spektralnego plazmy w zdefiniowanych zakresach długości falowych wzbudzeń i jonizacji atomów: Ar, Ti, Cr, molekuł: N₂, H₂, C₂H₂, w powiązaniu z danymi eksperymentalnymi i literaturowymi odnośnie do typu materiału wytwarzanej powłoki (budowa fazowa, morfologiczna) oraz właściwości fizycznych, chemicznych i mechanicznych pozwalają w precyzyjny sposób sterować syntezą nowych materiałów powłokowych PVD.



Rys. 1. Plazma na powierzchni magnetronu rurowego o średnicy 12 mm: torusy plazmowe na powierzchni katody magnetronowej w otoczeniu anody siatkowej ferrytycznej (a), model pojedynczego torusa plazmowego, schemat zjawisk fizycznych (b)

Fig. 1. Plasma on a tubular magnetron surface of the diameter of 12 mm: plasma torus on the surface of a magnetron cathode in the vicinity of a volcanic anode (a), model of a single plasma torus, physical phenomena scheme (b)

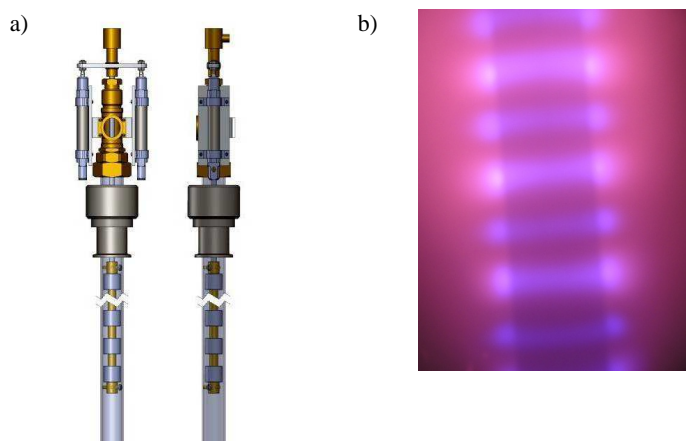
3. Zakres prac badawczych nad modyfikacją lufy moździerza

Celem pracy były badania syntezy powłok metodą PVD wewnątrz tulei rur ze stali ferrytycznych z zastosowaniem magnetronu cylindrycznego. Zakres pracy obejmował:

1. Badania eksploatacyjne magnetronów rurowych z katodą chromową i tytanową.
2. Prace projektowe i konstrukcyjne związane z konstrukcją układów badawczych, w tym nowej, poziomej komory próżniowej z wysuwym trzonem.
3. Badania technologiczne nad syntezą powłok typu TiN, TiCN, CrN.

4. Badania technologiczne nad syntezą powłok PVD w lufie HSW.
5. Badania materiałowe powłok otrzymanych na materiałach dostarczonych przez HSW.

Wynikiem prac badawczych nad technologią magnetronową było opracowanie i wykonanie prototypowej konstrukcji długiego magnetronu cylindrycznego, dostosowanego do gabarytów lufy moździerza z uwzględnieniem założonych parametrów technologicznych (próżni, temperatury, chłodzenia, parametrów prądowo-napięciowych, pomiaru parametrów oraz ich sterowania itp.). Konstrukcja umożliwiła przeprowadzenie badań podstawowych nad technologią syntezy materiałów powłokowych na wewnętrznych powierzchniach rur o średnicach od > 50 mm. Schemat koncepcji konstrukcji badanego magnetronu i obraz plazmy na powierzchni magnetronu przedstawiono na rys. 2. Parametry eksploatacyjne magnetronów cylindrycznych zestawiono w tab. 1. Proces nanoszenia powłok na wewnętrzne powierzchnie stalowych rur o średnicach do 100 mm i długości od 200 do 1500 mm prowadzono w komorach do procesów MS PVD. Stanowiska badawcze są wyposażone w układy pompowe składające się z pompy rotacyjnej i dyfuzyjnej (rys. 3.). Zastosowane układy pompowe gwarantują uzyskanie ciśnienia roboczego do 4×10^{-4} Pa. Parametry eksploatacyjne stanowisk technologicznych zestawiono w tab. 2. Na rysunku 4. pokazano stanowisko CMS PVD-IMP 2000 do osadzania warstw z różnych materiałów na wewnętrznych powierzchniach cylindrycznych z widoczną lufą moździerza przeznaczoną do obróbki oraz schemat ogólny stanowiska.



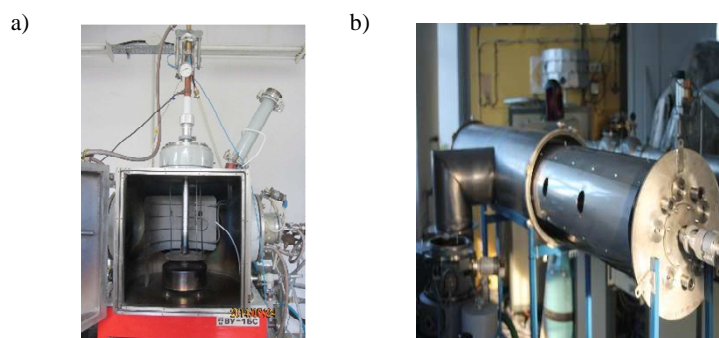
Rys. 2. Cylindryczne magnetronowe źródło plazmy – technologia MS PVD (a), wygląd torusów plazmy na powierzchni katody cylindrycznej (b)

Fig. 2. Cylindrical magnetite plasma source – MS PVD technology (a), plasma torus on the surface of a cylindrical cathode (b)

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne układów badawczych technologii PVD

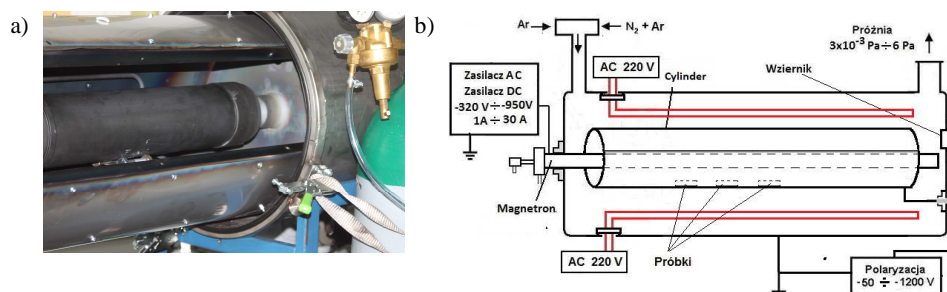
Table 1. Basic technical parameters of PVD technology research systems

Parametr, cecha	Mag 33/800 IMP	Mag 33/2000 IMP
Wymiary magnetronu	ϕ 33 x 800 mm	ϕ 33 x 1200 mm
Grubość targetu	3 mm	2 mm
Strefa rozpylania	500 mm	1700 mm
Materiał targetu	Cu; Ti; Cr; 1H18	Cu; Ti; 1H18, Al
Ciśnienie gazu roboczego	3×10^{-4} Pa	3×10^{-3} Pa
Źródło toroidalnego pola magnetycznego, natężenie pola magnetycznego	Magnes neodymowy B-180 mT, dynamiczne	Magnes neodymowy B-100 mT, dynamiczne
Prąd	1-20 A	1-30 A
Napięcie	250-800 V	250-800 V
Moc	do 10 kW	do 20 kW



Rys. 3. Magnetron cylindryczny pionowy ϕ 33 x 100 mm w komorze kubicznej 550 x 550 x 450 (a), magnetron cylindryczny poziomy ϕ 33 x 1200 mm w komorze cylindrycznej ϕ 400 x 2000 (b)

Fig. 3. Vertical cylindrical magnetron ϕ 33 x 100 mm in a cubic chamber 550 x 550 x 450 (a), horizontal cylindrical magnetron ϕ 33 x 1200 mm in a cylindrical chamber 400 x 2000 (b)



Rys. 4. Stanowisko CMS PVD-IMP 2000 do osadzania warstw z różnych materiałów na wewnętrznych powierzchniach cylindrycznych z lufą mózdzierza przeznaczoną do obróbki PA PVD (a), schemat stanowiska (b)

Fig. 4. CMS PVD-IMP 2000 stand for depositing layers of various materials on internal cylindrical surfaces with a mortar barrel intended for PA PVD coatings (a), position diagram (b)

Tabela 2. Parametry technologiczno-konstrukcyjne komór badawczych

Table 2. Technological and structural parameters of test chambers

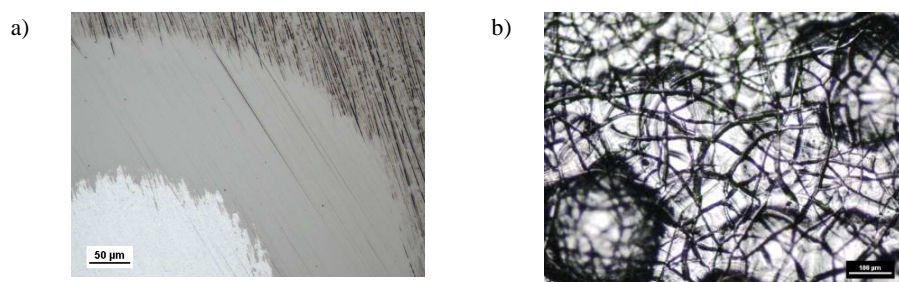
Stanowiska badawcze Parametr, cecha	WU-1B	CMS PVD-IMP 2000
Wymiary komory	Kubiczna – 550 x 550 x 450 mm	Cylindryczna – ϕ 400 x 2000 mm
Układ pompowy	Pompa rotacyjna; Pompa dyfuzyjna – wydajność 1200 l/s	Pompa rotacyjna; Pompa dyfuzyjna – wydajność 2000 l/s
Ciśnienie	4×10^{-4} Pa	4×10^{-3} Pa
Czas osiągnięcia ciśnienia roboczego	20 min	40 min
Układ grzewczy	1200 W	6000 W
Źródła plazmy	Magnetron ϕ 33 x 800 mm 2 x źródła ARC ϕ 65 mm Źródło jonów typu Kaufmanna	Magnetron ϕ 33 x 2000 mm
Materiał katody magnetronu Materiał katody źródła ARC	Ti; Cr; Nb; Cu; Al; 1H18 Ti; Cr; V; TiAl; FeAl; Al	Ti; Cr; Nb; Cu; Al; 1H18
Zasilacz pol. podłoża (bias)	DC 1200 AC 100 kHz do 800 V	AC 100 kHz do 800 V
Zasilacz magnetronowy	AC 100 kHz, impulsowy; AC regulowany 1-100 kHz	AC 100 kHz, impulsowy; AC regulowany 1-100 kHz

4. Badania wstępne technologiczne nanoszenia powłok

W zakresie badań wstępnych przeprowadzono procesy osadzania powłok azotku chromu i azotku tytanu. Na rysunku 5a pokazano strukturę powłoki CrN uzyskaną w procesie magnetronowym na stanowisku z komorą kubiczną, a na rys. 5b – wygląd powierzchni targetu z powłoką chromu wytworzoną w procesie galwanicznym, po procesie osadzania. Proces nanoszenia powłoki CrN realizowano w atmosferze azotu przy stałym ciśnieniu 4 Pa. Jak widać, powłoka CrN ujawniona przy użyciu kulotestera, kulą o średnicy 30 mm, jest ciągła i jednorodna. Na granicy powłoki z podłożem nie ujawniono nieciągłości, wykruszeń, co świadczy o bardzo dobrej przyczepności powłoki do podłoża. Grubość powłoki ujawnionej na zgładzie wynosi 3 μ m, twardość mierzona na powierzchni płaskiej próbki wynosi 1800 HV0.02, co odpowiada twardości wytworzonej powłoki.

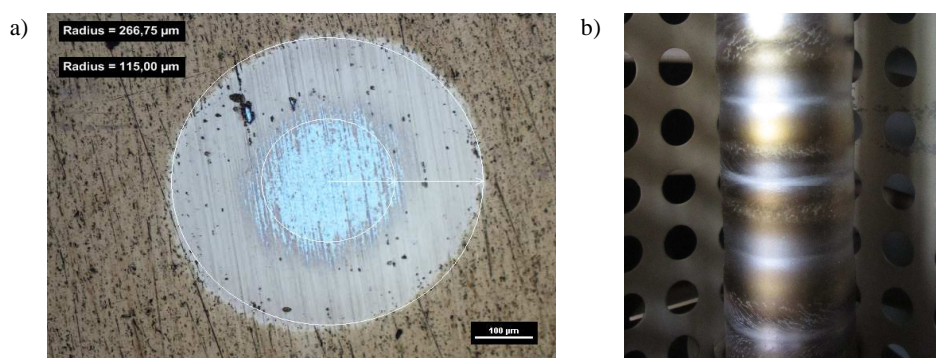
Na rysunku 6a przedstawiono strukturę powłoki TiN uzyskaną w procesie magnetronowym na stanowisku z komorą kubiczną, a na rys. 6b – wygląd targetu tytanowego po procesie osadzania. Proces nanoszenia powłoki TiN realizowano w atmosferze Ar + N₂ przy stałym ciśnieniu 4 Pa. Powłoka TiN ujawniona przy użyciu kulotestera, kulą o średnicy 30 mm, jest ciągła, ale w odróżnieniu od powłoki azotku chromu występują w niej niejednorodności. Na granicy powłoki z podłożem nie ujawniono nieciągłości, wykruszeń, co świadczy o bardzo dobrej przyczepności powłoki do podłoża. Grubość powłoki ujawnionej na zgładzie

wynosi $2\ \mu\text{m}$, a twardość mierzona na powierzchni płaskiej próbki – ok. 1800 HV0.02, co odpowiada twardości wytworzonej powłoki.



Rys. 5. Struktura powłoki CrN na powierzchni zglądu sferycznego, grubość powłoki $3\ \mu\text{m}$, czas procesu nanoszenia 20 min (a), wygląd powierzchni targetu chromowego nanoszenia powłoki (b)

Fig. 5. The structure of CrN coating on the spherical metallographic surface area, the coating thickness of $3\ \mu\text{m}$, time of coating 20 min (a), appearance of the coating application chromium surface (b)



Rys. 6. Struktura powłoki TiN na powierzchni zglądu sferycznego, grubość powłoki $2\ \mu\text{m}$, czas nanoszenia powłoki 20 min (a), wygląd tytanowego targetu magnetronu po procesie nanoszenia powłoki w atmosferze $\text{N}_2 + \text{Ar}$ (b)

Fig. 6. The structure of TiN coating on the spherical metallographic surface area, coating thickness $2\ \mu\text{m}$, coating time 20 min (a), the appearance of the titanium magnetron target after the process of coating application with the $\text{N}_2 + \text{Ar}$ atmosphere (b)

W badaniach technologicznych analizowano czynniki decydujące o jakości powłoki nanoszonej na wewnętrzne powierzchnie długich przewodów rurowych. Analizie poddano m.in. następujące parametry:

- generacji i utrzymywania stabilnego wyładowania jarzeniowego w przewodzie lufy moździerza przy założeniu, że magnetron cylindryczny jest katodą,

- pracy zasilaczy prądowych polaryzacji magnetronu i polaryzacji podłoża, na które jest nanoszona powłoka,
- ciśnienie i skład atmosfery gazowej,
- pola magnetycznego.

Na podstawie analizy opracowano wstępne założenia, wytyczne technologiczne i procedury obejmujące:

1. Przygotowanie lufy do procesu nanoszenia powłoki technologią MS PVD.
2. Przygotowanie powierzchni wewnętrznej lufy w procesie trawienia jonowego.
3. Przygotowanie powierzchni targetu magnetronu w procesie trawienia jonowego.
4. Konfigurację układu w cyklu syntezy powłoki.
5. Nanoszenie powłoki.
6. Zakończenie procesu.

Przygotowanie lufy do procesu technologicznego obejmuje kontrolę wzrokową powierzchni wewnętrznej lufy. Powierzchnia wewnętrzna powinna być metaliczna błyszcząca. Przed załadunkiem lufy do urządzenia wewnętrzne powierzchnie należy umyć, np. alkoholem. Proces nanoszenia warstwy poprzedza etap trawienia jonowego wewnętrznej powierzchni lufy w celu jej oczyszczenia i aktywacji. Trawienie jonowe prowadzi się w układzie diodowym, w którym powierzchnia trawiona jest katodą, a elektroda dodatkowa wprowadzona w przestrzeń rury – anodą. Odpowiednia konfiguracja pola elektrycznego i magnetycznego umożliwia stworzenie warunków, w których wyładowanie jarzeniowe występuje wewnątrz lufy, co intensyfikuje etap trawienia i aktywacji wewnętrznej powierzchni lufy. Przygotowanie powierzchni magnetronu odbywa się w komorze próżniowej lub procesowej. Celem procesu trawienia powierzchni magnetronu jest usunięcie zanieczyszczeń i nich produktów syntezy powstałych we wcześniejszych procesach. Etap nanoszenia powłoki jest prowadzony zgodnie z procedurą technologii MS PVD. Rodzaj materiału powłokowego determinuje skład chemiczny magnetronu i rodzaj gazów reaktywnych. Szacowana grubość powłok typu MeN, MeMeN, MeCN, MeMeCN powinna wynosić 1-4 μm . Po zakończeniu nanoszenia powłoki i ochłodzeniu wsadu do temperatury 50°C można zapowietrzyć komorę, a po wyjęciu wsadu i magnetronu należy odpompować komorę procesową. Wyjęty magnetron należy umieścić w komorze przygotowawczej o ciśnieniu 3×10^{-4} Pa.

5. Wnioski

Badania technologiczne umożliwiły weryfikację właściwości i cech użytkowych wytwarzanych powłok na wewnętrznej powierzchni lufy. Zastosowanie magnetronu cylindrycznego z przemieszczającą się katodą umożliwia wytwarzanie powłok na powierzchniach wewnętrznych przewodów ze stali ferrytycznej. Uzyskanie równomierności reaktywnego rozpylania katody wymaga optymalizacji

geometrii pola magnetycznego. Udoskonalenie konstrukcji magnetronu rurowego wymaga dalszych badań technologicznych związanych z wytwarzaniem materiałów powłokowych, np. Cr, CrN, CrC, Ti, TiN, na powierzchniach wewnętrznych przewodów ze stali ferrytycznej nagrzewanej radiacyjnie do temperatury ok. 350°C, docelowo do grubości powłoki 3-15 µm.

Wynikiem badań są ustalone parametry techniczne konstrukcji demonstratora technologicznego, umożliwiającego realizację pilotowych procesów produkcyjnych.

Literatura

- [1] SERDP – www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Weapons-Systems-and-Platforms/Surface-Engineering-and-Structural-Materials – marzec 2018.
- [2] Miller M., Campo F.: Chromium Elimination in Medium Caliber Gun Barrels, U.S. Army Benét Lab, SERDP Project WP-1426 JANUARY, 2010, 1-37.
- [3] Roland A.L.: Investigation of Chemically Vapor Deposited Tantalum for Medium Caliber Gun Barrel Protection, SERDP Project WP-1425, New Jersey Institute of Technology, 2008.
- [4] Campo F., Miller M., Walden J.: Chromium Elimination and Cannon Life Extension, SERDP Project WP-201111, Benet Laboratories US Army RDECOM ARDEC, 2012, pp. 1-25.
- [5] Rusch L.F., Vasilakis D.J., Ostrom G.: Tri-Service Green Gun Barrel, SERDP Project WP-1074 Final Report, 2003, pp. 1-39.
- [6] Michael J.A.: Use of Electroplated Chromium in Gun Barrels, US Army RDECOM-ARDEC-Benet Laboratories DoD Metal Finishing Workshop, Washington DC, 2006, pp. 1-41.
- [7] Łataś Z., Michalski J., Tacikowski J., Betiuk M.: Azotowanie regulowane luf broni strzeleckiej, Inżynieria Powierzchni, Warszawa 2013.
- [8] Łataś Z., Betiuk M., Tacikowski J., Michalski J.: Nowa metoda oceny warstw i powłok luf strzeleckich, Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, 6 (2015) 85-100.
- [9] Łataś Z., Michalski J., Tacikowski J., Betiuk M.: Wpływ regulowanego azotowania gazowego na trwałość eksploatacyjną przewodu luf broni strzeleckiej, Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa, 4 (2013) 53-65.
- [10] Betiuk M., Łataś Z.: Nowy system generacji plazmy na powierzchniach cylindrycznych, Problemy Techniki Uzbrojenia, 136 (2015) 41-58.
- [11] Betiuk M.: Cylindrical magnetron with dynamic magnetic field, Solid State Phenomena, 237 (2015) 61-67.
- [12] Betiuk M., Łataś Z., Michalski J.: Patent RP Nr prawa wyłącznego 212418, Sposób plazmowego wytwarzania powłok poprawiających właściwości mechaniczne powierzchni metalowych.
- [13] Betiuk M., Łataś Z., Michalski J.: Zgłoszenie patentowe P-405735, Sposób próżniowego napyłania powłok metodą magnetronową.

- [14] Betiuk M., Łataś Z., Michalski J.: Zgłoszenie patentowe P-417215, Rurowy magnetron do napyłania wielowarstwowych lub kompozytowych powłok, Sposób próżniowego napyłania powłok wielowarstwowych lub kompozytowych metodą.
- [15] Betiuk M., Łataś Z., Michalski J.: Zgłoszenie patentowe P-423550, Anoda, zwłaszcza do procesów jarzeniowej obróbki wyrobów metalowych.
- [16] Betiuk M., Łataś Z., Michalski J.: Zgłoszenie patentowe P-423211, Anoda do jarzeniowego azotowania wewnętrznych powierzchni tulei, zwłaszcza luf.
- [17] Miernik K.: Działanie i budowa magnetycznych urządzeń rozpylających, ITE, Radom 1997.

MODIFICATION OF MORTAR BARREL INTERIOR SURFACE BY MAGNETRON METHOD

S u m m a r y

The publication presents the results of CMS PVD (Cylindrical Magnetron Sputtering Physical Vapor Deposition) research with the use of a cylindrical – linear magnetron inside barrel's conductor. The initiation of research with participation of Huta Stalowa Wola is an attempt to solve the problem of increasing service life of chemical and pressure-loaded components of chemical installations and utilities, containing cylindrical surfaces in their design. The analyzed technology can be an alternative to highly ecologically and healthily harmful, galvanic techniques for the production of technical chromium coatings. Modified surfaces are internal walls of ferritic steel pipes with diameters from 45 to 100 mm, including a barrel of a 98 mm mortar, made available by Huta Stalowa Wola. The paper presents an outline of the technological procedure for the preparation of TiN, CrN, TiCN coatings on 38HN3MFA barrel steel.

Keywords: cylindrical magnetron, plasma, barrel, shell

DOI: 10.7862/ rm.2018.34

Otrzymano/received: 24.04.2018

Zaakceptowano/accepted: 12.10.2018

Wojciech BŁAŻEJEWSKI¹

Adrianna FILIPIAK²

Michał BARCIKOWSKI²

Karolina ŁAGODA²

Paweł STABLA²

Marek LUBECKI²

Michał STOSIAK²

Cezary ŚLIWIŃSKI³

Zbigniew KAMYK³

DESIGN AND IMPLEMENTING POSSIBILITIES OF COMPOSITE PONTOON BRIDGE

This work focuses on the analysis of actions conducted by the Military Institute of Engineer Technology and Wrocław University of Science and Technology regarding the production and testing (on proving ground) of composite pontoon bridge. The starting point for this work was the experience gained from the project named „Light, resistant to environmental hazards, aluminum-composite hybrid pontoon used in constructing floating bridges of MLC 70/110 class”. Each one of the three V-shaped outriggers was designed using different technology. The middle part was constructed mostly of aluminum by company PREMO, but the smaller outrigger and all parts of the bow were made at Wrocław University of Science and Technology from composite material reinforced with glass, aramid and carbon fibers. The inside was filled with multiple types of foam. During successful tests on proving grounds, conducted by Military Institute of Engineer Technology, elements were connected with PP-64 pontoons. It was proven that Wrocław scientific society is capable of designing and manufacturing of a prototype pontoon bridge park.

Keywords: pontoon bridge, composite material, prototype

1. Introduction

Floating bridges are used for temporary transverses (including military transverses). The oldest object of this kind in Poland was a pontoon bridge built specifically for the march of Polish-Lithuanian army during the Battle of Grunwald preparations. This bridge was constructed of 150 boats and had the total length of approx. 500 m. Built on the edge of Kozieniecka Forest, it was rafted to Czerwińsk

¹ Corresponding author/autor do korespondencji: Wojciech Błażejowski, Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 25 M. Smoluchowskiego Ave., 50-370 Wrocław, Poland, tel.: (71) 3202765, e-mail: wojciech.blazejewski@pwr.edu.pl

² Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering

³ Military Institute of Engineer Technology, Wrocław

and set up in half a day. It allowed for 3 day long march. Floating bridges were built during many following military expeditions in years: 1414 in Zakroczym, 1419 and 1422 in Czerwińsk [1]. These bridges had essential attributes that made them more resistant. These bridges were mobile, easy to fix and disassembly in case of spates. Moreover, these objects did not need construction of expensive foundations. Due to these reasons they were built for years in big trade centers. The most popular structures include four bridges built by the Swedish in 1756 in Warsaw [2], the floating bridge built by the Imperial Russian Army in 1815 in Plock (it existed in the original form until 1895) and 637,48 meter long bridge in Wloclawek (built in 1865) constructed for civilians and used until 1914 (Fig. 1).



Fig. 1. Bascule pontoon bridge on the Vistula in Wloclawek (photo made before 1914) [3]

The largest modern bridges were built in the USA and Japan, and newest designs include 845 meter long Bergsoysund Floating Bridge (Kristiansund) from 1992 and 1246 meter long Nordhordland Floating Bridge (Salhus) from 1994, both built in Norway [4, 5].

2. New bridges and materials

Composite bridges have been built for about 30 years. The first objects of this type include the bridge made from polymer composites in China in 1982 (Miyun), the foot-bridge in Scotland from 1992 (Aberfeldy) and the Bonds Mill Lock Bridge in England built in 1994. The usage of fiber reinforced materials is becoming useful in a wide range of applications, as proven by [6-8]. Along with civilian structures, there are numerous bridges built fully from composite materials for military use (mostly for American and Canadian armies) [9-12]. Fundamental advantages of fiber reinforced composite materials in comparison to traditional materials include superior specific resistance, much higher fatigue limit,

high chemical resistance (to corrosion), resistance to environmental hazards (including UV rays), programmable structure and many more. These attributes are decisive when considering suitability of composite materials in bridge design.

In Poland first bridges made from composite materials are also being built; these include the foot-bridge over the sewage plant in Lodz from 2002, the foot-bridge over the S11 express road in Gadki from 2008 and the bridge in Błażowa (Rzeszów) from 2015. The latest project, initiated by the Military Institute of Engineer Technology and Wrocław University of Science and Technology, aims at developing a technology and a manufacturing concept of a light pontoon, used for building temporary bridges. This project has already been implemented and tested, and so far its hypotheses have been proven correct.

3. Composite pontoon bridge

Mobile bridges must comply with multiple criteria that adapt them to requirements set for both bridges and cargo that can be transported using multiple means. The expected attributes include low weight, high resistance, simplicity of assembly and compatibility with popular, but legal systems. Due to these reasons, the modern pontoon bridge is designed to maximize the usage of composite materials while maintaining classic structure compliant with the Polish PP-64 type pontoon, as a part of the innovation project no. 03003906, named „Light, resistant to environmental hazards, aluminum-composite hybrid pontoon used in constructing floating bridges of MLC 70/110 class”. This first, light segment of the bridge consists of 3 parts forming the so-called „V-shape”. The prototype block was made using 3 parts (Fig. 2), and each of them was manufactured using different technologies to learn and study these innovative solutions. Geometry of the object enables folding and unfolding two wings connected to the central part using a hinge. The folded formation is used for transportation by a trailer attached to a tractor unit (Fig. 3).

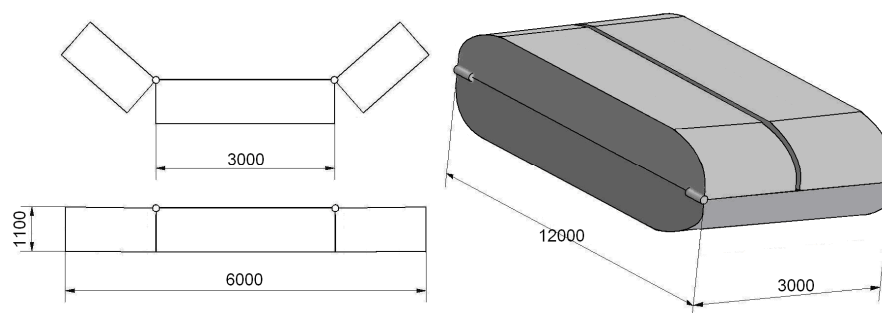


Fig. 2. Concept of three-part „V-shaped” pontoon

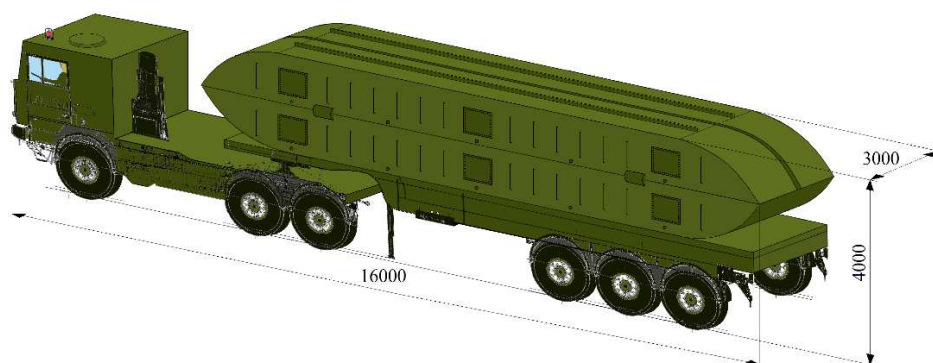


Fig. 3. Concept of pontoon transportation

Hulls of the central part and one of the wings are manufactured using welded aluminum sheets. Inner space is filled with an unsinkable material with closed pores (e.g. Styrofoam). Bow and stern of these parts were made from glass fiber reinforced composite materials with epoxy resin matrix. pontoons are connected using pins, as defined by PP-64 „Ribbon” system. The third part was designed to be produced fully from composite materials (Fig. 4). It consists of glass, aramid and carbon fibers reinforced composite, filled with construction foam. Such structure assures proper stiffness and resistance to damage. Keel is made of sandwich material and is removable, as expected of this element because of heavy wear.



Fig. 4. Two pontoons, PP-64 at the bottom and the prototype made from composites at the top

The structure of a composite pontoon is a spatial structure of sandwich laminate and various types of ribbing as well as foam fillings. The durability of this element has been selected to the nature of the loads occurring during operation in the MLC 70/110 class. The top layer was made of aluminum ribbed plate to achieve adequate grip of vehicle wheels and to ensure resistance to abrasion. This surface is an integral part of the pontoon, therefore laboratory tests of its samples (Fig. 5) were carried out on a fragment of its section [13].

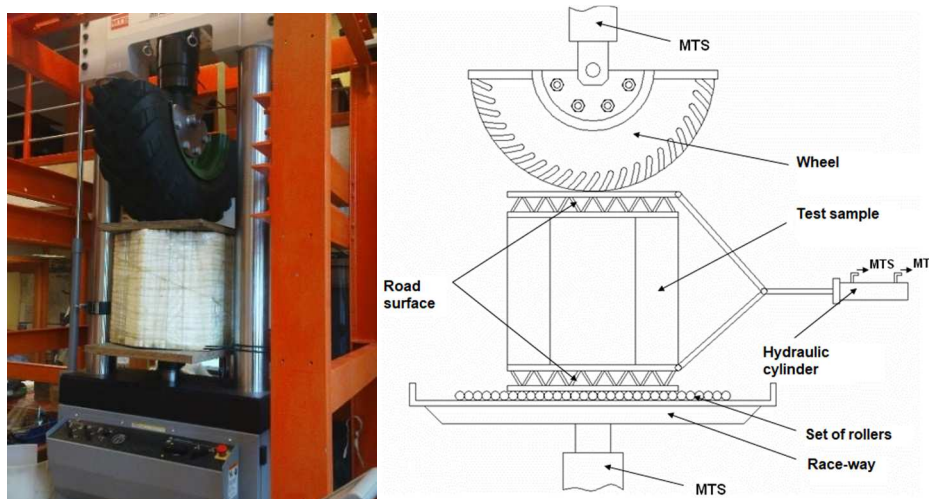


Fig. 5. The original station for testing the elements of a block pontoon

Dry tests were also carried out. Dry strength tests consisted in loading the middle float, which was suspended on external floats. The outer ones were based on sand. Measurements of displacements of control points were carried out using two structural light scanners, with an accuracy of approx. 0.1 mm.

4. Technical parameters of the pontoon

Requirements for pontoon bridges are complex. In terms of operational loads, it is necessary to adapt the design to both military (NATO [14]) and civil (Polish Standard [15]) requirements. In terms of military loads, the pontoon should meet the requirements of the recommended MLC 70/110 class. Its name indicates the weight of a vehicle moving on the bridge: 70 t – e.g. a tracked vehicle, 110 t – a wheeled vehicle (semi-trailer tractor). The nature of the interactions of both types of vehicles is different. Considering the global load of the object, it can be concluded that tracked vehicles are heavy but have a large pressure area. In the case of wheeled vehicles, the suitability of the site is the local resilience of the surface. The MLC 70/110 class determines the axle load of 309.7 kN. Platform elements are loaded with a force of 90.7 kN per the area of 0.4 x 0.5 m. In turn, the load on a tracked vehicle is generated by a force of 317.5 kN spread over the area of 4.57 x 0.79 m [6]. A prototype pontoon was designed and made for such loads based on the requirements of the ordering party (DPZ MON) and the defense standard [16].

The durability of the pontoon, according to the standard assumptions, should be 30 years. Over this period, there may be 5,000 MLC 70/110 vehicles passing. The maximum number of individual tractor and trailer wheels in each of them is 10. For this reason, the pontoon surface should withstand 25,000. fatigue load

cycles, so its strength can be considered low-cycle. The durability of the pontoon bridge will also be determined by the simplicity and the method of its assembly. A positive feature of the composite construction in comparison to the standard PP-64 segment is the maintenance of its buoyancy in the case of even significant unsealing of the skin (piercing or breaking the fragment.) An additional benefit is the possibility of repairing damage using handheld tools.

5. Polish prototype composite pontoon

The presented composite pontoon was made with collaboration of the Military Institute of Engineering Technology (WITI) and Wrocław University of Technology. During the tests of the finished prototype, in 2012 the pontoon segments were launched and connected to the pontoons of the Polish military bridge PP-64 (Fig. 6). The military belt of various masses, including Star 266, the prototype demounting vehicle and the prototype Wheel Transport Engineer Reconnaissance weighing over 25 tons, passed through the ribbon (Fig. 7). The bridge successfully withstood the passage of the abovementioned vehicles, meeting the operational requirements.



Fig. 6. Segment transport and construction of the crossing in combination with PP-64 segments



Fig. 7. Water trials

Tests of operational loads were also performed by measuring the displacement of the row of points for the central segment located on the edge and on the axis of the road (Fig. 8 and Fig. 9). For measuring the displacements, during bridge loading, a structural light scanner was used. The test object was loaded with vehicles of various weights: Star 266 (7.5 tons), Ryś (25 tons). Table 1 shows the value of averaged vertical displacement and the increase in buoyancy depending on the loading vehicle. Please observe that the buoyancy increase is lower than the weight of the vehicle as some of that weight is taken also by neighboring, linked pontoons in the bridge.

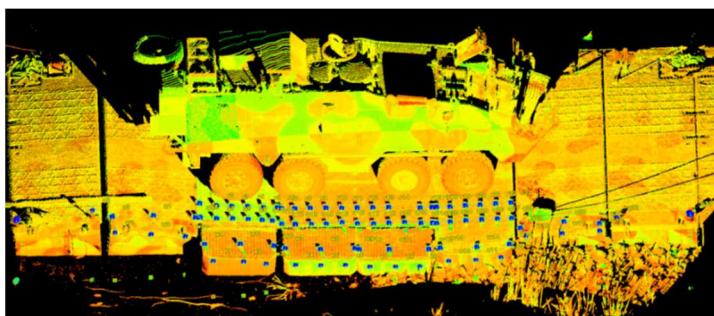


Fig. 8. Vertical displacements of the central segment of the bridge

Table 1. Results of tests of operational loads for various vehicles

Vehicle	Averaged vertical displacement, m	Increase of buoyancy, Mg
Star 266 (7.5 tons)	0.16	6.29
Ryś (25 tons)	0.48	18.57

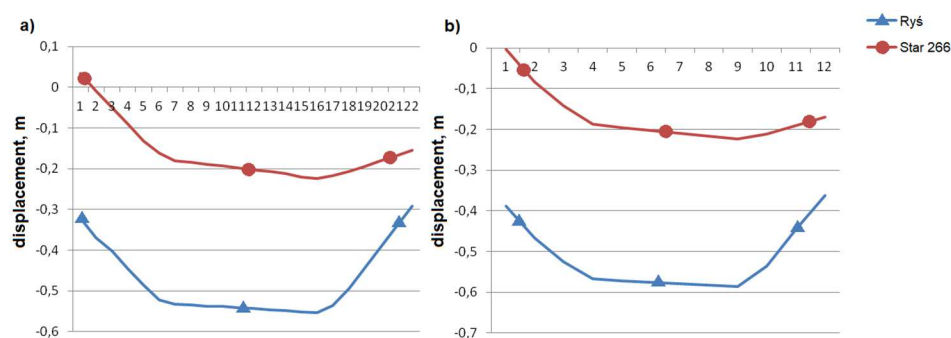


Fig. 9. Displacements of marker points: a) the nearest axis of the road, b) on the edge of the road

6. Summary

During the cross-border inspections, potential damage was monitored using fiber optic sensors. The bridge successfully managed to pass the abovementioned tests. No damage to the spans or exceeding the buoyancy reserve was found. The tests of displacement of bridge elements under the load of the abovementioned vehicles with the use of a spatial scanner were also carried out. As a part of the work on the pontoon, many other tests have been carried out, e.g. measurement of strains using strain gauges during tests on suitably shaped sand heaps, numerous tests of the technology of making further elements, strength tests of internal nodes, etc. The presented research has shown that it is possible to use polymer composites in construction of military bridges and mobile composite bridge structures. The use of composites in bridges, both military and civil, gives unique advantages resulting from the specific strength of these materials compared to steel and aluminum, as well as the best corrosion resistance – resistance to atmospheric exposure during storage. Therefore, polymer composites have a bright future in bridge engineering.

The presented Polish pontoon bridge is a structure that shows unique advantages of durability and safety of use resulting mainly from the use of modern composite materials that ensure corrosion resistance, high strength and low weight while maintaining a reasonable cost of performance. The example of a new pontoon confirms the suitability of the applications of polymer composites in bridge engineering. It is also a proof of the positive impact of technical university cooperation with the Polish army's design and research unit.

References

- [1] Chwaściński B.: Mosty na Wiśle i ich budownictwo, Warszawa 1997.
- [2] Sterner W.: Mosty Warszawy, PWT, Warszawa 1960.
- [3] Kaliszewski K., Rojewski T., Winiarski A.: Ukłony z Włocławka, karty pocztowe 1898-1945, EXPOL, Włocławek 2005.

- [4] Watanabe E., Wang C.M., Utsunomiya T., Moan T.: Very Large Floating Structures: Applications, Analysis and Design. Centre for Offshore Research and Engineering National University of Singapore. CORE Report No. 2004-02.
- [5] Watanabe E., Utsunomiya T.: Analysis and design of floating bridges, *Progress Structural Eng. Mater.*, 5 (2003) 127-144.
- [6] Bank L.C.: Application of FRP composites to bridges in the USA. *Int. Colloquium on Application of FRP to Bridges*, Japan Society of Civil Engineers, S. Yamada, ed., Tokyo, Japan 2006, pp. 9-16.
- [7] Keller T.: Overview of fiber-reinforced polymers in bridge construction, *Struct. Eng. Int.*, 12 (2002) 66-70.
- [8] Zobel H., Karwowski W., Sarnowska J., Wróbel M.: Nowa generacja mostów – mosty z kompozytów polimerowych, część I – Autostrady 4/2004, s. 16-19, część II – Autostrady 5/2004, s. 54-63.
- [9] Kamyk Z., Szelka J.: Zastosowanie kompozytów w mostach wojskowych, *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, 5 (2009) 133-142.
- [10] Robinson M.J., Kosmatka J.B.: Light-weight fiber-reinforced polymer composite deck panels for extreme applications, *J. Composites Constr.*, 12 (2008) 344-354.
- [11] Robinson M.J., Kosmatka J.B.: Development of a short-span fiber-reinforced composite bridge for emergency response and military applications, *J. Bridge Eng.*, 7 (2008) 388-397.
- [12] Wight R.G., Shyu C.T., Tanovic R., Erki M.A., Heffernan P.J.: Short-span deployable GFRP tapered box beam bridge, *Proc., 4th Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. 2004, pp. 20-23.
- [13] Błażejowski W., Gąsior P.P., Kaleta J., Krzyżak A., Rybczyński R.: Wytwarzanie i badania sześciokątnych profili kompozytowych do bloków komórkowych, [In:] *Materiały polimerowe*, T. Spychaj, S. Spychaj (ed.), Szczecin 2010, pp. 117-118.
- [14] STANAG 2021, *Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles*, NATO NSA, Brussels 2006.
- [15] PN-85/S-10030, *Obiekty mostowe. Obciążenia*.
- [16] INO-54-A201A1 2007, *Parki pontonowe. Wymagania ogólne*.

MOŻLIWOŚCI PROJEKTOWE I WYKONAWCZE KOMPOZYTOWEGO MOSTU PONTONOWEGO

Streszczenie

W ramach projektu rozwojowego nr 03003906 zespoły Wojskowego Instytutu Techniki Inżynierskiej i Politechniki Wrocławskiej zaprojektowały i wykonały pierwszy w świecie, całkowicie kompozytowy ponton przeznaczony do budowy mostów pływających. Kompletny prototypowy zespół pontonowy składa się z trzech członów zespolonych w układzie „V” – szerokiego członu centralnego i dwóch dwukrotnie węższych członów bocznych. Człony boczne do transportu składają się zawiasowo na wierzch członu centralnego. Każdy z trzech członów wykonano według różnej technologii. Jeden z nich – całkowicie kompozytowy – wykonano, wykorzystując włókna szklane, węglowe, aramidowe oraz wiele różnego typu pianek. Ponton jest lekki, niezatapialny, o podwyższonej odporności na uszkodzenia mechaniczne, w tym odłamki i przestrzelenie, a także na ogień.

W ostatnim etapie prac ponton włączono w przeprawę i testowano przez najeżdżanie kolejno cięższymi pojazdami wojskowymi. Udowodniono słuszność koncepcji wykorzystania materiałów kompozytowych do budowy pontonów.

Słowa kluczowe: most pontonowy, materiał kompozytowy, prototyp

DOI: 10.7862/ rm.2018.35

Otrzymano/received: 24.04.2018

Zaakceptowano/accepted: 28.09.2018

Rafał CHATYS¹
Kacper KUTA²
Alexander PANICH³

COMPOSITE BODY CONSTRUCTION OPTIMIZATION AND TECHNOLOGICAL DESIGN OF AN ELECTRICALLY POWERED RACE CAR

The paper discusses the ways of structural optimization of composite automotive bodies, such as in race cars using electric and hybrid power sources. To reach these goals we were using CFD aerodynamic design check. Taking into account all the above mentioned issues, the integrated 3D-CAD race bolide body model prototype was designed, based on the concept of NACA profiles used in surface positive and negative curvatures generation to ensure better air overflow, stability, drag coefficient, downforce etc. The result of the integrated 3D-CAD race bolide body model is also presented as a real scale composite automotive body. This paper also discusses technological methods as well as problems and stages of real-life designing (from mould to ready composite part). The results can be useful for such consideration and on such issues as production and development of complex shape composite bodies, using readily obtainable and justified by cost-effectiveness materials and software.

Keywords: aerodynamics, automotive, composite, parts technology

1. Introduction

In modern automotive industry, designing all kinds of vehicles is not anymore imaginable without using 3D-CAD processing software [1]. The processes that are involved in modern car production in almost 70 percent consist of computer aided processes (Fig. 1).

In this paper we are taking into account processes that are more commonly associated with project race car (bolide) construction. In the race car industry one of the main aspects that regulates the prospective outlook are legislation boundaries. In our case, these are IET Formula 24 and 24+ Technical and Sporting Regulations [2]. The goal is to ensure bolide longest endurance among competitors

¹ Corresponding author/autor do korespondencji: Rafał Chatys, Kielce University of Technology, al. 1000-lecia P.P. 7, 25-345 Kielce, tel.: (41) 3424321, e-mail: chatys@tu.kielce.pl

² Kacper Kuta, Kielce University of Technology, e-mail: Kacper.Kuta@student.tu.kielce.pl

³ Alexander Panich, Riga Technical University, Latvia, e-mail: aleksandrs.panichs@gmail.com

during up to 2 hour race using 12 volt batteries [3]. To do this, we can use knowledge and practices in 3D designing, as it will be shown later in this paper.

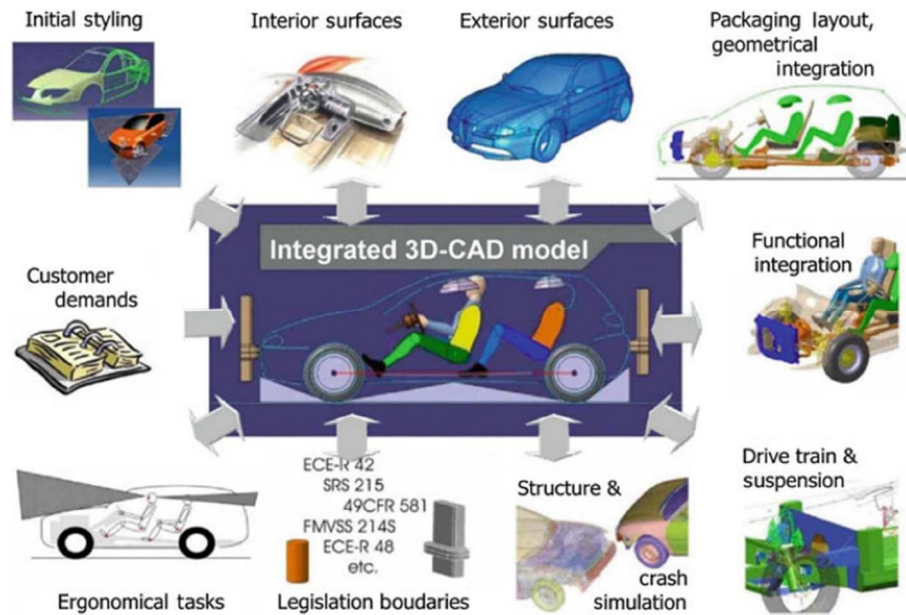


Fig. 1. The visualization of interrelation processes of 3D-CAD integration into automotive design state

Novelty of this work is determined by the alternative use of composite material cost effective combination in comparison with common face sheet construction of epoxy/carbon high cost fabrication methods, mentioned in literature [4] relevant chapter. The main goal was to create outer composite automotive sheet body, using economically efficient combination of fiberglass, carbon and hybrid and polyester resin in specific construction. For this reason the final product consists 90% of fiberglass lightweight 160 g/m^2 2 layers and 450 sandwich fiberglass mat core sandwich. Other 10% were used to improve stiffness and strength and impact resistance of the structure, like driver casing, using unidirectional carbon 280 g/m^2 , and front part nose, using impact resistant carbon/kevlar (hybrid). As the reinforcement/matrix, low cost polyester resin was chosen. The cost efficiency of material and technology used in this work is numerically proven.

2. Materials and equipment

Definite bolide required basic materials are presented as examples in Fig. 2. The selection of required materials and equipment aided to plan the budget and effectiveness of the project. Effectiveness is the main criterion to present not only

the profitability, but it also let us clearly understand which method of designing is more useful and qualitative. The problem is that there is no actual information in different sources about how to measure effectiveness of a technological method. In our case the only way to do it was the real time experience using current materials and equipment selection. In result we got relative, but reliable technological method results based on experience, which can be used as a starting point for next similar projects to avoid organizational mistakes and prospective stage obstacles, described further.



Fig. 2. Basic equipment required, set № 4 of 4: 1 – measuring equipment, 2 – resin mixing cup 50 l 8 bar, 3 – mechanical connections for bolide parts, 4 – chemical protective gloves, 5 – latex gloves, 6 – protective glasses, protective clothes and clean wipes, 7 – heating fan, 8 – rivet gun, 9 – pliers, 10 – manual screwdriver, 11 – dust particle protective mask FFP1 type and Moldex® type chemical, 12 – pneumatic grinding machine and basic attachments, 13 – pneumatic grinding machine specific round cutting abrasive for steel, 14 – pneumatic elliptical grinding machine, 15 – electric jig saw, 16 – standard blades for jig saw, 17 – abrasive blades for jig saw

To evaluate total effectiveness of the production process or overall equipment effectiveness [5] and to get numerical result we were using the total effectiveness evaluation procedure, for the coefficient of total equipment effectiveness E_{OEE} :

$$E_{OEE} = \frac{R_{numerical}}{S_{cost}} \quad (1)$$

where: $R_{numerical}$ – some numerically expressed value we got after completing production process (includes quality, time etc.),
 S_{cost} – cash investment amount into project.

Total effectiveness of the production process can be described numerically by the equation (4) in percentages, if we multiply by 100 formulae (1). The formulae (1) result give us clear evidence of the used equipment effectiveness in accordance with the invested amount of budget using current bolide building technological method. The results of the current method compared with other known one are presented further.

3. 3D-CAD design of the bolide

Utilizing CAD drawings as a modelling tool is one of the most popular engineering methods. Still, however, designers suffer from inconsistency of software and are vastly limited by possibilities of standard computing power of typical hardware. To get actual calculations CAD drawings were reverse engineered from dimensionless surfaces, surfaces recreated as overlapping, knitted and filled to obtain structure similar to what was expected to obtain in real-life production, with the main goal of keeping the outside shell as close to the design intent as possible. A similar algorithm of behavior can be used in the case of 3D scanning as shown in Fig. 3. The only difference is in preparing parasolid elements to feed Solid-Works Flow Simulation add-in. In our case we scanned first the prototype of bolide using 3D smart SCAN C2 2MP scanner to obtain a cloud of points (around 17 million points) that later was rebuild into the .stl format and subsequently into parasolid in GeoMagic Design. Modelling in GeoMagic was partially similar to what was done to the theoretical model in Solid Works, as we created volumes, from them cross sections, and we used scanned body contours as guidelines for the loft.

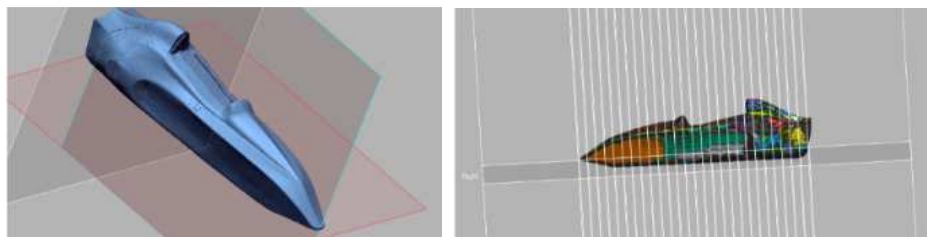


Fig. 3. States of creating solid body after 3D scanning (closed surfaces and parasolid creation)

We can install such air control surface devices (Fig. 4) to make research concerning Venturi effect [6] study etc., that appears under the body and ends at the diffuser zone, as well as to study other common factors like laminar air flow, Reynolds number [7] etc. For these kind of experiments we can use airflow simulation software. However, it requires much greater financial, time, intellectual work demands, as well as much greater computational processing powers and resources.

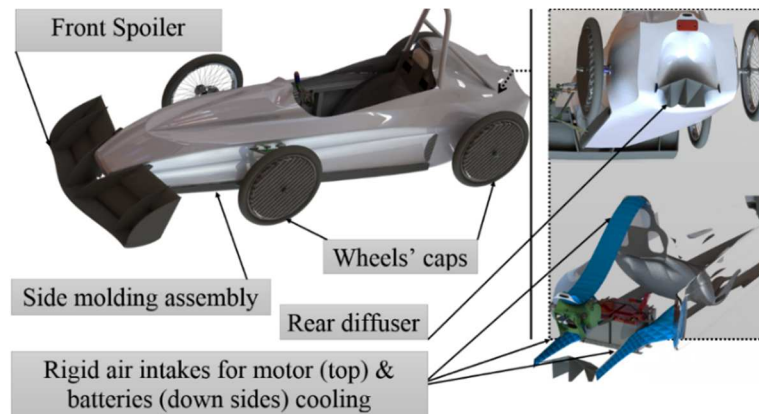


Fig. 4. Probabilistic aerodynamical set of air control surface devices in the case of further bolide modifications

4. Specific bolide composite body building technology

As a designing idea to make the overall body construction look like the Naca 4412 profile (Fig. 5) coordinate data [8] were used. The 3D designing allowed us not only design the complex shapes, but also to count the initial material needed with good accuracy. The production of specific mould consists of 5 main stages:

- gluing two sides of the mould and covering the area of the required body part shape boundaries,
- applying industrial transparent foil on two side tape covered areas,
- waxing foil covered areas for better mould to ready part further release,
- laminating composite material directly on to preliminary prepared surface,
- releasing body parts.

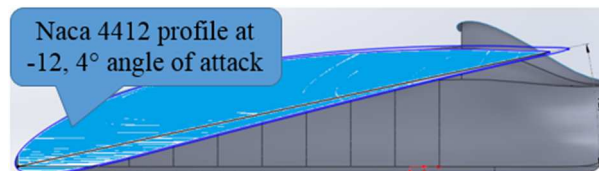


Fig. 5. 1st version body design

We used this method, in view of effectiveness, because surface perfect finishing is not required in comparison with a method like vacuum infusion. Surface can be not very smooth because the tension of industrial transparent foil and adequate tape installation prevents excessive air bubbles and delamination.

Before the lamination process, we performed the preliminary analysis of the future construction and took into account the directions of forces acting during the object (bolide) exploitation. Since the lay-up fibre orientation straightly affects mechanical properties of laminate or future construction, it is obvious to orient

most layers to the direction of load to be carried. We were using a balanced laminate fibre orientation map everywhere in bolide body construction laminates following the guide routes (fibre orientation directions) by the scheme of 0° , $+45^\circ$, -45° , and 90° degrees directions, as mentioned earlier a quasi-isotropic laminate [9].

We used custom designed fasteners sets as the method of composite body parts connection in a specific case (Fig. 6), using glue connection, rivets, custom duraluminium. Each set of fasteners accomplished their own task during exploitation. For example the rubber inside coating clamps would ensure soft and good grip connection with stainless frame, as well as provide absorption of vibrations and momentum shocks, during the ride on rough road surfaces. Tangent mounted clamps were providing tangential position of surfaces at the point of bolide body parts edge connection areas. Also we prepared a carbon frame to add additional stiffness to the middle bolide body part, as well as its 50 mm elongation around perimeter, which was providing connection and easier installing with front and rear parts. We used special vinyl ester based bonding paste to provide best connection between the carbon polyester frame and polyester body laminates, accordingly to this product technical specification and abilities [10].

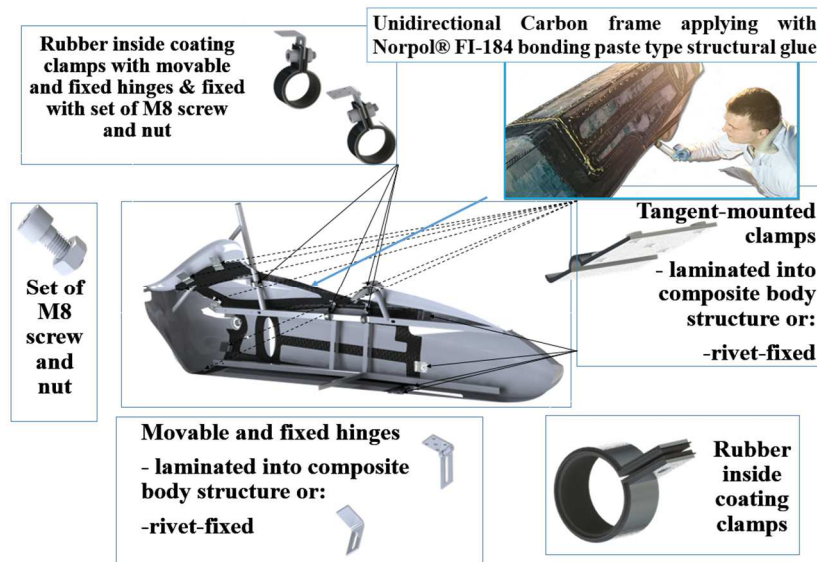


Fig. 6. Bolide body parts custom connection using sets of purpose-oriented fasteners

5. Research methodology and results analysis

Taking into account methodologies used in bolide body construction production we can mention the technology of mould making using 3D to 2D as well as the composite fabric fibre orientation method and the method of composite

body parts connection. Values of aerodynamical drag ratio for bolide are obtained using finite volumes method calculation. The computational fluid dynamics module of SolidWorks 2017 software, called Fluid Simulation, was used. Surfaces were knitted and filled to obtain a structure similar to what was expected in further production, and finally solid bodies were formed. On this stage real thickness of bolide shell was ignored and the body was assumed as rigid one when subjected to incoming airflow with speed below 20 m/s. Only then bodies were meshed (Fig. 7). Considering crudeness of tests approximate of 283 226 cells total and 64 360 fluid cells containing solids were used, approximation (up to 1 mm²) of frontal area found as 316746 mm². With ambient pressure at 101325 Pa, temperature 293.2 K and incoming, along main axis of bolide, airflow of 20 m/s calculations were held.

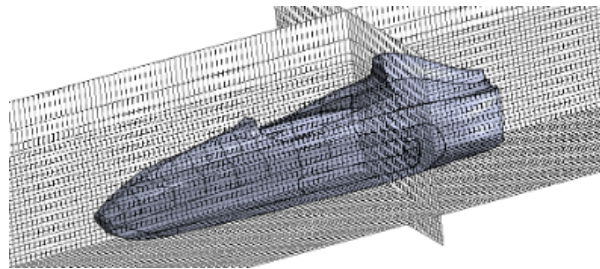


Fig. 7. Global mesh as seen in SolidWorks Flow Simulation with 280k fluid cells

Streamlines and cut plots are used to determine the shape of airflow around bolides body. Understanding of fluid behavior is crucial to determine whether simplified calculated methods are sufficient to predict real force acting on surfaces.

To integrate the aerodynamical coefficient of resistance (drag coefficient) into the flow simulation analysis and to get drag equation goal we were using the drag equation procedure, for the coefficient of drag C_d :

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2)$$

where: F_d – drag force constituent in the direction of the flow velocity,
 ρ – density of the ambient environment,
 V – velocity of flow in relation to the object,
 A – cross reference area.

The drag coefficient is obtained as the so-called equation goal where drag equation procedure is written in.

Speed isolines on cut plots along the main bolide axis are used to visualise fluid flow, especially around parts suspected for being possible obstacles for

smooth transition. The visualisation above, shown in Fig. 8 and Fig. 9, allowed to show that such a problem exists with windshield, due to its shape acting effectively as an aerodynamic break.

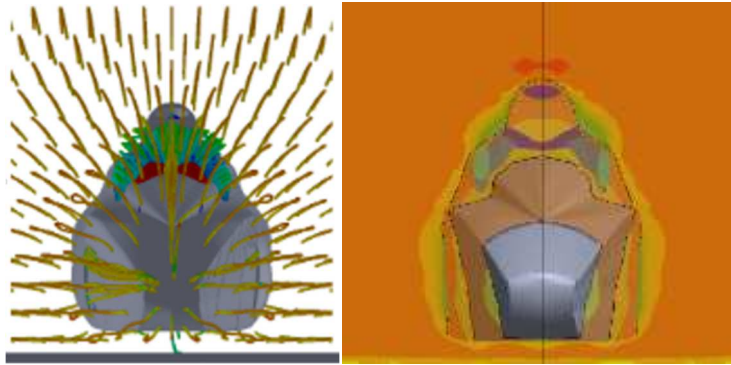


Fig. 8. Flow speed from the front side (on left streamlines, on right cut plots)

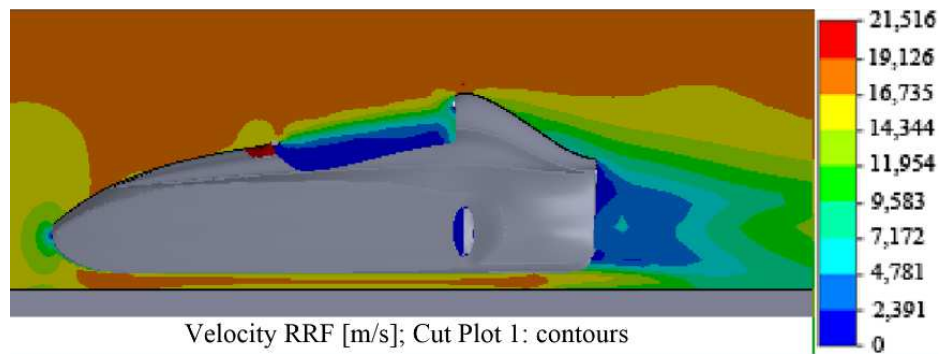


Fig. 9. Flow behavior along the main axis

Comparative analysis of specific technological building methods is represented in Fig. 10 and Fig. 11. According to Fig. 10 data analysis the most expenses are in the method using 3D mould printing and then vacuum bagging. It's for the reason of high 3D material amount and glue (to connect 3D printed surface parts) cost. TEME factor is the highest for this method, but it's a relative value because it's calculated proportionally to TEU, by the relation to calculate specific effectiveness of each unit equipment, using the formulae of maximal one unit effectiveness (MOUE):

$$\text{MOUE} = \frac{\text{TEME}}{\text{TEU}} \quad (3)$$

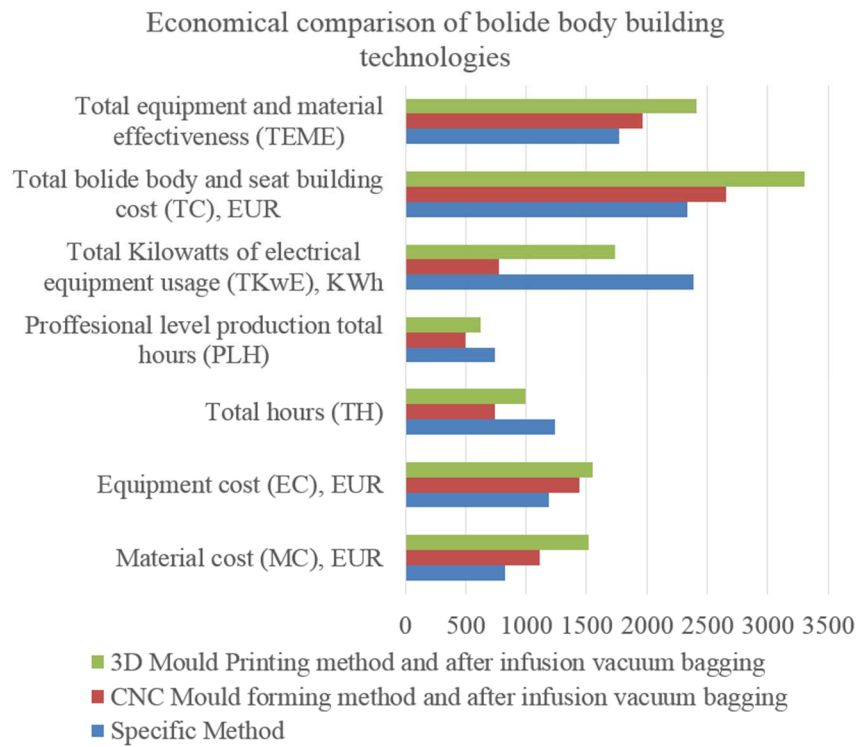


Fig. 10. Economic comparison analysis histogram of technological building methods

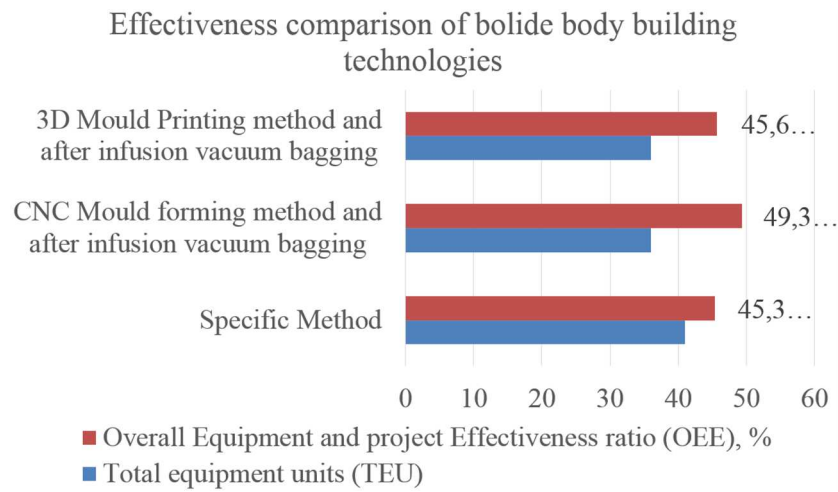


Fig. 11. Effectiveness comparative analysis histogram

The TEME actually never can reach TC or amount 100%, because all equipment cannot be working without faults, including human factor. More demonstrative parameter is overall equipment and project effectiveness ratio (OEE), represented in Fig. 11. It includes all the mentioned parameters, by relation, using the formulae of overall equipment and project effectiveness:

$$OEE = \frac{TEME \cdot PLH}{TC \cdot TH} \cdot 100\% \quad (4)$$

where: $\frac{PLH}{TH}$ – is professional level production total level hours 2-to-1 ratio to total real working hours.

The highest OOE is assigned to the CNC mould forming method and further vacuum bagging (Fig. 11). That is obvious and proven by the attached calculations of this work.

Other explanations are ideal symmetry and linear airflow, as well as ignoring induced drag which may lead to the increase of total C_d to more believable values around 0,19-0,20 (Tab. 1).

Table 1. Comparison of some production and concept cars drag coefficient [11]

Drag coefficient value	Model name	Year of production
0.19	Alfa Romeo B.A.T. 7 Concept	1954
0.19	General Motors Ultralite	1992
0.1768	<i>KUT Bolide</i>	2018
0.17	Pininfarina Fiat 124 concept (Morelli shape)	1978

6. Conclusions

The results, experience and knowledge gained while writing this publication, prove the necessity of planning and organization of work to put into effect such methods of composite parts production. This attitude provides us with predictable vision of future projects and results which can be obtained and analysed further.

References

- [1] Hirz M., Dietrich W., Gfrerrer A., Lang J.: Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2013.

- [2] <https://www.greenpower.co.uk/technical-sporting-regulations>.
- [3] <https://www.google.com/amp/slideplayer.com/amp/9754982/>.
- [4] Davies G.: *Materials for Automobile Bodies*, Elsevier Ltd., 2003.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Overall_equipment_effectiveness.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect (checked out: 25.03.2018).
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number (checked out: 25.03.2018).
- [8] <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-1000000>.
- [9] Campbell F.C.: *Structural Composite Materials*, Materials Park, ASM International®, Ohio 2010.
- [10] <http://www.reja.com.pl/products/norpol-fi-184-en-us> (checked out: 05.04.2018).
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient.

METODY OPTIMALIZACJI KONSTRUKCJI KAROSERII KOMPOZYTOWEJ ORAZ PROJEKT TECHNOLOGII DLA SAMOCHODÓW Z SILNIKIEM ELEKTRYCZNYM

Streszczenie

W artykule omówiono sposoby optymalizacji strukturalnej kompozytowych nadwozi samochodowych, takich jak samochody wyścigowe wykorzystujące elektryczne i hybrydowe źródła energii. Aby osiągnąć te cele, korzystano z kontroli aerodynamicznej projektu CFD. Opracowano zintegrowany prototyp modelu nadwozia typu 3D-CAD oparty na koncepcji profili NACA, stosowany w generowaniu dodatnich i ujemnych krzywizn powierzchni, aby zapewnić lepsze parametry: stabilność, współczynnik oporu, siłę docisku itd. Rezultat zintegrowanego modelu nadwozia typu 3D-CAD z nadwoziem wyścigowym jest także prezentowany jako nadwozie kompozytowe w skali rzeczywistej. W artykule omówiono również metody technologiczne oraz problemy i etapy projektowania rzeczywistego (od formy do gotowej części kompozytowej). Uzyskane wyniki mogą być przydatne do produkcji złożonych brył kompozytowych, przy użyciu łatwo dostępnych i opłacalnych materiałów oraz oprogramowania.

Słowa kluczowe: aerodynamika, motoryzacja, kompozyt, technologia części

DOI: 10.7862/rm.2018.36

Otrzymano/received: 27.03.2018

Zaakceptowano/accepted: 22.10.2018

Olha DVIRNA¹

ANALIZA STOSOWANYCH TECHNOLOGII OBRÓBKI POWIERZCHNI ZAMKA TARCZY SPRĘŻARKI I TURBINY GAZOWEJ

Powierzchnie elementów połączeń zamkowych w turbinie i sprężarce są jednymi z najbardziej obciążonych powierzchni podczas pracy silnika turbinowego. Obecność agresywnego środowiska (gorący gaz z popiołem i domieszkami znajdującymi się w paliwie), wysoka temperatura pracy, ciśnienie, obciążenia od działania sił odśrodkowych, gazodynamicznych oraz powstające drgania wywołują wiele procesów prowadzących często do uszkodzenia połączenia zamkowego, a w efekcie nawet awarii lub zniszczenia silnika turbinowego. Wymienione czynniki wpływające na powierzchnie połączeń zamkowych prowadzą do wzrostu naprężeń i napięć kontaktowych, aktywizacji procesów zużycia frettingowego, powodują również erozję i pęknięcie zmęczeniowe. Najczęściej stosowanym typem połączenia łopatki z tarczą wirników sprężarki jest zamek trapezowy lub tzw. „jaskółczy ogon”, dla turbiny zaś – jodełkowe połączenie zamkowe. W procesie projektowania i wytwarzania zamka należy szczególnie uwzględnić stabilną pracę zespołu wirnikowego sprężarki i turbiny oraz żywotność całego silnika oraz wziąć pod uwagę: wysokie wymagania dotyczące składu oraz jakości materiałów tarczy i łopatek, niską obrabialność tych materiałów, skomplikowany kształt i wysokie wymagania dotyczące dokładności, a także wzajemnego położenia powierzchni oraz jakość warstwy powierzchniowej zamka. Takie wymagania można spełnić za pomocą różnych metod obróbki skrawaniem (przeciąganie, frezowanie), obróbki elektrochemicznej (ECM) lub elektroerozyjnej (EDM). Metoda obróbki elektrochemicznej zamka ma wiele zalet w stosunku do obróbki skrawaniem, m.in.: możliwość obróbki materiałów przewodzących prąd z różnymi właściwościami mechanicznymi, zapewnienie wysokiej jakości warstwy powierzchniowej, dużą produktywność przy długim okresie eksploatacji elektrody. Dokładność obróbki zamków metodą ECM jest jednak bardzo niska. Metoda przeciągania pozostaje więc jedną z najczęściej używanych, a na etapie wykańczania – jedyną możliwą metodą tworzenia dokładnego zamka z wysoką jakością warstwy powierzchniowej.

Słowa kluczowe: połączenia zamkowe, dokładność kształtu, jakość warstwy powierzchniowej, przeciąganie tarczy, żywotność silnika turbinowego

1. Wprowadzenie

Rozwój branży okrętowej, lotniczej, energetycznej i innych branż przemysłu maszynowego jest ściśle związany z wprowadzaniem nowoczesnych technologii

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Olha Dvirna, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, tel.: +48608816161, e-mail: o.dvirna@wm.am.gdynia.pl

obróbki głównych elementów silników, do których produkcji stosuje się materiały o ulepszonych właściwościach fizycznych i mechanicznych.

Silnik turbinowy jako źródło lub przetwornik energii jest często stosowany w ciepłownictwie, okrętownictwie, lotnictwie, a także w transporcie naziemnym. Głównym elementem silnika determinującym jego parametry pracy jest turbina gazowa. Im wyższa robocza temperatura gazu w turbinie, tym na ogół bardziej ekonomiczna praca silnika, gdyż wraz z jej wzrostem zmniejsza się jednostkowe zużycie paliwa i powietrza na jednostkę mocy. W związku z tym, do produkcji głównych elementów turbiny należy zastosować nowe żaroodporne materiały oraz nowe metody i technologie ich obróbki.

Obecnie najczęściej stosowane w przypadku połączeń łopatek z obręczą tarczy są zamki typu „jaskółczy ogon”. Wyróżniają się one prostotą konstrukcji i stosunkowo niewielką wysokością zamka, co umożliwia stosowanie tarczy ze zmniejszoną grubością obręczy. Z kolei taka konstrukcja tarczy umożliwia rozmieszczenie optymalnej liczby łopatek na obręczy w celu stworzenia kratki o wymaganej gęstości. Połączenia te mają jednak niską zdolność tłumienia drgań. Doświadczenie wynikające z eksploatacji silników wskazuje, że zasadniczą część uszkodzeń całkowitych i częściowych powstaje wskutek zjawiska zmęczenia przy drganiach roboczych łopatek, które tworzą ogniska pęknięć zmęczeniowych i stają się przyczyną uszkodzenia trzonu łopatki i występu tarczy. Badania dynamiczne właściwości połączeń zamkowych pokazują, że właściwie dla wszystkich typów łopatek drgania, bez względu na ich formę, nie zanikają u stopy łopatki, lecz rozprzestrzeniają się w głąb połączenia zamkowego (niezależnie od siły zacisku nie można wygasić drgań w zamku), co ostatecznie prowadzi do pojawienia się zjawiska frettingu [1].

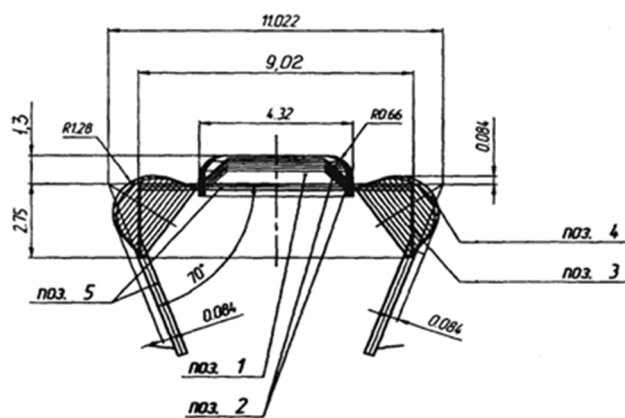
Połączenia jodełkowe są w znacznie mniejszym stopniu podatne na takie negatywne procesy jak opisane powyżej, co wynika z równomiernego podziału obciążenia elementów profilu zamka. Pracują one poprawnie w przypadku gdy jest zapewniony właściwy kontakt powierzchni zamkowej łopatki i tarczy. Jednym z najważniejszych parametrów kontaktowego współdziałania połączeń zamkowych jest wielkość zbliżenia powierzchni łączących się elementów. Kontaktowe zbliżenie powierzchni odbywa się przez elastyczno-plastyczne deformacje wierzchołków chropowatości oraz leżących poniżej warstw. Na proces przejścia od deformacji elastycznych do plastycznych przy takim samym materiale ma znaczący wpływ jakość warstwy powierzchniowej (uszkodzenia powierzchni, chropowatość, znak i wartość naprężeń resztkowych, stopień umocnienia powierzchni itp.), zależnej od technologicznych metod obróbki powierzchni kontaktowych.

2. Technologiczne metody obróbki połączeń zamkowych

Typ zamka wybiera się w zależności od jego przeznaczenia, miejsca rozmieszczenia, stopnia turbiny i sprężarki oraz warunków pracy tarczy. Przy wyborze metody obróbki zamków należy uwzględnić właściwości używanych żarowy-

trzymałych materiałów, ich obrabialność oraz dokładność wzajemnego położenia powierzchni połączeń zamkowych o skomplikowanym profilu. Obecnie stosuje się kilka metod obróbki połączeń zamkowych, wśród których można wyróżnić metody: obróbki skrawaniem (przeciąganie, frezowanie), obróbki elektrochemicznej (ECM) i elektroerozyjnej (EDM).

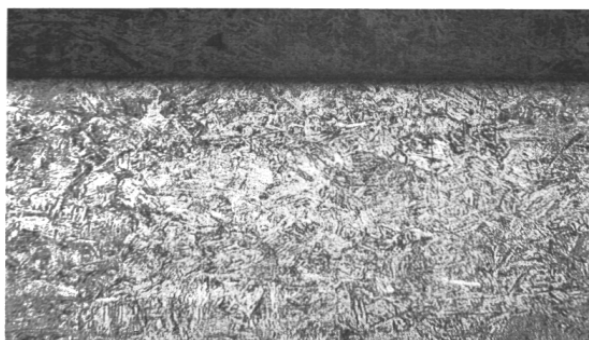
Spośród metod obróbki skrawaniem połączeń zamkowych najczęściej stosuje się metodę przeciągania. Przeciąganie jest to proces obróbki mechanicznej, w której cały nadatek obróbkowy usuwa się w czasie jednego przejścia narzędzia nazywanego przeciągaczem (stosowanego w produkcji wielkoseryjnej i masowej). Proces ten jest realizowany według dwóch schematów usuwania nadatku (generatorowego i profilowego) na poziomych oraz pionowych obrabiarkach różnych rodzajów i o odmiennej konstrukcji. Parametry skrawania przy przeciąganiu są wybierane w zależności od właściwości obrabianego materiału i wykonywanej operacji, a także technicznej charakterystyki obrabiarki. Kolejność usuwania nadatku zależy od typu obrabianego zamka (rys. 1.).



Rys. 1. Kolejność usuwania nadatku przy przeciąganiu

Fig. 1. Removal sequence of broaching operation

W ramach umowy o technicznej współpracy z Naukowo-Produkcyjnym Zespołem Budowy Turbin Gazowych „Zoria-Maszprojekt” (Ukraina) przeprowadzono wiele badań dotyczących zastosowania metod obróbki skrawaniem zamków tarcz wytwarzanych z żarowytrzymałej stali ЭП1517-III [2, 3]. Mikrostrukturą kutech wzorców z tego materiału w stanie hartowania i odpuszczania w wysokiej temperaturze jest sorbit w charakterze martenzytu (rys. 2.). Chemiczny skład tej stali przedstawiono w tab. 1., a właściwości mechaniczne w tab. 2.



Rys. 2. Mikrostruktura wzorca ze stali ЭП517-III

Fig. 2. ЭП517-III steel sample microstructure

Tabela 1. Skład chemiczny stali ЭП517-III

Table 1. Chemical composition of ЭП517-III steel

Stal, %	C	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	N	Fe	Si	Mn	S	P
										nie więcej			
ЭП517-III	0,13 0,18	11,0 12,5	1,7 2,1	1,35 1,65	0,65 1,0	0,18 0,30	0,20 0,35	0,02 0,08	osn.	0,5	0,5	0,015	0,03

Tabela 2. Właściwości mechaniczne stali ЭП517-III

Table 2. Mechanical properties of ЭП517-III steel

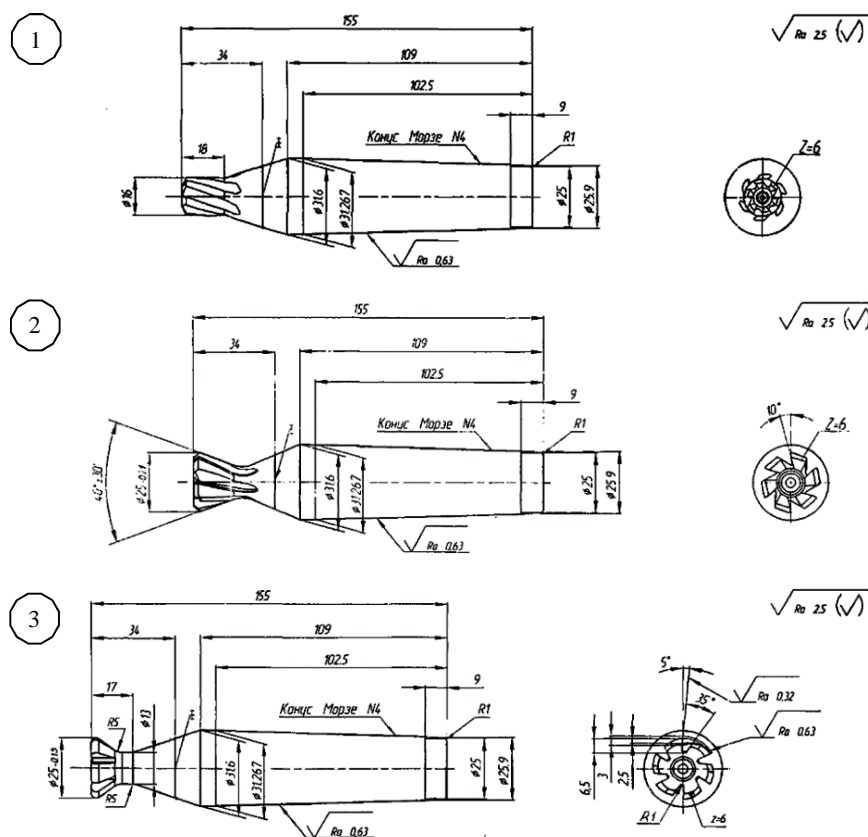
Obróbka cieplna	Właściwości mechaniczne		
	wytrzymałość, MPa	granica plastyczności, MPa	udarność, J/cm ²
Hartowanie 1120 ± 15°C	1090	935	128
Odpuszczanie 680 ± 15°C	1075	875	113

Stal ЭП517-III ma dobre właściwości eksploatacyjne, jest o wiele tańsza od istniejących odpowiedników, posiada jednak wiele specyficznych właściwości fizyczno-mechanicznych, które obniżają jej obrabialność i utrudniają zastosowanie tradycyjnych metod obróbki. Podczas badania jakości powierzchniowej warstwy połączeń zamkowych tarcz turbin i kompresorów ze stali ЭП517-III (obrobionych metodą przeciągania) zostały ujawnione liczne uszkodzenia powierzchni zamkowych (rys. 3.).



Rys. 3. Uszkodzenia obrabianej powierzchni

Fig. 3. Defects of the treated surface



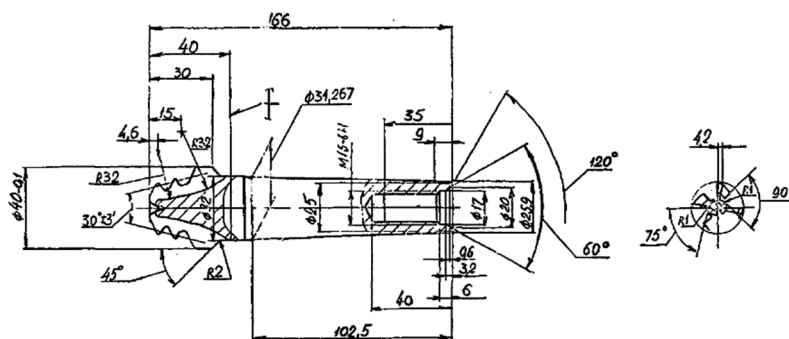
Rys. 4. Kolejność używania frezów

Fig. 4. Sequence of mills use

W przypadku produkcji krótkich serii zamków z szeroką gamą obrabianych powierzchni można zastosować frezowanie jako alternatywną metodę obróbki połączeń zamkowych tarcz turbiny gazowej. Realizacja technologii frezowania zamków typu „jaskółczy ogon” i „jodła” we wzorcach ze stali ЭП517-III polegała na wyznaczeniu warunków otrzymania zamków o rozmiarach i jakości odpowiadających wymaganiom technologicznym oraz zasadom rysunku technicznego. W wyniku tego ustalono:

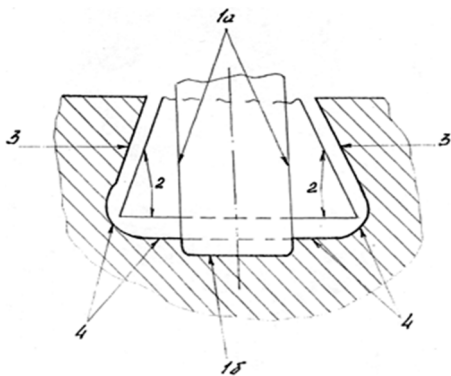
- schemat i kolejność obróbki,
- tryby skrawania,
- chropowatość obrabianych powierzchni,
- czas obróbki zamka.

Do wykonywania zamka był zaprojektowany i wytworzony komplet frezów palcowych o określonym kształcie i określonej geometrii części skrawających (rys. 4. i 5.). Frezowanie zamków typu jodełkowego realizowano przez dwie operacje: najpierw wycinanie zamka trapezowego, a następnie nadanie mu wymaganej formy (rys. 6.).



Rys. 5. Kształt ostatecznego frezu

Fig. 5. The shape of the finished mill



Rys. 6. Kolejność usuwania nadatku przy frezowaniu

Fig. 6. Removal sequence of milling operation

Oprócz metod obróbki skrawaniem znane są również metody formowania zamków w tarczach zgodnie ze schematem obróbki elektroerozyjnej (EDM). Są one realizowane w dwóch wariantach: prostego oraz odwrotnego kopiowania. Ze względu na małe ścieranie elektrody i zadowalającą energochłonność (na poziomie frezowania), obróbkę elektroerozyjną w trybie elektroimpulsowym można rekomendować jako alternatywę dla frezowania dużych powierzchni o skomplikowanym kształcie.

3. Wnioski

W celu wstępnej obróbki zamków w wielkogabarytowych tarczach stosuje się metodę elektrochemiczną (ECM). Metoda obróbki ECM zamka pozwala znacznie zmniejszyć liczbę przeciągaczy w zestawie i ma wiele zalet w stosunku do obróbki skrawaniem:

- możliwość obróbki materiałów przewodzących prąd z różnymi właściwościami mechanicznymi,
- zapewnienie wysokiej jakości warstwy powierzchniowej,
- dużą produktywność,
- duży okres eksploatacji elektrody,
- umiarkowaną wartość elektrody.

Wadą tego rodzaju obróbki jest bardzo mała dokładność.

Metodę obróbki EDM można zastosować w przypadkach, gdy mechaniczna obróbka nie pozwala osiągnąć wysokiej wydajności oraz przy utrudnionym dostępie narzędzia do strefy skrawania. Powierzchniowa warstwa zamka tarczy po obróbce elektroerozyjnej nabiera zwiększonej twardości, przy czym środek zachowuje miękkość, co pozytywnie wpływa na eksploatacyjne właściwości tarcz. Na powierzchni mogą jednak występować pęknięcia, wywołane przez naprężenia rozciągające. Bardzo trudno jest zapewnić wymaganą chropowatość powierzchni. Taki rodzaj obróbki jest zalecany podczas operacji wstępnych i kształtujących w procesie usuwania większości naddatku. Zastosowanie metody przeciągania pozostaje zatem jedną z najczęściej używanych, a na etapie wykańczania – jedyną możliwą metodą tworzenia dokładnego zamka z wysoką jakością warstwy powierzchniowej [4].

Literatura

- [1] Dvirna O., Shumilov A.: Podnoszenie jakości tarcz turbiny gazowej poprzez udoskonalenie technologii ich obróbki, Technologiczne Centrum, 15 (2014) 4-8.
- [2] Shumilov A., Dvirna O.: Technologiczne sposoby podnoszenia jakości powierzchni połączeń zamkowych w elementach turbiny gazowej, NUBO, (2005) 175-176.
- [3] Shumilov A., Dvirna O.: Współczesne metody obróbki zębów zamkowych w tarczach zespołu turbiny gazowej, NUBO, (2011) 112-115.

- [4] Beziyazychny V., Volkov S., Fomenko R.: Techniczne i ekonomiczne uzasadnienie technologii obróbki jodełkowych rowków tarczy silnika turbogazowego, СТИИ, 2 (2008) 27-31.

ANALYSIS OF APPLIED TECHNOLOGIES OF SURFACE TREATMENT LOCKS GRAPE COMPRESSOR AND TURBINE

S u m m a r y

The surfaces of the lock connection elements in the turbine and compressor are one of the most stressed surfaces during operation of the turbine engine. The aggressive environment (hot gas with ashes and additives in fuel), high working temperature and pressure, loads caused by the existing centrifugal forces and forces of gas flow, vibrations – all these factors cause increase of variable loads and surface stresses, activation of fretting wear processes, fatigue cracking, erosion and other dangerous processes which often lead to destruction of lock connection, and even to fault of turbine motor. The most commonly used connection of turbine blade with the compressor rotors disc is the trapezoid lock, also called the dovetail, while in turbines the herring-bone lock connections are commonly applied. In course of the design and production of such a lock, and aiming to ensure faultless operation of the compressor and turbine rotor unit, as well as long service life of the whole motor, the following items shall be considered: high requirements to the composition and quality of the disc lock and blades, low workability of these materials, complicated shape and high requirements of precision and mutual arrangement of surfaces, along with the quality of lock surface. Such requirements may be met through the application of various machining methods (draw-out, milling), methods of electro-chemical (ECM) or electro-erosive (EDM) processing. The method of lock electro-chemical processing has a number of advantages in comparison to machining: the possibility to process the conductive materials with various mechanical features, ensuring high-quality surface layer, high productivity with a long electrode service life and its moderate cost. However, ECM processing precision is very low. Therefore, application of the draw-out method remains one of the most commonly used, and at the finishing stage it is even the only possible method to obtain high-precision lock with a high quality surface layer.

Keywords: lock connections, form precision, surface layer quality, disc draw-out, turbine motor service life

DOI: 10.7862/rm.2018.37

Otrzymano/received: 24.04.2018

Zaakceptowano/accepted: 10.10.2018

Wiesław FRĄCZ¹
Grzegorz JANOWSKI²

SELECTED PROPERTIES OF BIOCOMPOSITES ON THE BASIS OF PHBV WITH CELLULOSE FILLERS

The paper presents selected properties of the developed biocomposites based on PHBV poly (3-hydroxybutyric co-3-hydroxyvaleric acid) biopolymer. The PHBV biopolymer is obtained by the copolymerization of 3-hydroxybutyric acid and 3-hydroxyvaleric acid. The biopolymer used for the tests contained 8% of poly (3-hydroxyvaleric acid). For the preparation of the composite, three types of fillers: wood flour, hemp fiber and flax fiber were used in search for the best possible mechanical properties of composite. During the selection of filler types, the availability and price in the geographical area of Poland as well as mechanical properties were taken into account. Fillers were alkalinized and fiber modification parameters were determined. The following mass percentages of fillers in the tests: 15%, 30%, 45%, 50% and various fiber lengths were used. To produce the biocomposites the single- and twin screw extruders made by Zamak Company were used. The initial processing parameters were determined using DSC thermogram analyses. The technological parameters depended on the type of filler and its percentage content. The best mechanical properties, compared to generally available polymers like PP, PE, PVC or PS were obtained for the composite with hemp fiber. The developed composite is completely biodegradable. Better mechanical properties of produced composite in relation to e.g. PE or PP allow using it for the production of parts that are used in various branches of the economy.

Keywords: PHBV, natural fibers, composites, biopolymers, injection moulding

1. Introduction

Management of plastic waste is a significant problem that is increasing year by year. Considering these problems and biodegradability of polymers, and also the source of its production, polymers can be classified as follows [1]:

- non-biodegradable and manufactured from petrochemical raw materials,
- biodegradable and produced from petrochemical raw materials,
- non-biodegradable and produced from renewable raw materials,

¹ Corresponding author/autor do korespondencji: Wiesław Frącz, Rzeszow University of Technology, 8 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651714, e-mail: wf@prz.edu.pl

² Grzegorz Janowski, Rzeszow University of Technology, e-mail: gjan@prz.edu.pl

- biodegradable and produced from renewable raw materials (so-called „double green”).

Apart from the first group, the other three can be called „bioplastics” because they are materials that are biodegradable or they are of natural origin. Today, bioplastics comprise only 1% of the total annual production of plastics, but the group of these materials is constantly growing and the demand for such materials is increasing. The data developed by the European Bioplastics in cooperation with the Nova-Institute research institute shows that global bioplastic production capacities are supposed to increase from approx. 2.05 million tonnes in 2017 to approx. 2.44 million tonnes in 2022 [2]. The greatest hope is seen in the development of the group of double green bioplastics, which are of natural origin and are fully biodegradable. The main reason for slow development and commercialization of this type of polymers are quite high production costs.

An interesting group of double green polymers are polyhydroxyalkanoates (PHAs), which are produced by microorganisms as a backup material. Microorganisms are able to synthesize various types of PHA depending on the availability of carbon sources and biochemical reactions in cells. The production of PHA takes place in the cytoplasm of a bacterial cell, while the process of producing this biopolymer takes place in two stages. In the first stage, the bacterial inoculum is introduced into a sterile solution of nutrients, a carbon source and traces of metals. In the second stage, essential nutrients like N₂, C and O₂ are deliberately limited, which results in accumulation of PHA as a backup material [3]. One of the polymers belonging to the PHA group is poly (3-hydroxybutyric acid) (PHB). Despite similar physical properties to polypropylene, it is characterized by fairly high brittleness [4], which results from formation of large crystalline domains in the form of spherulites and can be associated with the exceptional purity of the obtained biopolymer. The above feature makes PHB microbiologically an ideal system for spherulites investigation [5], but it is also a serious disadvantage of the commercial use of this homopolymer [6, 7]. The possibility of improving mechanical properties of PHB is insertion of a second monomer, i.e. poly (3-hydroxyvaleric acid) (HV or PHV) to the PHB chain, which allows to obtain poly (3-hydroxybutyric acid-3-hydroxyvaleric acid) (PHBV). Copolymerization leads to reducing the crystallinity [8-10]. In comparison to PHB, PHBV is characterized by reduced stiffness and brittleness, higher elongation at fracture and increased tensile strength. Depending on the amount of HV in the polymer chain, a significant drop in the melting point can be obtained, increasing the difference between the melting point and the onset of the thermal decomposition, thus expanding the processing window [11]. Wider commercial use of this biopolymer is still difficult due to the high production costs as well as small difference between the melting temperature and the degradation temperature of this polymer, as well as low flexibility and fairly high brittleness [12-15]. For this reason, further plans in the research of scientists are to improve the

mechanical properties and processing windows of this biopolymer, as well as the possibility of producing composites with a PHBV matrix [16, 17].

In recent years there has been a significant increase in the use of natural fibres as fillers in the polymer matrix in order to create new types of environmentally friendly composites. These fibres are characterized by low density while maintaining high strength, renewability and full biodegradability, with production requiring low energy. It should be noted, however, that these materials have lower durability than synthetic fibres, are characterized by quite high variability of properties and have a tendency for quite high water absorption [18-21]. The tensile strength as well as the Young's modulus of natural fibres are usually lower than for glass fibres used in composites production. However, the density of glass fibre is significantly higher (about 2500 kg/m³) than natural plant-derived fibres (about 1500 kg/m³), which is especially important for the weight of components made of composites, where the mass must be significantly reduced [22, 23]. Higher mechanical properties are noticeable for fibres with a high content of cellulose and cellulose microfibre arranged in the direction of reinforcement - this situation is often found in bast fibres, which have higher structural requirements to ensure adequate scaffolding for the stem of the plant. The properties of natural fibres are significantly diversified – this is due to growing conditions, harvesting time, processing and storage [24-26].

The possibility of commercialization of double green polymers (PHBV in particular) may be the use of natural fibre fillers in a biopolymer matrix. This may enable to improve mechanical properties of the manufactured biocomposites while maintaining full biodegradability at reduced production costs in relation to the pure biopolymer. The aim of the work is to present selected properties of PHBV-cellulosic fibre biocomposites.

2. Manufacture of biocomposites

The composites were produced using a twin screw extruder RES-2P12A made by Zamak company using adjustable temperature values in heating zones, in the range from 145°C to 160°C (Tab. 1). The fibres at this stage of the research were not surface modified. The extruded composite was granulated on a stand equipped with a water cooling bath and a granulator. Extrusion was carried out at the screw speed of 50 rpm. In the case of higher velocity, the process was unstable, i.e. the fibres were accumulated in the area before the extruder head. Moreover, the extrudate was characterized by very low viscosity when leaving the extrusion head. In turn, lowering the rotational speed of the screw below 50 rpm caused degradation of the biocomposite in the plastification unit due to too long heating time. These phenomena were particularly visible for composites with flax fibre. This was the cause of significant pressure fluctuations on the screw's forehead, which made it difficult to maintain the stability of the technological process. The obtained granulate was used for the production of test specimens by means of the

injection moulding process. The stages of composite production are shown in Fig. 1. The configurations of produced PHBV biocomposites are presented in Tab. 2. SEM investigations were performed for each batch of composites produced. Selected images of composite areas fractures are shown in Fig. 2.

Table 1. The temperature of extruder heating zones

Head	Adapter	Zone 6	Zone 5	Zone 4	Zone 3	Zone 2	Zone 1	Feed hopper zone
160°C	160°C	160°C	160°C	160°C	160°C	155°C	145°C	50°C

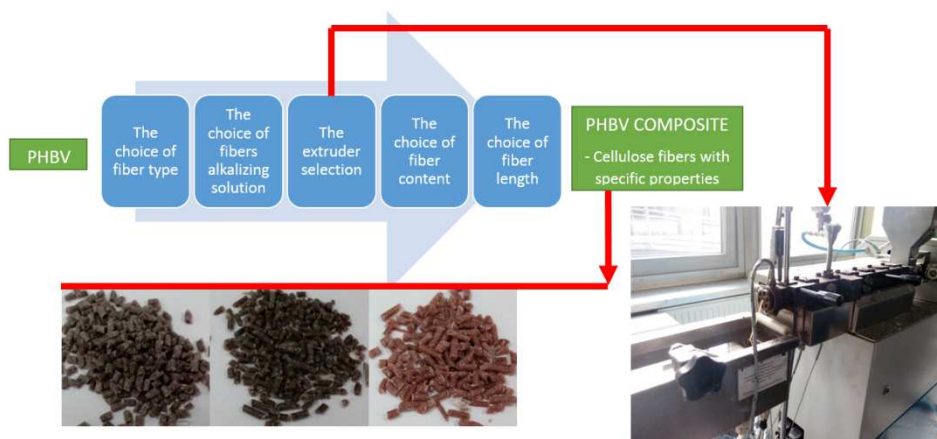


Fig. 1. The production stages of PHBV biocomposites.

Table 2. Configurations of manufactured biocomposites based on PHBV matrix

Composite designation	Type of fibre	Extrusion method	Mass filler content	Length of fibre	Mercerization of fibres
K15mas0rr1mmDwu	hemp	concurrent	15%	1 mm	no
L15mas0rr1mmDwu	flax	concurrent	15%	1 mm	no
D15mas0rr1mmDwu	wood	concurrent	15%	1 mm	no

In order to determine the processing window, among others, DSC analysis using TA Instruments Q2000 microcalorimeter was made. The recorded thermograms (Fig. 3) indicate that composites with a high degree of fibre adhesion to the matrix were produced – this is evidenced by high peaks on the thermograms. Glass transition and melting temperature of PHBV and its composites was observed, which shows semicrystalline materials. In addition, in the case of PHBV, the so-called „cold crystallization” was observed. Based on the obtained results, it was estimated that the glass transition temperature (T_g) of unfilled

PHBV is 6.4°C, and the change in specific heat (ΔC_p) is equal to 0.094 J/g°C. The onset temperature (T_m) of the polymer is 164.95°C. Estimated parameters for the composites produced are listed in Tab. 3. No significant changes in melting temperature were observed in relation to PHBV.

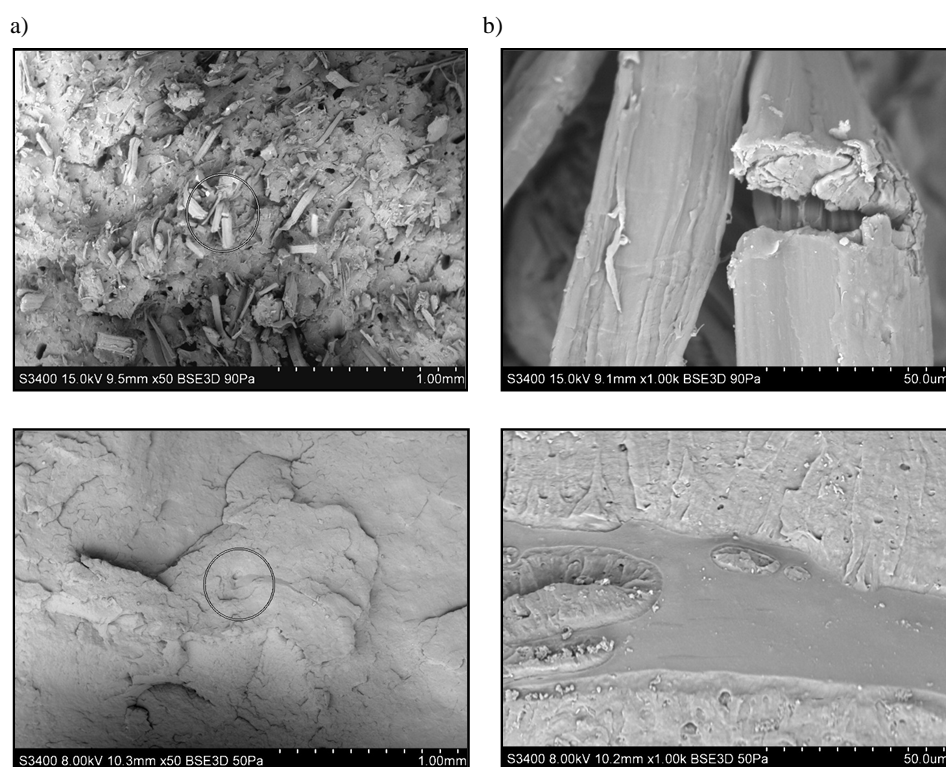


Fig. 2. Examples of SEM images of fracture areas for: a) composites filled with hemp fibres, b) pure PHBV biopolymer

Table 3. Comparison of thermal parameters of biocomposites for a variable type of filler and for a pure biopolymer

Type of material	ΔC_p , J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹	T_g , °C	T_m , °C	T_c , °C
L15mas0rr1mmDwu	0.077	6.40	164.30	101.10
K15mas0rr1mmDwu	0.067	3.60	164.20	106.60
D15mas0rr1mmDwu	0.080	5.58	163.20	101.70
PHBV	0.094	6.40	164.95	75.05

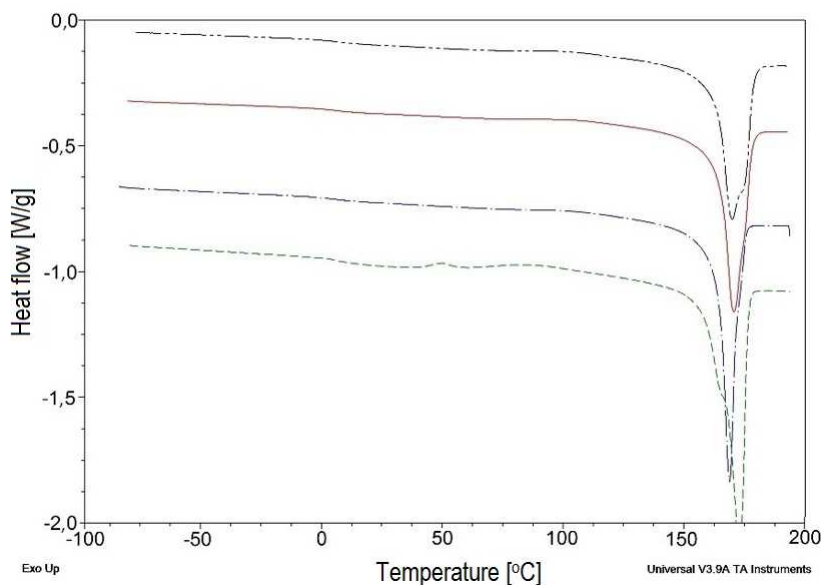


Fig. 3. Dependence of heat flow on temperature for unfilled PHBV (---) and its composites: with unmodified fillers: L15mas0rr1mmDwu (-), K15mas0rr1mmDwu (-·-), D15mas0rr1mmDwu (···)

3. Selected properties of produced biocomposites – preliminary tests

The Dr Boy 55E injection moulding machine was used to produce test pieces (Fig. 4). The tests of mechanical properties were carried out by means of the Zwick Roell Z030 testing machine and the Ceast 9050 impact hammer. The results of the performed tests are presented in Fig. 5-10.



Fig. 4. The moulded piece made of composite PHBV-hemp fibres (fibre content: 15% by weight)

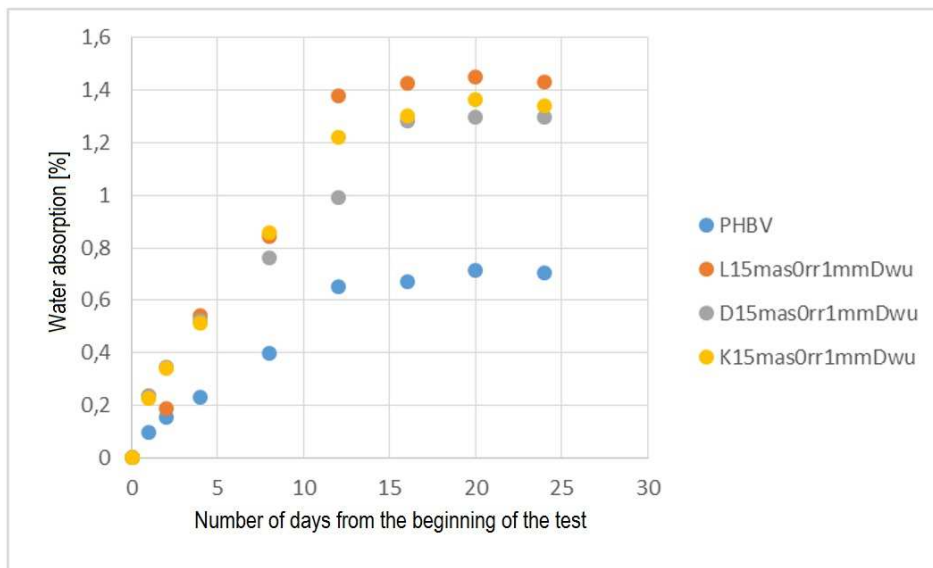


Fig. 5. Water absorption for a variable type of filler and for pure PHBV biopolymer

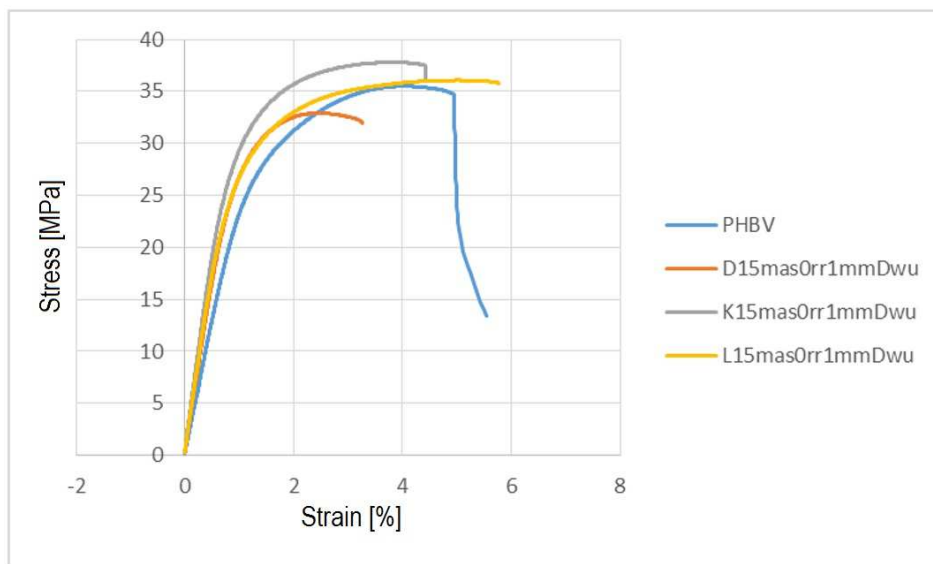


Fig. 6. The stress – strain characteristics for a variable type of filler and pure PHBV biopolymer

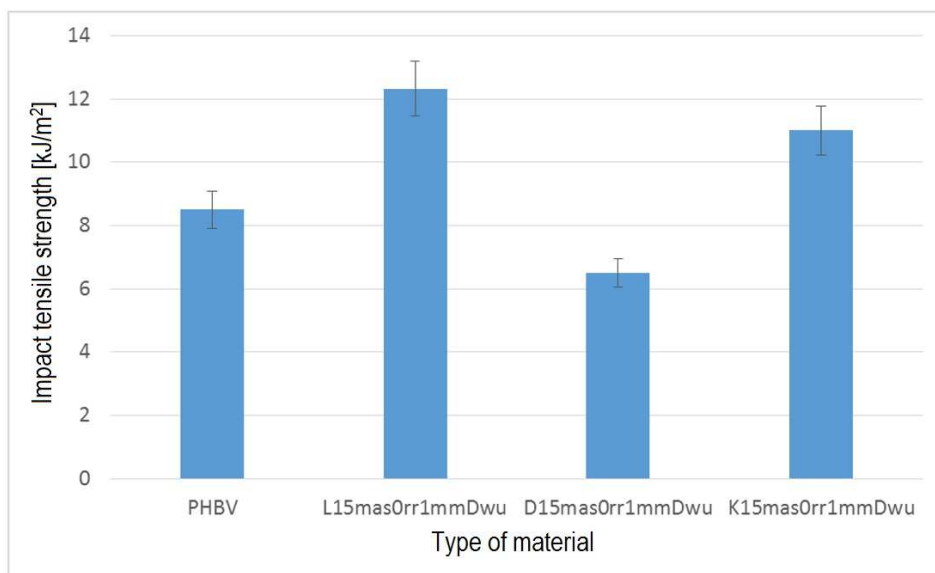


Fig. 7. The impact tensile strength results for composites with variable type of filler and for pure PHBV biopolymer

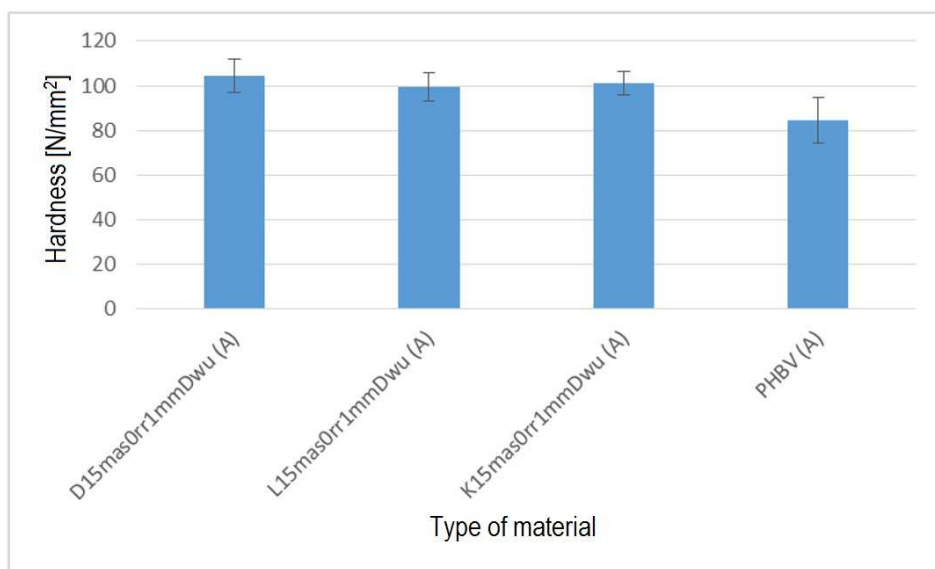


Fig. 8. The hardness test results for a variable type of filler and for the pure PHBV biopolymer

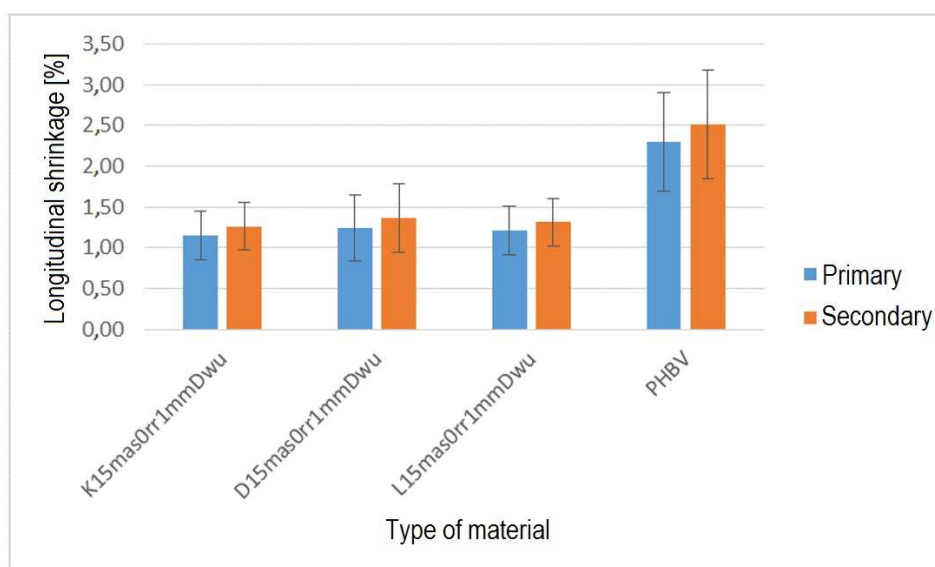


Fig. 9. Primary and secondary shrinkage of the moulded piece measured in the longitudinal direction for a variable type of filler and for a pure PHBV biopolymer

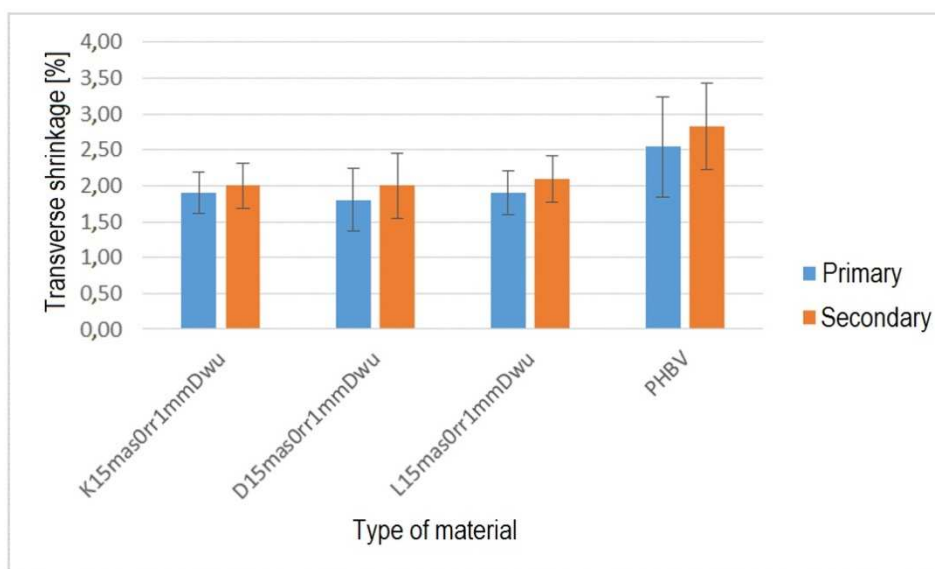


Fig. 10. Primary and secondary shrinkage of moulded piece measured in the transverse direction for a variable type of filler and for a pure PHBV biopolymer

4. Conclusion

1. As a part of the study double green composites with good mechanical properties, comparable to popular polyolefin's group of plastics and much better than pure PHBV biopolymer, were produced. The cost of producing the material based on fully biodegradable PHBV has been reduced thanks to the use of natural fibres.
2. When analysing the results of research, it should be noted that mechanical properties, as well as the quality of the PHBV biocomposites, improved when using flax and hemp fibres already by a small percentage of them (15% by mass).
3. In the case of wood fibres, despite correct chemical treatment applied by the manufacturer, poor results of mechanical properties were obtained, even in relation to the PHBV biopolymer.
4. For all the produced composites filled with cellulose fibres, greater adsorption of water, compared to pure PHBV is noticeable, which is evident due to the presence of polar OH groups in the structures of cellulose fibres.
5. The results obtained for PHBV composites filled with the flax and hemp fibre are the basis for further research. In the case of wood fibre – the subsequent stages of testing with the use of this filler will not be continued.
6. Higher mechanical properties of the produced composite in relation to, e.g. PE or PP, allow to use it for the production of more durable packaging, containers, and disposable transport pallets, elements of investment road infrastructure as well as for gardening, for example as covers of unique trees in parks and forests. Application in other areas of economy is conditioned by economic factors and the required durability of products.

References

- [1] Malinowski R.: Biotworzywa jako nowe materiały przyjazne środowisku naturalnemu, *Inżynieria Ochrona Środowiska*, 18 (2015) 215-231.
- [2] Report: BIOPLASTICS facts and figures 2017. http://docs.europeanbioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf (access: 30.04.2018 r.).
- [3] Serafim L.S., Lemos P.C., Albuquerque M.G., Reis M.A.: Strategies for PHA production by mixed cultures and renewable waste materials, *Appl. Microbiology Biotechnology*, 81 (2008) 615-628.
- [4] Alper R., Lundgren D.G., Marchessault R.H., Cote W.A.: Properties of poly- β -hydroxybutyrate. I. General considerations concerning the naturally occurring polymer, *Biopolymers*, 1 (1963) 545-556.
- [5] Hobbs J.K., McMaster T.J., Miles M.J., Barham P.J.: Direct observations of the growth of spherulites of poly (hydroxybutyrate-co-valerate) using atomic force microscopy, *Polymer*, 39 (1998) 2437-2446.
- [6] Bassett D.C.: *Developments in Crystalline Polymers*, Elsevier, Londyn 1988.

- [7] Barham P.J., Barker P., Organ S.J.: Physical properties of poly (hydroxybutyrate) and copolymers of hydroxybutyrate and hydroxyvalerate, *FEMS Microbiology Reviews*, 9 (1992) 289-298.
- [8] Zinn M., Hany R.: Tailored material properties of polyhydroxyalkanoates through biosynthesis and chemical modification, *Adv. Eng. Mater.*, 7 (2005) 408-411.
- [9] Fei B., Chen C., Wu H., Peng S., Wang X., Dong L., Xin J.H.: Modified poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) using hydrogen bonding monomers, *Polymer*, 45 (2004) 6275-6284.
- [10] Scott G.: Green polymers. Polymer degradation and stability, 68 (2000), 1-7.
- [11] Chiellini E., Solaro R.: Biodegradable polymeric materials, *Adv. Mater.*, 8 (1996) 305-313.
- [12] Vogel R., Tändler B., Voigt D., Jehnichen D., Häußler L., Peitzsch L., Brünig H.: Melt spinning of bacterial aliphatic polyester using reactive extrusion for improvement of crystallization, *Macromolecular Bioscience*, 7 (2007) 820-828.
- [13] Arakawa K., Yokohara T., Yamaguchi M.: Enhancement of melt elasticity for poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by addition of weak gel, *J. Appl. Polymer Sci.*, 107 (2008) 1320-1324.
- [14] Blackburn R.S.: *Biodegradable and Sustainable Fibres*, 1st edition, Woodhead Publishing Limited Cambridge 2005.
- [15] Vogel R., Tändler B., Häußler L., Jehnichen D., Brünig H.: Melt Spinning of Poly (3-hydroxybutyrate) fibers for tissue engineering using α -cyclodextrin/polymer inclusion complexes as the nucleation agent, *Macromolecular Bioscience*, 6 (2006) 730-736.
- [16] Błędzki A.K., Jaszkiwicz A.: Mechanical performance of biocomposites based on PLA and PHBV reinforced with natural fibres – A comparative study to PP, *Composites Sci. Technol.*, 70 (2010) 1687-1696.
- [17] Chen G.X., Hao G.J., Guo, T.Y., Song M.D., Zhang B.H.: Structure and mechanical properties of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)/clay nanocomposites, *J. Mater. Sci. Letters*, 21 (2002) 1587-1589.
- [18] Mohanty A.K., Khan M.A., Sahoo S., Hinrichsen G.: Effect of chemical modification on the performance of biodegradable jute yarn-Biopol® composites, *J. Mater. Sci.*, 35 (2000) 2589-2595.
- [19] Lee B.H., Kim H.J., Yu W.R.: Fabrication of long and discontinuous natural fiber reinforced polypropylene biocomposites and their mechanical properties, *Fibers Polymers*, 10 (2009) 83-90.
- [20] Li X., Tabil L.G., Panigrahi S.: Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites, *J. Polymers Environment*, 15 (2007) 25-33.
- [21] Mehta G., Mohanty A.K., Thayer K., Misra M., Drzal L.T.: Novel biocomposites sheet molding compounds for low cost housing panel applications, *J. Polymers Environment*, 13 (2005) 169-175.
- [22] Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T.: Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world, *J. Polymers Environment*, 10 (2002) 19-26.
- [23] Mohanty A.K., Misra M.A., Hinrichsen G.: Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview, *Macromolecular Mater. Eng.*, 276 (2000) 1-24.

- [24] Bos H.L., Van Den Oever M.J.A., Peters O.C.J.J.: Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites, *J. Mater. Sci.*, 37 (2002) 1683-1692.
- [25] Pickering K.L., Beckermann G.W., Alam S.N., Foreman N.J.: Optimizing industrial hemp fibre for composites, *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 38 (2007) 461-468.
- [26] Charlet K., Baley C., Morvan C., Jernot J. P., Gomina M., Bréard J.: Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites, *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.*, 38 (2007) 1912-1921.

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BIOKOMPOZYTÓW O OSNOWIE PHBV Z NAPEŁNIACZAMI CELULOZOWYMI

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane właściwości wytworzonego biokompozytu w osnowie biopolimeru PHBV – poli(kwas 3-hydroksymasłowy-co-3-hydroksywalerianowy), który otrzymuje się przez kopolimeryzację poli(kwasu 3-hydroksymasłowego) i poli(kwasu 3-hydroksywa-lerianowego). Biopolimer stosowany w badaniach zawierał 8% poli(kwasu 3-hydroksywa-lerianowego). Do wytworzenia kompozytów użyto trzech rodzajów napełniaczy w formie włókien: drzewnych, lnianych i konopnych w celu otrzymania najlepszych właściwości mechanicznych kompozytu. Podczas doboru rodzajów napełniaczy uwzględniono dostępność i koszt w obszarze geograficznym Polski, a także właściwości mechaniczne. Napełniacze poddano zabiegowi merceryzacji oraz określono parametry modyfikacji włókien. W badaniach stosowano następujące zawartości masowe napełniaczy: 15%, 30%, 45%, 50% oraz różne długości włókien. Do produkcji biokompozytów wykorzystano wyciarkarkę jedno- i dwuślimakową firmy Zamak. Początkowe parametry przetwarzania zostały określone za pomocą analizy DSC. Parametry technologiczne dobrano w zależności od rodzaju napełniacza i jego zawartości procentowej. Najlepsze właściwości mechaniczne w porównaniu z ogólnie dostępnymi polimerami, takimi jak PP, PE, PVC lub PS, otrzymano dla kompozytu z włóknem konopnym. Opracowany kompozyt jest całkowicie biodegradowalny. Lepsze właściwości mechaniczne wytwarzanego kompozytu w stosunku do np. PE lub PP pozwalają na wykorzystanie go do produkcji wyrobów znajdujących zastosowanie w różnych obszarach gospodarki.

Słowa kluczowe: PHBV, włókna naturalne, kompozyty, biopolimery, formowanie wtryskowe

DOI: 10.7862/rm.2018.38

Otrzymano/received: 12.09.2018

Zaakceptowano/accepted: 23.10.2018

Rafał GAŁEK¹

Paweł GIL²

Mariusz SZEWCZYK³

Franciszek WOLAŃCZYK⁴

EFFICIENCY OF MICRO COMBINED HEAT AND POWER UNIT IN REAL CONDITIONS

The article presents the results of short-term performance of small AISIN GECC60A2N cogeneration heat and power (CHP) unit classified to the micro-cogeneration. Electric and heat generation efficiency has been assumed as parameters characterizing the operation of the CHP unit. Under test electrical efficiency reach about 23% and thermal efficiency about 44%. Overall efficiency reached about 67%. Article also includes a brief description of the hydraulic and electrical system of CHP unit.

Keywords: μ CHP system, performance, AISIN, cogeneration

1. Introduction

The depletion of fossil fuels resources traditionally used in power industry coupled with the constantly growing consumption of electricity – both in the developed and the developing countries – tends to look for new technological, system and organizational solutions. One of the good practices resulting in high energy efficiency is combined production of heat and power (CHP). In addition distributed power generation results in reduction of energy losses in power grid. Another good practice is using renewable energy sources for heat and/or power generation. Both renewable energy resources and significant opportunities for increase in energy efficiency exists over wide geographical areas, in contrast to other energy sources, which are concentrated in a small number of countries. Rapid deployment of using renewable energy, improvement of energy efficiency, and technological diversification of energy sources, results in economic benefits and significant rise of energy security. Usage of renewable energy and CHP units reduce environmental pollution and improve public health also.

¹ Rafał Gałek, Rzeszow University of Technology, e-mail: rafalgalek@prz.edu.pl

² Corresponding author/autor do korespondencji: Paweł Gil, Rzeszow University of Technology, 8 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 7432299, e-mail: gilpawel@prz.edu.pl

³ Mariusz Szewczyk, Rzeszow University of Technology, e-mail: szewmar@prz.edu.pl

⁴ Franciszek Wolańczyk, Rzeszow University of Technology, e-mail: fwolan@prz.edu.pl

Cogeneration heat and power unit generates electricity and useful heat at the same time. Cogeneration is a very efficient use of fuel from thermodynamic point of view. In separate production of electricity, some amount of energy must be discarded as waste heat, but in cogeneration systems some amount of this wasted thermal energy is put to use. Micro combined heat and power (μ CHP) units are intended to be used as distributed energy sources. The μ CHP installations are usually less than 5 kW electrical power and they are intended primarily for houses or small businesses. Instead of burning fuel to merely heat space or water, some of the energy is converted to electricity in addition to heat. This electricity can be used within the house or business or, if permitted by the grid management, sold back into the electric power grid. A detailed experimental investigation of instantaneous performance of micro CHP unit was presented in [1, 2]. Although the degree of dissemination of the CHP technology varies depending on the country, the industrial and district CHP plants have an important and well-established role in the power systems of many countries [3].

Cogeneration heat and power units consist of four basic elements: a prime mover (engine or drive system), an electricity generator, a heat recovery system, and a control system. The prime mover, while driving the electricity generator, creates usable heat that can be recovered. In electrical output terms, CHP units sizes range from 1 kWe (kilowatt electric) to over 1000 MWe (megawatt electric). Micro CHP (μ CHP) installations use five different technologies: microturbines, internal combustion engines, Stirling engines, closed cycle steam engines and fuel cells. Theoretically, almost any fuel is suitable for micro and mini CHP for example diesel, LPG or biogas, although for new systems, natural gas currently predominates.

The aim of the article is presentation of the performance of micro cogeneration unit under the real working conditions.

2. Experimental setup

Investigated micro CHP unit is part of a system consisting moreover photothermal and photovoltaic solar system, two heat pumps: compressor and absorption type and mid-term heat accumulator operated in the Solar and Environment Thermal Energy Laboratory in Department of Thermodynamics in Rzeszow University of Technology. The way each device producing electrical and/or thermal energy works is related to determinants resulting from the structure of the heat sinks and their characteristics. System is controlled by the master control system automatically implementing the tasks of acquisition and presentation of a measurement data. A CHP AISIN GECC60A2N with nominal electric power of 6 kW and a thermal output of 11.7 kW (Fig. 1a), is used in the system. It is equipped with three-cylinder internal combustion engine with OHV timing with a capacity of 952 cm³ burning natural gas. Main parameters of CHP unit (Fig. 1b) are presented in Tab. 1.

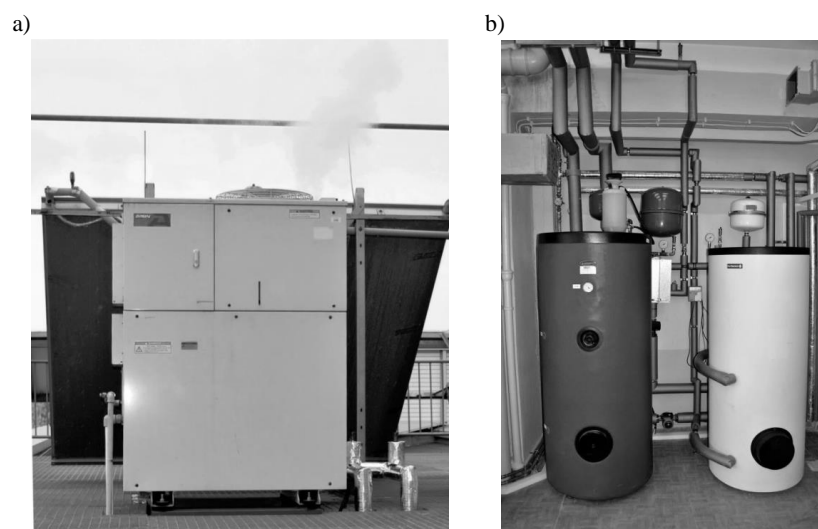


Fig. 1. CHP AISIN GECC60A2N (a) unit installed on roof, CHP heat sinks (b)

Table 1. Cogenerating unit AISIN GECC60A2N [4]

Company	AISIN
Type	GECC60A2N
Rated electrical output	6 kW
Heat Recovery	11.7 kW
Output hot water temperature	60 → 65°C
Fuel gas consumption rate	20.8 kW
Noise level	54 dB
Fuel gas type	Natural gas
Internal combustion engine – Water cooled, Vertical, 4-cycle, 3 cylinders, Lean-burn	
Displacement	952 cm ³
Rated revolution rate	1600-1800 rev/min
Permanent magnet type, 16 poles, synchronous generator	
Efficiency of electricity generation	28.8%
Efficiency of heat generation	56.2% (60 → 65°C)
EUF	85%

Combustion engine used in μ CHP unit drives three-phase synchronous generator. The electrical current is then rectified and subsequently led to the inverter adjusting the parameters of the generated electricity to the requirements of the grid and synchronizing itself with the grid. This allows the connection of cogenerating unit to the building electrical installation. At the output of CHP electricity has parameters used in the Japanese standard low voltage network, which is

100/200 V supplied with 3 wires. This dictates the need for additional external transformer. An integrated control system and air cooler allow the CHP unit production of the electricity independently from the current heat demand and working with a fraction of the nominal power matching the needs of consumers in a separated circuit. Second mode of operation allows running CHP on heat demand – generated electricity is transmitted to common building electric network. Heat is recovered from engine and transported to hot water tanks. The working fluid is propylene glycol solution.

Diagram of the hydraulic system transferring heat from the CHP unit to heat sinks is presented in Fig. 2. Cogeneration heat and power unit can transfer heat to heating system of the building – this is the main goal – or to domestic hot water tank with a capacity of 500 dm³ (Fig. 1b). Glycol solution heated in the cogenerator passes first through the plate heat exchanger (Fig. 2). Transmission of heat in a plate heat exchanger (W) to the boiler water circulation is switched on by setting the three-way valve (Z) in the open position what establish flow of water through it. Heat transfer to the domestic hot water tank is done through two coils connected in series. Boiler water entering the plate heat exchanger is pre-heated by the absorption heat pump to the temperature of 40-45°C. Similarly, domestic water supply tank is pre-heated by solar collectors and compressor heat pump. This solution allows obtaining the nominal temperature parameters for CHP unit which are respectively 65°C and 60°C (Tab. 1). Cogenerator is mounted on the building roof (Fig. 1a), as it is designed to work under atmospheric conditions.

Electrical connection to the building installation is performed by a transformer and junction box containing the fuses and circuit breakers. Two electricity meters PAFAL 12EA5gr have also been used to measure electricity flows. One of them measures the energy delivered by the cogenerator to the network while the second one measures energy necessary to drive the circulation pumps. Mode of cogenerator operation is established on heat demand for. As it is not possible to adjust the thermal power of the cogenerating unit, it has a binary character. Cogenerator can be on – works all the time with a nominal power – or off. The decision to start CHP unit is taken on the basis of the temperatures in the hot water tank (T5), in the domestic water tank and at the return pipe of heating system in the building. Priority of domestic hot water for valve (Z) is implemented. At such control mode cogenerator works all the time with a nominal electrical power equal to 6 kW, and all generated electricity is transmitted to the building electric network and consumed in situ.

Switching on/off the CHP unit and controlling the three-way valve is done via relay output cards placed in Keithley 3706 measurement system acting a role of both the multimeter and the controller. Keithley 3706 measurement system supports totally tens of inputs (mainly resistance thermometers) and several outputs to control pumps and valves in the laboratory ensuring measurement and control of all connected energy subsystems. It is connected to a computer through the

USB bus. Computer runs the control program responsible for acquisition measurement data, making decisions on the basis of the inputs, controlling outputs, and the acquisition and presenting the results.

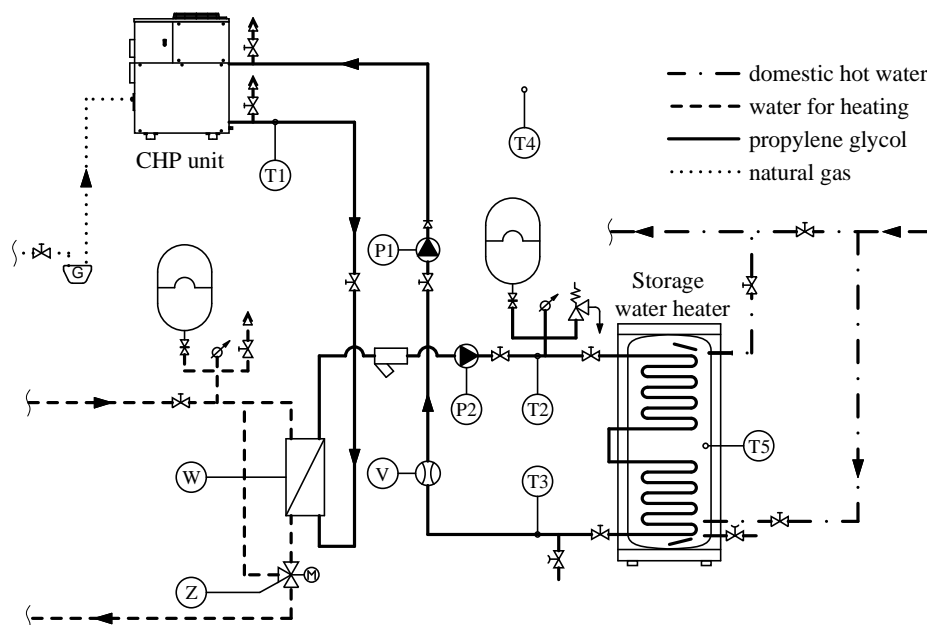


Fig. 2. Diagram of the hydraulic system, G – gas meter, T1 – glycol solution temperature at the CHP outlet, T2 – temperature at the inlet to the hot water tank coils, T3 – temperature at the outlet of the hot water tank coils, T4 – ambient temperature, T5 – temperature in the hot water tank, V – heat meter, W – plate heat exchanger, Z – mixing valve, P1 – force pump, P2 – suction pump

3. Measurements

For the acquisition and presentation of data on the basis of which the characteristic parameters of the cogenerator were determined the system composed of Keithley 3706 measurement system and LabView based application was used. Glycol solution temperature (T1), ambient temperature (T4), and the temperature of the coolant in the internal circuit of CHP units were measured by the CHP integrated electronic controller connected to a computer via RS-232 serial port. Temperature at the inlet and outlet of the domestic hot water tank coils (T2 and T3) and the volume flow of a glycol solution were received from the heat meter Kamstrup MULTICAL 402. The hot water tank temperature (T5) was measured by Keithley multimeter 3706 using a silicon thermistor KTY-81. All these readings were recorded automatically with one minute interval. Readings of electricity meters and gas meter PAFAL 12EA5gr INTERGAZ BK-G4M were made manually every 10 minutes.

The total thermal power of the CHP was calculated using the supply and return temperature (T1) and (T3), but unfortunately, due to the lack of a temperature sensor near the connecting pipe at return to cogenerator, CHP power calculated this way is slightly less than the actual power. This disagreement in CHP thermal power is equal to the thermal losses on the piping between the CHP connecting pipe and the temperature sensor (T3) but hydraulic pipes connecting the cogenerator with the domestic hot water tank are thermally insulated so it can be neglected. For the power calculations specific heat of 40% glycol solution at mean temperature equal to the arithmetic mean (T1) and (T3) were taken [5]. The value of glycol solution density was determined for the return temperature (T3). The amount of heat delivered to the domestic hot water tank was calculated similarly using values of temperature (T2) and (T3).

Electrical efficiency was determined based on the instantaneous electric power cogenerator (gross) and the power actually delivered to the building electric network (net). To calculate the efficiency of the device following formulas were used [3]:

- electrical (electric generation) efficiency:

$$\eta_{el} = \frac{N_{el}}{E_{ch}}, \% \quad (1)$$

- thermal (heat generation) efficiency:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}}{E_{ch}}, \% \quad (2)$$

- total efficiency (energy utilization factor):

$$EUF = \frac{N_{el} + \dot{Q}}{E_{ch}}, \% \quad (3)$$

where: N_{el} – electrical power, kW,

E_{ch} – flux of chemical energy of fuel, kW,

\dot{Q} – thermal power, kW.

Flux of the chemical energy of fuel was calculated using the gas meter INTERGAZ BK-G4M and the lower heating value of natural gas LHV = 35.75 MJ/Nm³ (value given by the PGNiG Laboratory).

The measurements were carried out within a few hours on the day when the full load of the cogenerator had been expected and many hours of continuous work of CHP unit had been anticipated. For the purpose of comparison, the parameters of the system control were set so that on the input and output pipe of the cogenerator values of the temperatures similar to the nominal values given by the pro-

ducer in Tab. 2 were established for the time as longer as possible. The variation of major temperatures characterizing the work of a co-generator during the day is shown in Fig. 3.

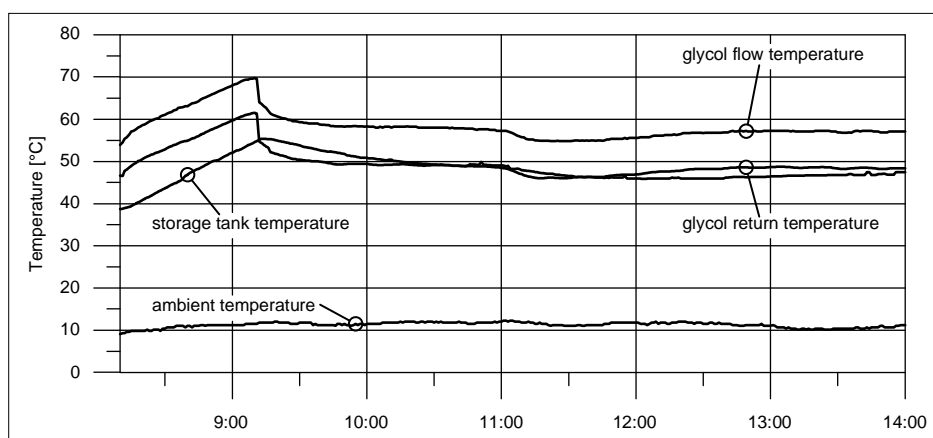


Fig. 3. The course of variability of significant temperatures

The temperature course is fundamentally determined by the morning start of heating the domestic hot water tank which had been cooled down during the night and switching position of the three-way valve (Z). The changes in total thermal power generated by CHP unit and thermal power for the domestic hot water storage tank are shown in Fig. 4. Due to the specificity of the hydraulic system forcing the serial flow through plate heat exchanger (space heating) and coils in the domestic hot water tank, it can be noticed that the hot water tank temporarily works as a heat storage transferring part of stored thermal energy through the cogenerator circuit to the heating system of the building.

Electrical efficiency value does not exhibit significant volatility due to the continuous operation with a nominal power. The power output of the inverter was maintained at 6 kW, and this value was used to determine the gross electrical efficiency, which amounted to approx. 26.3%. The power delivered to the grid, however, was significantly lower and amounted to only 5.32 kW and in consequence net electrical efficiency was lower as shown in Fig. 5. This difference resulted from the need to power circulation pumps (200 W – the result of measurement), internal automation systems and electronics integrated inside cogenerator (210 W – manufacturer's data).

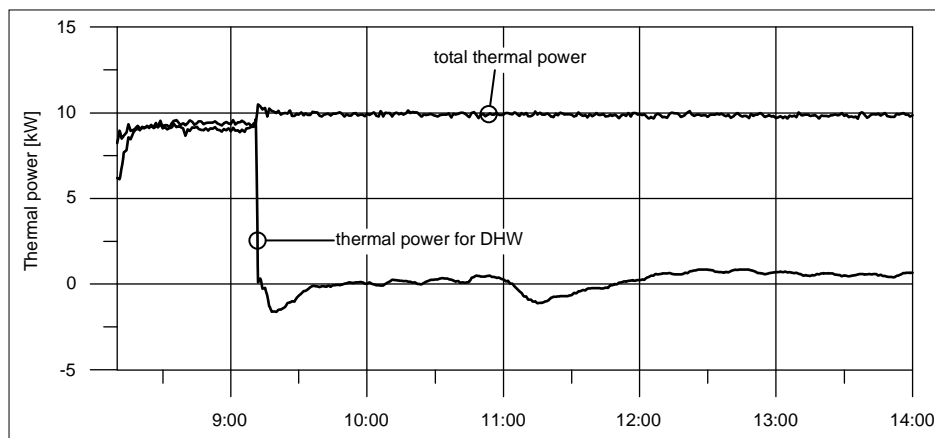


Fig. 4. The course of total thermal power generated by CHP and thermal power transferred to the domestic hot water tank

The electric energy balance closes the unavoidable losses of the transformer whose efficiency on the basis of the above data can be determined at about 95.5%. On the basis of the power returned to the grid, the net electrical efficiency was calculated – approx. 23.3%. The calculated gross electric efficiency is lower than the value specified by the manufacturer of 28.8% due to slightly higher than nominal actual stream of chemical energy of fuel.

Changes of the thermal efficiency are determined by the course of the total heat power generated by CHP unit and its value exceeds 45% only for a very short period. The actual thermal efficiency values are far below the manufacturer's declared value of 56%. The average value of the actual thermal efficiency is about 23% lower than the declared one. Considering the relatively constant consumption of fuel and almost constant electric power, the course of total efficiency (EUF) is determined by the course of heat power variability (Fig. 5). The above reasons cause that also the chemical energy use factor does not reach the declared by the manufacturer value of 85%.

A summary of the basic performance indicators for several cogeneration units in the 5 kW electric power class is presented in Fig. 6. It should be noticed that for devices other than the tested co-generator, the data come from the promotional materials of the producers, therefore they probably correspond to the maximum values achieved only in favorable conditions. However, even in this case, the actual value of the AISIN GECC60A2N cogeneration is one of the best in its class. Significantly lower value of thermal efficiency in comparison to other units can be explained by profiling of the device for electricity generation (even for nominal temperatures the thermal efficiency is only 56%) and conditions of work during the experiment deviating from nominal values.

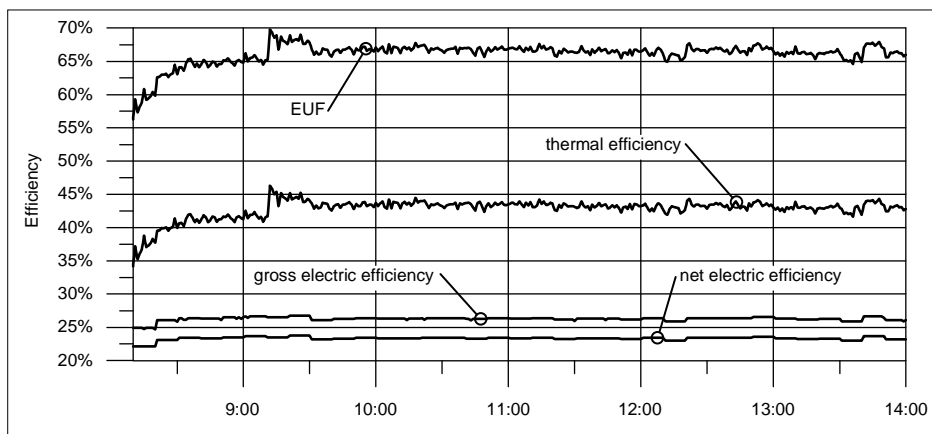


Fig. 5. The electrical, thermal and total efficiency

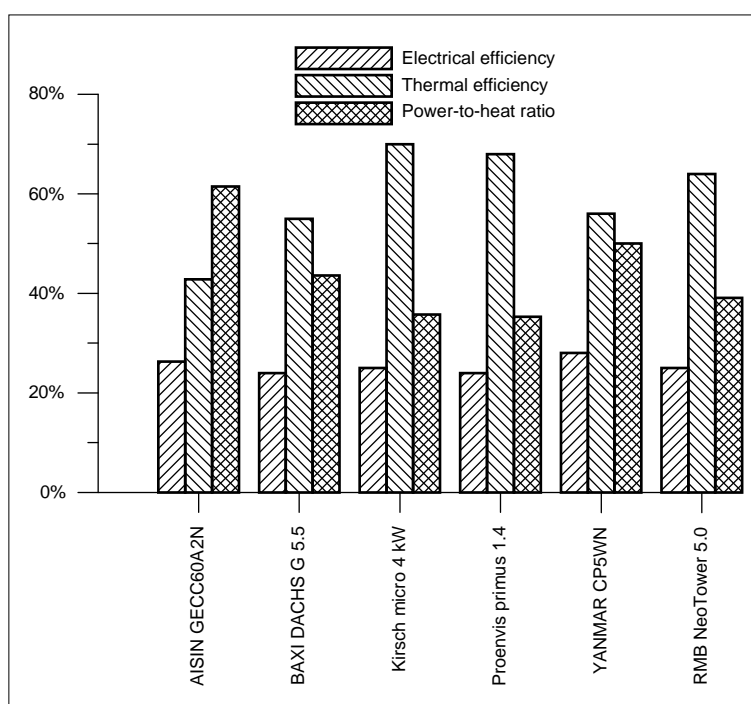


Fig. 6. Comparison of the efficiency and coefficient of association of cogeneration units with the electric power of approx. 5 kW

4. Summary

Gross electrical efficiency equal to 26.3% should be considered satisfactory, as it is higher than the corresponding parameters of most similar units commercially available [6-8] but in real operating conditions without special adjustment of operating parameters is clearly lower than the value 28.8% given by the manufacturer, Table 1. The electrical efficiency can probably be increased by adjusting the fuel consumption closer to level declared by the manufacturer.

The value of thermal efficiency depends largely on the characteristics of the system of heat sinks. In spite of adjusting the operating parameters of the installation in such a way that actual installation should as good as possible establish the assumed temperatures on the CHP supply and return pipe the thermal efficiency value slightly lower than 43% is clearly lower than the value given by the manufacturer – 56%. It can be clearly seen that the manufacturer presents the value that is possible to achieve only in laboratory conditions. In every actual installation, this parameter will be lower and this conclusion probably applies to all manufacturers. The main way for future modification in order to increase thermal efficiency is increasing the flow rate of glycol solution in circulation. For the stability of the installation work and to avoid unwanted heat removal from the domestic hot water tank, the temperature set in it should be as close as possible to the temperature in the boiler water tank.

References

- [1] Gil P., Tychanicz M., Wilk J.: Instalacja skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (μ CHP) – badania eksperymentalne parametrów energetycznych, *Rynek Energii*, 126 (2016) 49-57.
- [2] Gil P., Wilk J.: Instalacja CHP z silnikiem spalinowym zasilanym gazem drzewnym, *ZN PRz Mechanika*, 32 (2015) 217-226.
- [3] Skorek J., Kalina J.: *Gazowe układy kogeneracyjne*, WNT, Warszawa 2005.
- [4] Gas Engine Cogeneration System Interconnection with Power Grid System Type, Operation Manual, GECC60A2 N AISIN Toyota group, 2006.
- [5] 2009 ASHRAE HANDBOOK: Fundamentals.drseg.
- [6] Materiały promocyjne firm: Baxi SenerTec, Kirsch GmbH, Proenvis GmbH & Co, Yanmar, RMB/Energie GmbH.
- [7] Mago P.J., Chamra L.M., Moran A.: Modelling of micro-cooling, heating, and power (micro-CHP) for residential or small commercial building applications, ASME paper IMECE2006-13558, 2006.
- [8] Rosato A., Sibilio S.: Energy performance of a micro-cogeneration device during transient and steady-state operation: experiments and simulations, *Appl. Therm. Eng.*, 52 (2013) 478-491.

SPRAWNOŚĆ MAŁEGO UKŁADU KOGENERACYJNEGO PRACUJĄCEGO W RZECZYWISTYCH WARUNKACH

Streszczenie

W artykule przedstawiono krótkookresowe wyniki pomiarów sprawności małej jednostki kogeneracyjnej AISIN GECC60A2N zaklasyfikowanej do mikrokogeneracji (μ CHP). Sprawność wytwarzania energii elektrycznej i ciepła została przyjęta jako parametry charakteryzujące pracę układu kogeneracyjnego. Rzeczywista sprawność elektryczna osiąga wartość około 23%, a sprawność cieplna – wartość około 44%. Sprawność całkowita osiągnęła 67%. Artykuł zawiera krótki opis układu hydraulicznego i elektrycznego jednostki kogeneracyjnej.

Słowa kluczowe: system μ CHP, sprawność, kogeneracja, energia odnawialna

DOI: 10.7862/rm.2018.39

Otrzymano/received: 17.07.2018

Zaakceptowano/accepted: 24.11.2018

Piotr GIERLAK¹

SINGULARITY ROBUST TRAJECTORY GENERATOR FOR ROBOTIC MANIPULATOR BASED ON GENETIC ALGORITHM WITH DYNAMIC ENCODING OF SOLUTIONS

In this paper a singularity robust trajectory generator for robotic manipulators is presented. The generator contains the procedure of solving the inverse kinematics problem. This issue is defined as an optimization problem, where a genetic algorithm is used for optimizing the fitness function. In order to avoid singularity problem, the generator is based on the direct kinematics problem. The trajectory generator allows to obtain generalized coordinates, velocities and accelerations. Simulation results show that the procedure generates a trajectory of manipulator even in kinematics singularities.

Keywords: inverse kinematics, genetic algorithm, singularity, robotic manipulator, trajectory generator

1. Introduction

One of the basic problems of robotics is generating a desired trajectory of manipulators' motion. The desired trajectory generator contains a procedure of solving the inverse kinematics problem (IKP), which enables to calculate generalized coordinates, velocities and accelerations in the manipulator joint space. All the variables are necessary to control manipulators because they are the desired trajectory of the control system (Fig. 1). However, authors of many publications which deal with IKP often consider only the motion from an initial point to a final point [1, 2] and do not deal with generation of generalized velocity and acceleration of motion. Some algorithms allow to obtain a solution to the singular IKP [3] but they are very complex and applicable to special structures of manipulators only. Moreover, the authors are concerned with the problem of generalized coordinates but they do not consider the problem of generalized velocities and accelerations. In the articles [4, 5] the authors presented methods based on artificial intelligence which allow to obtain generalized coordinates and velocities even in singularities. However, a solution to the problem of generalized accelerations has not been found due to too large computational complexity of the method.

¹ Corresponding author/autor do korespondencji: Piotr Gierlak, Politechnika Rzeszowska, 12 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651854, e-mail: pgierlak@prz.edu.pl

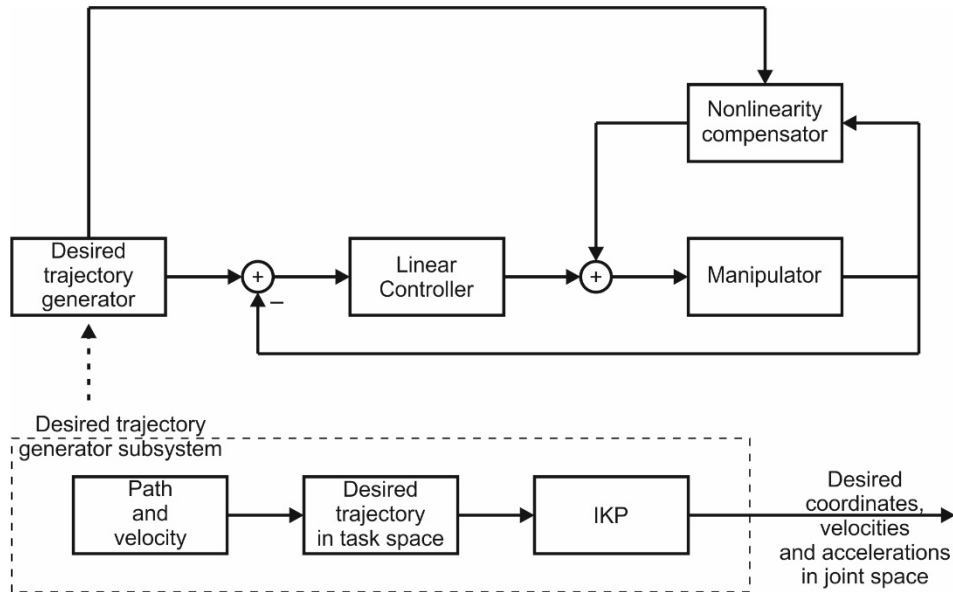


Fig. 1. Schema of manipulator control system with the trajectory generator

Kinematics' equation of manipulator may be written in a general form as follows:

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (1)$$

where: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ – a vector of position and orientation of manipulator's end-effector in a frame of reference, which is connected with task space,

$\mathbf{q} \in \mathbf{R}^m$ – a vector of generalized coordinates,

$\mathbf{f} \in \mathbf{R}^n$ – a vector function, usually non-linear, the structure and parameters of which are known.

The IKP may be symbolically written as:

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

Because $\mathbf{f}(\mathbf{q})$ is non-linear many \mathbf{q} give the same \mathbf{x} , so the equation (2) may have more than one solution. Moreover, the inverse of the function \mathbf{f} may not exist. Typical disadvantages in the IKP solution are presented graphically in Fig. 2.

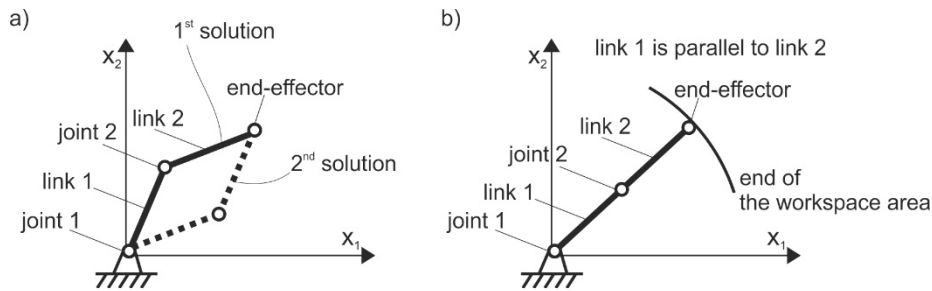


Fig. 2. Typical disadvantages in the IKP solution for a two-link manipulator: a) ambiguous solution, b) singular configuration

There is a classical method used to solve IKP, in which the inverse of a Jacobian matrix is used. Jacobian matrix is defined as

$$J(\mathbf{q}) = \frac{\partial f(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (3)$$

and depending on the dimensions of the joint space and task space it may be a square or rectangular matrix. The IKP solution is based on the numerical solution of the equation

$$\dot{\mathbf{q}} = J^{-1} \dot{\mathbf{x}} \quad (4)$$

While solving IKP by inversion of the Jacobian matrix a problem of singularity may occur. This is strictly a mathematical problem which occurs in configuration \mathbf{q} , in which an order of the Jacobian decreases. The most formal definition of singular configuration is as follows [3]: a configuration \mathbf{q} in which a rank of the geometric Jacobian is less than the dimension of the task space T , which can be written as

$$\text{rank}(\mathbf{J}(\mathbf{q})) < \dim T \quad (5)$$

and is called a singular configuration.

In literature there are many publications which deal with the application of adaptive systems [6, 7] or genetic algorithm (GA) [8, 9] for solving the IKP. Especially the second category of methods allows to avoid the problem of singularities. In a very interesting work [10] the authors used continuous GA for trajectory generating. The procedure is singularity robust but only the problem of generalized coordinates is considered. Renner and Ekárt [11] presented the review of applying GA in path planning. Some of the algorithms are singularity robust but in the articles only the problem of generalized coordinates generation is presented. In recent years, there has been an increase in the number of publications devoted

to the IKP. This conclusion is based on the analysis of the number of articles devoted to IKP topics in the five-year period of 1997-2006 in one of major bases of scientific journals. In the last five years the number of articles has increased by about 30%. This is probably due to the fact that despite many attempts, we have failed to find general robust methods for solving the IKP for different manipulator structures.

In this paper the singularity robust trajectory generator for robotic manipulators is presented. It is singularity robust because it is based on the direct kinematics problem (DKP). In this method there is no overt information about singularities. This trajectory generator allows to obtain generalized coordinates, velocities and accelerations.

2. Optimizing problem formulation

Let us assume that the manipulator will be non-redundant and x describes only the position of the end-effector in the task space $x_1x_2x_3$ (Fig. 3).

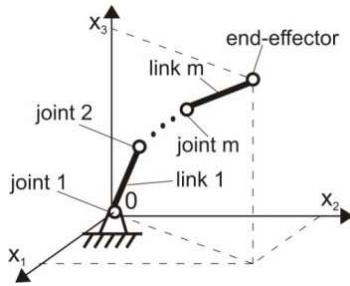


Fig. 3. Schema of manipulator

Projecting the equation (1) onto the axis of the frame of reference yields system of equations which describes the position of manipulator's end-effector. Calculating its i^{th} time derivatives yields the following description of the kinematics:

$$\mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dots, \mathbf{q}^{(i)}), \quad i = 0, 1, \dots, p, \quad p = 3 \quad (6)$$

Equation (6) constitutes a mathematical model of DKP.

The IKP consists in calculating generalized coordinates \mathbf{q} , velocities $\dot{\mathbf{q}}$ and accelerations $\ddot{\mathbf{q}}$ for the desired path and desired velocity of manipulator's end-effector in the task space. For this trajectory and velocity in the task space we may calculate coordinates $\mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$, projections of velocity $\mathbf{x}^{(1)} = \dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3]^T$, acceleration $\mathbf{x}^{(2)} = \ddot{\mathbf{x}} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3]^T$ and acceleration's time derivative $\mathbf{x}^{(3)} = \dddot{\mathbf{x}} = [\dddot{x}_1, \dddot{x}_2, \dddot{x}_3]^T$ onto the axis of the frame of reference that is $\mathbf{x}^{(i)}$. These variables are connected with $\mathbf{q}^{(i)}$ by equation (6).

The IKP is defined as an optimization problem, where a fitness function (error function) for each trajectory point defined by (7) is optimized:

$$E = \sum_{i=0}^p w_i \|\mathbf{x}^{(i)} - \hat{\mathbf{x}}^{(i)}\|^2 \quad (7)$$

where: $\hat{\mathbf{x}}^{(i)}$ – approximation of $\mathbf{x}^{(i)}$,
 $\|\cdot\|$ – Euclidean norm of a given vector,
 w_i – unit value weight.

By using (5) we finally obtain the fitness function in the following form

$$E(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\dot{\mathbf{q}}}, \hat{\ddot{\mathbf{q}}}) = \sum_{i=0}^p w_i \|\mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{f}(\hat{\mathbf{q}}, \dots, \hat{\mathbf{q}}^{(i)})\|^2 \quad (8)$$

where: $\hat{\mathbf{q}}^{(i)}$ – approximation of $\mathbf{q}^{(i)}$.

The optimization is carried out by a procedure based on the GA [11-15]. The GA searches for a minimum of the fitness function towards $\hat{\mathbf{q}}^{(i)}$ and values of $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{q}}, \dots, \hat{\mathbf{q}}^{(i)})$ are calculated from DKP. The presence of terms $\hat{\mathbf{q}}$, $\hat{\dot{\mathbf{q}}}$ and $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$ in the fitness function is natural because the solution of the IKP consists of generalized coordinates, velocities and accelerations. The term $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$ in the fitness function makes that acceleration $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$ is smooth.

The idea of solving the problem results from the following reason. It is a well-known fact that if the desired trajectory in task space is a continuous function of time, the IKP has a solution for each moment of time but it may be ambiguous or non-continuous (Fig. 4). However, it is known that in the physical system continuous changes of coordinates, velocities and accelerations in task space are associated with continuous changes of coordinates, velocities and accelerations in joint space. A physical point cannot have two or more different coordinates, velocities and accelerations at the same time. Furthermore, coordinates, velocities or accelerations of a physical object belong to a bounded set. In other words, non-continuous solutions are caused by a mathematical description, not by specificity of a real object.

According to the above reasoning, there are practically not very large changes (Fig. 4b) of generalized coordinates, velocities and accelerations even in singularities, and solutions of IKP in neighbouring moments of time are similar (Fig. 4a). Therefore, we can assume the highest changes of generalized coordinates, velocities, accelerations and acceleration's time derivatives, i.e.: Δq_{jMAX} , $\Delta \dot{q}_{jMAX}$, $\Delta \ddot{q}_{jMAX}$ and $\Delta \ddot{\ddot{q}}_{jMAX}$ respectively, where $j = 1, 2, \dots, m$ denotes manipulator's joint. Their value may be associated with properties of manipulator or with constraints imposed by the user. Therefore, the GA may be used for searching a solution in a certain neighbourhood of the previous solution only. The neighbourhood is defined by the highest changes in parameters of motion. In the centre of this

region there is the previous solution. It ensures that the trajectory of manipulator will be continuous even in singularities because the solution is constrained (in this method there are not singularities, the expression „singularities” is used symbolically to define a region in which the singularities exists in classical methods). In other words, the GA searches the solution in a certain small region of search, and the region is changing in time and, in a way, moving in the space over the curve that is the appropriate solution. The current encoding of the population of solutions along the trajectory has been referred to by the author as *dynamic encoding*. Compared to *static encoding* performed for the whole task space, the dynamic approach allows for greater accuracy and smoothness of the solutions. This approach allows to obtain the applicable desired trajectory of the manipulator. It should be added that the procedure requires the initial condition for $\hat{\mathbf{q}}$. The initial conditions for $\hat{\mathbf{q}}$, $\hat{\dot{\mathbf{q}}}$ and $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$ will practically be zero. For each trajectory point a trajectory error $e_p(k)$ and a velocity error $e_v(k)$ in task space are defined as:

$$e_p(k) = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| \quad (9)$$

$$e_v(k) = \|\dot{\mathbf{x}}\| - \|\hat{\dot{\mathbf{x}}}\| \quad (10)$$

where k – a number of path points.

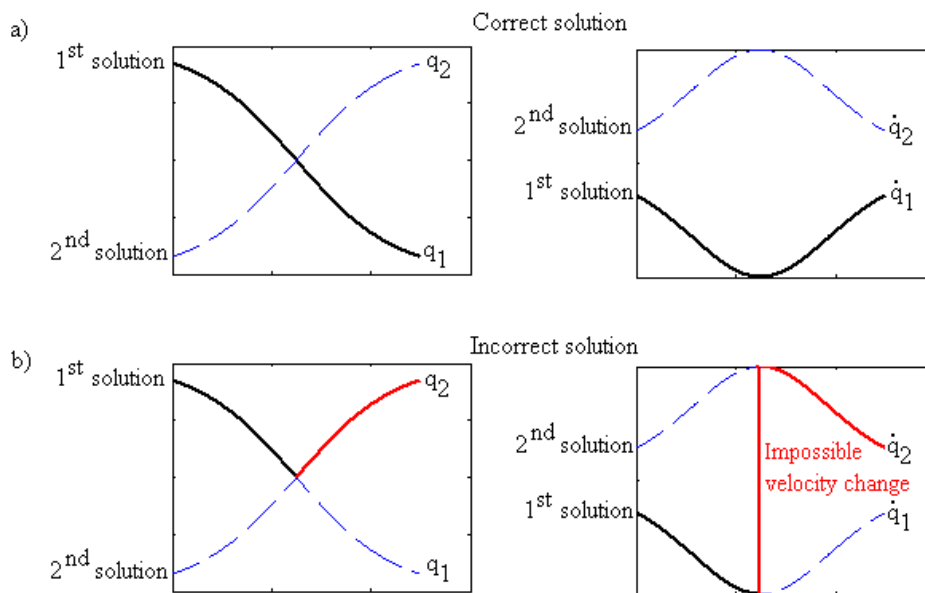


Fig. 4. The idea of IKP solution: a) physically realizable solution, b) physically unrealistic solution

Moreover, quality ratings are defined as:

$$E_P = h\sqrt{\sum_k [e_P(k)]^2} \quad (11)$$

$$E_V = h\sqrt{\sum_k [e_V(k)]^2} \quad (12)$$

where: k – a number of path points,

h – the time step.

This allows to evaluate quality of the solution.

3. Genetic algorithm implementation

In the optimizing problem the GA is used, which contains the following operations: encoding, initialization, evaluation, selection, crossover and mutation. The GA carries out operations on population of chromosomes which consist of genes. For a given path point k , encoding, initialization and evaluation should be carried out. After that, it should be checked whether the fitness is acceptable. If the fitness is sufficient, the result for a given path point is generated. If the fitness is unsatisfactory, selection, crossover and mutation are carried out. Next the evaluation is carried out and the cycle is repeated. Based on the numerical tests one change was made in the basic GA., namely, if the value of the fitness function of the best chromosome was larger than the prescribed threshold value E_T and it did not decrease during the optimization the mutation probability is temporarily increased. It improves optimization results.

In the first operation i.e. encoding, permissible solutions are encoded in the form of vectors Q_j^i which store values of variables $q_j^{(i)}$. For example, if the variable $q_1 \in \langle q_{1MIN}, q_{1MAX} \rangle$, a given set will be digitized with a constant step and the vector will store discrete values from the set. A number of discrete values depends on the number of genes in the chromosome which is allotted to encoding values of a variable. For example, if a number of genes allotted to encoding q_1 is equal to g_1^0 , the vector will store $2^{g_1^0}$ digitized value of q_1 . Values of variables are encoded in chromosomes. The binary system is used for encoding; therefore, each gene may store values 0 or 1. It is shown in Fig. 5.

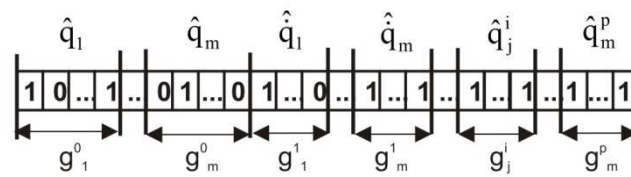


Fig. 5. Manner of encoding

In genes from 1 to g_1^0 the discrete value of a generalized coordinate q_1 is encoded. In the following genes discrete values of generalized coordinates, velocities, accelerations and accelerations' time derivatives are encoded. Therefore, a chromosome is a vector which is a candidate for representation solution of the IKP. For example, if a chain of genes which is allotted to encoding q_1 has a form of |1|0|0|1|1|, then the part of chromosome is associated with the value which is stored in the vector Q_1^0 on position $1 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 = 25$.

A number of genes depends on the desired precision of solution and manipulator's degrees of freedom. Each chromosome has a number of genes described as:

$$g = \sum_{i=0}^p \sum_{j=1}^m g_j^i \quad (13)$$

where: g_j^i – a number of genes allotted to encoding i^{th} time derivatives of i^{th} generalized coordinates.

During initialization an initial population with even number of the chromosome H is generated. Values 0 or 1 are randomly generated and stored in genes.

In the next operation i.e. evaluation, the degree of adaptation to problem is checked. Information about them is taken from the fitness function $E(\hat{q}, \hat{q}, \hat{q}, \hat{q})$. If a value of fitness function for a given chromosome is lower, then the degree of chromosome adaptation to minimization fitness function is larger. With the aim of calculating the value of fitness function, values of generalized coordinates, velocities, accelerations and acceleration's time derivatives should be decoded. Then, these values first should be used for determining $f(\hat{q}, \dots, \hat{q}^{(i)})$ from the DKP, and next the value of fitness function $E(\hat{q}, \hat{q}, \hat{q}, \hat{q})$ for each chromosome should be calculated. A chromosome for which the fitness function has the lowest value is the best chromosome in a given group.

In order to create a new generation of chromosomes, a parental pool is selected from the current population. In order to do that, the tournament selection is used. In this method a sub-group of chromosomes is randomly chosen (with repetition) from population. In the articles [12, 14], sub-groups have 2 or 3 chromosomes, but results of numerical tests show that the procedure converges much faster if the size of the sub-group r is dependent on the size of population H in this way:

$$r = \text{round}(0.6\sqrt{H} + 0.4) \quad (14)$$

Then the chromosomes from the sub-group are evaluated and next one chromosome is selected and added to the parental pool. This selection should be performed H times. Then, the chromosomes from the parental pool are randomly coupled.

New chromosomes are created by using one-point crossover with the probability $P(c) = 1$. A crossover point for each pair of parents is generated randomly. New chromosomes have features like their parents because offsprings are their combination. In this way, the next generation of chromosomes is created from the parental pool. After that, an old population is replaced by a new population. Finally, mutation is carried out. In this operation values stored in the genes change from 1 to 0 or from 0 to 1. The mutation occurs with the probability m .

4. Simulation results

In this chapter kinematics of a two-degrees-of-freedom planar manipulator with rotational joints, which is schematically presented in Fig. 6, is considered. It is assumed that movement took place in the xy plane.

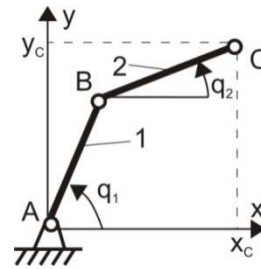


Fig. 6. The two-degrees-of-freedom planar manipulator with rotational joints

Point C is chosen as the particular manipulator's point. It is also referred to as an end-effector. Its coordinates are described by the system of equations:

$$\begin{cases} x_C = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_2 \\ y_C = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_2 \end{cases} \quad (15)$$

where: x_C, y_C – coordinates of the point C,

$l_1 = 0.22$ m, $l_2 = 0.22$ m – lengths of manipulator's link 1 and 2,

q_1, q_2 – joint angles of link 1 and 2 (generalized coordinates).

By calculating time derivatives (15), we obtain equations of velocities, accelerations and accelerations' time derivatives:

$$\begin{cases} \dot{x}_C = -l_1 \dot{q}_1 \sin q_1 - l_2 \dot{q}_2 \sin q_2 \\ \dot{y}_C = l_1 \dot{q}_1 \cos q_1 + l_2 \dot{q}_2 \cos q_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_C = -l_1 \ddot{q}_1 \sin q_1 - l_1 \dot{q}_1^2 \cos q_1 - l_2 \ddot{q}_2 \sin q_2 - l_2 \dot{q}_2^2 \cos q_2 \\ \ddot{y}_C = l_1 \ddot{q}_1 \cos q_1 - l_1 \dot{q}_1^2 \sin q_1 + l_2 \ddot{q}_2 \cos q_2 - l_2 \dot{q}_2^2 \sin q_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_C = l_1 \dot{q}_1^3 \sin q_1 - 3l_1 \dot{q}_1 \ddot{q}_1 \cos q_1 - l_1 \ddot{q}_1 \sin q_1 + \\ \quad + l_2 \dot{q}_2^3 \sin q_2 - 3l_2 \dot{q}_2 \ddot{q}_2 \cos q_2 - l_2 \ddot{q}_2 \sin q_2 \\ \ddot{y}_C = -l_1 \dot{q}_1^3 \cos q_1 - 3l_1 \dot{q}_1 \ddot{q}_1 \sin q_1 + l_1 \ddot{q}_1 \cos q_1 + \\ \quad - l_2 \dot{q}_2^3 \cos q_2 - 3l_2 \dot{q}_2 \ddot{q}_2 \sin q_2 + l_2 \ddot{q}_2 \cos q_2 \end{cases} \quad (18)$$

For this manipulator Jacobian of velocity has the form:

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 & -l_2 \sin q_2 \\ l_1 \cos q_1 & l_2 \cos q_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

whose determinant has the form:

$$\det(J) = l_1 l_2 \sin(q_1 - q_2) \quad (20)$$

Therefore, singularity occurs when $q_1 = q_2 + n\pi$, but practically $n = 0$.

The highest changes of generalized coordinates, velocities, accelerations and accelerations' time derivatives are supposed as $\therefore \Delta q_{jMAX} = \pm 0.005$ rad, $\Delta \dot{q}_{jMAX} = \pm 0.005$ rad/s, $\Delta \ddot{q}_{jMAX} = \pm 0.01$ rad/s², $\Delta \dddot{q}_{jMAX} = \pm 0.05$ rad/s³. Numbers of genes for encoding values of variables are supposed as $g_j^0 = 3$, $g_j^1 = 4$, $g_j^2 = g_j^3 = 5$. We set the value of the population size as $H = 600$, $E_T = 5 \cdot 10^{-8}$, and the value of the mutation probability as $m = 0.05$, which is temporarily increased ten times if fitness function did not decrease during the optimization.

In order to test the method, simulation is performed. We assume generalized coordinates $q_1(t)$ and $q_2(t)$ so generalized velocities, accelerations and accelerations' time derivatives are known. Generalized coordinates are selected in such a way that the case of singularity in the IKP ($q_1 = q_2$ – regions marked by circles in Fig. 7) occurs several times.

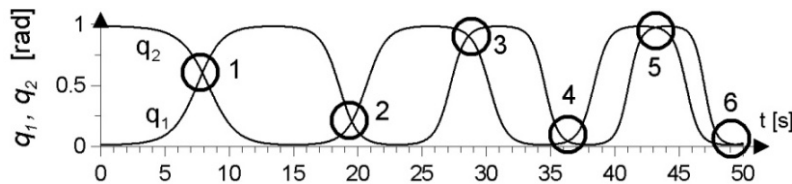


Fig. 7. Generalized coordinates and regions in which there occurs the case $q_1 = q_2$

Based on the relations (15)-(18), $\mathbf{x}^{(i)}$ is calculated, which means that mapping of the trajectories in the joint space into the trajectory in the task space is well known. Thus, the ideal solution to which the solution obtained by the proposed method is compared is known. Then, the IKP was solved. In Fig. 8 corresponding

supposed generalized movement parameters and their approximation calculated by the singularity robust trajectory generator are presented.

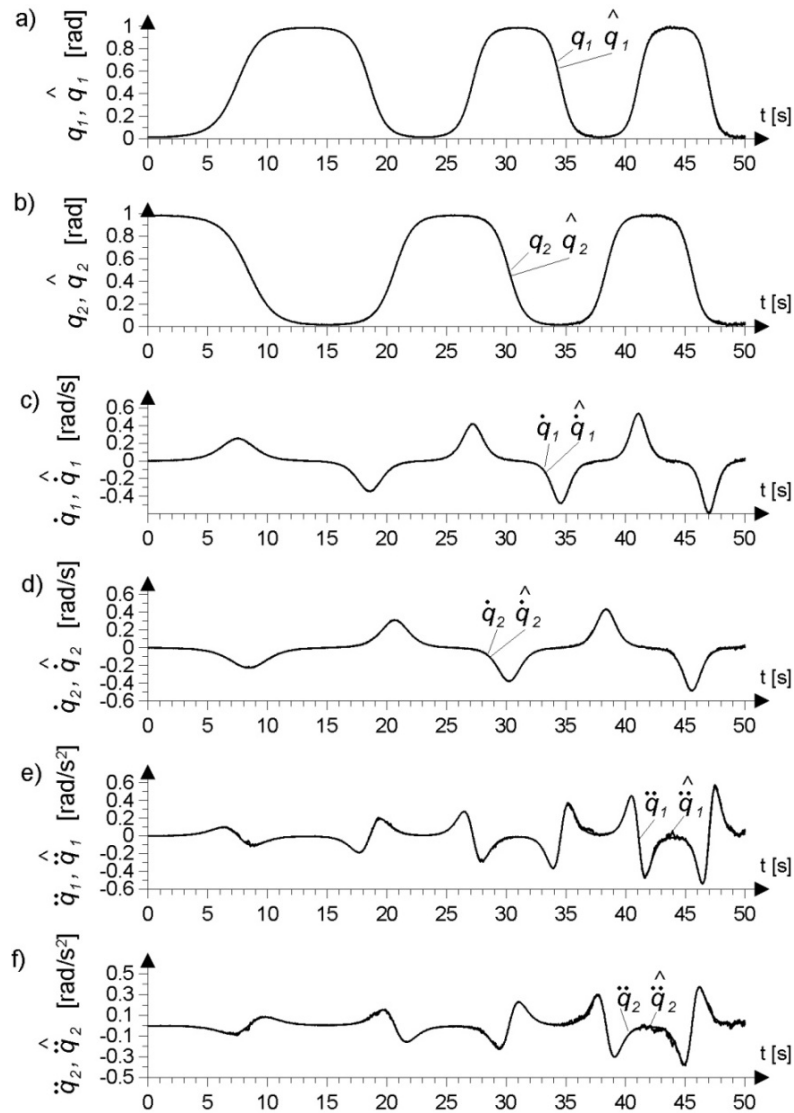


Fig. 8. The supposed generalized movement parameters and their approximation calculated by a trajectory generator

Particularly interesting are approximations of generalized movement parameters in cases when $q_1 \approx q_2$. In singularities 1, 2 and 3 the approximations are very smooth. In singularities 4, 5 and 6 ($t \sim 36$ s, 43 s, 50 s) approximations of generalized accelerations are oscillating. It is caused by very small values of

generalized velocities. When $q_1 \approx q_2$ and generalized velocities are nearly zero, then two possible solutions of IKP are very similar, and the procedure generates the trajectory with small oscillations.

In order to evaluate the solution of IKP, path error $e_p(k)$ (Fig. 9) and velocity error $e_v(k)$ (Fig. 10) are calculated. Path error defined by (9) is smaller than 0.001 m, and velocity error defined by (10) always belongs to the range $(-0.001; 0.001)$ m/s. The quality ratings for $h = 0.01$ have values: $E_p = 1.59 \cdot 10^{-4}$ m, $E_v = 1.14 \cdot 10^{-4}$ m/s. Such errors and the quality of solution are acceptable and this given trajectory may be used in the movement control of manipulator.

In the case of practical applications of a trajectory generator, a slightly different approach than the one presented in subchapter 4.1. *Test of trajectory generator* is required. In practice, a characteristic point C which belongs to the manipulator end-effector is chosen and it is defined how it should move within the workspace. For this purpose, the trajectory of the point and its velocity in the workspace is determined. Then, with the use of kinematic equations, the coordinates of the point C with regard to the frame of reference and its subsequent derivatives, that is, $x_C, y_C, \dot{x}_C, \dot{y}_C, \ddot{x}_C, \ddot{y}_C, \ddot{\ddot{x}}_C$ and $\ddot{\ddot{y}}_C$ are set. The final stage is to produce the IKP solution with the use of a trajectory generator.

Let us assume the path of the point C for the manipulator shown in Fig. 7 be

$$f_C(x_C, y_C) = 0 \quad (21)$$

The velocity of the point C in the xy reference frame put in vector notation is

$$\mathbf{v}_C = \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \end{bmatrix} \quad (22)$$

whereas its value is defined by the equation:

$$v_C = \sqrt{(\dot{x}_C)^2 + (\dot{y}_C)^2} \quad (23)$$

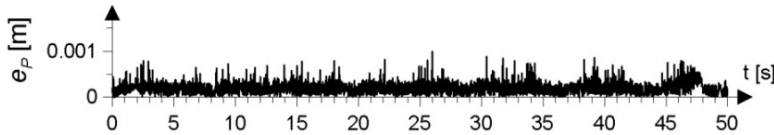


Fig. 9. Path error of the point C

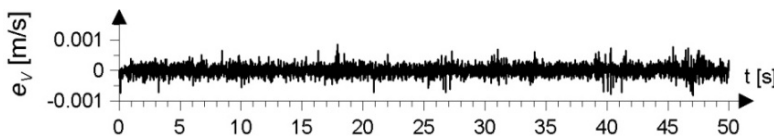


Fig. 10. Velocity error of the point C

In order to fulfil the velocity of the point C, the velocity vector must be tangent to the trajectory, thus the following equation must be satisfied:

$$\text{grad}f_C \mathbf{v}_C = 0 \quad (24)$$

Upon taking into consideration the equations (21) and (22), it shall have the form of:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_C}{\partial x_C} & \frac{\partial f_C}{\partial y_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{y}_C \end{bmatrix} = 0 \quad (25)$$

By determining $f_x = \frac{\partial f_C}{\partial x_C}$ i $f_y = \frac{\partial f_C}{\partial y_C}$ the equation:

$$f_x \dot{x}_C + f_y \dot{y}_C = 0 \quad (26)$$

was obtained. By solving the equation systems (23) and (26), the equation:

$$\begin{cases} \dot{x}_C = \mp \frac{f_y v_C}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}} \\ \dot{y}_C = \pm \frac{f_x v_C}{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}} \end{cases} \quad (27)$$

was obtained. Solving the system of differential equations (27) enables to determine how velocity vector components and the coordinates of the point C change. Moreover, it enables to determine how higher derivatives of motion parameters for the defined path and velocity values of this point change.

In the following example, a trajectory in the form of an ellipse is assumed:

$$f_C = \left(\frac{x_C - x_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{y_C - y_0}{b}\right)^2 - 1 = 0 \quad (28)$$

for which let $f_x = 2 \frac{x_C - x_0}{a^2}$ and $f_y = 2 \frac{y_C - y_0}{b^2}$, and it is assumed that $x_0 = 0$, $y_0 = 0.22$, $a = 0.16$, $b = 0.22$. The velocity value was determined as:

$$v_C = \frac{v_{Cmax}}{1 + \exp[-c(t-5)]} - \frac{v_{Cmax}}{1 + \exp[-c(t-25)]} \quad (29)$$

where: $v_{Cmax} = 0.3$ m/s – the maximum motion velocity,

$c = 3$ s⁻¹ – constant responsible for the velocity curve gradient during accelerating and stopping.

Having assumed the initial conditions of the trajectory as $x_C(0) = 0.16$ m and $y_C(0) = 0.22$ m, the equation system (27) was solved, considering the

equations (28) and (29). As a result, the kinematic motion parameters of the point C, that is, x_C , y_C , \dot{x}_C , \dot{y}_C , \ddot{x}_C , \ddot{y}_C , \dddot{x}_C and \dddot{y}_C (Fig. 11a-d) were obtained. Then, by using the afore-discussed trajectory generator, which uses the kinematic equations (15)-(18), the IKP solution was obtained (Fig. 11f-h).

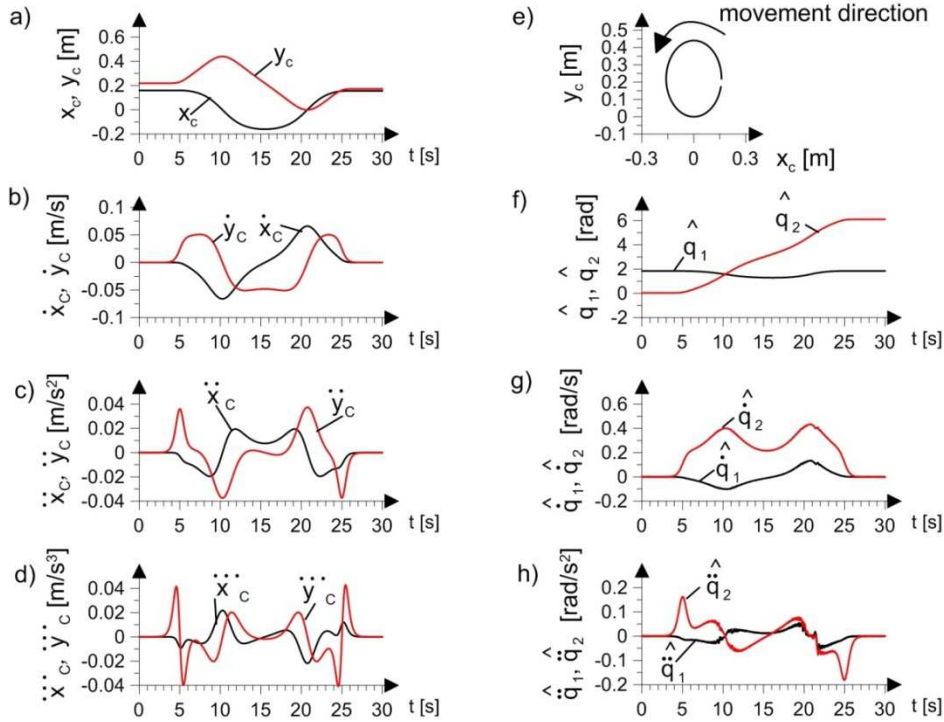


Fig. 11. The IKP solution with the use of a trajectory generator: a-d) kinematic motion parameters of the point C, e) point C path, f-h) the IKP solution

The chart in Fig. 11f shows that around 10 s we have situation when the angles of rotation of the manipulator joints are equal. This means that in the case of the classical approach, kinematic singularities would occur, whereas due to the trajectory generator which is free from singularities, arriving at the IKP solution became possible.

5. Conclusions

In this paper a trajectory generator for robotic manipulators is presented. This generator does not need the inverse of a Jacobian matrix, so it is singularity robust. Continuity of trajectory is assured by limiting changes of generalized coordinates, velocities, accelerations and accelerations' time derivatives. The IPK is formulated as an optimization problem because in this approach we may use the DKP

only. By limiting the region in which the optimization is carried out, the time of solving the IKP decreases.

The theoretical discussion is confirmed by an example in which generalized coordinates, velocities and accelerations of a two-degrees-of-freedom manipulator are generated correctly even in singularities. To the authors' knowledge, it is the first singularity robust trajectory generation algorithm that can be applied to determine generalized coordinates, velocities and accelerations of the manipulator in singularities.

This algorithm may easily be applied to IKP of other manipulators, also redundant manipulators. In such cases the fitness function should be appropriately defined.

References

- [1] de la Cueva V., Ramos F.: Cooperative genetic algorithms: A new approach to solve the path planning problem for cooperative robotic manipulators sharing the same work space, Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conf. Intell Robots and Sys., 1998.
- [2] Pires E.J.S., Oliveira P.B.M., Machado J.A.T.: Manipulator trajectory planning using a MOEA, Appl. Soft. Comput., 7 (2007) 659-667.
- [3] Dułęba I., Hossa R., Mazur A., Muszyński R., Tchoń K.: Manipulatory i roboty mobilne: modele, planowanie ruchu, sterowanie, PLJ, Warszawa 2000.
- [4] Żylski W., Gierlak P.: Generator zadanej trajektorii ruchu obiektu dynamicznego, ZN PRz, seria: Mechanika, 74 (2008) 421-432.
- [5] Żylski W., Gierlak P.: Zadanie odwrotne kinematyki manipulatora w ujęciu Rozszerzonej Mapy Kohonena, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria: Elektronika, 166 (2008) 495-504.
- [6] Hasan A.T., Hamouda A.M.S., Ismail N., Al-Assadi H.M.A.A.: An adaptive-learning algorithm to solve the inverse kinematics problem of a 6 DOF serial robot manipulator, Adv. Eng. Softw., 37 (2006) 432-438.
- [7] Vargas L.V., Leite A.C., Costa R.R.: Overcoming kinematic singularities with the filtered inverse approach, IFAC Proc. Vols., 47 (2014) 8496-8502.
- [8] El-Sherbiny A., Elhosseini M.A., Haikal A.Y.: A comparative study of soft computing methods to solve inverse kinematics problem, Ain Shams Eng. J., 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.001>
- [9] Köker R.: A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization, Inf. Sci., 222 (2013) 528-543.
- [10] Abo-Hammour Z.S., Mirza N.M., Mirza S.M., Arif M.: Cartesian path generation of robot manipulators using continuous genetic algorithms, Rob. Auton. Syst, 41 (2002) 179-223.
- [11] Renner G., Ekárt A.: Genetic algorithms in computer aided design, Comput. Aided Des., 35 (2003) 709-726.
- [12] Chakraborty M., Chakraborty U.K.: An analysis of linear ranking and binary tournament selection in genetic algorithms, Proc. ICICS'9 1997.

- [13] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, PWN, Warszawa 1999.
- [14] Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji, PWN, Warszawa 2005.
- [15] Zhong J., Hu X., Gu M., Zhang J.: Comparison of performance between different selection strategies on simple genetic algorithms, Proc. CIMCA-IAWTIC'05, 2005.

ODPORNY NA OSOBLIWOŚCI GENERATOR TRAJEKTORII ROBOTA MANIPULACYJNEGO OPIERAJĄCY SIĘ NA ALGORYTMIE GENETYCZNYM Z DYNAMICZNYM KODOWANIEM ROZWIĄZAŃ

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono generator trajektorii robota manipulacyjnego odporny na osobliwości kinematyki. Generator zawiera procedurę rozwiązywania zadania odwrotnego kinematyki. Problem ten jest zdefiniowany jako problem optymalizacyjny, w którym algorytm genetyczny służy do optymalizacji funkcji dopasowania opierającej się na błędzie rozwiązania zadania. Aby wyeliminować problem osobliwości, generator wykorzystuje zadanie proste kinematyki. Generator trajektorii umożliwia uzyskanie uogólnionych współrzędnych, prędkości i przyspieszeń manipulatora. Wyniki symulacji wskazują, że opracowana procedura generuje trajektorię manipulatora nawet w przypadku wystąpienia osobliwości kinematyki.

Słowa kluczowe: zadanie odwrotne kinematyki, algorytm genetyczny, osobliwości, robot manipulacyjny, generator trajektorii

DOI: 10.7862/rm.2018.40

Otrzymano/received: 7.06.2018

Zaakceptowano/accepted: 25.09.2018

Adam KALINA¹

Aleksander MAZURKOW²

Stanisław WARCHOŁ³

WYZNACZANIE LUZU OBWODOWEGO W ZAZĘBIENIU KÓŁ PRZEKŁADNI FAŁOWEJ

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania luzu obwodowego dla przyjętego zarysu ewolwentowego koła podatnego i sztywnego przekładni fałowej. W pierwszej części pracy scharakteryzowano parametry geometryczne przekładni. Następnie dla współpracujących kół zębatach zdefiniowano luz obwodowy, przedstawiono założenia do modelu matematycznego wyznaczania luzu obwodowego, omówiono algorytm metody rozwiązania równań modelu matematycznego. We wnioskach zawarto wyniki badań symulacyjnych. Opracowana metoda zostanie wykorzystana w dalszych badaniach do określenia w strefie kontaktu zazębiających się kół rozkładu nacisków i odkształceń.

Słowa kluczowe: przekładnia fałowa, zazębienie, koło sztywne, koło podatne, luz obwodowy

1. Wprowadzenie

Przekładnie fałowe ze względu na specyfikę pracy stanowią dla konstruktorów złożone zagadnienie do realizacji [1]. Jednym z problemów w zapewnieniu poprawnej pracy pary zazębiających się kół: podatnego i sztywnego jest dobór geometrii wieńców wraz z odpowiadającymi im luzami. W niniejszej publikacji przedstawiono metodę wyznaczania luzu obwodowego. Do badań przyjęto koła zębata o zarysie ewolwentowym. Koło podatne ma zarys wypukły, koło sztywne natomiast – zarys wklęsły.

2. Droga względna zęba koła podatnego

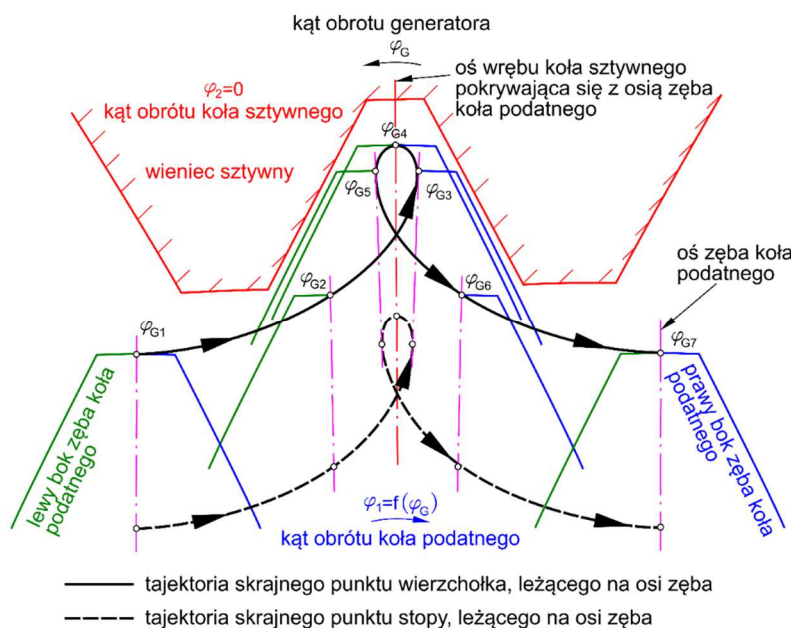
W pierwszym etapie wyznaczania luzu obwodowego niezbędne jest ustalenie względnego położenia współpracujących wieńców koła sztywnego i podatnego. W pracy przyjęto, że wspomniane położenia określają trajektorie dwóch punktów wyznaczających oś zęba. Punkty te leżą kolejno na przecięciu osi zęba z okręgami

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Adam Kalina, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 7432398, e-mail: akalina@prz.edu.pl

² Aleksander Mazurkow, Politechnika Rzeszowska, e-mail: almaz@prz.edu.pl

³ Stanisław Warchoł, Politechnika Rzeszowska, e-mail: warchols@prz.edu.pl

stóp i głów. Dokładny opis ich wyznaczania w zależności od konstrukcji przekładni przedstawiono w pracach [2, 3]. Położenia zęba względem wrębu określa się, obracając i przesuując punkty wyznaczające oś zęba. Wyznaczanie trajektorii omawianych punktów opisano szczegółowo w artykule [4]. Z kolei w publikacji [5] omówiono zasady modyfikacji trajektorii przemieszczania się koła podatnego przez zmianę parametru w_0 – maksymalnego odkształcenia promieniowego. Na rysunku 1. pokazano jedną z możliwych do uzyskania dróg względnych położenia zęba koła podatnego przekładni falowej względem nieruchomego koła sztywnego.



Rys. 1. Droga względna zęba koła podatnego

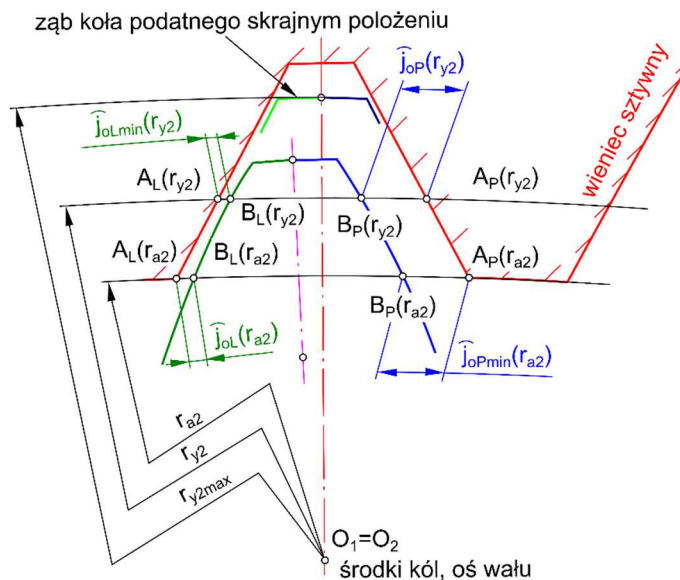
Fig. 1. Trajectory of flex spline tooth

3. Definicja i metoda wyznaczania luzu obwodowego

Podczas współpracy z wrębem koła sztywnego ząb koła podatnego obraca się oraz przemieszcza na kierunku promieniowym. W zależności od obciążenia przekładni, kształtu zarysu oraz trajektorii może dojść do współpracy lewego boku zęba koła podatnego tylko z lewym bokiem wrębu koła sztywnego lub lewego boku zęba koła podatnego z lewym bokiem wrębu koła sztywnego i prawego boku zęba koła podatnego z prawym bokiem wrębu koła sztywnego (rys. 1.).

Dla każdego kąta obrotu generatora φ_G oraz położenia zęba względem wrębu konieczne jest zatem zapewnienie odpowiedniej wartości luzu obwodowego \hat{f}_0 po obu stronach osi zęba (rys. 2.). W przypadku przekładni nieobciążonej wartość

luzu powinna być zawsze dodatnia. Dla przekładni obciążonej luz może być równy zeru lub większy. W pracy przyjęto, że luz obwodowy lewostronny \widehat{J}_{oL} będzie łukiem opisanym przez promień r_{y2} i kąt $\Delta\varepsilon_L = \angle(A_L, O_1, B_L)$. Punkt A_L leży na przecięciu okręgu o promieniu r_{y2} z lewym zarysem wrębu koła sztywnego, B_L – na przecięciu okręgu o promieniu r_{y2} z lewym zarysem zęba koła podatnego (rys. 3.). Analogicznie jest definiowany luz prawostronny \widehat{J}_{oP} .



Rys. 2. Luzy obwodowe

Fig. 2. Side Backlashes

W celu zbadania współpracy zęba koła podatnego z wrębem koła sztywnego należy na całej czynnej wysokości zęba koła sztywnego ($r_{y2} = r_{a2} - r_{y2max}$) wyznaczyć luzy obwodowe \widehat{J}_o w każdym położeniu generatora. W kolejnym etapie badań dla każdego położenia generatora ze zbioru wartości luzów obwodowych wyznaczono wartość minimalną.

Na rysunku 4. pokazano algorytm metody obliczeń luzów obwodowych: \widehat{J}_{oL} – lewostronnego i \widehat{J}_{oP} – prawostronnego. Luzy obwodowe \widehat{J}_{oL} i \widehat{J}_{oP} obliczano ze wzorów (1)-(4).

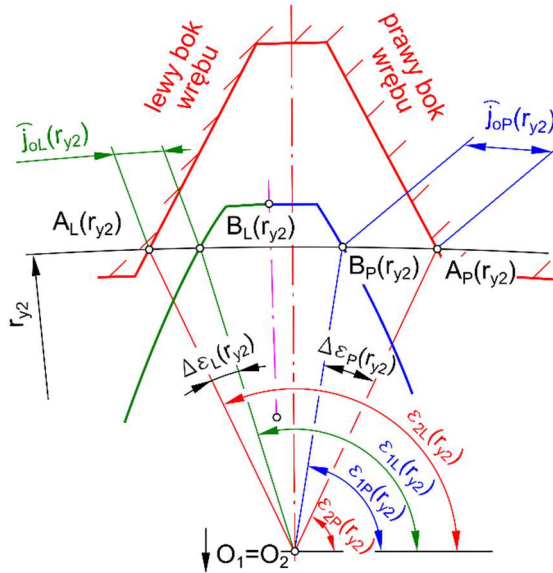
$$\widehat{J}_{oL} = \Delta\varepsilon_L \cdot r_{y2} \quad (1)$$

$$\widehat{J}_{oP} = \Delta\varepsilon_P \cdot r_{y2} \quad (2)$$

gdzie:

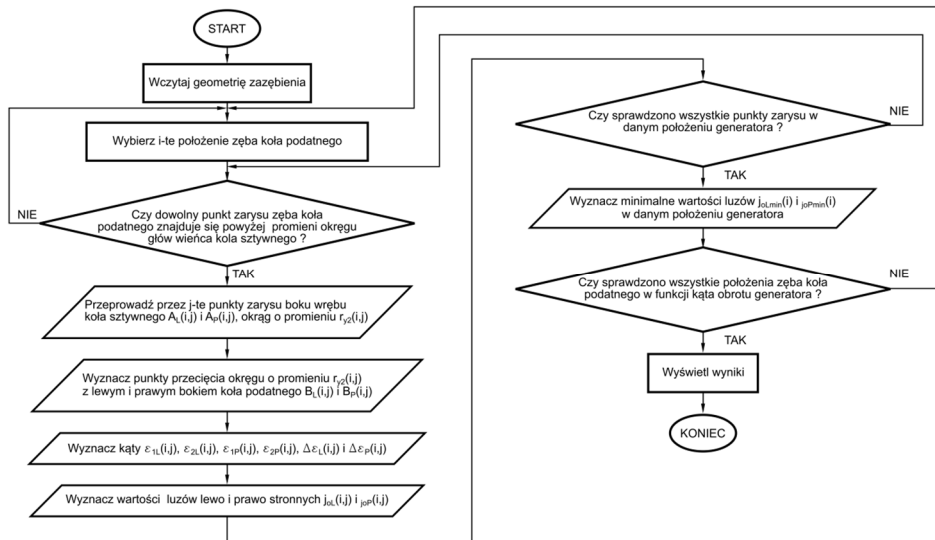
$$\Delta\varepsilon_L = \varepsilon_{2L} - \varepsilon_{1L}, \text{rad} \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon_P = \varepsilon_{1P} - \varepsilon_{2P}, \text{rad} \quad (4)$$



Rys. 3. Obliczanie luzów \hat{J}_{oL} i \hat{J}_{oP} , gdzie ε – kąt zawarty między prostą przechodzącą przez punkt zarysu zęba (1) i wrębu (2) po lewej (L) lub prawej (P) stronie; kąty ε wyrażone w radianach

Fig. 3. Calculation of side backlashes, where: ε – the angle between the line passing through the point of profile of flexspline's (1) and circular spline's tooth (2) from left (L) or right (P) side; angles ε are expressed in radians



Rys. 4. Algorytm metody obliczania wartości luzów obwodowych

Fig. 4. Algorithm of the calculation method of side backlashes

4. Analiza wyników badań

W tabeli 1. przedstawiono podstawowe parametry wieńców zębatych badanej przekładni falowej z generatorem krzywkowym. Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

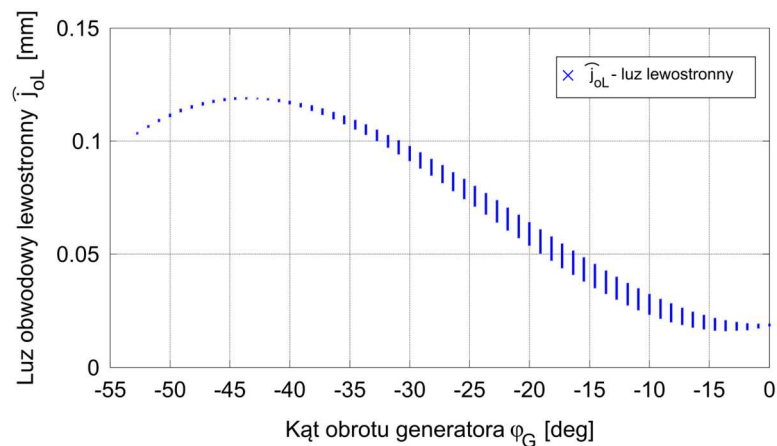
- wieniec koła sztywnego jest nieruchomy,
- w chwili początkowej dla kąta obrotu generatora $\varphi_G = 0^\circ$, ząb koła podatnego znajduje się we wrębie koła sztywnego w skrajnym położeniu, oś wrębu pokrywa się z osią zęba,
- kąt obrotu generatora zmienia się w zakresie $\varphi_G = \langle -90^\circ, 0^\circ \rangle$ – ujemna wartość kąta wynika z tego, że generator obraca się w przeciwnym kierunku do kierunku obrotu wieńca podatnego,
- w przypadku gdy ząb koła podatnego znajduje się poniżej średnicy $d_{a2} = 2r_{a2}$, wartość luzu przyjmuje wartość $\widehat{f}_o = 1$,
- obliczenia przeprowadzono dla 100 położeń generatora,
- do badań przyjęto tylko punkty leżące na bokach zęba i wrębu. Nie analizowano punktów opisujących łuk wierzchołka oraz dno wrębu,
- każdy bok (wrębu i zęba) podzielono na 110 punktów.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wartości luzów \widehat{f}_{oL} i \widehat{f}_{oP} w funkcji kąta obrotu generatora φ_G oraz promienia r_{y2} . Wartości tych luzów przedstawiono na rys. 5. i 6. Na rysunku 7. przedstawiono w powiększeniu uzyskane wartości luzów lewostronnych dla kąta obrotu generatora $\varphi_G = 36,3636^\circ$. Na rysunku 8. przedstawiono wartości minimalnych luzów obwodowych lewo- i prawostronnych $\widehat{f}_{oL \min}$ i $\widehat{f}_{oP \min}$ w funkcji obrotu generatora φ_G .

Tabela 1. Parametry geometryczne wieńców zębatych o zarysie ewolwentowym

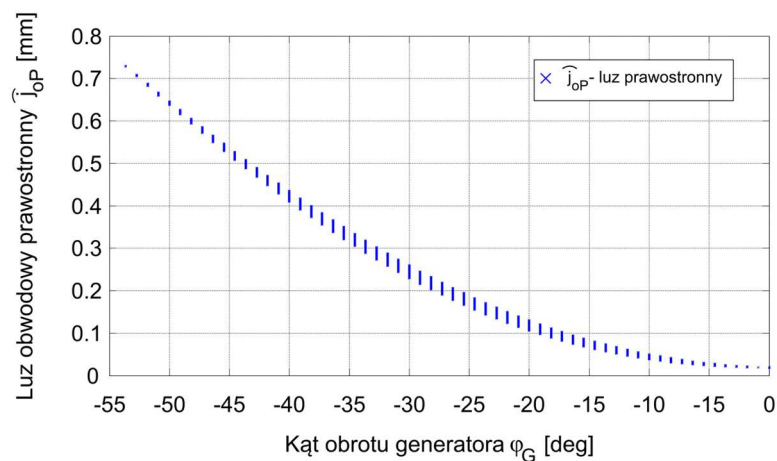
Table 1. Geometrical parameters of gear rims with involute outline

Wieniec	Parametr	Oznaczenie	Wartość
Koła podatnego	Promień okręgu podziałowego	r_1	39,6 mm
	Promień okręgu stóp	r_{f1}	40,824 mm
	Promień okręgu głów	r_{a1}	41,858 mm
	Współczynnik przesunięcia zarysu	x_1	3,39
	Maksymalne odkształcenie promieniowe korpusu	w_0	0,64 mm
	Promień nieodkształconej warstwy obojętnej	R	40,412 mm
Koła sztywnego	Promień okręgu podziałowego	r_2	40,2 mm
	Promień okręgu stóp	r_{f2}	42,7681 mm
	Promień okręgu głów	r_{a2}	41,658 mm
	Współczynnik przesunięcia zarysu	x_2	3,55



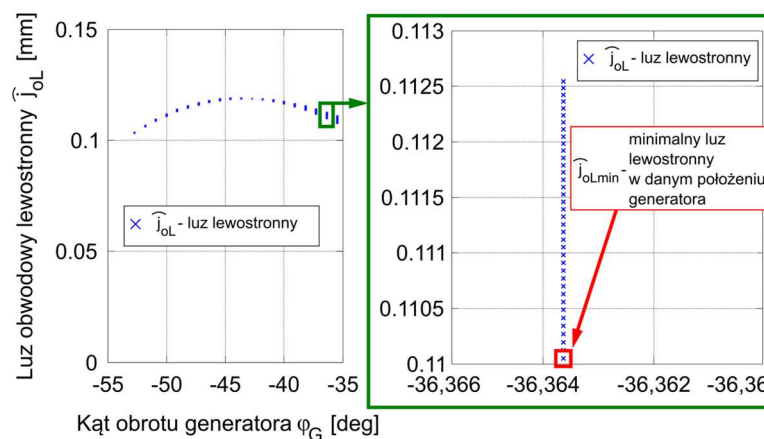
Rys. 5. Wartości luzu obwodowego lewostronnego \widehat{j}_{oL} w funkcji kąta obrotu generatora φ_G i promienia r_{y2}

Fig. 5. Side backlash from the left side in the function of angle of rotation of wave generator φ_G and radius r_{y2}



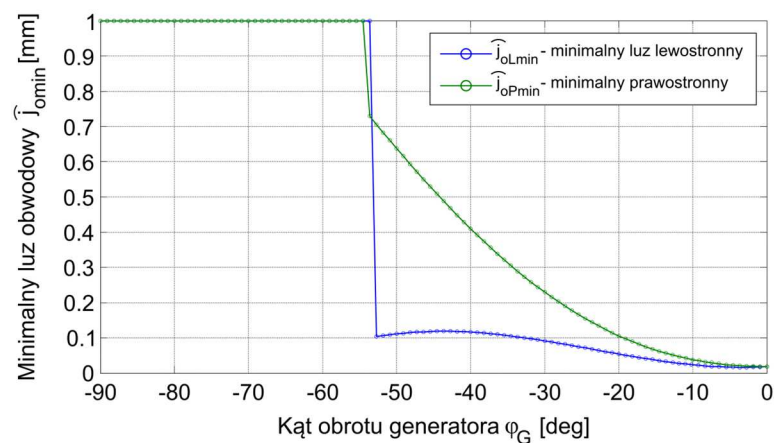
Rys. 6. Wartości luzu obwodowego prawostronnego \widehat{j}_{oP} w funkcji kąta obrotu generatora φ_G i promienia r_{y2}

Fig. 6. Side backlash from the right side in the function of angle of rotation of wave generator φ_G and radius r_{y2}



Rys. 7. Wartości luzu obwodowego lewostronnego \widehat{J}_{oL} w wybranym położeniu generatora oraz określenie luzu minimalnego $\widehat{J}_{oL, min}$ w tym położeniu

Fig. 7. Side backlash from the left side \widehat{J}_{oL} in the selected position of wave generator and minimum value of side backlash from the left side $\widehat{J}_{oL, min}$ for this position of wave generator



Rys. 8. Minimalne wartości luzów $\widehat{J}_{oL, min}$ i $\widehat{J}_{oP, min}$ w funkcji kąta obrotu generatora φ_G

Fig. 8. Minimal values of side backlashes $\widehat{J}_{oL, min}$ i $\widehat{J}_{oP, min}$ in the function of of the angle of rotation of wave generator φ_G

5. Wnioski końcowe i podsumowanie

Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- ząb koła podatnego wychodzi z przestrzeni wrębu międzyzębnego przy kącie $\varphi_G \approx -53,5^\circ$. Warto jednak zauważyć, że lewy bok zęba wyjdzie z tej przestrzeni wcześniej ze względu na pochylenie zęba koła podatnego w kierunku ruchu,
- najmniejsze wartości luzu obwodowe przyjmują dla kątów $\varphi_G = \langle -20^\circ, 0^\circ \rangle$,
- luz $\widehat{J_{oP} min}$ rośnie wraz ze wzrostem wartości bezwzględnej kąta obrotu generatora φ_G ,
- luz $\widehat{J_{oL} min}$ ma przebieg zbliżony do sinusoidy, przyjmując swoje maksimum $\max\{\widehat{J_{oL} min}\} = 0,1183$ mm dla $\varphi_G \approx -43^\circ$, z kolei minimum $\min\{\widehat{J_{oL} min}\} = 0,01639$ mm dla kąta $\varphi_G \approx -3,64^\circ$,
- wartość luzu można modyfikować, zmieniając kształt zarysu zębów lub kształt krzywki. Zmienia się w tym przypadku wartość parametru w_0 lub funkcja opisująca geometrię krzywki.

Literatura

- [1] Kalina A., Mazurkow A., Warchoł S.: Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych przekładni falowych, Przegląd Mechaniczny, 2 (2017) 45-48.
- [2] Mijał M.: Synteza falowych przekładni zębatych. Zagadnienia konstrukcyjno-technologiczne, OW PRZ, Rzeszów 1999.
- [3] Ostapski W.: Przekładnie falowe, OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
- [4] Kalina A., Mazurkow A., Warchoł S.: Geometria zazębienia kół przekładni falowej, Stal Metale Nowe Technol., 1 (2018) 94-97.
- [5] Kalina A., Mazurkow A., Warchoł S.: Trajektoria przemieszczeń zęba koła podatnego falowej przekładni z eliptycznym generatorem krzywkowym, Przegląd Mechaniczny, 11 (2017) 35-39.

CALCULATION METHOD OF SIDE BACKLASH IN MESHING GEARS OF A HARMONIC GEAR

Summary

The article contains information about the calculation method of side backlash for harmonic gear with involute profile. The first part of the paper contains a description of main geometric parameters of this kind of gear. After that a definition of side backlashes was defined with the main

foundations of mathematical model of the method with algorithm. The summary contains conclusions. The presented method will be used in further research of tooth contact.

Keywords: wave transmission, meshing, rigid wheel, flexible wheel, circumferential play

DOI: 10.7862/rm.2018.41

Otrzymano/received: 27.03.2018

Zaakceptowano/accepted: 25.10.2018

Stanisław NOGA¹

DRGANIA GIĘTNE W PŁASZCZYŹNIE KÓŁ MODELOWANYCH UKŁADAMI PIERŚCIENIOWYMI Z WARSTWĄ SPRĘŻYSTĄ

W pracy omówiono drgania giętne w płaszczyźnie kół modelowanych układami pierścieniowymi z podłożem sprężystym typu Winklera. Zaprezentowano równania drgań własnych modeli pierścieni Timoshenki i Bernoulliego z warstwą sprężystą typu Winklera. W równaniach uwzględniono zaproponowany trzyparametrowy model warstwy sprężystej. Następnie wyprowadzono równanie częstości własnych wymienionych modeli oraz podano równanie form własnych. Zasadnicza część pracy dotyczy oceny wpływu głębokości pierścienia na wyniki rozwiązań analitycznych otrzymanych z proponowanych modeli. W procesie dostrajania współczynników modeli analitycznych wykorzystano wyniki rozwiązań numerycznych opartych na metodzie elementów skończonych. Otrzymane wyniki symulacji zweryfikowano doświadczalnie na wybranych obiektach. Ustalono przypadki pierścieni, dla których korzystne jest stosowanie zaproponowanych modeli analitycznych.

Słowa kluczowe: drgania giętne w płaszczyźnie, podłoże sprężyste Winklera

1. Wprowadzenie

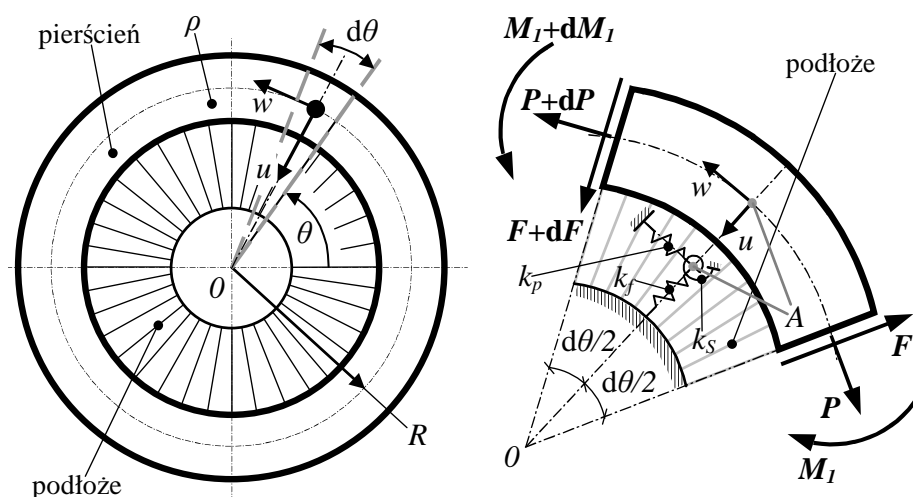
Problematyka modelowania drgań układów kołowo-symetrycznych układami pierścieniowymi z warstwą sprężystą jest przedmiotem zainteresowania wielu badaczy i ośrodków badawczo-rozwojowych [1-7]. Wynika to z faktu, że w przypadku analizy zagadnień drgań giętnych w płaszczyźnie układów typu koła kolejowe i zębate korzystnie jest stosować wymienione analityczne modele pierścieniowe z warstwą sprężystą [2, 4]. Podstawy teoretyczne dotyczące analizy i pomiarów drgań układów ciągłych z uwzględnieniem metody elementów skończonych (MES) omówiono w pracy [8]. W publikacjach [5, 7] rozważano przydatność zaproponowanych modeli analitycznych w symulacji drgań giętnych w płaszczyźnie kół kolejowych i kół z ogumieniem pełnym. Artykuł [1] dotyczy z kolei analizy drgań giętnych kół samochodowych. W pracach [2, 4] omówiono drgania giętne w płaszczyźnie kół zębatach, stosując modele analityczne i numeryczne MES. W publikacji [3] analizowano przydatność modelu analitycznego pierścienia cienkiego z trzyparametrową warstwą sprężystą w procesie symulacji

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Stanisław Noga, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Polska, tel.: (17) 8651639, e-mail: noga@prz.edu.pl

drgań układów kołowo-symetrycznych. Podobny problem, odnoszący się do modelu tzw. pierścienia grubego, dyskutowano w referacie [6]. W pracach [2, 4], omówiono podstawy teoretyczne dotyczące równań drgań giętych w płaszczyźnie układów pierścieni ciekich (teoria Bernoulliego) i grubych (teoria Timoshenki) z trzyparametrową warstwą sprężystą typu Winklera. W niniejszej pracy omówiono drgania gięte w płaszczyźnie kół modelowanych układami pierścieniowymi z podłożem sprężystym. Zasadnicza część pracy dotyczy oceny wpływu głębokości pierścienia na wyniki rozwiązań otrzymanych z proponowanych modeli analitycznych. W procesie badawczym wykorzystano rezultaty badań doświadczalnych i wyniki rozwiązań MES.

2. Sformułowanie zagadnienia

Model mechaniczny rozważanych układów zawiera płaski pierścień kołowo-symetryczny współpracujący z trzyparametrowym podłożem sprężystym typu Winklera [2, 4]. W rozważaniach teoretycznych założono prostokątny jednorodny przekrój poprzeczny pierścienia i podłoża. Przyjmuje się, że pierścień i podłoże stanowią układ doskonale sprężysty, a R to promień linii środkowej pierścienia.



Rys. 1. Model układu pierścienia z warstwą sprężystą Winklera

Fig. 1. Physical model of a ring with Winkler foundation

Zakłada się, że nieskończenie mały element pierścienia (rys. 1.) wyznaczony przez kąt θ przemieszcza się w kierunku promieniowym $u(\theta, t)$ i obwodowym $w(\theta, t)$. W modelu matematycznym podłoża uwzględnia się dodatkowo przemieszczenie kątowe w płaszczyźnie wynikające z obrotu w płaszczyźnie przekroju poprzecznego pierścienia podczas deformacji [2, 4]. Przyjmuje się małe

przemieszczenia na wymienionych kierunkach. W proponowanym modelu matematycznym podłoża współczynniki k_f i k_p reprezentują sztywność promieniową i obwodową podłoża, a trzeci współczynnik k_s uwzględnia sztywność obrotową podłoża, ze względu na wspomniany obrót przekrojów poprzecznych pierścienia w czasie drgań giętych w płaszczyźnie. W przypadku gdy rozpatrywany jest tzw. pierścień gruby stosuje się teorię Timoshenki [2], a równanie drgań własnych giętych w płaszczyźnie układu, w funkcji przemieszczenia promieniowego przyjmuje formę [2, 4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^6 u}{\partial \theta^6} + \left(2 - k_f \frac{R^2}{kAG} - k_s \frac{R^2}{EI_1} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial \theta^4} + \left(1 + k_p \frac{R^2}{kAG} - 2k_s \frac{R^2}{EI_1} + k_f k_s \frac{R^4}{kAGEI_1} + \right. \\ & \left. + k_f \frac{R^4}{EI_1} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \left(k_s \frac{R^2}{EI_1} + k_p k_s \frac{R^4}{kAGEI_1} + k_p \frac{R^4}{EI_1} \right) u - \left(\frac{\rho R^2}{E} + \frac{\rho R^2}{kG} \right) \frac{\partial^6 u}{\partial \theta^4 \partial t^2} + \\ & + \frac{\rho^2 R^4}{kGE} \frac{\partial^6 u}{\partial \theta^2 \partial t^4} + \left(-2 \frac{\rho R^2}{E} + k_f \frac{\rho R^4}{kAGE} + \frac{\rho R^2}{kG} + k_s \frac{\rho R^4}{kGEI_1} + \frac{\rho AR^4}{EI_1} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial \theta^2 \partial t^2} + \\ & - \frac{\rho^2 R^4}{kGE} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4} - \left(\frac{\rho R^2}{E} + k_p \frac{\rho R^4}{kAGE} + k_s \frac{\rho R^4}{kGEI_1} + \frac{\rho AR^4}{EI_1} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: E – moduł Younga,
 G – moduł Kirchhoffa,
 I_1 – geometryczny moment bezwładności przekroju poprzecznego pierścienia,
 ρ – gęstość masy pierścienia,
 A – pole przekroju poprzecznego pierścienia,
 k – współczynnik kształtu przekroju.

W przypadku tzw. pierścienia cienkiego stosuje się teorię Bernoulliego i równanie (1) przyjmuje postać [2, 4]:

$$\begin{aligned} & \frac{EI_1}{R^3} \left(\frac{\partial^6 u}{\partial \theta^6} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right) - \frac{k_s}{R} \left(\frac{\partial^4 u}{\partial \theta^4} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + u \right) + \left(k_f \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - k_p u \right) R + \\ & + \rho AR \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - u \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Warto zauważyć, że równanie (2) ma znacznie prostszą postać niż zależność (1). Wynika to z faktu, że w przypadku pierścieni cienkich, przy formułowaniu równań drgań giętych w płaszczyźnie pomija się wpływ odkształcenia postaciowego ($k = 0$) i bezwładności obrotowej pierścienia [2].

3. Rozwiązania teoretyczne drgań własnych

Rozwiązania ogólnego równań (1) i (2) poszukuje się w postaci:

$$u(\theta, t) = U(\theta)e^{i\omega t} \quad (3)$$

gdzie: ω – częstość własna,

$i = \sqrt{-1}$ – jednostka urojona.

Po podstawieniu rozwiązania (3) do równania (1) otrzymuje się zależność:

$$\begin{aligned} & \frac{d^6 U}{d\theta^6} + \left(2 - b_0 k_f - k_s \frac{a_0}{R^2}\right) \frac{d^4 U}{d\theta^4} + \left(1 + b_0 k_p - 2k_s \frac{a_0}{R^2} + k_f k_s \times \right. \\ & \times \frac{h_0}{\rho I_1} + k_f a_0 \left. \right) \frac{d^2 U}{d\theta^2} - \left(k_s \frac{a_0}{R^2} + k_p k_s \frac{h_0}{\rho I_1} + k_p a_0\right) U + (c_0 + d_0) \times \\ & \times \omega^2 \frac{d^4 U}{d\theta^4} + c_0 d_0 \omega^4 \frac{d^2 U}{d\theta^2} - c_0 d_0 \omega^4 U - \left(-2c_0 + k_f h_0 + d_0 + k_s \frac{h_0 A}{I_1} + \right. \\ & \left. + \rho A a_0\right) \omega^2 \frac{d^2 U}{d\theta^2} + \left(c_0 + k_p h_0 + k_s \frac{h_0 A}{I_1} + \rho A a_0\right) \omega^2 U = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

$$a_0 = \frac{R^4}{EI_1}, \quad b_0 = \frac{R^2}{kAG}, \quad c_0 = \frac{\rho R^2}{E}, \quad d_0 = \frac{\rho R^2}{kG}, \quad h_0 = \frac{\rho R^4}{kEAG} \quad (5)$$

W przypadku podstawienia równania (3) do wzoru (2):

$$\begin{aligned} & \frac{d^6 U}{d\theta^6} + (2 - h_1) \frac{d^4 U}{d\theta^4} + (1 - 2h_1 + a_1) \frac{d^2 U}{d\theta^2} - (c_1 + h_1) U + \\ & - \omega^2 b_1 \left(\frac{d^2 U}{d\theta^2} - U \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

$$a_1 = \frac{k_f R^4}{EI_1}, \quad b_1 = \frac{\rho AR^4}{EI_1}, \quad c_1 = \frac{k R^4}{EI_1}, \quad h_1 = \frac{k_s R^2}{EI_1} \quad (7)$$

Rozwiązanie ogólne równań (4) i (6) jest przewidywane w postaci [2, 8]:

$$U(\theta) = \sum_{j=1}^3 C_{jn} \sin(n\theta + \varphi_{jn}), \quad n = 2, 3, \dots \quad (8)$$

gdzie: C_{jn} , φ_{jn} – stałe.

Po podstawieniu równania (8) do równań (4) i (6) otrzymuje się tzw. równania częstości. W przypadku równania (4) równanie częstości przyjmuje formę:

$$\begin{aligned} & -c_0 d_0 (n^2 + 1) \omega_n^4 + \left[(c_0 + d_0) n^4 + \left(-2c_0 + k_f h_0 + d_0 + k_s \frac{h_0 A}{I_1} + \rho A a_0 \right) \times \right. \\ & \times n^2 + \left. \left(c_0 + k_p h_0 + k_s \frac{h_0 A}{I_1} + \rho A a_0 \right) \right] \omega_n^2 - n^6 + \left(2 - b_0 k_f - k_s \frac{a_0}{R^2} \right) n^4 + \\ & - \left(1 + b_0 k_p - 2k_s \frac{a_0}{R^2} + k_f k_s \frac{h_0}{\rho I_1} + k_f a_0 \right) n^2 - \left(k_s \frac{a_0}{R^2} + \right. \\ & \left. + k_p k_s \frac{h_0}{\rho I_1} + k_p a_0 \right) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

Równanie (9) jest równaniem kwadratowym ze względu na ω_n^2 . Oznacza to, że każdemu n odpowiadają dwie wartości częstości własnych. Niższe wartości odnoszą się do częstości własnych drgań giętych w płaszczyźnie [2, 4]. W przypadku równania (6) równanie częstości przyjmuje postać:

$$\omega_n^2 = \frac{n^6 - (2 - h_1) n^4 + (1 - 2h_1 + a_1) n^2 + (c_1 + h_1)}{b_1 (n^2 + 1)}, \quad n = 2, 3, \dots \quad (10)$$

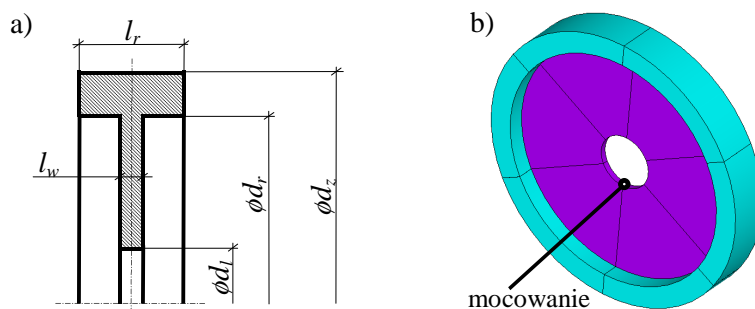
Istnieje szczególny przypadek rozwiązania równań (9) i (10). Mianowicie po podstawieniu do wymienionych równań $n = 1$, otrzymuje się oscylacje związane tylko z przemieszczeniem w płaszczyźnie pierścienia, bez jego deformacji (deformuje się tylko warstwa sprężysta). Dla dowolnego $n > 1$ pierścień (gruby lub cienki) odkształca się zgodnie z równaniem [2, 4]:

$$u_n(\theta, t) = C_{jn} \sin(n\theta + \varphi_{jn}) e^{i\omega_n t} \quad (11)$$

przy czym stałe C_{jn} i φ_{jn} wyznacza się z warunków początkowych układu.

4. Modele MES układów pierścieniowych

W bieżącym rozdziale zostaną omówione modele MES rozważanych układów pierścieniowych. Modele te otrzymuje się z dyskretyzacji modelu ciągłego układu rzeczywistego. Analizie poddano obiekty o geometrii pokazanej na rys. 2. Rozważono sześć przypadków układów pierścieniowych. W tabeli 1. zamieszczono dane techniczne badanych układów, przy czym h to grubość pierścienia wzdłuż promienia, a ν – współczynnik Poissona. Pozostałe wielkości zdefiniowano na rys. 2. bądź w zależności (1). Każdy rozważany układ składa się z obrzeża modelowanego pierścieniem sprężystym oraz tarczy traktowanej jako masowe podłoże sprężyste.



Rys. 2. Model geometryczny rozważanych układów: a) wymiary geometryczne, b) widok modelu

Fig. 2. Geometrical model of a discussed systems: a) geometric dimensions, b) view of the model

Równania drgań własnych układu dyskretnego korzystnie jest zapisać w postaci macierzowej [2, 8]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (12)$$

gdzie: \mathbf{M} – macierz bezwładności w układzie globalnym,
 \mathbf{K} – macierz sztywności w układzie globalnym,
 $\ddot{\mathbf{u}}$ – wektor przyspieszeń węzłowych,
 \mathbf{u} – wektor przemieszczeń węzłowych.

Częstości drgań własnych w tym przypadku otrzymuje się, rozwiązując zagadnienie własne:

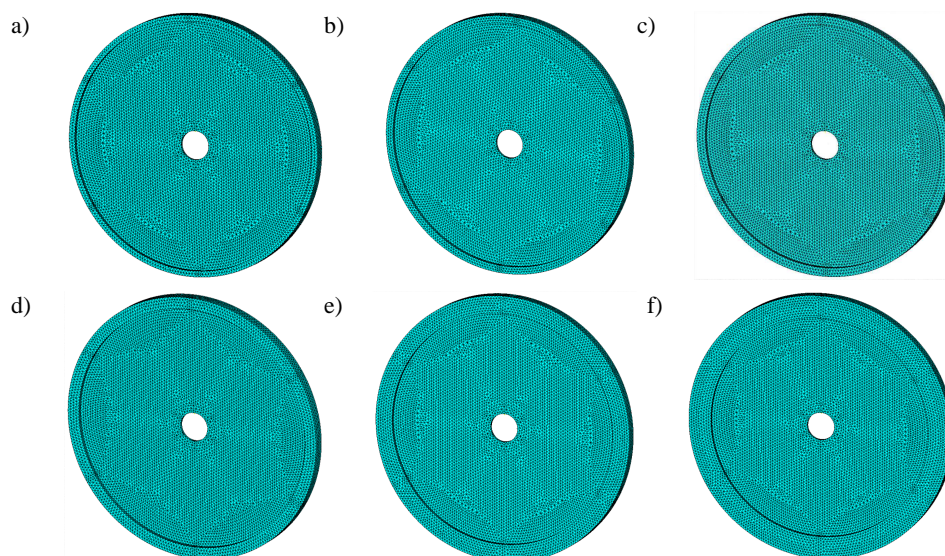
$$\left(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M}\right)\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0} \quad (13)$$

gdzie: ω – wspomniana wcześniej częstość drgań własnych,
 $\bar{\mathbf{u}}$ – wektor własny (postać drgań własnych).

Tabela 1. Dane techniczne analizowanych układów

Table 1. Parameters characterizing discussed systems

Lp.	d_z , m	d_w , m	h , m	ρ , kg/m ³	R , m	d_1 , m	l_r , m	l_w , m	E , Pa	ν
1	0,179	0,171	0,004	$7,85 \cdot 10^3$	0,0875	0,02	0,008	0,002	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,28
2	0,180	0,170	0,005							
3	0,181	0,169	0,006							
4	0,183	0,167	0,008							
5	0,187	0,163	0,012							
6	0,191	0,159	0,016							



Rys. 3. Modele MES układów po rozwinięciu: a) model obiektu nr 1, b) model obiektu nr 2, c) model obiektu nr 3, d) model obiektu nr 4, e) model obiektu nr 5, f) model obiektu nr 6

Fig. 3. FE models of the systems after evaluation: a) model of the object no. 1, b) model of the object no. 2, c) model of the object no. 3, d) model of the object no. 4, e) model of the object no. 5, f) model of the object no. 6

W obliczeniach numerycznych do rozwiązania zagadnienia własnego (11) stosuje się metodę blokową Lanczosa [2, 8]. W pierwszej kolejności porównano wyniki rozwiązań analitycznych z rozwiązaniami numerycznymi MES. Następnie dla wybranych przypadków obiektów wyniki z modeli analitycznych i numerycznych odniesiono do rezultatów badań doświadczalnych. Jakość zaproponowanych modeli analitycznych i numerycznych MES ustala się, wyznaczając tzw. błąd względny częstości, określony zależnością [2]:

$$\varepsilon = (\omega^f - \omega^e) / \omega^e \times 100, \% \quad (14)$$

gdzie: ω^e – referencyjna wartość częstości własnej drgań giętnych,
 ω^f – wartość częstości własnej drgań z modelu.

Dla każdego rozważanego przypadku opracowano model MES w środowisku ANSYS APDL. W procesie nakładania siatki stosowano element czworosścienny dziesięciowęzłowy (solid187) o trzech stopniach swobody w każdym węźle. Przyjęto, że długość krawędzi elementu nie przekracza grubości tarczy modelującej podłoże sprężyste w danym układzie [2, 8]. Przy opracowywaniu modeli MES wykorzystano właściwości cyklicznej symetrii rozważanych obiektów. Każdy model MES stanowi jedną szóstą modelowanych układów. Na rysunku 3. pokazano modele MES analizowanych obiektów po rozwinięciu do procesu wizualizacji wyników obliczeń.

5. Analiza numeryczna

W niniejszym rozdziale omówiono wyniki rozwiązań analitycznych i numerycznych dla modeli analizowanych układów. Dla każdego przypadku modelu wyznaczono siedem pierwszych częstości drgań własnych giętnych w płaszczyźnie i odpowiadających im form własnych. Ze względu na to, że modele analityczne nie uwzględniają masy warstwy sprężystej, zadowalające rezultaty uzyskuje się przy zmianie masy pierścieni w modelach analitycznych układów. W tabeli 2. podano wartości współczynników zastępczej gęstości materiałowej pierścieni modeli analitycznych rozważanych obiektów, przy których uzyskano zadowalające wyniki. Wartości te wyznaczono w symulacji numerycznej dla modeli Timoshenki, a następnie wykorzystywano w modelach Bernoulliego. Podobnie, wartości współczynników k_f , k_p i k_s wyznaczono w symulacji numerycznej, przy czym aby uzyskać satysfakcjonujący wynik, dla każdego modelu analitycznego należało wyznaczyć osobny zbiór wartości współczynników.

Tabela 2. Współczynnik zastępczej gęstości materiałowej pierścieni

Table 2. Ring substitute mass density

Lp.	ρ_z , kg/m ³
1	94·10 ³
2	95·10 ³
3	95·10 ³
4	93·10 ³
5	885·10 ³
6	835·10 ³

W tabeli 3. podano wartości częstotliwości drgań własnych giętnych w płaszczyźnie, uzyskane z modeli MES analizowanych obiektów. Rezultaty te wykorzystano jako dane referencyjne do wyznaczenia współczynników ρ_z , k_f , k_p i k_s modeli analitycznych obiektów. W tabeli 4. pokazano wartości częstotliwości drgań własnych giętnych rozważanych układów oraz wartości współczynników k_f , k_p , k_s otrzymane z modeli Timoshenki (pierścienie grube).

Tabela 3. Częstotliwości własne rozważanych układów ω_n , Hz (rozwiązanie MES)Table 3. Natural frequencies of the considered systems ω_n , Hz (FE solutions)

Lp.	k_f , N/m ²	k_p , N/m ²	k_s , N/m	n							
				2	3	4	5	6	7	8	
1	-	-	-	11135	17854	22886	27355	31489	35385	39105	
2	-	-	-	10792	17195	21963	26186	30098	33808	37387	
3	-	-	-	10475	16603	21156	25195	28962	32573	36104	
4	-	-	-	9916	15597	19834	23645	27280	30863	34472	
5	-	-	-	9038	14141	18091	21833	25607	29518	33611	
6	-	-	-	8393	13199	17141	21084	25218	29594	34207	

Tabela 4. Częstotliwości własne rozważanych układów ω_n , Hz (model Timoshenki)Table 4. Natural frequencies of the considered systems ω_n , Hz (thick ring solution)

Lp.	k_f , N/m ²	k_p , N/m ²	k_s , N/m	n							
				2	3	4	5	6	7	8	
1	15·10 ⁹	6·10 ⁶	175·10 ⁸	11997	16304	20819	25454	30161	34911	39691	
2	17·10 ⁹	6·10 ⁶	13·10 ⁸	11520	15851	20378	25010	29702	34431	39183	
3	185·10 ⁹	6·10 ⁶	112·10 ⁸	11132	15510	20072	24723	29424	34155	38904	
4	224·10 ⁹	6·10 ⁶	18·10 ⁷	10561	14530	18681	22932	27243	31593	35972	
5	228·10 ⁹	6·10 ⁶	18·10 ⁷	9390	13469	17698	21996	26340	30722	35140	
6	223·10 ⁹	6·10 ⁶	16·10 ⁷	8602	12686	16916	21227	25613	30072	34605	

Tabela 5. zawiera wyniki (wartości częstotliwości drgań własnych giętnych oraz współczynników k_f , k_p , k_s) otrzymane z modeli Bernoulliego (pierścienie cienkie).

Kolejne tabele zawierają błędy częstości (12) wynikające z porównania otrzymanych rozwiązań analitycznych z rezultatami uzyskanymi z modeli MES układów, przy czym – jak wspomniano wcześniej – wyniki rozwiązań MES traktowano jako dane referencyjne. W tabeli 6. zamieszczono stosowne wartości błędów częstości wynikające z porównania wyników z modeli Timoshenki z wynikami z modeli MES. Otrzymane wartości błędów są dla rozważanych przypadków obiektów zadowalające (dla każdej częstości bezwzględne wartości błędów poniżej 91%). Jedynie w odniesieniu do pierwszego obiektu zauważa się dla dwóch częstości błąd powyżej 8%.

Tabela 5. Częstotliwości własne rozważanych układów ω_n , Hz (model Bernoulliego)Table 5. Natural frequencies of the considered systems ω_n , Hz (thin ring solution)

Lp.	k_f , N/m ²	k_p , N/m ²	k_s , N/m	n							
				2	3	4	5	6	7	8	
1	1405·10 ⁹	6·10 ⁶	235·10 ⁶	11890	16514	21359	26335	31404	36552	41774	
2	17·10 ⁹	6·10 ⁶	264·10 ⁶	11501	15824	20380	25092	29926	34870	39924	
3	195·10 ⁹	6·10 ⁶	292·10 ⁶	11183	15322	19709	24277	29000	33869	38888	
4	244·10 ⁹	6·10 ⁶	309·10 ⁶	10696	14367	18333	22565	27051	31792	36802	
5	301·10 ⁹	6·10 ⁶	314·10 ⁶	9733	12889	16503	20624	25275	30483	36275	
6	323·10 ⁹	6·10 ⁶	228·10 ⁶	8697	11289	14648	18931	24176	30393	37582	

Tabela 6. Błąd częstości ε_n , % (porównanie rozwiązań z modeli Timoshenki z wynikami MES)Table 6. Frequency error ε_n , % (comparison of the thick ring solution with the FE solutions)

Lp.	k_f , N/m ²	k_p , N/m ²	k_s , N/m	n							
				2	3	4	5	6	7	8	
1	15·10 ⁹	6·10 ⁶	175·10 ⁸	774	-868	-903	-695	-421	-134	15	
2	17·10 ⁹	6·10 ⁶	13·10 ⁸	674	-782	-722	-449	-131	184	48	
3	185·10 ⁹	6·10 ⁶	112·10 ⁸	627	-659	-513	-187	16	486	776	
4	224·10 ⁹	6·10 ⁶	18·10 ⁷	651	-684	-582	-302	-014	237	435	
5	228·10 ⁹	6·10 ⁶	18·10 ⁷	389	-475	-217	075	286	408	455	
6	223·10 ⁹	6·10 ⁶	16·10 ⁷	248	-389	-131	068	156	161	116	

W tabeli 7. zamieszczono wartości błędu częstości wynikające z porównania rezultatów z modeli Bernoulliego ze stosownymi rozwiązaniami MES. W tym przypadku zauważa się gorsze dopasowanie modeli obiektów nr 5 i 6. Wyniki dla obiektu nr 5 są dopuszczalne (dla dwóch częstości bezwzględna wartość błędu częstości mieści się w przedziale 8-9%). W przypadku obiektu nr 6 dla trzech częstości obserwuje się błąd (wartość bezwzględna) powyżej 10%, a dla jednej powyżej 9%, co nie jest do zaakceptowania.

Tabela 7. Błąd częstości ε_n , % (porównanie rozwiązań z modeli Bernoulliego z wynikami MES)Table 7. Frequency error ε_n , % (comparison of the thin ring solution with the FE solutions)

Lp.	k_f , N/m ²	k_p , N/m ²	k_s , N/m	n							
				2	3	4	5	6	7	8	
1	1405·10 ⁹	6·10 ⁶	235·10 ⁶	678	-751	-667	-373	-027	33	683	
2	17·10 ⁹	6·10 ⁶	264·10 ⁶	657	-797	-721	-418	-057	314	679	
3	195·10 ⁹	6·10 ⁶	292·10 ⁶	676	-772	-684	-364	013	398	771	
4	244·10 ⁹	6·10 ⁶	309·10 ⁶	787	-789	-757	-457	-084	301	676	
5	301·10 ⁹	6·10 ⁶	314·10 ⁶	769	-885	-878	-554	-13	327	792	
6	323·10 ⁹	6·10 ⁶	228·10 ⁶	362	-145	-145	-102	-413	27	986	

Analizując otrzymane rezultaty, zauważa się zadowalającą zgodność obu modeli analitycznych z wynikami MES dla pierwszych pięciu obiektów. Biorąc pod uwagę wpływ głębokości pierścieni h w relacji do promieni linii środkowej R , można zauważyć, że dla wartości parametru h/R poniżej 0,14 występuje zadowalająca zgodność obu modeli analitycznych z wynikami MES (obiekty nr 1-5).

6. Weryfikacja doświadczalna

Otrzymane w symulacji modele analityczne i numeryczne MES zweryfikowano badaniami doświadczalnymi.



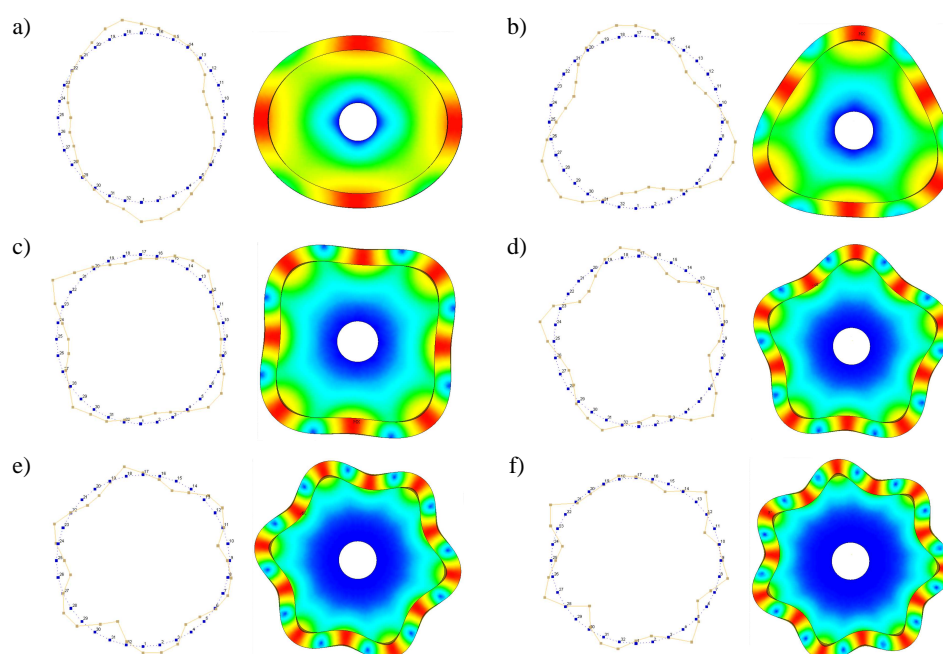
Rys. 4. Badania doświadczalne
Fig. 4. Experimental verification

Tabela 8. Wyniki badań eksperymentalnych

Table 8. Results of the experimental investigation

Lp.	n						
	2	3	4	5	6	7	8
Częstotliwości własne rozważanych obiektów ω_n , Hz (dane eksperymentalne)							
1	11732	17215	22934	27451	31482	35206	39488
6	8660	129438	168025	206181	252119	295506	341556
Błąd częstości ε_n , % (porównanie rozwiązań z modeli Timoshenki z wynikami eksperymentu)							
1	226	-529	-922	-728	-420	-084	052
6	-067	-199	067	296	159	176	132
Błąd częstości ε_n , % (porównanie rozwiązań z modeli Bernoulliego z wynikami eksperymentu)							
1	135	-407	-687	-407	-025	382	579
6	043	-1279	-1282	-818	-411	285	1003
Błąd częstości ε_n , % (porównanie rozwiązań MES z wynikami eksperymentu)							
1	-509	371	-021	-035	002	051	-097
6	-308	197	201	226	002	015	015

Eksperyment wykonano na obiektach nr 1 i 6 (tab. 1., rys. 2.). Dane techniczne materiału wykonanych próbek zawiera tab. 1. W badaniach wykorzystano system pomiarowy LMS, składający się z młotka modalnego PCB – model 08C03 ze stalową końcówką, czujnika przyspieszenia PCB – model 353B18, systemu archiwizacji danych LMS SCADA oraz modułu pomiarowego SCM-V4E. Eksperyment zaplanowano i wykonano tak, aby wzbudzić i zidentyfikować częstotliwości własne i odpowiadające im formy własne drgań giętnych w płaszczyźnie. Badane układy przymocowano połączeniem śrubowym do obiektu o znacznej masie i wymiarach gabarytowych (rys. 4.) Każdy badany obiekt pobudzano uderzeniem młotkiem modalnym w ten sam punkt. Odpowiedź układu mierzono w 32 punktach pomiarowych równo rozmieszczonych na obwodzie. Wartości wzbudzonych i zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych przedstawiono w tab. 8. Wartości te odniesiono do wyników wygenerowanych z modeli analitycznych i numerycznych MES badanych obiektów (tab. 1-5). W tabeli 8. pokazano także wartości błędu częstotliwości (12), odnoszące się do otrzymanych modeli analitycznych i numerycznych obiektów. Jak należało się spodziewać, najgorsze rezultaty uzyskano dla obiektu nr 6, porównując wyniki uzyskane z modelu Bernoulliego (pierścień cienki) z wynikami badań doświadczalnych.



Rys. 5. Postacie drgań własnych odpowiadające częstościom: a) ω_2 , b) ω_3 , c) ω_4 , d) ω_5 , e) ω_6 , f) ω_7

Fig. 5. Mode shapes related to the following frequencies: a) ω_2 , b) ω_3 , c) ω_4 , d) ω_5 , e) ω_6 , f) ω_7

Rezultaty te są nie do zaakceptowania. Dla tego obiektu współczynnik $h/R = 018$. Pozostałe wyniki są zadowalające. Godny zauważenia jest wysoki poziom dopasowania wyników z modeli MES układów do rezultatów badań doświadczalnych (dwa ostatnie wiersze w tab. 8.). Jak wcześniej wspomniano, wyniki z modeli MES wykorzystano jako dane referencyjne do dostrajania modeli analitycznych badanych obiektów. Na rysunku 5. pokazano sześć postaci drgań giętych w płaszczyźnie, odnoszących się do pierwszych sześciu częstości własnych, wyznaczonych w eksperymencie pomiarowym i z modelu MES dla pierwszego obiektu. Zauważa się znaczne podobieństwo kształtowe odpowiadających sobie form własnych.

7. Uwagi i wnioski

W pracy rozważano drgania gięte w płaszczyźnie, układów zawierających pierścień kołowy współpracujący z tarczą traktowaną jako podłoże sprężyste. Zaprezentowano modele analityczne drgań własnych pierścieni z warstwą sprężystą, opracowane na podstawie teorii pierścieni grubych (Timoshenki) i cienkich (Bernoulliego). W równaniach stosowano trzyparametrowy model warstwy sprężystej. Następnie omówiono zaproponowane modele MES tego typu układów. Wyniki rozwiązań MES wykorzystano do wyznaczenia współczynników modeli analitycznych omawianych układów. Z analizy otrzymanych rezultatów wynika, że dla wartości współczynnika $h/R < 014$ oba zaproponowane modele analityczne wykazują zadowalającą zgodność z wynikami z modeli MES. Otrzymane rozwiązania analityczne i numeryczne zweryfikowano badaniami doświadczalnymi dla dwóch reprezentatywnych obiektów. Prezentowane w pracy wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych potwierdzają celowość stosowania trzyparametrowego modelu warstwy sprężystej w modelach analitycznych. Ponadto warto zauważyć, że dla układów, w których współczynnik $h/R < 014$, wystarczające jest stosowanie w symulacji drgań modelu analitycznego pierścienia cienkiego (Bernoulliego), który charakteryzuje się znacznie prostszą formułą matematyczną w porównaniu z modelem pierścienia grubego.

Podziękowanie

Pracę poświęcam pamięci **Profesora Romana Bogacza**, mojego mentora i przyjaciela.

Literatura

- [1] Liu Z., Zhou F., Oertel C., Wei Y.: Three-dimensional vibration of a ring with a noncircular cross-section on an elastic foundation, PIME Part C: J. Mech. Eng. Sci., 232 (2017) 2381-2393.
- [2] Noga S.: Analityczne i numeryczne zagadnienia drgań układów z symetrią kołową, OW PRz, Rzeszów 2015.

- [3] Noga S.: Vibration analysis of a thin ring interacting with the annular plate treated as an elastic foundation, *J. Civil. Eng. Environ. Architecture*, 31 (2014) 131-138.
- [4] Noga S., Bogacz R., Markowski T.: Vibration analysis of a wheel composed of a ring and a wheel-plate modelled as a three-parameter elastic foundation, *J. Sound Vibration*, 333 (2014) 6706-6722.
- [5] Metrikine A., Tochilin M.: Steady-state vibrations of an elastic ring under a moving load, *J. Sound Vibration*, 232 (2000) 511-524.
- [6] Noga S., Markowski T.: Vibration analysis of a thick ring interacting with the disk treated as an elastic foundation, *Vibrations Physical System*, 26 (2014) 217-222.
- [7] Wang C., Ayalew B., Rhyne T., Cron S., Dailliez B.: Forced in-plane vibration of a thick ring on a unilateral elastic foundation, *J. Sound Vibration*, 380 (2016) 279-294.
- [8] De Silva C.: *Vibration and shock handbook*, Taylor & Francis, Boca Raton 2005.

IN-PLANE FLEXURAL VIBRATION OF WHEELS MODELLED BY RING SYSTEMS WITH ELASTIC FOUNDATION

S u m m a r y

This paper deals with the in-plane flexural vibration of wheels, modelled as circular ring systems with elastic foundation. Equations of motion of discussed systems achieved on the basis of the Bernoulli and Timoshenko theory are presented. In motion equations the three-parameter Winkler elastic layer is included. Then for each model the frequency equation is derived and the equation of normal modes is given. The main part of the paper concerns the evaluation of the ring depth impact on the results of analytical solutions, which were obtained from the proposed analytical models. In the tuning process, of the coefficients of analytical models, the results of solutions achieved from finite element computations were used. Obtained simulation results were verified experimentally on selected objects. The cases of ring systems for which it is preferred to use the proposed analytical models were established.

Keywords: in-plane flexural vibration, Winkler elastic foundation

DOI: 10.7862/rm.2018.42

Otrzymano/received: 10.10.2018

Zaakceptowano/accepted: 15.11.2018

Andrzej SKRZAT¹
Marta WÓJCIK²

THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN ENGINEERING APPLICATIONS

In order to describe the phenomenon for which the mathematical model or input data are unknown, the fuzzy logic is applied. The fuzzy theory enables to find the most reliable solution on the assumption that the input data are fuzzed. This paper presents the possibility of application of fuzzy theory in engineering problems. The theoretical basis of the fuzzy logic and mathematical calculations on fuzzy variables are presented. The comparison of two methods used in fuzzy logic – extension principle and α -level optimization are written and compared. Examples of the application of aforementioned methods for solving simple engineering problem were presented. Numerical calculations were done with the use of MATLAB program. The selection of the most reliable solution, based on finding the mass center or with the use of rank level method, was also shown.

Keywords: fuzzy logic, α -level optimization, extension principle, mechanical engineering

1. Introduction

Precise information which is determined in the form of numerical values is accepted in mathematical methods. However, imprecise or incomplete information about a problem is often available in engineering calculations. For example, imprecise information concerning the material properties or strain is often knowable in problems of materials forming. The fuzzy logic theory might be used in situations for which precise data are not available [1].

Fuzzy logic is a superset of Boolean logic which introduces the term of partial truth. Whereas, the classical logic uses only binary terms (0 or 1), fuzzy logic implements the degrees of truth instead classical truth values [2]. The first mention about fuzzy logic theory was presented by Plato who postulated the existence of area between the truth and falsity [3]. But Lofti A. Zadeh is considered as a father of fuzzy logic theory. He indicated that fuzzy theory might be used for solving both easy and complicated problems. In one of his papers titled „Fuzzy

¹ Corresponding author/autor do korespondencji: Andrzej Skrzat, Rzeszow University of Technology, 8 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 7432449, e-mail: askrzat@prz.edu.pl

² Marta Wójcik, Rzeszow University of Technology, e-mail: m.wojcik@prz.edu.pl

Sets” published in 1965, he stated that *As the complexity of system increases, our ability to make precise and yet significant statements about its behaviour diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) become almost mutually exclusive characteristics* [4].

The fuzzy logic is applied in problems for which the knowledge of the mathematical model is unknown or model reconstruction is impossible or unprofitable. The fuzzy theory is necessary to describe unspecified phenomena which cannot be described with the use of classical logic. It enables to find the system response to external factors assuming that input data are fuzzed and the adopted mathematical model is uncertain. The fuzzy theory also enables to find the most reliable solution from obtained results [5].

Fuzzy logic was first implemented in England in 1973 at University of London. The aforementioned theory was used for the stabilization the speed of a small steam engine constructed for the research purposes [6]. Nowadays, fuzzy logic has become a design technology in many developed countries, such as Japan, Germany, Korea, Sweden and France [7]. The fuzzy theory is applied in controlling, databases, electronics, medicine, mechanical science, ecology and other branches of industry. One of the most popular implementations of fuzzy logic on a big scale is the subway in Sendai (Japan). The subway system uses a fuzzy logic system to control acceleration and thanks to it, journey is more comfortable with smooth braking and acceleration. The fuzzy logic controller is also responsible for traffic planning and the usage of subway facilities by passengers [8]. Fuzzy logic controllers are also used in anti-lock braking system (ABS) which affects the improvement of the braking performance and the directional stability of cars [9]. But the examples of fuzzy logic are also observed in everyday life. Application examples of fuzzy logic are washing machines and fuzzy microwaves. The application of fuzzy logic technology enables to choose the best washing cycle or the most appropriate temperature and time of cooking [10, 11].

Fuzzy logic is also used in scientific problems which were confirmed in research carried out by different researchers. Amjad et al. [12] tested the application of fuzzy theory to control the position of a ball in a ball and beam system. They showed that the fuzzy controller stabilized the system efficiently. Moreover, the performance during the transient period of the fuzzy system was better and less overshoot was obtained. The fuzzy controller also provided a zero steady state error [12]. Parthiban et al. [13] used fuzzy theory in order to predict the CO₂ laser cutting parameters. They noted that the proposed fuzzy model might be applied in prediction of the top kerf width, bottom kerf width and kerf deviation on stainless steel sheet. In other research, Giorleo et al. [14] examined the possibility of the application of fuzzy logic in the control of steel rod quenching after hot rolling. They showed that this concept might be helpful in the assessment of the influence of steel diameter and chemical composition on its final mechanical properties. All aforementioned examples indicate the usefulness of fuzzy logic in engineering application.

The possibility of the use of fuzzy logic in engineering problems is presented in this paper. The theoretical information concerning the fuzzy theory and the mathematical calculations on fuzzy sets is shown. Two methods used in fuzzy theory: extension principle and α -level optimization are described with an indication of their advantages and disadvantages. The way to choose the most reliable solution which is based on the selection of mass center and level rank method is also presented.

2. Theoretical basis of fuzzy logic theory

In order to consider the application of fuzzy logic in engineering applications, the definition of basic terms associated with fuzzy theory, as well as, the determination of mathematical operations on fuzzy sets are necessary. In classical theory, the x element of X space might belong or not belong to the set. The membership of x element to the set X might be 1 when the element belongs to the set or 0 when the element does not belong to the set [15]. The fuzzy logic implements the partial membership of x element to the set (Fig. 1a). The fuzzy set A is defined as a set of x elements of X space which indicates the some membership to the set (1) [16]. In this case, the X set is a space on which the fuzzy set A is determined (Fig. 1b).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\} \quad (1)$$

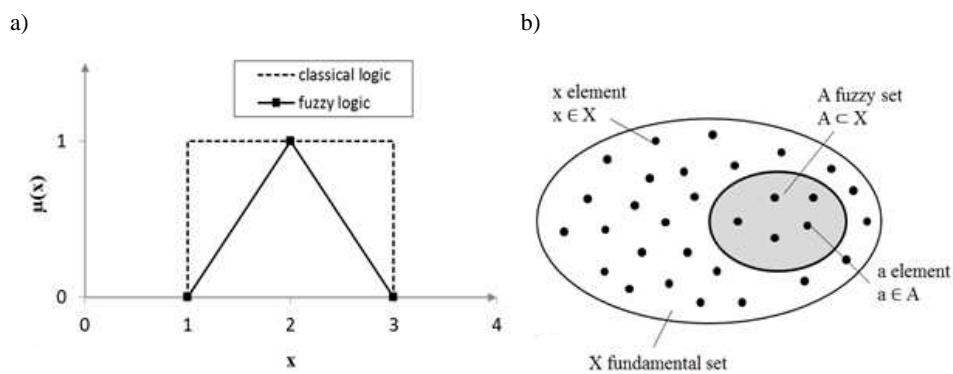


Fig. 1. Differences between classical and fuzzy logic (a) and the placement of A fuzzy set in X fundamental set (b)

The membership of x element into A fuzzy set is aimed by the membership function $\mu(x)$. For all x elements, this function assigns its membership to A fuzzy set (2). In other words, the membership function determines the level of truth that a variable has specific value. Its value is within the range from 0 to 1.

$$\mu_A : x \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

The membership function is created on the basis of measurements, possible measurement errors, researcher's experience, etc. For this reason, different shapes of membership function are used. Triangular, trapezoidal, Gaussian as well as pseudo-Gaussian distributions are commonly acceptable shapes of the membership function [16]. Depending on the shape, it is determined with the use of some points belonging to the function. For example, triangle membership function is defined by means of three points which are its vertices. The normal Gaussian distribution is adequate for the most of real problem. But in practice, the linear distribution is most often used [17].

Main calculations on fuzzy sets include addition (Fig. 2a) and multiplication (Fig. 2b). For two fuzzy sets A_1 and A_2 of fundamental sets X_1 and X_2 , addition and multiplication might be expressed by the formulas (3) and (4):

$$A \cup B = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \text{ for } x \in X \quad (3)$$

$$A \cap B = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \text{ for } x \in X \quad (4)$$

In mapping step, the Cartesian product (K) is used. It includes all combinations of x elements of fuzzy sets A_1, \dots, A_n . With the application of minimum operator, membership function values $\mu_K(x) = \mu_K(x_1, \dots, x_n)$ are assigned to one n -tuple (5). The Cartesian product represents a fuzzy set in the product space X with the membership function $\mu_K(z)$ [16]. The extension principle which is used in fuzzy logic is based on the Cartesian product of input variables.

$$K = \{(x = (x_1, \dots, x_n), \mu_K(x) = \mu_K(x_1, \dots, x_n)) : x_i \in X; \mu_K = \min[\mu_{A_i}(x_i)]\} \quad (5)$$

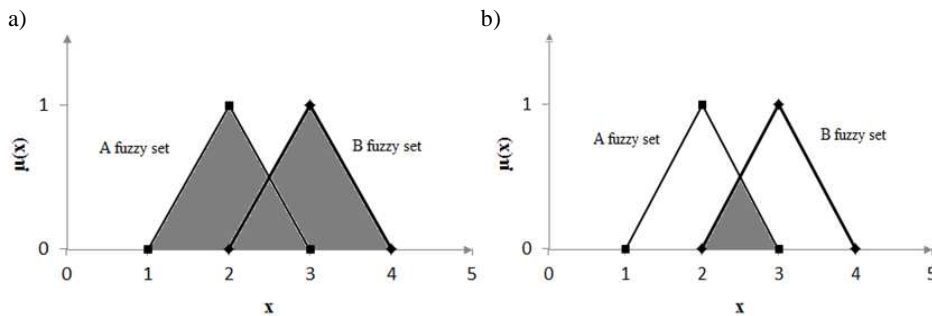


Fig. 2. Result of addition (a) and multiplication (b) of fuzzy sets

The aim of fuzzy logic theory is modeling of systems with a known mapping from input to output. The main assumption is imprecise defined input parameters. The membership function for the obtained result $z = f(x_1, x_2)$ is determined on the basis of calculations on fuzzy sets. The membership function also presents the possible dispersion of z variable, as well as, the level of accessibility of its

values [9]. The most reliable solution of z variable might be also determined in the defuzzification step (Fig. 3).

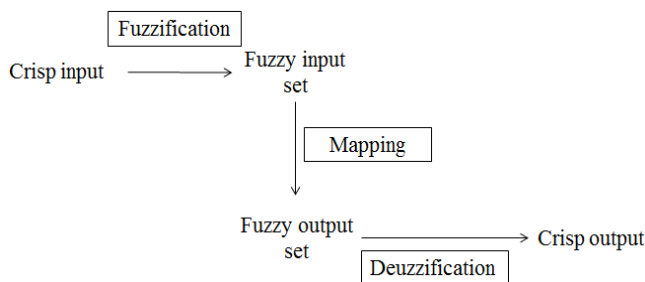


Fig. 3. Mapping of fuzzy input variables into output space

Two methods – extension principle and α -level optimization are used in fuzzy theory. The extension principle (Fig. 4) is based on the Cartesian product of fuzzy sets A_1, \dots, A_n . The final product of this method presents the fuzzy set with n -dimension membership function $\mu_K(x_1, \dots, x_n)$. It is an input fuzzy set. The extension principle presents the mapping of input set X on the new Z fundamental set with the use of mapping function $z = f(x_1, \dots, x_n)$ [11]. The new B fuzzy set and its membership function $\mu_B(z)$ is gained on Z set (6). The values of $\mu_B(z)$ are calculated with the use of max-min operator (7).

$$B = \{ (z, \mu_B(z)) : z = f(x_1, \dots, x_n); z \in Z; (x_1, \dots, x_n) \in X_1, \dots, X_n \} \tag{6}$$

$$\mu_B(z) = \{ \sup_{f=(x_1, \dots, x_n)} \min[\mu(x_1), \dots, \mu(x_n)], \text{ if } \exists z = f(x_1, \dots, x_n) \} \tag{7}$$

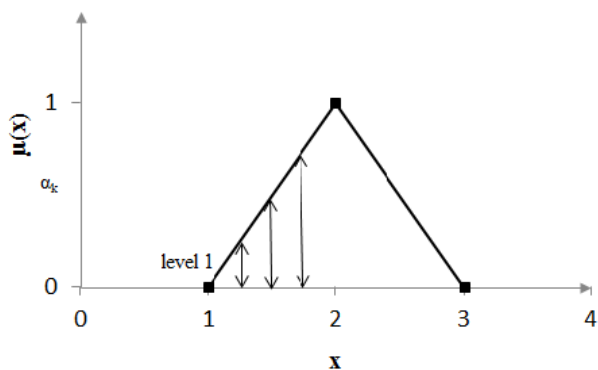


Fig. 4. Determination of membership function with the use of extension principle

In some special mappings, for example during addition or multiplication of fuzzy numbers, different shapes of membership function $\mu(z)$ might be achieved (Fig. 5). The addition of fuzzy triangular numbers $x = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$ and $y = \langle y_1, y_2, y_3 \rangle$ gives the triangular number $z = \langle z_1, z_2, z_3 \rangle$. The multiplication of x and y gives a fuzzy results with a nonlinear membership function [16].

The alternative method in fuzzy logic is α -optimization which is based on the discretization of support. This concept relies on the selection of sufficiently high number of α -levels (Fig. 6). The extreme $x_{\alpha_{kl}}$ and $x_{\alpha_{kr}}$ values determine the subspace assigned to α_k level. The $x_{\alpha_{k,l}}$ and $x_{\alpha_{k,r}}$ values for sufficiently high number of α -levels designate the shape of membership function [5, 16, 17].

For all α -level representation of fuzzy input variables, the $z_{\alpha_{kl}}$ and maximum $z_{\alpha_{kr}}$ variables are found. This searching is formulated as an optimization problem in which $(x, y) \in X_{\alpha_k}$ are constraints of the optimization process (8). Extreme values of z variable for each α -level determine $\mu(z)$ membership function. The result obtained in α -optimization method is smoother than envelop for extension principle [5]. But the α -optimization might be used if mapping operator is continuous and fuzzy result space is convex.

$$\begin{aligned} z &= f(x, y) \Rightarrow \max (x, y) \in X_{\alpha_k} \\ z &= f(x, y) \Rightarrow \min (x, y) \in X_{\alpha_k} \end{aligned} \quad (8)$$

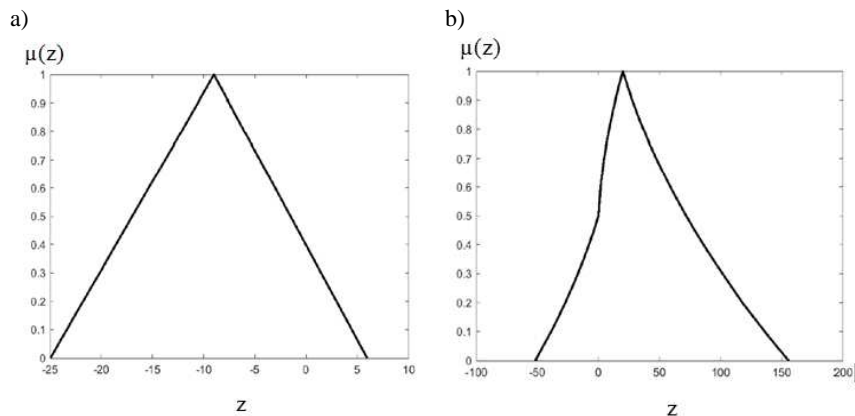


Fig. 5. Addition (a) and multiplication (b) of fuzzy variables

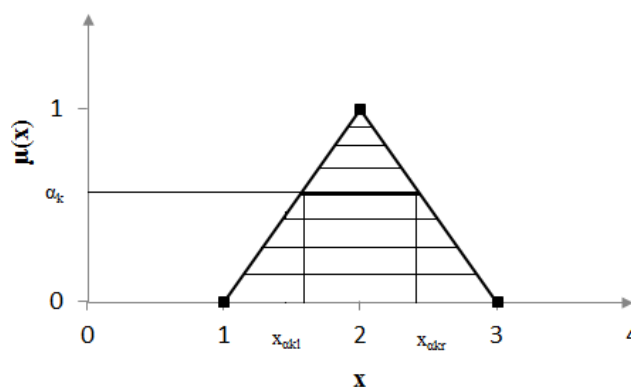


Fig. 6. Determination of membership function with the use of α -optimization method

As the final step of calculations on fuzzy sets, defuzzification of Z fuzzy variable on the non-fuzzy space is applied. It leads to the obtaining of specific value z_{j0} which is the most reliable solution. The mass center method is commonly used for the conversion of fuzzy variable into the non-fuzzy value. The center of space below the membership function plot is searched as the most reliable value (9) [16].

$$z_{j0} = \frac{\int_{z_j} z_j \cdot \mu(z_j) dz_j}{\int_{z_j} \mu(z_j) dz_j} \quad (9)$$

In order to achieve the most reliable solution, level rank method which is based on the α -discretization might be also used. The membership scale of z fuzzy variable is discretized with the aid of r chosen α -levels. After that, the arithmetic mean of the interval centers of α -level sets is calculated (10). The results obtained by means of this method might vary depending on the number of α -levels [16].

$$z_{j0} = \frac{1}{r} \cdot \sum_{k=1}^r \frac{z_{j,\alpha_{kl}} + z_{j,\alpha_{kr}}}{2} \quad (10)$$

3. Determination of membership functions for output variable with the use of extension principle and α -optimization

The determination of the membership function for z fuzzy variables with the use of two methods described in Section 2 is presented below. In considerations, the mapping model which is described as a function $z = f(x, y) = -x \cdot y + 50 \cdot \sin(x) + 40 \cdot \sin(y)$ was used. The three-dimensional and contour plots are presented in Figure 7. All numerical calculations were done with the use of MATLAB program.

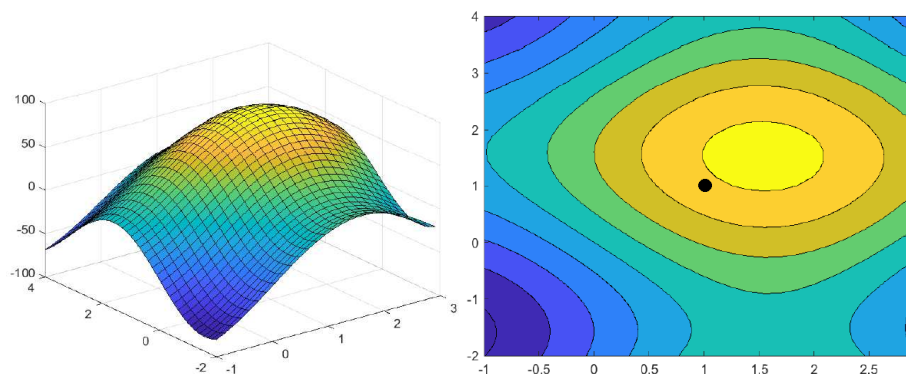


Fig. 7. Plot of z mapping function

It was assumed that arguments of x and y functions are fuzzy variables. The membership functions for x and y variables are presented in Fig. 8. On the basis of plots it was stated that $x \in [-1; 3]$ and $y \in [-2; 4]$. The most reliable value of x and y variables is 1. For these arguments, the value of membership functions is 1. Using membership functions for x and y , z result variable and its membership function were determined.

In extension principle, the membership function for z variable is obtained by means of random searching of range of arguments variability. The membership function is calculated with the use of minimum and maximum operator according to the following formula (11) [17].

$$\mu(z) = \sup \min[\mu(x), \mu(y)], \exists z = f(x, y) \quad (11)$$

The application of two operators is associated with the fact that there are many ways of mapping of X and Y fuzzy sets on Z result set. Different combinations of x and y elements gives different $\mu(z)$ values. Firstly, the values of membership functions $\mu(z)$ are determined with the use of minimum operator. After that, the highest $\mu(z)$ value for z element is selected. The membership functions for ranges of fuzzy variable divided into $n = 500$ and 5000 intervals are presented in Figure 9. The thick line represents the sup operator.

Although the membership functions for x and y input variables might be linear (triangular and trapezoidal), the membership function for z output variable is always non-linear. It was observed that the small amount of n subdomains gives a jagged solution. Better results might be achieved for higher number of analyzed subdomains. The results presented in Fig. 9 show that the extension principle is very sensitive to the number of combinations of x and y elements of fuzzy input data. The final result is also dependent on the assumed precision Δz of searching maximum from minimum values of membership function. Additionally, a smooth envelope might be obtained only for dense searching of the variability range of

fuzzy input data [5]. It is related with the multiple calculation of mapping function values.

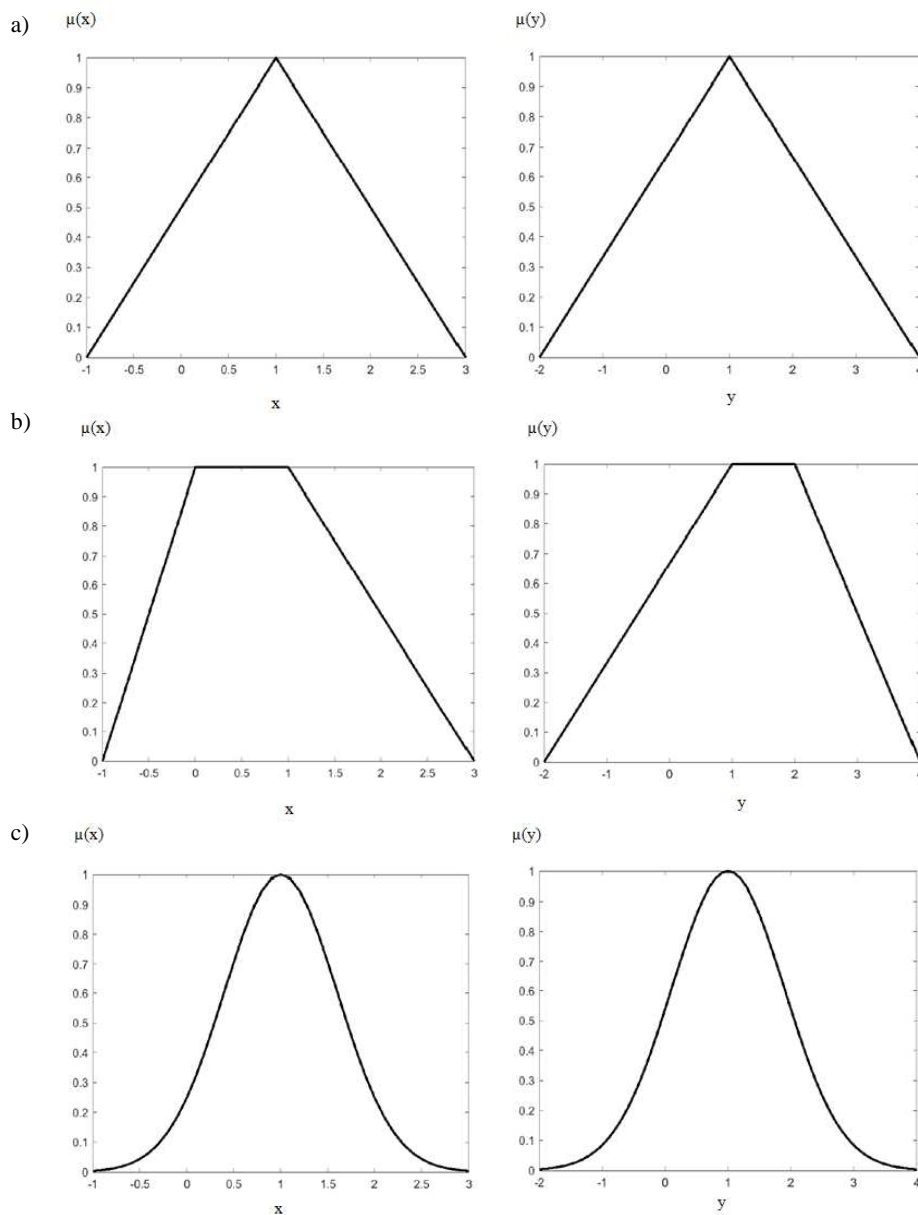


Fig. 8. Membership functions for x and y variables: triangle (a), trapezoidal (b) and pseudo-Gaussian (c)

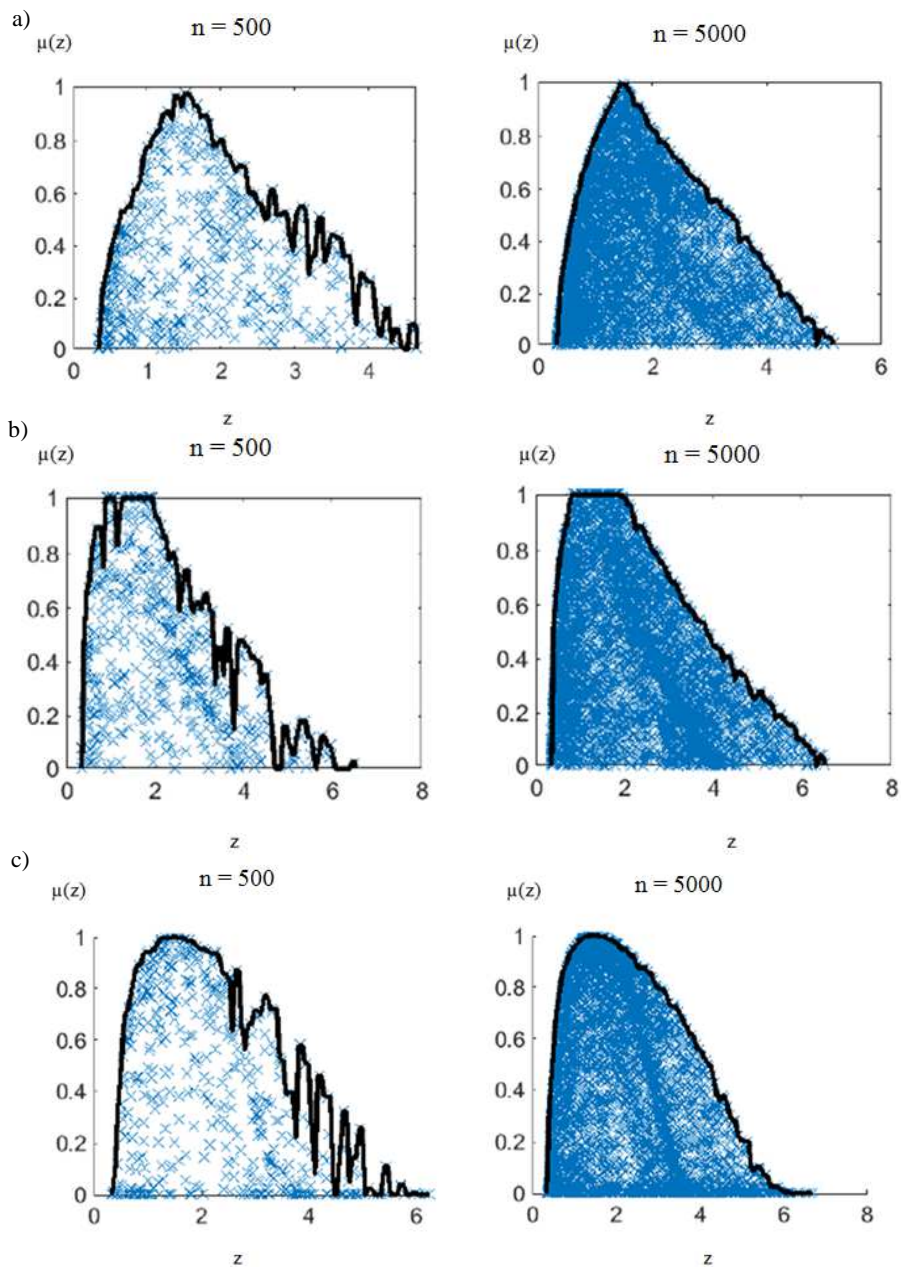


Fig. 9. Results obtained for $n = 500$ and $n = 5000$ subdomains for triangle (a), trapezoidal (b) and pseudo-Gaussian (c) input membership functions

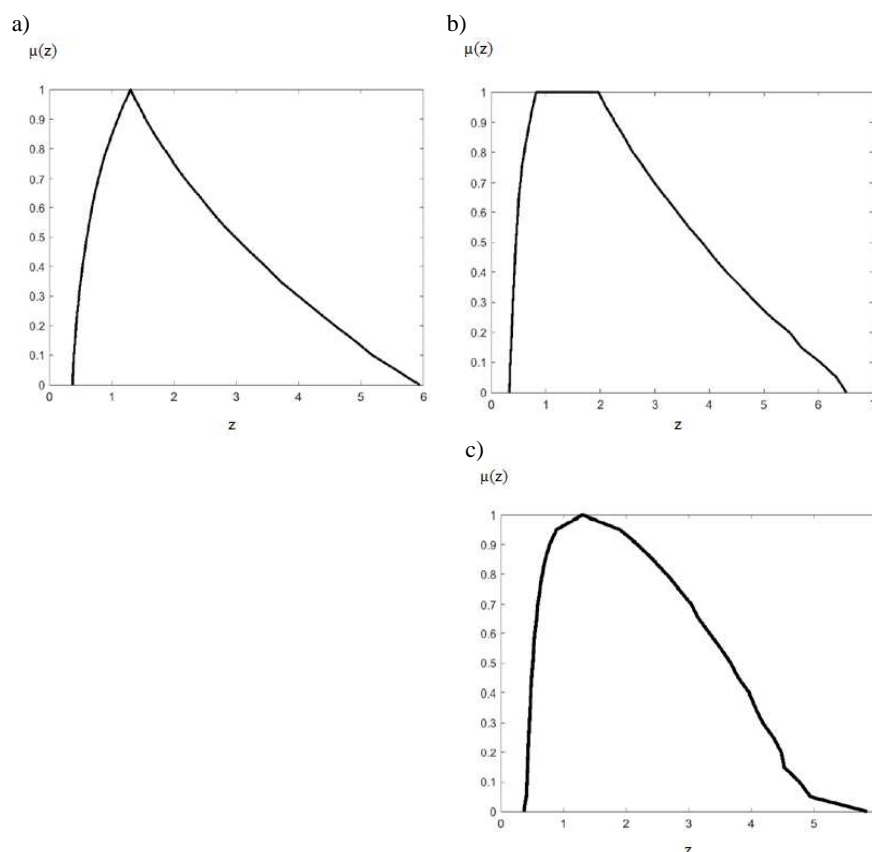


Fig. 10. Fuzzy value of z function obtained with the use of α -optimization for triangle (a), trapezoidal (b) and pseudo-Gaussian (c) input membership functions

The extension principle is ineffective for a mapping model which has a form of complex numeric algorithm. In this situation, α -optimization method is more suitable. This concept enables to decrease the number of calculations for fuzzy output variable z . Firstly, the membership function is divided into the high number of α -levels. For all considered α -levels, $x_{\alpha_{kl}}$ and $x_{\alpha_{kr}}$ values for which $\mu(x) = \alpha_k$, are selected. These points define the shape of membership function. After that, the minimum $z_{\alpha_{kl}}$ and the maximum $z_{\alpha_{kr}}$ elements are searched with the use of mapping operator. Extreme z values for all α -levels define the membership function $\mu(z)$. Detailed information concerning the α -optimization method was presented in Section 2.

The result obtained with the use of α -optimization is presented in Fig. 10. The membership value is 1 for $z = 1.30$. In comparison to result for extension principle, α -optimization method enables to achieve definitely smoother solution. In extension principle, such smooth line result might be attained only for very

dense discretization of input fuzzy variables. For this reason, α -level optimization procedure is recommended in structural analysis [5, 17].

Defuzzification of z variable on the non-fuzzy space is investigated with the use of mass center method. The most reliable value obtained with the use of mass center method is 1.53; 1.54 and 1.52 for triangle, trapezoidal and pseudo-Gauss input membership functions, respectively. This value is similar for all shapes of input membership functions. It shows that the shape of membership function does not affect final result. The most reliable value which was achieved with the use of rank level method is 1.52; 1.56 and 1.55 for triangle, trapezoidal and pseudo-Gauss input membership functions, respectively. On the basis of obtained results it can be stated that values achieved with the use of two aforementioned methods are similar.

4. Summary

Fuzzy logic is a relatively new concept in science which might be used for the analysis of mathematical models contained some uncertainties. Because many problems in technical sciences are more or less uncertain, the application of classical logic might be impossible. The fuzzy logic can be used in problems for which mathematical model is unknown. The fuzzy theory also investigates the influence of selected parameters on the model response.

The aim of fuzzy logic is modeling of systems with a known mapping from input to output. The main assumption is fuzziness of input parameters. Two methods: extension principle and α -optimization might be used in order to investigate the membership function for the output variable.

Based on the results obtained with the use of MATLAB program, the following findings and conclusions could be made:

- In the extension principle, more calculations in order to achieve satisfactory results are necessary. The small amount of calculations gives a jagged solution. Smooth envelope might be obtained only for dense searching of the variability range of fuzzy input data.
- The extension principle is very sensitive to the number of combinations of x and y elements of fuzzy input data. Additionally, the final result is also dependent on the assumed precision Δz of searching maximum from minimum values of membership function.
- The α -optimization method is more suitable for more complicated engineering problems. This method enables to decrease the number of calculations for fuzzy output variable.
- It was noted that the shape of input membership function does not affect significantly on the most reliable value. This value is similar for triangle, trapezoidal and pseudo-Gauss input membership functions.
- The most reliable values which are obtained with the use of mass center and rank level method are similar.

- There are differences between the value for which membership function is 1 and the value measured with the use of rank level or mass center methods. The differences are associated with the non-linear character of mapping model.

The fuzzy theory indicates the potential application in solving engineering problems and gives methodical flexibility to engineers on calculations. Its application on a big scale enables to optimize most of technical processes. In this article, fuzzy logic was used for solving simply problem. In further research, fuzzy theory will be applied for specific engineering problems. Due to the lower number of necessary calculations, α -optimization method will be used. The extension principle will be applied in order to check the consistency of results.

References

- [1] Ali Z., Singh V.: Potentials of fuzzy logic: An approach to handle imprecise data, *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, 2 (2010) 358-361.
- [2] Smets P., Magrez P.: The measure of the degree of truth and of the grade of membership, *Fuzzy Sets Systems*, 25 (1998) 67-72.
- [3] Smarandache F.: *A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Logic, Neutrosophy, Neutrosophic Set, Probability and Statistics*, American Research Press, Rehoboth 2000.
- [4] Rose J.T.: *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2004.
- [5] Skrzat A.: *Wybrane problemy eksperymentalnego i numerycznego wyznaczania naprężeń własnych w kołach pojazdów szynowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
- [6] Mamdani E.H., Assilian S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies*, 7 (1975) 1-13.
- [7] Patyra M.J., Mlynek D.M.: *Fuzzy Logic. Implementation and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., New York 1996.
- [8] <http://skisko.blogspot.com/2005/06/fuzzy-logic-and-its-practical-use-in.html> (access: 03.11.2018).
- [9] Subbulakshmi K.: Antilock-braking system using fuzzy logic, *Middle-East J. Sci. Research*, 20 (2014) 1306-1310.
- [10] http://softcomputing.tripod.com/sample_termpaper.pdf (access: 03.11.2018).
- [11] https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2017_02_28!06_25_26_PM.pdf (access: 03.11.2018).
- [12] Amjad M., Kashif M.I., Abdullah S.S.: Fuzzy logic control of ball and beam system, *2nd Int. Conf. Education Technology and Computer (ICETC)*, 2010, pp. 490-491.
- [13] Parthiban A., Ravikumar R., Zubar A., Duraiselvam M.: Experimental investigation of CO₂ laser cutting on AISI 316L sheet, *J. Scient. Industrial Research*, 73 (2014) 387-393.

- [14] Giorleo G., Memola Capece Minutolo F., Sergi V.: Fuzzy logic modeling and control of steel rod quenching after hot rolling, *J. Mater. Eng. Performance*, 6 (1997) 599-604.
- [15] Aruna A.G., Vani K.H., Meena R.S.: A Study on Reversible Logic Gates of Quantum Computing, *Int. J. Computer Sci. Information Technol.*, 7 (2016) 427-432.
- [16] Möller B., Beer M.: *Fuzzy Randomness. Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin 2004.
- [17] Skrzat A.: Fuzzy logic application to strain-stress analysis in selected elastic-plastic material model, *Arch. Metall. Mater.*, 56 (2011) 559-568.

ZASTOSOWANIE LOGIKI ROZMYTEJ W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

Streszczenie

Do opisu zjawisk, w przypadku których dane wejściowe lub model matematyczny nie są dokładnie znane, zastosowano logikę rozmytą. Teoria rozmyta umożliwia znalezienie najbardziej wiarygodnego rozwiązania przy założeniu rozmycia danych wejściowych. Artykuł przedstawia możliwości zastosowania teorii rozmytej w inżynierii mechanicznej. Zaprezentowano teoretyczne podstawy logiki rozmytej oraz opisano podstawy obliczeń matematycznych na zbiorach rozmytych. Opisano i porównano ze sobą dwie metody stosowane w teorii rozmytej: α -optymalizację oraz zasadę rozszerzeń. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania tych metod do rozwiązania prostego problemu inżynierskiego. Wszystkie obliczenia numeryczne wykonano z użyciem programu MATLAB. Przedstawiono również metodę wyboru najbardziej wiarygodnego rozwiązania opartego na poszukiwaniu środka ciężkości figury ograniczonej wykresem funkcji przynależności oraz na wyznaczeniu średniej arytmetycznej ze środków przyjętych poziomów α .

Słowa kluczowe: logika rozmyta, α -optymalizacja, zasada rozszerzeń, inżynieria mechaniczna

DOI: 10.7862/rm.2018.43

Otrzymano/received: 12.10.2018

Zaakceptowano/accepted: 21.11.2018

Piotr STRZELCZYK¹
Mariusz SZEWCZYK²
Rafał GAŁEK³
Paweł GIL⁴

MEASUREMENT OF SOLAR RADIATION PROPERTIES AND THERMAL ENERGY OF THE ATMOSPHERE IN RZESZOW

This article presents measurement of solar radiation properties and thermal energy of the atmosphere in Rzeszów ($\varphi = 50^{\circ}02'N$, $\lambda = 22^{\circ}17'E$). The measurements include direct, diffuse and global solar radiation as well as thermal radiation from the atmosphere. Weather station provides six of the most important weather parameters: air pressure, temperature, humidity, rainfall, speed and direction. Sky radiometer with dedicated sun tracker provides multiband measurement of direct and diffuse solar radiation. Measurement results from over 4 years have been collected so far and may be used to estimate energy yields from solar systems. The article presents selected results of solar radiation and weather parameters in 2017.

Keywords: solar radiation, renewable energy, weather, atmosphere

1. Introduction

As populations expand, living standards improve, consumption rises and total demand for energy increases. At the same time, growing concerns over climate change are promoting governments worldwide to look for ways to supply energy while minimizing greenhouse gas emissions. Renewable energy is energy that is collected from renewable sources that have the ability to naturally replenish on a human timescale. That includes solar, wind, water, certain types of biomass and geothermal energy. They have the potential to replace conventional fossil fuels in the future. Renewable energy sources exist over wide geographical areas, in contrast to other energy sources, which are concentrated in a limited number of countries. Widespread deployment of renewable energy systems results in significant

¹ Author for correspondence/autor do korespondencji: Piotr Strzelczyk, Politechnika Rzeszowska, 8 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651352, e-mail: piotstrz@prz.edu.pl

² Mariusz Szewczyk, Politechnika Rzeszowska, e-mail: szewmar@prz.edu.pl

³ Rafał Gałek, Politechnika Rzeszowska, e-mail: rafalgalek@prz.edu.pl

⁴ Paweł Gil, Politechnika Rzeszowska, e-mail: gilpawel@prz.edu.pl

improvement of energy security, climate change mitigation, and economic benefits. There are a number of technologies for utilizing renewable energy and for improving energetic efficiency such as photovoltaics (PVs) [1-3], wind turbines [4-5], water turbines [6-7], cogeneration [8-10] and biomass burning [11-12].

Solar energy conversion systems can be divided into three categories according to their primary energy product: solar electricity, solar fuels, and solar thermal energy. The challenge in converting sunlight to electricity via photovoltaic solar cells is to reduce the cost/watt of delivered solar electricity. Modern materials that allow absorbing sunlight efficiently, new techniques to harness the full spectrum of wavelengths in solar radiation and new approaches based on nanostructured architectures can improve the technology used to produce solar electricity. The technological development and successful commercialization of single-crystal solar cells demonstrates the social demand and market potential of PV technology. Novel approaches exploiting, thin films, organic semiconductors, and quantum dots offer fascinating new opportunities for cheaper, more efficient, longer-lasting systems. The key challenge in solar thermal technology is to identify cost-effective methods to convert sunlight into storable thermal energy. Reactors heated by focused, concentrated sunlight in thermal towers reach temperatures exceeding 3000°C, enabling the efficient chemical production of fuels from raw materials without expensive catalysts [13].

It is extremely important to know the thermal parameters of the surroundings, weather and solar radiation properties in a given location in order to design and improve systems utilizing renewable energy sources. Accurate measurements of the solar radiation intensity are needed to determine the performance and efficiency of different type of solar and PV systems [1-3].

The purpose of this article is to present the research capabilities and selected measurement results of existing laboratory in characterization of solar radiation and atmosphere properties.

2. Experimental setup

The laboratory for measurement of solar radiation properties and thermal energy of the atmosphere was founded in November 2013. The purchase was funded with UE grants. The steel structure that supports measuring devices is installed on the roof of the building. The lab is located in Rzeszow ($\varphi = 50^{\circ}02'N$, $\lambda = 22^{\circ}17'E$) and it is a part of the laboratory equipment for renewable energy devices performance investigation.

Incoming short-wave solar radiation can be divided into direct, diffuse and global components. Radiation from the sun is mainly in the „short-wave” range from 300 to 4000 nm that includes the visible, ultraviolet and near infrared wavelengths. A portion of this radiation is absorbed by clouds and aerosols in the atmosphere, which warms up and radiates long-wave radiation (4.5 μm to beyond

40 μm). Direct solar radiation is measured with pyr heliometer directed at the centre of the sun disk. The CHP 1 Kipp&Zonen pyr heliometer has a full opening angle of 5° and measures the normally incident direct irradiance from the sun and its aureole. The CHP1 has a spectral range (50% points) from 200 to 4000 nm and operational temperature range from -40°C to $+80^\circ\text{C}$. Part of the radiation from the sun is absorbed and scattered by clouds and aerosols. This scattered component is the diffuse solar radiation measured with CMP 22 Kipp&Zonen pyranometer with shading ball. This pyranometer can see the complete sky hemisphere, but the direct radiation from the sun is blocked by a shading ball that moves with a sun tracker. Another CMP 22 Kipp&Zonen pyranometer measures global radiation (both the direct and diffuse radiation). The CMP 22 pyranometer has spectral range (50% points) from 200 to 3600 nm, maximum solar irradiance 4000 W/m^2 , operational temperature range -40°C to $+80^\circ\text{C}$ and field of view 180° . For measuring incoming thermal radiation from the sky and clouds CGR4 Kipp & Zonen pyrgeometer is used. It has spectral range (50% points) 4.5 to 42 μm , operational temperature range -40°C to $+80^\circ\text{C}$ and field of view 180° . Net irradiance range for CGR4 is -250 to 250 W/m^2 .

The Kipp & Zonen Solys2 sun tracker is used to drive aforementioned sun sensors. It is the most widely used sun tracker around the world in solar energy and meteorological applications. The sun tracker has integrated GPS receiver to automatically configure location and time data upon installation. The operating temperature range from -40°C to $+50^\circ\text{C}$ using the standard internal heater. The pointing accuracy is better than $<0.1^\circ$, maximum payload is 20 kg (Fig. 1).

The CSD3 sunshine duration sensor is used for the measurement of sunshine duration. Sunshine duration is defined by WMO (World Meteorological Organization) as the time during which the direct solar radiation exceeds the level of 120 W/m^2 . The output is switched high or low to indicate whether this condition is satisfied.

The Vaisala WXT536 is the compact weather station that provides six of the most important weather parameters: air pressure, temperature, humidity, rainfall, wind speed and direction. The barometric pressure can be measured within a range from 600 to 1100 hPa with an accuracy of $\pm 1\text{ hPa}$ at -51°C to $+60^\circ\text{C}$ ($\pm 0.5\text{ hPa}$ from 0°C to 30°C). The outside air temperature can be measured in the range from -51°C to $+60^\circ\text{C}$ with accuracy $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Relative humidity can be measured in the range from 0...100%RH with accuracy $\pm 3\%$ RH. Wind characteristics include the measurement of the velocity in the range of 0...60 m/s with an accuracy of $\pm 3\%$ and detection of wind direction in the range of 0...360°. The Vaisala allows rainfall and hail accumulation measurements with output resolution 0.01mm and daily accuracy better than 5%.

The PREDE POM-01 is a sky radiometer with dedicated sun tracker. It uses a single photo-diode detector and rotating filter wheel to measure radiation in seven narrow wavebands from 315 nm to 1020 nm. The instrument has a sun sensor for active tracking (Fig. 1). The POM-01 sky radiometer provides multi-band

measurement of direct and diffuse solar radiation. POM-01 is used in the Asia-Pacific SKYNET network for aerosol monitoring and satellite ground-truthing around the world [13]. The POM data can be post-processed to provide parameters including aerosol optical depth, scattering coefficients, aerosol distribution and energy distribution.



Fig. 1. Laboratory for measurement of solar radiation properties and thermal energy of the atmosphere: 1 – sun tracker, 2 – pyrgeometer, 3 – pyranometer, 4 – pyranometer with shading ball, 5 – pyrliometer, 6 – sunshine duration sensor, 7 – compact weather station, 8 – sky radiometer

Analog and digital signals from measurement equipment are routed to digital multimeter Keithley 2002 and to a desktop computer. The Keithley 2002 is high performance ($8\frac{1}{2}$ digit, 28 bit) digital multimeter with built-in 10 channel scanner card connected via GPIB with desktop computer. Measurements are taken at 10 seconds intervals and averaged to 1 minute mean value. The results along with the precise time stamps are written in daily files by means of a custom-written application developed in LabVIEW environment.

3. Results and discussion

This chapter will present examples of measurement results recorded during representative sunny summer day of 30.07.2017 and cloudy fall day of 01.10.2017 in Rzeszow. During sunny day (Fig. 2a) a global horizontal irradiance reached maximum of $GHI = 860 \text{ W/m}^2$ at 12:15 local time. Direct horizontal irradiance reached 750 W/m^2 at the same moment and diffuse horizontal irradiance was equal to 76 W/m^2 . Thermal radiation from the sky and clouds was almost constant during all day and didn't exceed the range of $325\text{-}370 \text{ W/m}^2$. Figure 2b presents temperature, relative humidity (RH) and atmospheric pressure variations during a sunny day.

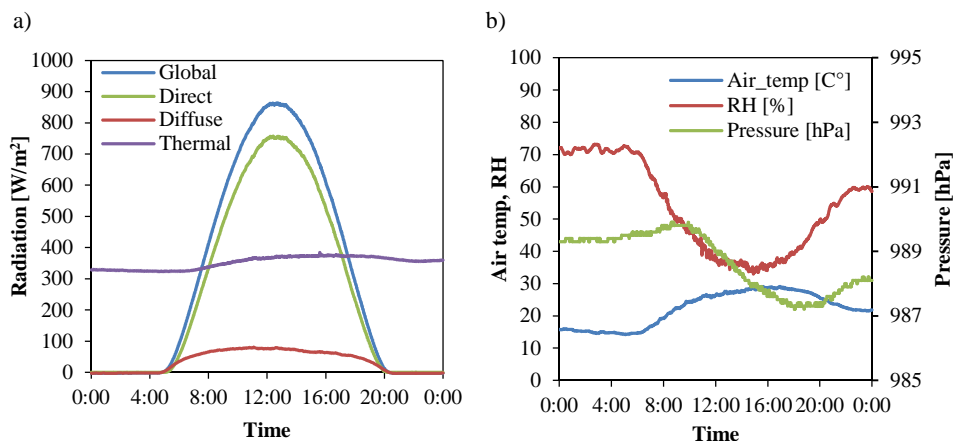


Fig. 2. A sunny day of 30.07.2017: a) solar radiation, b) atmosphere parameters

During cloudy day of 01.10.2017 (Fig. 3a) global, direct and diffuse irradiation were reaching local minima and maxima depending on whether the sun is shaded or not. Figure 3b presents temperature, relative humidity (RH) and atmospheric pressure variations during a cloudy day. Daily yields of direct and diffusion irradiance in 2017 are shown in Fig. 4. Maximum values of horizontal global irradiance occur in June and were about 8.5 kWh/m²/day. Global irradiance in Rzeszów in 2017 was 1100 kWh/m²/year. The paper [14] present average annual global irradiance in Kołobrzeg: 1064 kWh/m²/year, Warszawa: 966 kWh/m²/year and Zakopane: 988 kWh/m²/year. The compact weather station that provides variation in air pressure and temperature in 2017 (Fig. 5).

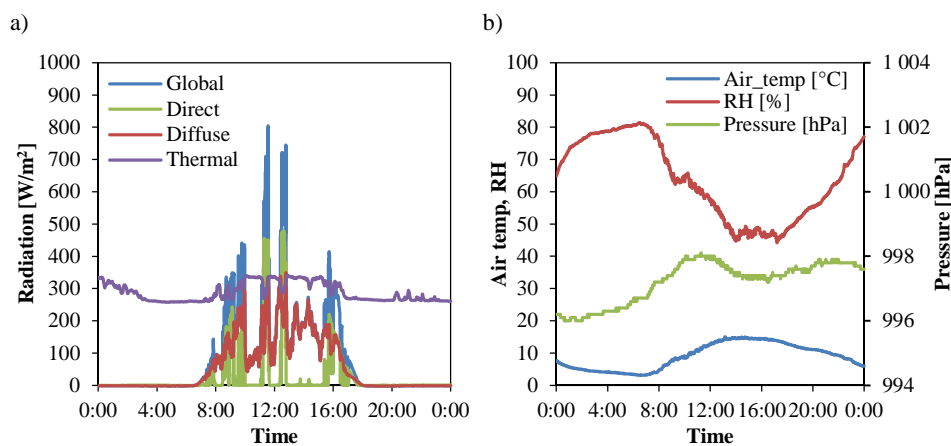


Fig. 3. A cloudy day of 01.10.2017: a) solar radiation, b) atmosphere parameters

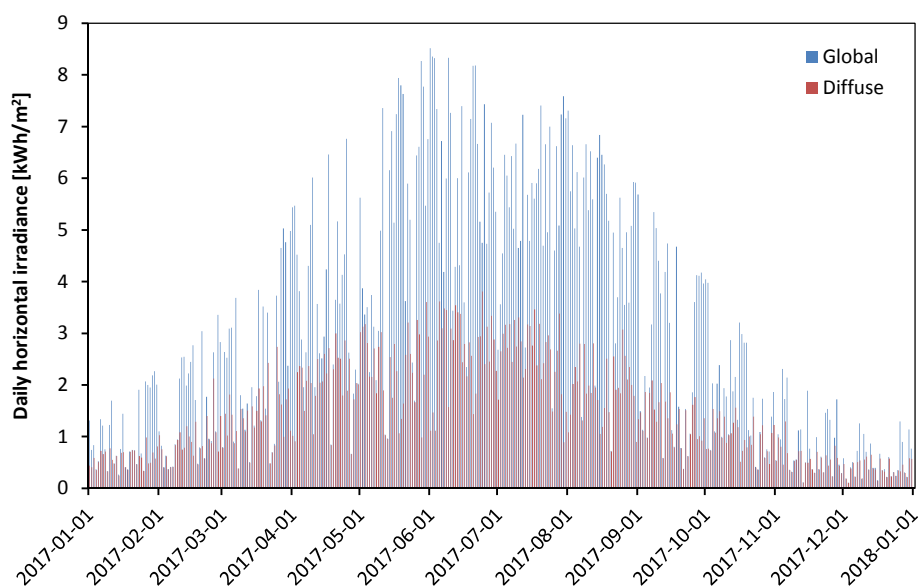


Fig. 4. Daily horizontal global and diffuse irradiance in 2017

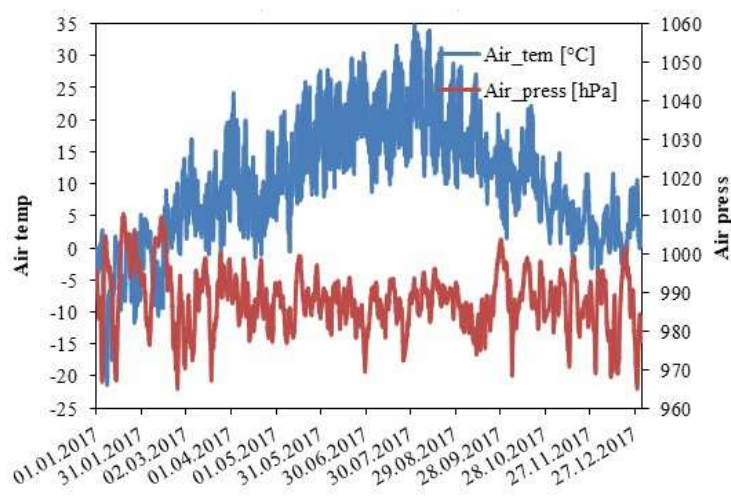


Fig. 5. Daily variation in air pressure and temperature in 2017

4. Conclusion

The article presents sample results of measurements of the solar radiation properties and the state of the atmosphere in 2017. By using this laboratory it is possible to determine the instantaneous values of the sun and atmosphere radiation

and weather conditions. In addition, type and amount of aerosols in the air can be determined.

Global irradiance in 2017 was 1100 kWh/m²/year, diffuse irradiance was 534.8 kWh/m²/year, direct irradiance (measured) was 536.4 kWh/m²/year and thermal irradiance was 2804 kWh/m²/year. The average air temperature in 2017 was 9.9°C, average pressure and relative humidity were 988 hPa and 65.5% respectively.

The presented measurement equipment along with the data acquisition and storage software allow determination of the values of the mean seasonal irradiation, temperature, humidity, wind speed and direction. In the era of renewable energy sources, the presented research equipment enables the optimization of solar systems and determination of efficiency, power and seasonal yields from solar installations, and other devices utilizing renewable energy which is extremely important in their design and operation practice.

References

- [1] Gil P., Szewczyk M.: Roczne badania eksploatacyjne parametrów monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych w Rzeszowie, *Instal*, 4 (2015) 22-27.
- [2] Gil P.: Roczne wyniki pomiaru sprawności amorficznych kolektorów fotowoltaicznych w Rzeszowie, *Rynek Energii*, 4 (2015) 75-83.
- [3] Strzelczyk P., Gil P.: Wpływ zaćmienia słońca na produkcję energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny, *J. Civil Eng. Environ. Archit.*, 34 (2017) 155-164.
- [4] Strzelczyk P., Szczerba Z., Woźniak A.: Modelowanie pionowego profilu prędkości wiatru w tunelu aerodynamicznym, *JCEEA*, 32 (2015) 413-427.
- [5] Gumuła S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z.: *Energetyka wiatrowa*, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków 2006.
- [6] Rehman S., Al-Hadhrami L.M., Alam M.M.: Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 44 (2015) 586-598.
- [7] Deane J.P., Gallachóir B.Ó., McKeogh E.J.: Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14 (2010) 1293-1302.
- [8] Gil P., Tychanicz M., Wilk J.: Instalacja skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (μCHP) – badania eksperymentalne parametrów energetycznych, *Rynek Energii*, 5 (2016) 49-57.
- [9] Gałek R., Gil P., Grosicki S., Wolańczyk F.: Wymiennikowy zasobnik ciepła w mikrogeneracji, *ZN PRz Mechanika*, 31 (2014) 483-490.
- [10] Gil P., Wilk J.: Instalacja CHP z silnikiem spalinowym zasilanym gazem drzewnym, *ZN PRz Mechanika*, 32 (2015) 217-226.
- [11] Gil P., Grosicki S., Wilk J.: Możliwości zastosowań metod oczyszczania gazu powstałego ze zgazowania biomasy w generatorze małej mocy, *Instal*, 12 (2013) 24-28.
- [12] Gil P., Wilk J., Tychanicz M., Wielgos S.: Wstępne badania automatycznego kotła na pellet pod kątem wymagań normy PN-EN 303-5: 2012, *Rynek Energii*, 5 (2017) 74-79.

- [13] Lewis N.S., Crabtree G.: Basic research needs for solar energy utilization: report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization, Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization, April 2005.
- [14] Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych, Ekspertyza Komitetu Termodynamiki i Spalania Wydziału IV PAN wykonana pod kierunkiem W. Gogóła, OW PW, Warszawa 1995.

POMIARY WŁAŚCIWOŚCI PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO I ENERGII CIEPLNEJ ATMOSFERY W RZESZOWIE

Streszczenie

W artykule zaprezentowano pomiary właściwości promieniowania słonecznego i energii cieplnej otoczenia w Rzeszowie ($\varphi = 50^{\circ}02'N$, $\lambda = 22^{\circ}17'E$). Pomiary obejmują promieniowanie słoneczne bezpośrednie, rozproszone i całkowite, dodatkowo mierzone jest promieniowanie ciepłe atmosfery. Kompaktowa stacja pogodowa umożliwia pomiar sześciu najważniejszych parametrów pogodowych: ciśnienia powietrza, temperatury, wilgotności, opadów oraz prędkości i kierunku wiatru. SkyRadiometr z dedykowanym układem śledzenia słońca zapewnia wielopasmowe i spektralne pomiary bezpośredniego promieniowania słonecznego i wielopasmowe pomiary rozproszonego promieniowania słonecznego. Obecnie pomiary obejmują okres ponad 4 lat, które można wykorzystać do oszacowania uzysku energii z systemów słonecznych.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, energia odnawialna, pogoda, atmosfera

DOI: 10.7862/rm.2018.44

Otrzymano/received: 17.07.2018

Zaakceptowano/accepted: 26.11.2018

Recenzenci współpracujący – 2018 r.

Janusz ADAMIEC	Krzysztof NOZDRZYKOWSKI
Stanisław ANTAS	Jozsef NYERS (Hungary)
Sławomir AUGUSTYN	Mariusz OLEKSY
Artur BEJGER	Tomasz PIEJA
Dana BOLIBRUCHOVA	Marek POTOCZEK
(Slovak Republik)	Tomasz ROGALSKI
Vladimir BRUSOV (Russia)	Sławomir SAMOLEJ
Grzegorz BUDZIK	Leszek SKOCZYLAS
Rafał DAŃKO	Andrzej SKRZAT
Paweł DOBRZAŃSKI	Jan SLOTA (Slovak Republik)
Anna J. DOLATA	Andrzej SOBCZYK
Ludmila DULEBOVA (Slovak Republik)	Lydia SOBOTOVA (Slovak Republik)
Zbigniew DZIOPA	Arkadiy SOLOVIEV (Russia)
Ivan GAJDOŠ (Slovak Republik)	Sławomir SPADŁO
Katarzyna GAWDZIŃSKA	Emil SPIŠAK (Slovak Republik)
Paweł GIL	Jana ŠUGAROVA (Slovak Republik)
Marcin GÓRNY	Pavol ŠVEC (Slovak Republik)
Jan JEZERSKI	Stanislav SZABO (Slovak Republik)
Luboš KAŠČAK (Slovak Republik)	Marcin SZUSTER
Marek KOWALIK	Miroslav TOMAŠ (Slovak Republik)
Andrzej KUBIT	Andrzej TRYTEK
Henryk ŁUKOWICZ	Michał WIECZOROWSKI
Aleksander MAZURKOW	Grzegorz WOJNAR
Jacek MICHALSKI	Gabriel WRÓBEL
Wacław MUZYKIEWICZ	Jozef ZAJAC (Slovak Republik)
Dawid MYSZKA	Zbigniew ZAPAŁOWICZ
Witold NIEMIEC	Wiesław ZIMA
Beata NIEZGODA-ŻELASKO	Eugeniusz ZIÓŁKOWSKI
Stanisław NOGA	Wojciech ŻUROWSKI

Afiliacja recenzentów (poza podaną): Polska

Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w czwartym numerze *Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika*, z. 4/2018 oraz zamieszczona na stronie internetowej:
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/mechanika/>
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:
<http://oficyna.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/>
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:
<http://oficyna.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/>
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/mechanika/>
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronach internetowych:
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/>
oraz
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/mechanika/>
w zakładce „Instrukcja dla autorów”.
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/mechanika/>

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą opublikowane w czwartym numerze *Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika*, z. 4/2018.

Zasady recenzowania artykułów naukowych w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej

Procedura recenzowania artykułów naukowych w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej jest zgodna z zaleceniami MNiSzW opracowanymi w formie broszury „Dobre praktyki w procedurach recenzyjnych w nauce”, Warszawa 2011 r.

1. Do oceny każdego artykułu redaktorzy tematyczni (naukowi) powołują dwóch niezależnych recenzentów spoza jednostki naukowej afiliowanej przez autora artykułu.
2. W przypadku artykułów napisanych w językach obcych, co najmniej jeden z recenzentów jest afiliowany w instytucji zagranicznej innej niż narodowość autora artykułu.
3. Redaktorzy tematyczni (naukowi) dobierają recenzentów najbardziej kompetentnych w danej dziedzinie.
4. Między recenzentami i autorami artykułów nie występuje konflikt interesów; w razie potrzeby recenzent podpisuje deklarację o niewystępowaniu konfliktu interesów.
5. Procedura recenzowania przebiega z zachowaniem zasad poufności – recenzenci i autorzy nie znają swoich tożsamości (double-blind review process).
6. Każda recenzja ma formę pisemną i kończy się wnioskiem o dopuszczenie lub odrzucenie artykułu do publikacji.
7. Nie są przyjmowane recenzje niespełniające merytorycznych i formalnych wymagań.
8. Wstępnie zakwalifikowany przez redaktora naczelnego do wydania artykuł zostaje wysłany do recenzentów, którzy wypowiadają się na temat jego przyjęcia lub odrzucenia. Recenzenci mają prawo do powtórnej weryfikacji poprawionego tekstu.
9. W przypadkach spornych powoływani są dodatkowi recenzenci.
10. Uwagi recenzentów są przekazywane autorowi, który ma obowiązek poprawienia tekstu.
11. Ostateczną decyzję o zakwalifikowaniu lub odrzuceniu artykułu podejmuje redaktor naczelny czasopisma, zasięgając opinii członków Komitetu Redakcyjnego.
12. Kryteria kwalifikowania lub odrzucenia artykułu są zawarte w formularzu recenzji.
13. Formularz recenzji znajduje się na stronie internetowej Zeszytów Naukowych.
14. Nazwiska recenzentów współpracujących będą podawane raz w roku – w ostatnim numerze czasopisma, a także opublikowane na stronie internetowej czasopisma (nazwiska recenzentów poszczególnych publikacji lub numerów wydań czasopisma nie są ujawnione).
15. Szczegółowe informacje nt. recenzowania artykułów oraz przebiegu prac w redakcji czasopisma i Oficynie Wydawniczej są opisane w wytycznych dla autorów artykułów naukowych.

**Informacje dla autorów artykułów naukowych publikowanych
w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej
zjawiska *ghostwriting* i *guest authorship***

Aby przeciwdziałać nierzetelności w nauce (*ghostwriting*, *guest authorship*), redakcje Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej prowadzą odpowiednie procedury charakterystyczne dla reprezentowanych dziedzin nauki i na bieżąco wdrażają podane rozwiązania:

1. Redakcja wymaga podania wkładu poszczególnych autorów w powstanie artykułu (z podaniem ich afiliacji i informacji, kto jest autorem koncepcji, założeń, badań itd.); główną odpowiedzialność ponosi autor zgłaszający artykuł.
2. Redakcja wyjaśnia autorom pojęcia *ghostwriting* i *guest authorship*, które są przejawem nierzetelności naukowej, a wszelkie wykryte przypadki tego typu działań ze strony autorów będą demaskowane, włącznie z powiadomieniem odpowiednich podmiotów (instytucje zatrudniające autorów, towarzystwa naukowe itp.).
3. Redakcja uzyskuje informacje o źródłach finansowania publikacji, wkładzie instytucji naukowo-badawczych i innych podmiotów (*financial disclosure*).
4. Redakcja będzie dokumentować wszelkie przejawy nierzetelności naukowej, zwłaszcza łamanie zasad etyki obowiązujących w nauce.

Z *ghostwriting* mamy do czynienia wówczas, gdy ktoś wniósł istotny wkład w powstanie artykułu, lecz ani jego udział jako jednego z autorów nie został ujawniony, ani nie wymieniono go w podziękowaniach zamieszczonych w publikacji.

Z *guest authorship* mamy do czynienia wówczas, gdy udział autora jest znikomy lub w ogóle nie miał miejsca, a jego nazwisko jest podane jako autora lub współautora.

Review Sheet / Blankiet recenzji

Scientific Papers of RUT /Zeszyty Naukowe PRz

Title / Tytuł:

A Please respond to the following questions

Prosimy o odpowiedzi na następujące pytania

	Yes Tak	No Nie	See comments Zobacz uwagi	
1. Is this a new and original contribution to the literature in this field? Czy jest to oryginalne opracowanie wśród publikacji z tego zakresu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2. Is the organization of the paper satisfactory? Czy układ opracowania jest zadowalający?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3. Is the length of the paper appropriate to the content? Czy objętość opracowania jest adekwatna do jego treści?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4. Is the language and presentation clear to readers familiar with the field? Czy język oraz sposób przedstawienia wyników jest jasny dla czytelnika?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5. Do the notation and nomenclature used meet the standards determined in the area which the paper deals with? Czy oznaczenia oraz terminologia odpowiadają standardom z określonej dyscypliny nauki?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6. Do the interpretation of the results and conclusions sound logical and justifiable in your opinion? Czy według Pani(a) opinii interpretacja wyników oraz wnioski są logiczne i uzasadnione?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7. Does the abstract contain sufficient and useful information? Czy streszczenie zawiera wystarczające oraz użyteczne informacje?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8. Does the title of the paper reflect sufficiently and clearly the content? Czy tytuł artykułu jest jasny i odpowiada jego treści?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9. Are the illustrations and tables all necessary and acceptable? Czy rysunki i tabele są potrzebne oraz odpowiednie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10. Final recommendation (to publishing purpose): paper Wniosek końcowy (rekomendacja do celów wydawniczych): praca	accepted przyjęta <input type="checkbox"/>	accepted with minor changes przyjęta z małymi zmianami <input type="checkbox"/>	accepted with major changes ¹ przyjęta z dużymi zmianami ¹ <input type="checkbox"/>	rejected ² odrzucona ² <input type="checkbox"/>

verte

B Confidential/Poufne

Name and Surname/Imię i Nazwisko:

Address/Adres

.....
podpis / signature

¹ repeated review required / wymaga ponownej opinii Recenzenta

² write justification please / proszę uzasadnić

C List here your detailed comments to support the responses you gave above.
Szczegółowy komentarz do udzielonych powyżej odpowiedzi.

Instrukcja dla autorów artykułów naukowych publikowanych w Oficynie Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej

Dane podstawowe

1. Pole zadruku: 12,5 x 19 cm + 1 cm na numery stron
2. Marginesy: górny – 5,20 cm, dolny – 5,20 cm, lewy – 4,25 cm, prawy – 4,25 cm
3. Czcionka: Times New Roman 11 pkt
4. Edytor: Microsoft Word
5. Zapis tekstu: obustronnie wyjustowany, interlinia pojedyncza, wcięcie pierwszego wiersza 0,75 cm, nie należy zostawiać pustych wierszy między akapitami
6. Wszystkie kolumny artykułu powinny być w całości wypełnione; pierwsza strona nietypowa – zawiera nagłówek, nazwisko Autora (Autorów), tytuł artykułu, streszczenie i początek artykułu, kolejne strony zawierają dalszą część artykułu, w tym tabele (tablice), rysunki (ilustracje, fotografie, wykresy, schematy, mapy), literaturę i streszczenie
7. Należy wprowadzić automatyczne dzielenie wyrazów

Dane szczegółowe (układ artykułu)

1. Na pierwszej stronie (nieparzystej) należy umieścić nagłówek (do pobrania): 10 pkt, pismo grube
2. Na kolejnych stronach artykułu u góry należy umieścić paginę żywą: strona parzysta – numer strony do lewego marginesu, pismo podrzędne 10 pkt, inicjał imienia i nazwisko Autora (Autorów) do prawego marginesu, pismo podrzędne 10 pkt; strona nieparzysta – tytuł artykułu lub (w przypadku dłuższego tytułu) jego logiczny początek zakończony wielokropkiem, pismo podrzędne 10 pkt
3. W dalszym ciągu na pierwszej stronie należy umieścić pismem grubym (odstęp przed 42 pkt): imię (pismo podrzędne 10 pkt), nazwisko (wersaliki 10 pkt) Autora (Autorów)
4. Tytuł artykułu – wersaliki 15 pkt, pismo grube, do lewego marginesu (nie należy dzielić wyrazów w tytule), interlinia pojedyncza, odstęp przed 24 pkt, odstęp po 18 pkt
5. Streszczenie (w języku artykułu) – 200-250 słów, pismo podrzędne 9 pkt, wcięcie całości z lewej strony 2 cm, bez akapitu, interlinia pojedyncza, odstęp po 12 pkt
6. Słowa kluczowe – pismo podrzędne 9 pkt, bez akapitu, interlinia pojedyncza, odstęp po 24 pkt
7. Imię i nazwisko Autora do korespondencji oraz pozostałych Autorów, afiliacja, adresy pocztowe, numery telefonów, e-maile – na dole pierwszej strony, pod kreską, pismo podrzędne 9 pkt z odpowiednimi odnośnikami, odstęp przed 2 pkt
8. Śródtytuł 1. stopnia – pismo podrzędne 13 pkt, grube, do lewego marginesu, interlinia pojedyncza, odstęp przed 14 pkt, odstęp po 9 pkt
9. Tekst artykułu, a w nim tabele (tablice), materiał ilustracyjny, wzory oraz śródtytuły niższego stopnia

10. Śródtytuł 2. stopnia – pismo podrzędne 11,5 pkt, grube, do lewego marginesu, interlinia pojedyncza, odstęp przed 10 pkt, odstęp po 8 pkt
11. Śródtytuł 3. stopnia – pismo podrzędne 11 pkt, do lewego marginesu, interlinia pojedyncza, odstęp przed 8 pkt, odstęp po 6 pkt
12. Nagłówek Literatura – pismo podrzędne 11,5 pkt, grube, do lewego marginesu, odstęp przed 12 pkt, odstęp po 8 pkt
13. Spis literatury cytowanej – pismo podrzędne 10 pkt, interlinia pojedyncza, nie należy zostawiać pustych wierszy między pozycjami literatury, odstęp po 2 pkt
14. Tytuł artykułu w języku angielskim (lub polskim) – wersaliki 11 pkt, pismo grube, do lewego marginesu, interlinia pojedyncza, odstęp przed 20 pkt, odstęp po 12 pkt
15. Nagłówek Summary (lub Streszczenie) – pismo podrzędne 9 pkt, grube, odstępy między znakami rozstrzelone co 2 pkt, odstęp po 6 pkt
16. Streszczenie w języku angielskim (lub polskim) – 200-250 słów, pismo podrzędne 9 pkt, wcięcie pierwszego wiersza 0,75 cm, interlinia pojedyncza, odstęp po 12 pkt
17. Słowa kluczowe – pismo podrzędne 9 pkt, bez akapitu, interlinia pojedyncza
18. Numer identyfikacyjny DOI – pismo podrzędne 9 pkt, bez akapitu
19. Terminy przesłania artykułu do redakcji i przyjęcia do druku – pismo podrzędne 9 pkt, kursywa, bez akapitu, interlinia pojedyncza

Rozmieszczenie rysunków (ilustracji, fotografii, map, wykresów, schematów)

1. Materiał ilustracyjny należy umieszczać możliwie jak najbliżej miejsca jego powołania
2. Nie należy przekraczać pola zadruku (12,5 x 19 cm), w którym musi się zmieścić i materiał ilustracyjny, i podpis
3. Większe rysunki (i inny materiał ilustracyjny) wraz z podpisem powinny zajmować całe pole zadruku, mniejsze zaś należy przesunąć odpowiednio – do lewego marginesu (na stronach parzystych), do prawego marginesu (na stronach nieparzystych)
4. Podpis w dwóch językach: w języku artykułu i w języku angielskim, należy umieścić pod rysunkiem (i innym materiałem ilustracyjnym), w jego ramach, bez kropki na końcu (jeśli jest to materiał zapożyczony, należy podać źródło), pismo podrzędne 9 pkt
5. Odstęp między materiałem ilustracyjnym a podpisem – 9 pkt, interlinia pojedyncza, odstęp między podpisami 4 pkt, odstęp po 14 pkt
6. Opis słowny na rysunkach należy ograniczyć do minimum, zastępując go liczbami arabskimi, a objaśnienia przenieść do podpisu
7. Materiał ilustracyjny powinien mieć dobrą jakość, należy ujednoczyć formę i opisy w całym artykule (pismo podrzędne proste, od małej litery, maks. 9, min. 6 pkt w zależności od wielkości rysunku)
8. Materiał ilustracyjny należy ponumerować kolejno w ramach artykułu
9. Jeżeli w artykule występują różne rodzaje materiału ilustracyjnego, każdemu z nich należy nadać odrębną, ciągłą numerację

10. Materiał ilustracyjny należy przygotować w odcieniach czarno-szarych (do 20% czerni), ponieważ przy wydruku czarno-białym kolorowe rysunki są słabo lub całkowicie niereprodukowalne
11. Rysunki do druku kolorowego (za zgodą redaktora naczelnego czasopisma) należy przygotować w plikach .tif, .jpg

Rozmieszczenie tabel (tablic)

Tabela – zestawienie tekstów i liczb bądź samych liczb uszeregowanych w kolumny i wiersze

Tablica – zestawienie tekstów i liczb wzbogacone dodatkowo elementami graficznymi lub kolorystycznymi (niekiedy stanowią je tylko ilustracje)

1. Tabele (tablice) należy umieszczać możliwie jak najbliżej miejsca ich powołania
2. Nie należy przekraczać pola zadruku (12,5 x 19 cm)
3. Większe tabele (tablice) włącznie z tytułem zajmują całe pole zadruku, mniejsze zaś należy przesunąć odpowiednio – do lewego marginesu (na stronach parzystych), do prawego marginesu (na stronach nieparzystych)
4. Nad tabelą (tablicą) należy umieścić tytuł w dwóch językach: w języku artykułu i w języku angielskim. Tytuł rozpoczyna się całym słowem tabela (tablica)/table i umieszcza nad nią, w jej ramach, bez kropki na końcu; pismo podrzędne 9 pkt, interlinia pojedyncza; jeżeli tabela (tablica) jest zapożyczona, należy podać źródło
5. Odstęp przed tytułem tabeli (tablicy) 12 pkt, odstęp między tytułami 4 pkt, odstęp między tytułem a tabelą (tablicą) 8 pkt
6. Legenda po tabeli (tablicy) – odstęp od tabeli (tablicy) 6 pkt, interlinia pojedyncza, odstęp po 14 pkt
7. Teksty w główce tabeli (tablicy), tj. w górnej, wydzielonej części tabeli (tablicy), objaśniające treść kolumn zapisuje się pismem grubym, rozpoczynając od dużej litery, teksty w boczku tabeli, tj. w bocznej, wydzielonej części tabeli, objaśniające treść wierszy rozpoczyna się dużymi literami – teksty w pozostałych rubrykach składa się małymi literami
8. Tabele (tablice) należy numerować kolejno w ramach artykułu. W przypadku występowania i tabel, i tablic należy nadać im odrębną, ciągłą numerację
9. Jeżeli tabela (tablica) nie mieści się w jednym polu zadruku, można ją podzielić i przenieść na następną stronę czy strony – wówczas nad wszystkimi częściami tabeli (tablicy) należy powtórzyć jej numer i tytuł, ze skrótem (cd.)
12. Tabele (tablice) należy przygotować w odcieniach czarno-szarych (do 20% czerni), ponieważ przy wydruku czarno-białym kolorowe tabele (tablice) są słabo lub całkowicie niereprodukowalne
13. Tabele (tablice) do druku kolorowego (za zgodą redaktora naczelnego czasopisma) należy przygotować w plikach .tif, .jpg

Rozmieszczenie wzorów

1. Wzory należy umieszczać z lewej strony, z wcięciem 0,75 cm, pismo proste 11 pkt, wartości indeksów i potęg 7 pkt
2. Numery wzorów należy umieszczać w nawiasach okrągłych, wyrównując do prawego marginesu, pismo proste 11 pkt
3. Wzory powinny być opatrzone objaśnieniem występujących w nich elementów
4. Wzory, do których są odniesienia w tekście, należy numerować kolejno w ramach artykułu
5. Dłuższe wzory można dzielić na znakach relacji lub działania – znak, na którym się przenosi wzór, należy pozostawić na końcu pierwszego wiersza
6. Przed wzorem i po nim należy zachować odstęp 10 pkt

Rozmieszczenie spisu literatury

1. Spis literatury umieszcza się za treścią artykułu, w kolejności alfabetycznej nazwisk autorów
2. Powołania na literaturę należy zapisywać w tekście w nawiasie kwadratowym
3. W spisie literatury należy umieścić wyłącznie te publikacje, które są powoływane w tekście

PRZYKŁADY:

Książki

Lewandowski W.M.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

Czasopisma

Pietrucha K.: Analiza czasu odnowy i naprawy podsystemu dystrybucji wody dla miasta Rzeszowa, Instal, nr 10, 2008, s. 113-115.

Dokumenty elektroniczne

Zanotti G., Guerra C.: Is tensegrity a unifying concept of protein folds? FEBS Letters, vol. 534, no. 1-3, 2003, pp. 7-10, <http://www.sciencedirect.com> [dostęp: 8 czerwca 2011 r.].

Rozmieszczenie streszczenia

1. Po literaturze umieszcza się tytuł artykułu, nagłówek Summary i streszczenie w języku angielskim
2. Gdy artykuł jest w języku angielskim, na początku należy umieścić streszczenie w języku angielskim, a na końcu w języku polskim
3. Gdy artykuł jest w innym języku kongresowym, na początku należy umieścić streszczenie w języku artykułu, a na końcu w języku angielskim
4. Po streszczeniu umieszcza się słowa kluczowe w tym samym języku co streszczenie

Rozmieszczenie numeru identyfikacyjnego i informacji dodatkowych

1. Po słowach kluczowych należy umieścić numer identyfikacyjny DOI
2. Pod numerem identyfikacyjnym zamieszcza się terminy przesłania artykułu do redakcji i przyjęcia do druku

Inne uwagi

1. W artykule można stosować wyliczenia – elementy wyliczeń należy oznaczać w całym artykule w sposób jednolity, np. za pomocą cyfr arabskich z kropką lub małych liter z nawiasem
2. W artykule należy stosować ogólnie przyjęte skróty, ale zdanie nie może się zaczynać od skrótu – należy go wówczas rozwinąć lub przeredagować zdanie
3. W artykułach każdy cytat musi być opatrzony informacją bibliograficzną (w formie przypisu na dole strony lub odwołania do spisu literatury)
4. Przypisy (pismo podrzędne 9 pkt) należy zapisywać w sposób jednolity w całym artykule, opatrując je odnośnikami gwiazdkowymi (gdy jest ich niewiele) lub liczbowymi, przyjmując ciągłą numerację w całym artykule i umieszczając każdy przypis od nowego akapitu

PRZYKŁADY:

- ¹ M. Hereźniak, *Kreowanie marki narodowej – rola idei przewodniej na przykładzie projektu „Marka dla Polski”*, [w:] H. Szulce, M. Florek, *Marketing terytorialny – możliwości aplikacji, kierunki rozwoju*, Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań 2005, s. 344-345.
 - ² L. Witek, *Wpływ ekologicznych funkcji opakowań na postawy rynkowe konsumentów*, *Opakowanie*, nr 5, 2006, s. 12-17.
 - ³ J. Strojny, *Zmiany gospodarcze i społeczne w integrującej się Europie*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 225, *Zarządzanie i Marketing*, z. 5, 2006, s. 45-50.
5. Nie należy pozostawiać na końcu wiersza tytułów znajdujących się przed nazwiskiem, inicjału imienia, spójników, cyfr arabskich i rzymskich
 6. Należy stosować wyłącznie legalne jednostki miar

Zachęcamy Autorów do zapoznania się z archiwum artykułów naukowych zawartych w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej oraz do wykorzystania ich w bibliografii swojego artykułu.

Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika
RUTMech (p-ISSN 0209-2689), (e-ISSN 2300-5211)
Scientific Letters of Rzeszow University of Technology, Mechanics

KOMITET REDAKCYJNY

Dane kontaktowe do redakcji:

Redaktor naczelny

prof. dr hab. inż. Feliks STACHOWICZ
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Przeróbki Plastycznej
al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
e-mail: stafel@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1538

Osoby do kontaktu/adresy e-mail do przesyłania artykułów:

Redaktorzy tematyczni - naukowi

dr hab. inż. Andrzej BURGHARDT, prof. PRz
Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki
e-mail: andrzejb@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1905

dr hab. inż. Tomasz ROGALSKI, prof. PRz
Katedra Awioniki i Sterowania
e-mail: orakl@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1477

prof. dr hab. inż. Jarosław SEP
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
e-mail: jsztmiop@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1512

Redaktor statystyczny

prof. dr hab. inż. Paweł PAWLUS
e-mail: ppawlus@prz.edu.pl
tel. +48 17 854 1183

Sekretarz redakcji

dr hab. inż. Tomasz TRZEPIECIŃSKI, prof. PRz
e-mail: tomtrz@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1714

Członkowie

dr hab. inż. Tadeusz BALAWENDER, prof. PRz
e-mail: tbalaw@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1667

dr hab. inż. Piotr STRZELCZYK, prof. PRz
e-mail: piotstrz@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1608

Adres pocztowy i afiliacja Komitetu Redakcyjnego

Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów, Polska

Informacje dla autorów
<https://oficyna.prz.edu.pl/zeszyty-naukowe/mechanika>

Dane kontaktowe do wydawcy:

Kierownik Oficyny Wydawniczej
mgr inż. Joanna BIENIASZ
Politechnika Rzeszowska
Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów
e-mail: jbie@prz.edu.pl
tel. +48 17 865 1195