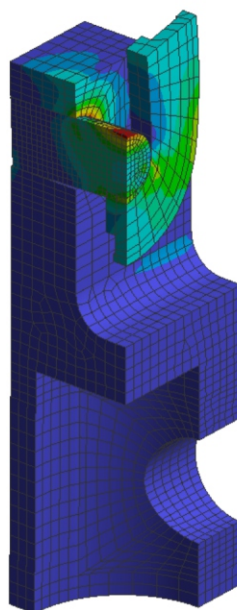
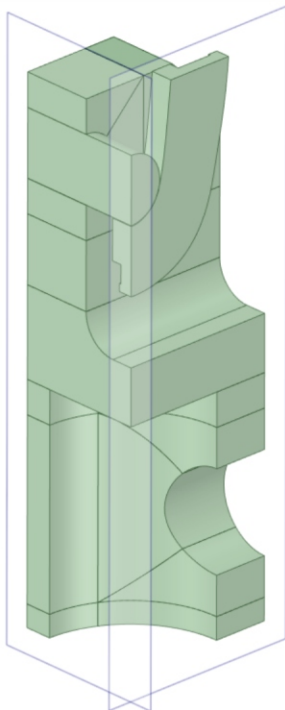




**KATEDRA MECHANIKI  
I INŻYNIERII OBLICZENIOWEJ**  
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY POLITECHNIKA ŚLĄSKA

**Studencka Konferencja Naukowa**

**METODY  
KOMPUTEROWE  
2020**



**Gliwice 2020**

**Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej**  
**Wydział Mechaniczny Technologiczny**  
**Politechnika Śląska**

**Studencka Konferencja Naukowa**  
**„METODY KOMPUTEROWE – 2020”**

**Gliwice, wrzesień 2020 r.**

## **Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej**

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

tel.: 32 237 12 04, fax: 32 237 12 82

### **Komitet Naukowy:**

Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Prof. dr hab. inż. Antoni John

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Dr hab. inż. Witold Beluch, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Marek Jasiński, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Grzegorz Kokot, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Waław Kuś, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Jerzy Mendakiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Marek Paruch, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Arkadiusz Poteralski, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ

### **Komitet Organizacyjny:**

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Dr inż. Waldemar Mucha

Dr inż. Witold Ogierman

Mgr inż. Mateusz Holek

Mgr inż. Natalia Mołęda

Mgr inż. Olaf Popczyk

Mgr inż. Tomasz Schlieter

Mgr inż. Anna Skorupa

Mgr inż. Mikołaj Stryczyński

Inż. Barbara Ciszynska

Jakub Podgórski

Inż. Mateusz Kita

### **Komitet Redakcyjny:**

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Wydanie zeszytów naukowych zostało sfinansowane przez MESco Sp. z o. o. w Bytomiu.

Rysunek na okładce wykonała inż. Barbara Ciszynska, Autorka artykułu na stronie 13.

ISBN 978-83-951185-1-7

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.

Druk i oprawę wykonano w Wydawnictwie Politechniki Śląskiej.

Nakład 100 egz. Druk ukończono we wrześniu 2020 r.

## Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 42 artykuły prezentowane na czternastej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe”, odbywającej się 24 września 2020 roku na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Konferencję zorganizowali studenci i pracownicy Katedry Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Politechniki Śląskiej. Publikacje dotyczą zastosowania metod komputerowych w różnych dziedzinach techniki, takich jak:

- wspomaganie komputerowe prac inżynierskich,
- wytrzymałość materiałów,
- biomechanika,
- hydromechanika,
- termodynamika,
- robotyka,
- informatyka,
- optymalizacja,
- badania doświadczalne.

Dziękuję studentom za przygotowanie artykułów i prezentacji na konferencję, Komitetowi Naukowemu za troskę o poziom naukowy prac, Komitetowi Redakcyjnemu za przygotowanie zeszytu naukowego do druku i wersji elektronicznej materiałów konferencyjnych, a Komitetowi Organizacyjnemu za przygotowanie obrad konferencji.

Szczególne podziękowania za wsparcie finansowe organizacji konferencji składam przedstawicielom firmy MESco Sp. z o. o.

Duża liczba zgłoszonych artykułów świadczy o znacznej aktywności naukowej studentów i potrzebie organizacji tego rodzaju konferencji. Życzę studentom owocnych dyskusji w czasie konferencji. Mam nadzieję, że udział w niej będzie inspiracją do dalszych badań naukowych.

Opiekun Naukowy Studenckiego Koła Naukowego  
„Metod Komputerowych”

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Gliwice, wrzesień 2020 r.

**Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych”**  
Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej  
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska  
*www.mio.polsl.pl*

**Zarząd Koła** w roku akademickim 2019/2020:

Przewodnicząca: inż. Barbara Ciszynska, Mechanika i Budowa Maszyn  
Wiceprzewodniczący: Jakub Podgórski, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji  
Sekretarz: inż. Mateusz Kita, Mechanika i Budowa Maszyn

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński  
Opiekunowie ds. organizacji: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. PŚ,  
dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych” zostało zarejestrowane w dniu 6.12.2001 r. Głównym celem Koła jest poszerzanie wiedzy studentów na temat metod komputerowych i ich zastosowań w technice.

**Zakres merytoryczny działania Koła:**

- poznanie nowych metod komputerowych i technik informatycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w dziedzinie mechaniki,
- zapoznanie się ze sprzętem i programami komputerowymi oraz ich obsługą,
- pogłębienie wiedzy z zakresu mechaniki układów odkształcalnych, termomechaniki, biomechaniki, analizy wrażliwości i optymalizacji, modelowania układów i procesów, metod sztucznej inteligencji.

**Formy działalności Koła:**

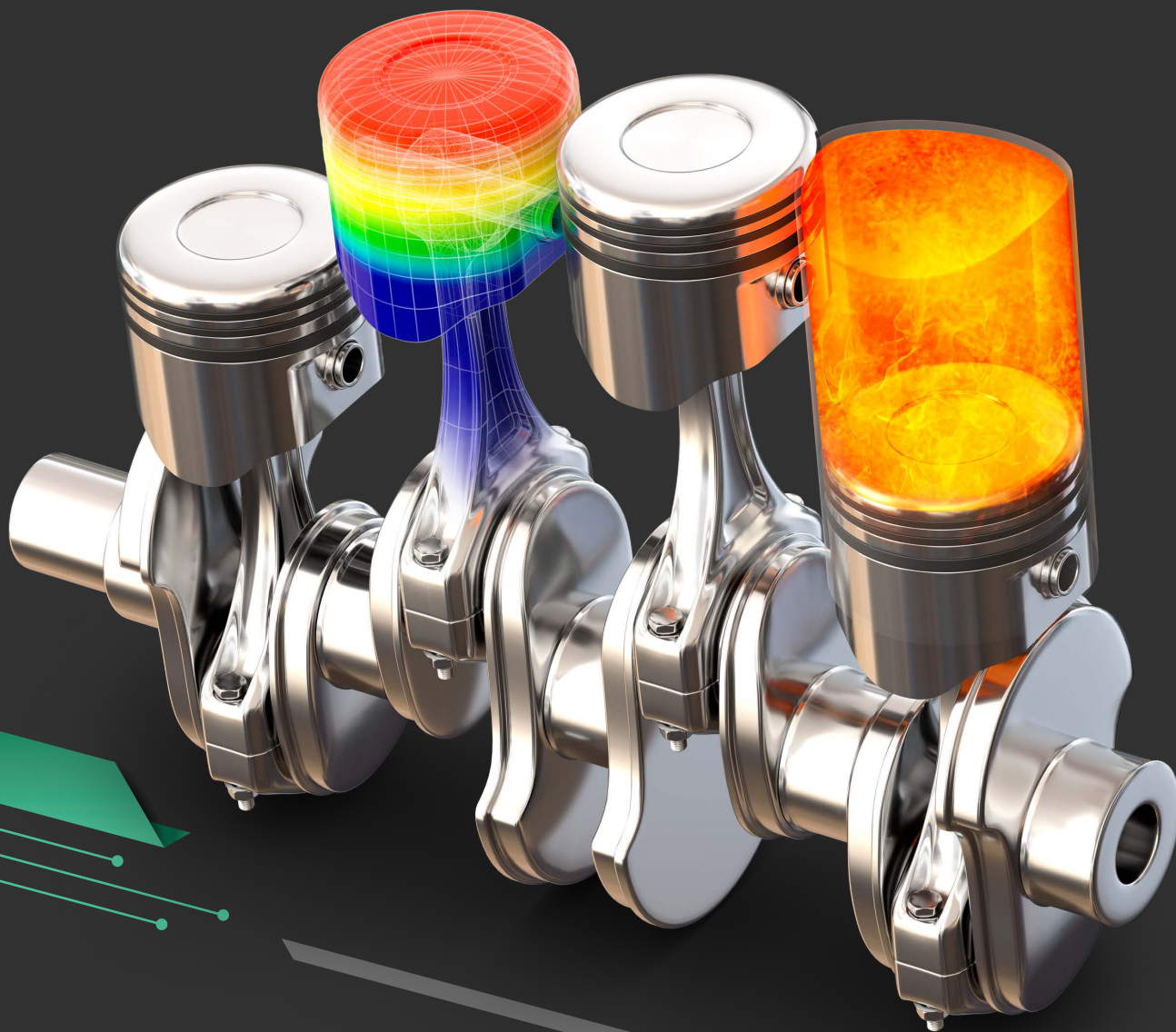
- udostępnianie członkom Koła sprzętu oraz programów komputerowych znajdujących się w Laboratorium Metod Komputerowych Katedry Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej (Katedry MiIO),
- samokształcenie i prowadzenie badań własnych przez członków Koła,
- prezentacje przez członków Koła prac własnych, prac przejściowych i prac dyplomowych na zebraniach naukowych Koła i konferencjach,
- opieka naukowa pracowników Katedry MiIO nad pracami własnymi członków Koła,
- referaty pracowników naukowych Katedry MiIO oraz zaproszonych gości na zebraniach naukowych Koła,
- organizowanie kursów obsługi programów wspomagających prace inżynierskie oraz kursów programowania,
- organizowanie konkursów,
- uczestniczenie w wystawach i prezentacjach sprzętu i programów komputerowych,
- zapoznanie się z pracą biur projektowo-konstrukcyjnych, instytutów, szkół wyższych stosujących metody mechaniki komputerowej, przez organizowanie wycieczek,
- współpraca naukowa z innymi studenckimi kołami naukowymi.



Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe – 2019” – Gliwice, 30.05.2019 r.



Zajęcia z zakresu podstaw obsługi programu ANSYS SpaceClaim  
– Gliwice, 24.10.2019 r.



# MESCO

# ANSYS

CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

## Symulacja w nauce i przemyśle

- dynamika liniowa
- analizy zmęczeniowe
- analizy kompozytów
- analizy explicit
- kontakt w MES
- analizy termiczne i termomechaniczne

Firma MESco jest biurem inżynierskim zajmującym się symulacją komputerową. Od ponad 25 lat wspieramy przemysł i ośrodki badawcze poprzez wykonywanie analiz numerycznych z zakresu mechaniki, terminiki, dynamiki płynów, elektromagnetyzmu, a także optyki. Jesteśmy przedstawicielem firmy ANSYS Inc. na Polskę o statusie Elite. To, co wyróżnia naszą firmę to indywidualne podejście do każdego tematu oraz ogromne doświadczenie naszych inżynierów w zakresie symulacji komputerowej.





## Spis treści

<b>AZIZ VINEET</b> An overview of soft robotics for lower-limb rehabilitation .....	1
<b>BOCZEK MIROSŁAW</b> Modelowanie przepływu Couette z zastosowaniem dyskretyzacji typu link-wise .....	5
<b>BURY SZYMON</b> Projekt i analiza numeryczna pasywnego zabezpieczenia prądowego .....	9
<b>CISZYŃSKA BARBARA</b> Projekt przyrządu do badań wytrzymałościowych karabinka wspinaczkowego .....	13
<b>DASZYŃSKI ADAM</b> Modelowanie przepływu Couette z zastosowaniem dyskretyzacji typu wet-node .....	17
<b>DOMIŃCZYK MONIKA</b> Wyznaczanie współczynnika przenikania ciepła ścian jedno- i dwuwarstwowych w budynkach jednorodzinnych .....	21
<b>FRĄCZEK ŁUKASZ</b> Projekt oraz analiza wytrzymałościowa robota przemysłowego .....	25
<b>GEMBALCZYK KAMIL</b> Analiza wibroakustyczna przyrządu badawczego lampy samochodowej .....	29
<b>HAŃDEREK WOJCIECH, KOBIELSKI MICHAŁ, POLNIK PAWEŁ</b> A concept of ICS cybersecurity benchmark problem .....	33
<b>HRAPEĆ FILIP</b> Stanowisko laboratoryjno-dydaktyczne do badania systemów fotowoltaicznych .....	37
<b>JAROSZ JOACHIM</b> Numeryczna analiza modalna osłony układu wydechowego .....	41
<b>JASIULEK TOBIAS</b> Optymalizacja toru ruchu robota w oparciu o algorytm najkrótszej drogi w sieci .....	45
<b>JURECZKO MARCIN</b> Dynamic analysis of the exploration robot chassis in CoppeliaSim software .....	49
<b>KALINOWSKI MARCIN</b> Wpływ zastosowania superelementu upraszczającego model numeryczny na czas optymalizacji topologicznej .....	53

<b>KARPETA MARCIN</b>	
Modelowanie przepływu w kanale prostokątnym z przeszkodą .....	57
<b>KITA MATEUSZ</b>	
Analiza termiczna hamulca tarczowego .....	61
<b>KŁOSOWSKI TOMASZ</b>	
Wpływ modelu materiału na zachowanie absorbera energii .....	65
<b>KOGUT MAGDALENA</b>	
Numerical analysis of the stent-artery system with the use of non-linear material models ...	69
<b>LUBSZCZYK PIOTR</b>	
Analiza wytrzymałościowa kompozytowej felgi bolidu Formuły Student .....	73
<b>MAZUREK DANIEL, GROŃ JAKUB</b>	
Minimalizacja masy wieży konkursowej z wykorzystaniem analizy wyboczeniowej .....	77
<b>MOLEDA NATALIA</b>	
Koncepcja stanowiska eksperymentalnego do analizy zachowania stentów w naczyniu krwionośnym in vitro .....	81
<b>NAGI MARCIN</b>	
Aplikacja operatora robota eksploracyjnego .....	85
<b>NOWAK KRZYSZTOF</b>	
Modelowanie i optymalizacja wielokryterialna wybranej struktury kompozytowej .....	89
<b>OKÓLSKI KRZYSZTOF</b>	
Współczynnik przenikania ciepła dachów drewnianych w domach jednorodzinnych .....	93
<b>OLSZÓWKA PRZEMYSŁAW</b>	
Modernizacja manipulatora robota eksploracyjnego .....	97
<b>PAŹDZIOR PAWEŁ</b>	
Opracowanie algorytmu optymalizacji globalnej typu fireworks algorithm .....	101
<b>PIEC KAMIL</b>	
Kamertony terapeutyczne – modelowanie, optymalizacja i symulacje numeryczne .....	105
<b>POPCZYK OLAF</b>	
Modelling of unsteady heat flow in 1D metamaterial by Fourier and C-V equations and the Kansa method .....	109
<b>POPIEL RAFAŁ</b>	
Ocena zmiany jakości procesu montażu połączenia gwintowego za pomocą modelu regresyjnego ze zmienną fikcyjną .....	113

**POREBA-SEBASTJAN MARTYNA**

Niesprężona metoda homogenizacji w modelowaniu wieloskalowym kompozytów z wtrąceniami w postaci włókien hipersprężystych ..... 117

**PYKA WOJCIECH, BRĘCZEWSKI JAKUB**

A prototype mobile platform of analog Mars exploration rover ..... 121

**ROBAK RAFAŁ**

Analiza modalna kierownicy turbiny niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego .... 125

**RUTKOWSKI MACIEJ**

Modelowanie i analiza wytrzymałościowa egzoszkieletu rehabilitacyjnego kończyny górnej ..... 129

**SEBASTJAN PRZEMYSŁAW**

Identyfikacja parametrów heterogenicznego modelu materiałowego tłoczyska amortyzatora samochodowego ..... 133

**SKORUPA ANNA**

Modelowanie procesu kriokonserwacji tkanki chrzęstnej z wykorzystaniem arytmetyki interwałowej ..... 137

**STRYCZYŃSKI MIKOŁAJ**

Modelowanie przepływu ciepła i cieczy w kanale o przekroju kołowym z przeszkodą ..... 141

**SUCHOŃ GRZEGORZ**

Algorytm symulowanego wyżarzania w zastosowaniach optymalizacyjnych ..... 145

**ŚLIWA PAWEŁ**

Konwolucyjne sieci neuronowe w zagadnieniach klasyfikacji ..... 149

**TATAREK MILENA**

Generacja pęknięć losowych w tarczach ..... 153

**ZADOŃ MARIA**

Analiza numeryczna oddziaływania lasera na tkankę biologiczną podczas terapii fotodynamicznej ..... 157

**ZADOROŻNY TOMASZ**

Wpływ rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego na odkształcenia cieplne ..... 161

**ŻAK MATEUSZ**

Badanie wydajności cieplnej systemu solarnego ..... 165



## AN OVERVIEW OF SOFT ROBOTICS FOR LOWER-LIMB REHABILITATION

**VINEET AZIZ, BSc.**

Mechatronics, semester I, 2nd level of studies

**Abstract.** This paper discusses the intersection of soft robotics and rehabilitation robotics. The various projects reviewed here can be synthesized towards the development of a soft exoskeleton to help wearers with limited locomotion to walk, run, and carry extra weight. Developing such an exosuit will also be important for able-bodied users, as it could eventually be commercialized for general consumers. An emphasis is placed on soft robotics and lightweight sensor technologies. General information about related fields is also presented when relevant.



## PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ ROBOTÓW ELASTYCZNYCH W REHABILITACJI KOŃCZYN DOLNYCH

**Streszczenie.** W artykule omówiono zastosowania robotów elastycznych (soft robots) w robotyce rehabilitacyjnej. Przedstawiono i omówiono aktualnie realizowane projekty, które pomogą w opracowaniu koncepcji egzoskieletu opracowanego z użyciem robotów elastycznych dla osób z ograniczoną możliwością poruszania w celu umożliwienia im chodzenia, biegania lub podnoszenia dodatkowych obciążeń. Opracowanie egzoskieletu jest również ważne dla osób pełnosprawnych i w przyszłości planowane jest wdrożenie opracowanych rozwiązań. Główny nacisk w artykule jest położony na roboty elastyczne oraz czujniki o małej masie.

Rehabilitation robotics are devices designed for the restoration and recovery of physiological function, such as a lower-limb exoskeleton. A current challenge in exoskeleton design is balancing comfort and function. One solution is to replace bulky motors with soft robotics: lightweight compliant actuators inspired by biology, also known as artificial muscles. As a result, there are three types of exoskeleton: soft actuators with rigid suit, rigid actuators with soft suit, and fully-compliant exosuits (soft actuators with soft suit) [1, 2]. These lightweight exosuits are advantageous to exoskeletons because they minimize the restrictions to the wearer without significantly increasing the inertia of the natural limbs. Flexible exosuits also eliminate the need to precisely align rigid robotic parts to human limbs. Hip-based exosuits are more advantageous than full-leg exosuits. Having less weight on the leg lowers the moment of inertia, reducing metabolic cost. A hip-based suit is also simpler than a full-leg system, as the user only needs to attach the device to their waist and upper leg [3].

In the Netherlands, Dr. Gerwin Smit et al. developed the lightest prosthetic hand in history at TU Delft using custom hydraulic actuators [4]. These miniature hydraulics could potentially be applied to rigid exoskeleton actuation as well. Other Delft projects include the Mindwalker Exoskeleton [5], the Rebocon powered-knee prostheses [6] and the Project MARCH

exoskeletons. The 2019 MARCH IV achieves stability through sideways motion and foot soles with distinct layers for comfort, support, and sensors. Upper-body sensors improve alignment with the suit and reduce the need for crutches. To minimize bulk, the thigh piece contains almost 100% more electronics than that of the MARCH III. The IV also utilizes more software and smaller electronics than the previous version. For example, the new power distribution board has 20% less surface area than the previous design and is slimmer as well. The modular construction of the exoskeleton simplifies fabrication, repair, and customizability and also allows for easy future improvement. The frame involves force-absorbing metal and a plastic shell. A control panel can be accessed without the user letting go of the crutches. Physical contact points have been optimized to reduce pressure scuffs, and a “corset” fixture improves stability [7].

In Italy, the Sant’Anna BioRobotics Institute has become well-renowned for their soft robotics pioneering. Created with EPFL, the hip-based Active Pelvis Orthosis (APO) of Prof. Nicola Vitiello’s lab uses artificial muscles to actively prevent falls while reducing the metabolic cost of walking [8-11]. Prof. Vitiello et al. also developed MOTU, a smart prosthesis that adapts to user gait patterns for improved comfort and efficiency [12]. Other BioRobotics projects include Prof. Christian Cipriani’s touch-sensitive prosthetic hand [13], Dr. Filippo Cavallo’s smart Parkinson’s orthoses [14], and Prof. Cecilia Laschi’s flexible and dextrous Octo-Bot [15].

In Switzerland, EPFL’s labs for Soft Transducers, Rehabilitation Robotics, Biorobotics, and Reconfigurable Robotics have been prolific in soft rehabilitation research. Their touch-sensitive artificial skin [16] and force-responsive foldables [17-19] are the precursors to sensitive exoskeletons and prostheses. The soft robots of Profs. Herbert Shea and Jamie Paik have been applied in exoskeletons [20-22], animal-inspired robots [23-25], and even wearables to regulate body temperature [26]. Some recent EPFL collaborations of note include the APO with Sant’Anna [8-11], the first soft robotic pump with Japan [26], and Prof. Hannes Bleuler’s Walk Again exoskeleton with Duke University and TU Munich. As a non-invasive EEG cap translated the user’s brain activity into movement, this exoskeleton recreated the sensation of walking by imprinting vibrations of each footstep onto the user’s arms [27].

At Harvard’s Biodesign Lab, Prof. Conor Walsh’s lab has also been impactful. In 2018, the lab reported the use of inertial measurement units to detect transitions from walking to running. This could allow an exoskeleton to provide assistance specific to the user’s movement. The study also showed the activated exosuit caused a metabolic reduction (walking -2.7% and running -3.9%); however wearing an inactive exosuit required significantly greater metabolic cost than no exosuit (walking +9.5% and running +4.3%). As a result, while the device tested in this study has some effect when activated, it is not suitable for passive use due to the weight of the suit [3].

At the Bristol Robotics Lab, Prof. Jonathan Rossiter’s Soft Robotics group is developing exosuits which resemble soft workout pants but are lined with artificial muscles, controllable smart materials, and balance sensors [1, 28-31]. The lab’s thermosensitive graphene knee braces stiffen when the user is standing (muscle is cold) and soften when the user is moving (muscle is warm) [29], which is a quality that may be able to provide rigid support in fully-compliant exosuits. The lab has also developed Soft Matter Computers that can rapidly pass data through fluidic tape, like hormones in blood [32]. Using microscale sensors and actuators, Bristol’s research in touch-sensitive artificial skins [33, 34], dielectric elastomer skin-like robots [35] and force-responsive controllers [36] could eventually yield smart and sensitive exosuit exteriors.

A 2019 survey paper by the Spanish National Research Council (CSIC) is perhaps the most comprehensive overview of exosuit literature. Maria del Carmen Sanchez-Villamañan was the

lead author of this paper, which studied 52 different exoskeleton systems. During their analysis, the authors focused on the variations in actuation, structure, and force-transmitting attachment components. In addition to their written analysis, Sanchez-Villamañan et al. also compiled an exhaustive datasheet of their properties, as a standardized guide to an otherwise overwhelming diversity of suits. The team also concluded that peak torque was not found to be proportional to actuator weight. As a result, high torque forces can be delivered even with lightweight actuators [2]. A key example of this is the KIT EXO-1 suit from Beil et al., which has demonstrated a staggering 120 Nm peak torque from a 1.38kg actuator [37].

Unfortunately, despite the comprehensive nature of Sanchez-Villamañan's review, only 2 of the 52 exosuits were fully compliant. This likely indicates that this field is relatively new and underdeveloped. Fully-compliant exosuits would appear to have higher comfort and lower weight values than other exoskeleton designs, but it remains to be seen what the disadvantages or challenges of these exosuits are [2]. It is possible that such a soft structure would be unable to firmly support significant weight. To this end, the thermosensitive graphene of Bristol's knee-brace may prove to be a promising support material while also being compliant and comfortable. Applying EPFL and Bristol's artificial skin technologies to exosuits could lead to partial restoration of touch for users without leg sensation. A next step for readers interested in compliant-exoskeleton research would be to pursue the readings below in more detail and to remain vigilant for upcoming literature in the near future, such as the in-development projects in fully-compliant exosuits from the Bristol and Harvard labs. A call to action for a proactive researcher would be to conduct such a compliant-exoskeleton study themselves. These are just small steps that can be taken to progress the field towards the emergence of an easily-accessible fully-compliant, lightweight, lower-limb exoskeleton.

## Literature

1. Helps, Tim. (2020, January 10). *Bot-Talks 2019 | The Right Trousers Project | Robotics Interview with Tim Helps* [Video file]. Retrieved from <https://youtu.be/PE7NPm2qtlk>
2. Sanchez-Villamañan, M., Gonzalez-Vargas, J., Torricelli, D. et al. Compliant Lower Limb Exoskeletons: A Comprehensive Review on Mechanical Design Principles. *J Neuro Engineering Rehabil* 16, 55 (2019). <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0517-9>
3. Jinsoo Kim, Roman Heimgartner, Giuk Lee, Nikos Karavas, David Perry, Danielle Louise Ryan, Asa M. Eckert-Erdheim, Patrick Murphy, Dabin Kim Choe, Ignacio Galiana, Conor J. Walsh: Autonomous and Portable Soft Exosuit for Hip Extension Assistance with Online Walking and Running Detection Algorithm. *ICRA*, 5473–5480 (2018).
4. Smit, Gerwin & Plettenburg, Dick & van der Helm, Frans. (2014). The Lightweight Delft Cylinder Hand, the First Multi-Articulating Hand That Meets the Basic User Requirements. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 23. 10.1109/TNSRE.2014.2342158.
5. Wang, Shiqian & Wang, Letian & Meijneke, Cory & van Asseldonk, Edwin & Hoellinger, Thomas & Cheron, Guy & Ivanenko, Yuri & la scaleia, Valentina & Sylos Labini, Francesca & Molinari, Marco & Tamburella, Federica & Pisotta, Iolanda & Thorsteinsson, Freygardur & Ilzkovitz, Michel & Gancent, Jeremi & Nevatia, Yashodhan & Hauffe, Ralf & Zanow, Frank & Kooij, Herman. (2014). Design and Control of the MINDWALKER Exoskeleton. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 23. 10.1109/TNSRE.2014.2365697.
6. <http://www.rbionics.com/>
7. <http://www.projectmarch.nl>
8. <https://newatlas.com/exoskeleton-balance-prevents-elderly-falls/49592/>



9. [www.sciencemag.org/news/2017/05/robotic-exoskeleton-could-help-prevent-falls-elderly](http://www.sciencemag.org/news/2017/05/robotic-exoskeleton-could-help-prevent-falls-elderly)
10. <https://arstechnica.com/science/2017/05/quick-twisting-pelvic-robot-could-keep-you-upright-when-youre-old/>
11. <https://www.santannapisa.it/en/news/wearable-robotics-exoskeleton-prevents-falls-seniors>
12. <https://www.santannapisa.it/en/news/wearable-robotic-exoskeleton-improves-metabolic-gait-efficiency-elderly-scientific-reports>
13. Cipriani, Christian & Antfolk, Christian & Balkenius, Christian & Rosén, Birgitta & Lundborg, Goran & Carrozza, Maria Chiara & Sebelius, Fredrik. (2009). *A Novel Concept for a Prosthetic Hand With a Bidirectional Interface: A Feasibility Study*. IEEE transactions on bio-medical engineering. 56. 2739-43. 10.1109/TBME.2009.2031242.
14. Rovini, E., Maremmani, C., & Cavallo, F. (2017). How Wearable Sensors Can Support Parkinson's Disease Diagnosis and Treatment: A Systematic Review. *Frontiers in neuroscience*, 11, 555. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00555>
15. <https://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-hardware/robot-octopus-points-the-way-to-soft-robotics-with-eight-wiggly-arms>
16. <https://www.genengnews.com/news/novel-artificial-skin-can-help-patient-rehabilitation/>
17. <https://actu.epfl.ch/news/epfl-spin-off-s-tiny-robots-turn-heads-in-las-ve-5>
18. <https://robohub.org/tedxhelvetia-features-soft-robots/>
19. <https://robohub.org/new-soft-antagonistic-actuator-enables-robots-to-fold/>
20. [www.twiice.ch](http://www.twiice.ch)
21. [www.autonomyo.ch/home](http://www.autonomyo.ch/home)
22. <https://www.medicaldevice-network.com/features/exoskeleton-evolution-a-step-in-the-right-direction-for-patients/>
23. [techcrunch.com/2019/12/18/this-tiny-soft-robo-bug-scoots-with-smarts-and-survives-swats/](http://techcrunch.com/2019/12/18/this-tiny-soft-robo-bug-scoots-with-smarts-and-survives-swats/)
24. <https://www.epfl.ch/labs/rrl/research-2/research-origami/tribot/>
25. <https://robohub.org/pleurobot-multimodal-locomotion-in-a-bioinspired-robot/>
26. <https://techxplore.com/news/2019-08-miniature-stretchable-soft-robots.html>
27. [robohub.org/exoskeleton-with-haptic-sensors-help-paralysed-man-to-kick-off-world-cup/](http://robohub.org/exoskeleton-with-haptic-sensors-help-paralysed-man-to-kick-off-world-cup/)
28. <http://www.bristol.ac.uk/news/2019/june/-freehab-project.html>
29. <https://www.theguardian.com/technology/2018/sep/11/the-right-trousers-wallace-and-gromit-mobility-aid-robotic>
30. <https://www.bbc.com/news/science-environment-45501069>
31. <https://therighttrousers.com/>
32. <https://www.bristol.ac.uk/news/2019/august/life-like-robots.html>
33. <https://techxplore.com/news/2019-10-artificial-skin-ticklish-devices.html>
34. <http://bullandbearmcgill.com/skin-on-your-body-now-on-your-phone/>
35. <https://www.eenewseurope.com/news/stretchable-skin-robot-crawls-and-convey-objects>
36. <https://techxplore.com/news/2019-10-haptic-arm-robotics-easy.html>
37. Beil, J., Perner, G., & Asfour, T. (2015). Design and control of the lower limb exoskeleton KIT-EXO-1. *2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 119-124.

## MODELOWANIE PRZEPŁYWU COUETTE Z ZASTOSOWANIEM DYSKRETYZACJI TYPU LINK-WISE

inż. MIROSLAW BOCZEK

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Anna Korczak

**Streszczenie.** W niniejszym artykule zamodelowano numerycznie przepływ Couette z zastosowaniem metody siatek Boltzmana. W tym celu zastosowano model dwuwymiarowy D2Q9 z dyskretyzacją typu "link-wise". Uzyskane wyniki pozwoliły przeprowadzić analizę wpływu czasu relaksacji  $\tau$  oraz prędkości maksymalnej  $u_{\max}$  cząsteczek na zbieżność otrzymanego numerycznie wyniku. Wyniki przedstawiono za pomocą wykresów oraz porównano z otrzymanymi rozwiązaniami analitycznymi. Obliczenia przeprowadzono w bezpłatnym oprogramowaniu Octave.



### COUETTE FLOW MODELLING USING LINK-WISE DISCRETIZATION

**Abstract.** In this paper, the Couette flow is numerically modelled using the lattice Boltzmann method. For this purpose, a two-dimensional model D2Q9 with "link-wise" discretization was used. The results obtained allowed to analyze the effect of relaxation time  $\tau$  and maximum  $u_{\max}$  velocity of particles on the convergence of the numerically obtained result. The results were presented using graphs and compared with the obtained analytical solutions. The calculations were performed in free Octave software.

#### 1. Wprowadzenie

Mechanika płynów jest jedną z dziedzin mechaniki, która swą uwagę skupia na płynach. Zgodnie z definicją, którą można znaleźć w literaturze, płyn jest określany jako substancja, która może płynąć, to oznacza, że może z wielką łatwością zmieniać wzajemne położenie poszczególnych cząstek pod wpływem nawet niewielkich sił. Warto podkreślić, że pojęcia płynu nie odnosimy wyłącznie do cieczy, ale także do wszystkich gazów, plazm, a nawet takich mieszanin różnych faz fizycznych jak piana, emulsja, zawiesina czy pasta, co znacznie poszerza zakres modelowanych zjawisk w ramach mechaniki płynów.

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy przepływu Couette z zastosowaniem siatki typu "link-wise" D2Q9 w metodzie siatek Boltzmana oraz sprawdzenie jej dokładności obliczeniowej w zależności od przyjętych parametrów.

#### 2. Model D2Q9 w metodzie siatek Boltzmana

Jednym z najczęściej używanych modeli w metodzie siatek Boltzmana jest wariant siatki D2Q9 (Rys. 1.), który jest dwuwymiarowy i posiada dziewięć kierunków prędkości. Ten układ prędkości został użyty w niniejszej pracy do zamodelowania przepływu Couette.



Tabela 1. Zestawienie wag dla rozwiązania 2DQ9  
Table 1. Weights list for 2DQ9 model

$i$	$w_i$
0	4/9
1,2,3,4	1/9
5,6,7,8	1/36

Jeden z najtrudniejszych problemów w obliczeniach numerycznych dotyczy poprawnego zaimplementowania warunków brzegowych. W symulacjach wykorzystywanych do obliczeń numerycznych wymagane jest zdefiniowanie zachowania funkcji rozkładu przy brzegach ścianek. Zwykle w takich przypadkach stosuje się prosty warunek brzegowy, gdzie wartość prędkości przyjmuje się zero.

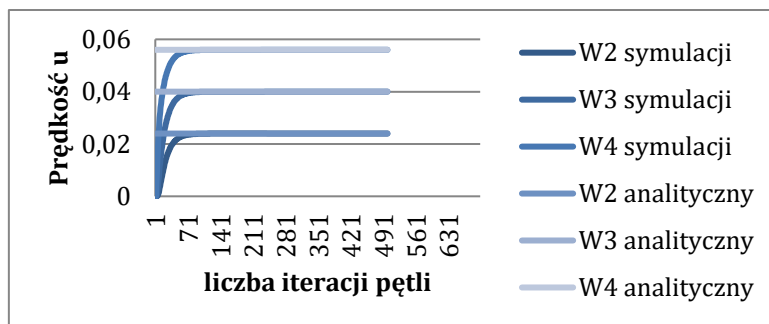
### 3. Praca własna oraz wyniki analiz

Przeanalizowano 9 przypadków, które zostały pogrupowane w trzy serie danych zamieszczonych w Tabeli 2. Uzyskane wyniki pozwoliły przeprowadzić analizę wpływu czasu relaksacji  $\tau$  oraz prędkości maksymalnych  $u_{\max}$  cząsteczek na zbieżność otrzymanego numerycznie wyniku.

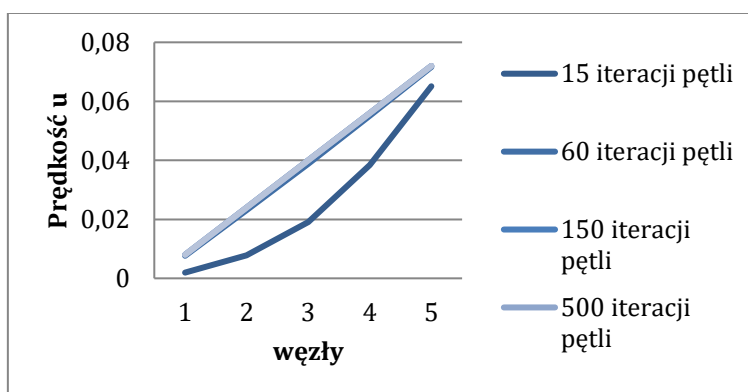
Tabela 2. Dane wraz z analizą błędów symulacji numerycznych  
Table 2. Data and error analysis of numerical simulations

	L.p.	$\tau$	$u_{\max}$	Re	Błąd bezwzgl.	Min. l. it.
Seria 1	1	0,7	0,08	6	1.06e-06	257
	2	0,7	0,15	11.25	1.06e-06	
	3	0,7	0,20	15	1.056e-06	
Seria 2	4	0,85	0,08	3.43	5.48e-11	154
	5	0,85	0,15	6.43	5.48e-11	
	6	0,85	0,20	8.57	5.48e-11	
Seria 3	7	0,99	0,08	2.45	8.29e-15	112
	8	0,99	0,15	4.59	9.19e-15	
	9	0,99	0,20	6.12	8.93e-15	

Obszar został zdyskretyzowany siatką o minimalnej gęstości dla tego zagadnienia 3x5 węzłów, ponieważ w każdym przekroju otrzymujemy ten sam rozkład prędkości. Rys. 3. oraz Rys. 4. ilustrują odpowiednio prędkości w kierunku poziomym w zależności od liczby iteracji (dla węzłów wewnętrznych nr 2, 3 i 4) porównane z rozwiązaniem analitycznym oraz rozkłady prędkości w całym przekroju.



Rys. 3. Porównanie wyników analitycznych z wynikami przebiegu 1. symulacji w 3. serii  
 Fig. 3. Comparison of analytical results with those of the 1. simulation in the 3. series



Rys. 4. Rozkład prędkości cząsteczek w węzłach w 1. symulacji w 3. serii  
 Fig. 4. Particle velocity distribution in nodes in the 1. simulation in the 3. series

#### 4. Wnioski

Na podstawie wyników otrzymanych w przeprowadzonych analizach można wyciągnąć następujące wnioski:

- zwiększenie czasu relaksacji  $\tau$  od 0,7 do 0,99 zmniejsza wartość liczby Reynoldsa oraz zmniejsza liczbę potrzebnych iteracji w celu uzyskania odpowiednio dokładnych wyników,
- zwiększenie prędkości maksymalnej  $u_{\max}$  powoduje zwiększenie liczby Reynoldsa oraz zwiększenie liczby potrzebnych iteracji,
- metoda siatek Boltzmana może być skutecznie wykorzystywana do analizy złożonych przepływów płynów.

#### Literatura

1. Kruger T. i in., The Lattice Boltzmann Method Principles and Practice, Springer, International Publishing Switzerland (2017).
2. Wykłady AGH, [http://home.agh.edu.pl/~pernach/wyklady/index.php?action=wyklad10\\_3](http://home.agh.edu.pl/~pernach/wyklady/index.php?action=wyklad10_3) (dostęp 15.05.2020).
3. Sukop M. C., Thorne D. T., Lattice Boltzmann Modeling. An Introduction for Geoscientists and Engineers, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2016).

# PROJEKT I ANALIZA NUMERYCZNA PASYWNEGO ZABEZPIECZENIA PRĄDOWEGO

**inż. SZYMON BURY**

Mechanika i Budowa Maszyn, Studia Dualne, semestr III, 2 stopień  
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł poświęcony jest projektowi oraz analizie numerycznej MES pasywnego zabezpieczenia prądowego. W pracy zaproponowano oraz zaprojektowano model geometryczny oraz numeryczny bezpiecznika topikowego. Wykonano sprzężone analizy elektro-termiczne w systemie Ansys Workbench dla różnych wariantów warunków brzegowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz wariantowych sformułowano wnioski.



## DESIGN AND NUMERICAL ANALYSIS OF PASSIVE CURRENT PROTECTION

**Abstract.** The article is devoted to the design and FEM numerical analysis of the passive current protection. In the paper geometry and numerical model of the short circuit fuse was prepared. Coupled electro-thermal analyses were performed by means of Ansys Workbench software for different variants of boundary conditions. On the basis of the performed variant analyses, conclusions were formulated.

### 1. Wprowadzenie

W celu przeprowadzenia symulacji numerycznej pasywnych zabezpieczeń prądowych konieczne jest m.in. rozwiązanie sprzężonej analizy elektro-termicznej. Zjawisko przemiany energii elektrycznej dostarczonej przez siłę elektro-motoryczną (SEM) w energię wewnętrzną, a dokładniej cieplną, opisuje prawo Joule'a-Lenza [1]. Zjawisko to występuje można niemal w każdym elektrycznym lub elektronicznym urządzeniu. Z jednej strony może być ono pożądane (np. w grzałkach), z drugiej może też być niepożądane (np. w układach scalonych) [4-6].

W pracy zastosowano model teoretyczny oraz numeryczny efektu Joule'a-Lenza do zaprojektowania i rozwiązania zagadnienia pasywnego zabezpieczenia prądowego. Zabezpieczenia tego typu, pozwalają na ochronę urządzeń elektrycznych przed zbyt wysoką wartością płynącego prądu, co może spowodować ich uszkodzenia. Przykładowym zabezpieczeniem tego typu jest bezpiecznik topikowy. Jego głównym elementem konstrukcyjnym jest topik, który nagrzewa się w wyniku przepływu prądu elektrycznego [9]. Zbyt wysoka wartość prądu powoduje stopienie topika, a tym samym przerwanie obwodu. Zabezpieczanie tego typu można dziś spotkać w wielu urządzeniach elektrycznych, przede wszystkim ze względu na jego niezawodność i prostotę działania. Do symulacji numerycznej efektu Joule'a-Lenza w pracy zastosowano metodę elementów skończonych [10].

## 2. Wstęp teoretyczny

Efekt Joule'a-Lenza polega na wydzielaniu ciepła przez przewodnik w czasie przepływu przez niego prądu i jest wprost proporcjonalne do iloczynu rezystancji przewodnika, kwadratu natężenia prądu oraz czasu przepływu tego prądu. Możliwe jest także przedstawienie tego twierdzenia w formie wzoru [2]:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – ilość wydzielonego ciepła [J],

$I$  – wartość natężenia prądu elektrycznego przepływającego przez przewodnik [A],

$R$  – opór elektryczny przewodnika [ $\Omega$ ]

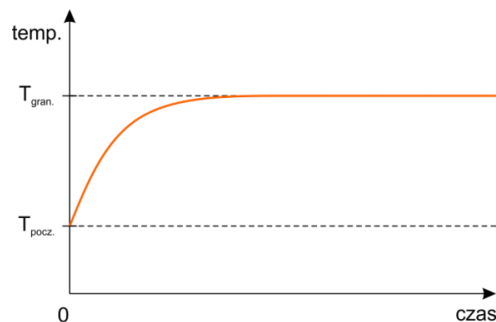
$t$  – czas przepływu prądu w przewodniku [s]

Po uwzględnieniu prawa Ohma oraz przekształceniu, możliwe jest uzyskanie wzoru w formie wymagającej podania napięcia i rezystancji oraz czasu w celu obliczenia ilości wydzielanego ciepła [7]:

$$Q = \frac{U^2}{R} t \quad (2)$$

gdzie:  $U$  - napięcie pomiędzy dwoma punktami przewodnika [V].

Zgodnie z twierdzeniem Joule'a-Lenza ilość energii cieplnej rośnie proporcjonalnie z czasem przepływu prądu. Ilość wygenerowanej energii cieplnej ograniczona jest możliwością oddawania energii przewodnika do otoczenia. Początkowo przewodnik nagrzewa się szybciej, lecz gdy z czasem ilość energii oddawanej do otoczenia zrówna się z ilością energii generowanej w przewodniku, dalszy wzrost temperatury zostanie uniemożliwiony. Przewodnik osiąga wtedy temperaturę graniczną (Rys. 1).



Rys.1 Wykres osiągnięcia temperatury granicznej w przewodniku

Fig. 1. Graph of reaching the limit temperature in the guide

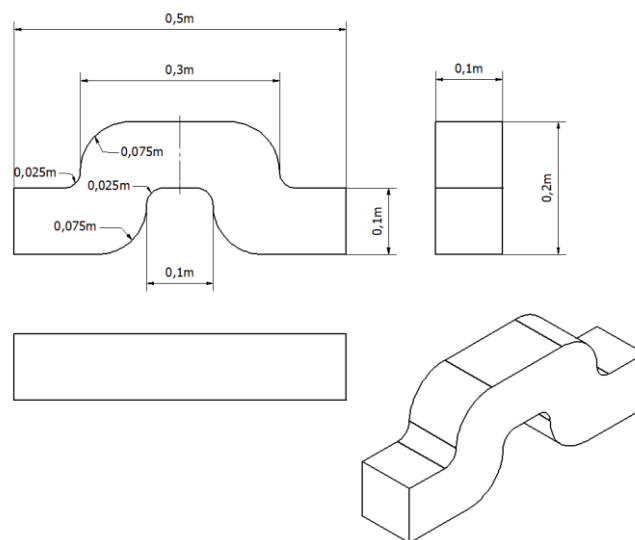
## 3. Rozwiązanie analityczne oraz numeryczne

Oprócz analiz przedstawionych w niniejszym artykule przeprowadzono wstępne symulacje numeryczne sprzężonej analizy elektro-termicznej dla prostego kształtu przewodnika. Uzyskane rozwiązania w postaci ciepła Joule'a oraz wartości temperatur zostały porównane z rozwiązaniem otrzymanym za pomocą wzorów analitycznych. Dla wszystkich wariantów analiz uzyskano pełną zgodność rozwiązań. Do przeprowadzenia symulacji numerycznych w pracy został wykorzystany system Ansys Workbench wraz z modułem Thermal-Electric [3].

#### 4. Analiza numeryczna geometrii przypominającej bezpiecznik

Wykonano projekt oraz przeprowadzono analizę numeryczną przewodnika, którego kształt wzorowany był na samochodowych bezpiecznikach topikowych (Rys.2). Do analizy wykorzystano 3 rodzaje materiałów: złoto, srebro oraz miedź. Dla złota współczynnik przewodzenia ciepła wynosi  $312 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , natomiast współczynnik oporności elektrycznej wynosi  $2,45e8 \Omega\text{m}$ . Dla srebra współczynnik przewodzenia ciepła wynosi  $419 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , natomiast współczynnik oporności elektrycznej  $1,74e-6 \Omega\text{cm}$ . Miedź jest materiałem, którego rezystywność nie jest liniowa ze względu na jej zależność od temperatury. Współczynnik przewodzenia ciepła wynosi  $401 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , natomiast współczynnik oporności elektrycznej to  $1,548e-8 \Omega\text{m}$  przy temperaturze  $0^\circ\text{C}$ ,  $1,694e-8 \Omega\text{m}$  przy temperaturze  $20^\circ\text{C}$  oraz  $2,277e-8 \Omega\text{m}$  przy temperaturze  $100^\circ\text{C}$ .

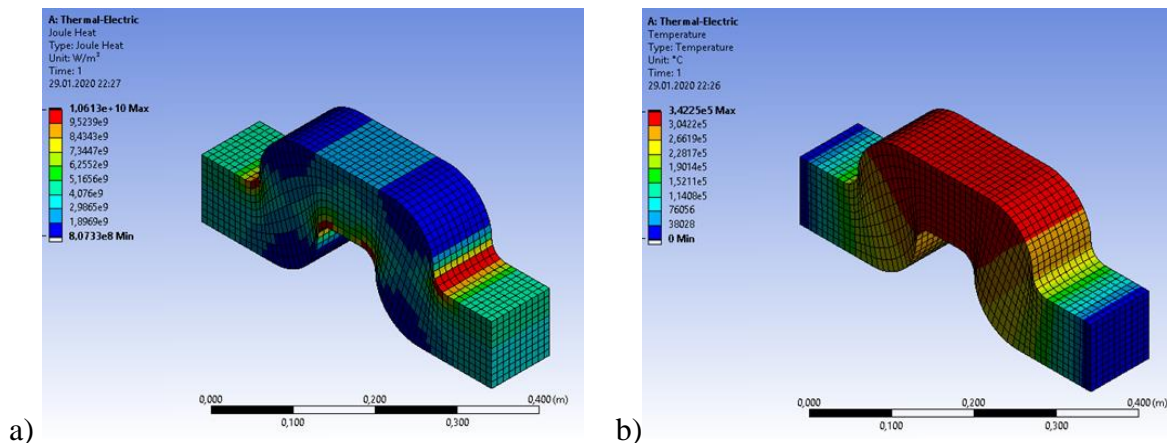
W symulacjach przyjęto metryczny system jednostek (m/kg/N/s/V/A). Warunki brzegowe dla zagadnienia elektrycznego są następujące: na lewej płaszczyźnie założono potencjał elektryczny  $0\text{V}$ , natomiast na prawej  $5\text{V}$ . Czas przepływu prądu elektrycznego wynosi  $1\text{s}$ . Ponadto na prawym oraz lewym brzegu modelu zdefiniowano termiczny brzegowy warunek pierwszego rodzaju o wartości  $T=0^\circ\text{C}$ , a na pozostałych powierzchniach nałożono warunek brzegowy II rodzaju o wartości  $0 \text{ W/m}$ . Utworzono odpowiedni model bryłowy bezpiecznika topikowego.



Rys.2 Model geometryczny bezpiecznika topikowego  
Fig. 2. Geometric model of the short circuit fuse

Przyjęto wielkość elementów siatki równą  $0,01 \text{ m}$ . Dla modelu bezpiecznika wykonanego z miedzi uzyskane ciepło Joule'a wynosi  $1,0613e10 \text{ W/m}^3$ , w przypadku srebra jest to  $1,3889e10 \text{ W/m}^3$ , natomiast w wykonanym ze złota to  $9,864e9 \text{ W/m}^3$ . Maksymalna osiągnięta wartość temperatury w przewodniku miedzianym to  $3,4225e5^\circ\text{C}$ , w wykonanym ze srebra  $4,2864e5^\circ\text{C}$ , a w złotym  $4,0882e5^\circ\text{C}$ . Otrzymane barwne mapy pozwalają określić miejsce, występowania ekstremalnych wartości ciepła Joule'a oraz temperatury. Umożliwia to przewidzenie oraz projektowanie miejsca przepalenia się bezpiecznika topikowego. Nastąpi to po przekroczeniu temperatury topnienia materiału, z którego wykonany jest przewodnik. W pracy zaprezentowano barwny rozkład ciepła Joule'a oraz barwny rozkład temperatury dla modelu bezpiecznika wykonanego z miedzi (Rys.3).





Rys.3 Rozkład: a) ciepła Joule'a, b) temperatury  
Fig. 3. Distribution of: a) Joule's heat, b) temperature

## 5. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie różnych materiałów na bezpieczniki topikowe powoduje powstanie różnych wartości ciepła Joule'a oraz różne wartości maksymalnej temperatury występującej w modelu. Charakter tego rozkładu nie zależy natomiast od rodzaju zastosowanego materiału. Nie fizyczne, tj. bardzo wysokie wartości otrzymanych temperatur dla każdej z przeprowadzonych analiz numerycznych, spowodowane są przyjęciem czasu analizy o wartości 1s. Czas zadziałania bezpieczników topikowych w praktyce to dziesiąte części sekundy lub nawet mniej [8]. Dalsza część prowadzonych badań będzie dotyczyła projektu oraz optymalizacji kształtu tego typu układów ze względu właśnie na czas zadziałania bezpiecznika oraz różne wartości natężenia prądu płynącego przez bezpiecznik.

## Literatura

1. Cichowska Z., Wykłady z elektrotechniki teoretycznej; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1997.
2. Dolegał M., Podstawy elektrotechniki i elektroniki, Wydawnictwo Komunikacji i łączności WKŁ, 2016.
3. Dokumentacja techniczna oprogramowania Ansys
4. link: <https://teoriaelektryki.pl/dlaczego-przewod-sie-nagrzewa-prawo-joulea/>, dostęp dnia 29.01.2020
5. link: <http://ilf.fizyka.pw.edu.pl/podrecznik/3/2/6>, dostęp dnia 29.01.2020
6. link: <http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/elk/scb/index08.html>, dostęp dnia 29.01.2020
7. Macura A., Teoria obwodów obwody prądu stałego; wydawnictwo politechniki śląskiej, Gliwice, 1997.
8. Markiewicz H., Instalacje elektryczne; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005.
9. von Meier A., Electric Power Systems: A Conceptual Introduction, Willey 2006.
10. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method, Vol. 1-2, Butterworth, Oxford, 2000.

## PROJEKT PRZYRZĄDU DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH KARABINKA WSPINACZKOWEGO

**inż. BARBARA CISZYŃSKA**

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Celem projektu było zamodelowanie i weryfikacja wytrzymałościowa z zastosowaniem metody elementów skończonych uchwytu do przeprowadzenia testów wytrzymałościowych karabinka wspinaczkowego zgodnie z normą BS EN 12275:2013. Badania będą wykonywane za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick Z050. W oprzyrządowaniu maszyny oferowanym przez producenta brakuje takiego uchwytu. Zaprojektowany uchwyt musi zapewniać możliwość zamocowania z wykorzystaniem trzpienia i specjalnego sworznia wchodzących w skład maszyny.



### DESIGN OF A DEVICE FOR THE CLIMBING CARABINER TEST

**Abstract.** This project aimed to design and carry out the strength analysis of a device for the climbing carabiner required for tests according to the BS EN 12275:2013 standard, by using the finite element method. The carabiner tests will be carried out by using the Zwick Z050 machine. Among available instrumentation, there is a lack of such a device. The designed device must provide a possibility to be fixed by a pin and a special pivot which are components of the machine.

#### 1. Wprowadzenie

Wśród oferowanego przez producenta maszyny wytrzymałościowej Zwick Z050 oprzyrządowania można wyróżnić różne rodzaje uchwytów do przeprowadzenia prób rozciągania, ściskania, zginania, ścinania, czy też do testów cyklicznych [5]. Brak jednak odpowiedniego uchwytu do przeprowadzenia testów wytrzymałościowych karabinków wspinaczkowych zgodnie z wymaganiami normy BS EN 12275:2013 [1].

Aby możliwe było przeprowadzenie testów karabinka w osi podłużnej oraz przy otwartym zamku, za pomocą programu SpaceClaim została zaprojektowana geometria specjalnego uchwytu (Rys.1a), która uwzględnia, że dwa identyczne uchwyty muszą zostać zamocowane przeciwstawnie na trzpieniach maszyny wytrzymałościowej o średnicy 36 mm i wysokości 42 mm. Każdy z trzpieni posiada poprzeczny otwór o średnicy 18 mm, na wysokości 20 mm, który pozwala na mocowanie oprzyrządowania za pomocą sworzni. Założono, że charakter współpracy wałka o średnicy  $12 \pm 0,1$  mm (zgodnie z wymaganiami normy) z otworem uchwytu będzie odpowiadał łożysku ślizgowemu. W tym celu zostały określone odchyłki wykonania wałka oraz otworu uchwytu, tak aby zostało zastosowane pasowanie H7/d9 [4]. Uchwyt musiał zostać tak zaprojektowany, aby zapewnić swobodną możliwość zamocowania karabinka i przeprowadzenia testów.

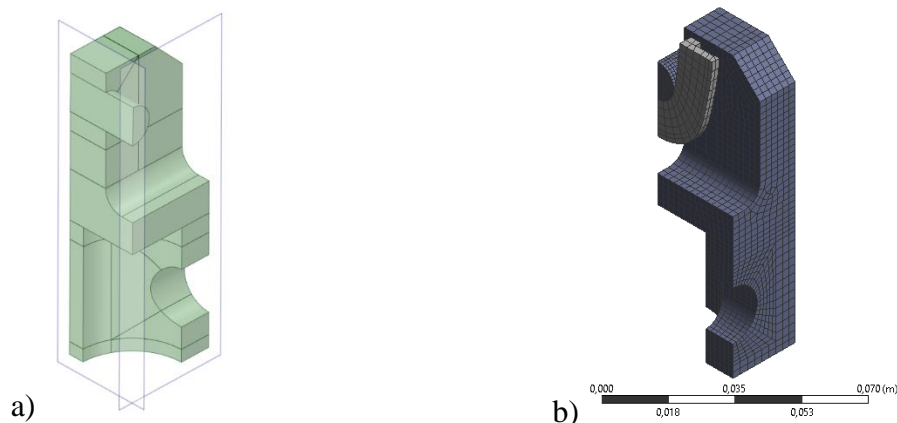
Ze względu na dostępne materiały założono, że uchwyty i wałki zostaną wykonane ze stali narzędziowej Toolox 44. Wybrane własności tej stali zostały przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane własności stali Toolox 44 [3]  
Table 1. Properties of the Toolox 44 steel [3]

Moduł Younga	210 GPa
Współczynnik Poissona	0,3
Granica plastyczności	1300 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	1450 MPa

## 2. Obliczenia wytrzymałościowe metodą elementów skończonych

Weryfikacja wytrzymałościowa uchwytu z zastosowaniem metody elementów skończonych została przeprowadzona w środowisku ANSYS Workbench. Model został utworzony z wykorzystaniem programu SpaceClaim (Rys. 1a). Uwzględnia on uchwyt, wałek oraz fragment karabinka firmy ClimbX oddziałujący na wałek. Dla fragmentu karabinka założono model materiału z bazy programu o nazwie „Aluminium Alloy NL”. Jest to model materiału sprężysto-plastycznego opisany charakterystyką biliniową z wzmocnieniem izotropowym. Zaprojektowana została jedna czwarta uchwytu ze względu na dwie płaszczyzny symetrii. W celu utworzenia siatki elementów skończonych o odpowiedniej jakości (Rys. 1b) uchwyt został podzielony na bryły składowe. Siatka składa się z 6 194 elementów skończonych, wśród których dominują elementy typu HEX20. Siatka liczy 29 409 węzłów. W programie Mechanical została uwzględniona podwójna symetria uchwytu.



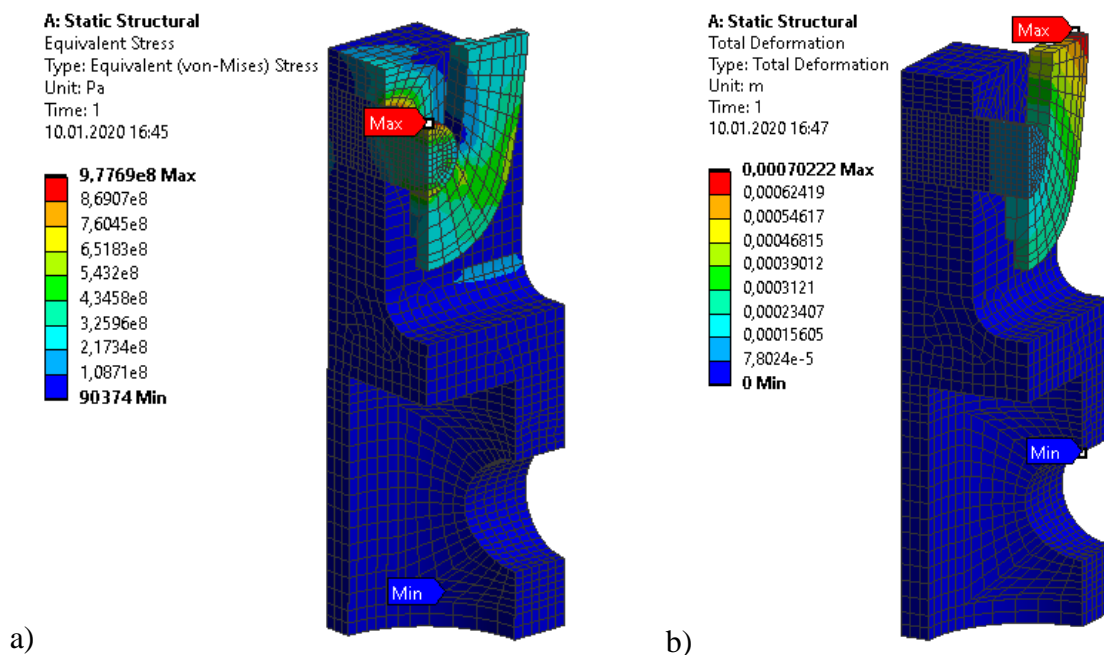
Rys. 1. Model uchwytu: a) geometria z płaszczyznami symetrii utworzona w SpaceClaim, b) siatka elementów skończonych

Fig. 1. Device model: a) geometry with planes of symmetry developed in SpaceClaim, b) finite element mesh

Kolejnym etapem było zadanie odpowiedniego rodzaju kontaktu pomiędzy współpracującymi elementami. Pomiędzy wałkiem a otworem uchwyty został zdefiniowany kontakt bez tarcia typu „Frictionless”. Pomiędzy wałkiem a powierzchnią fragmentu karabinka został również wprowadzony kontakt bez tarcia ze względu na wymaganie użycia smaru na bazie molibdenu wymaganego przez normę.

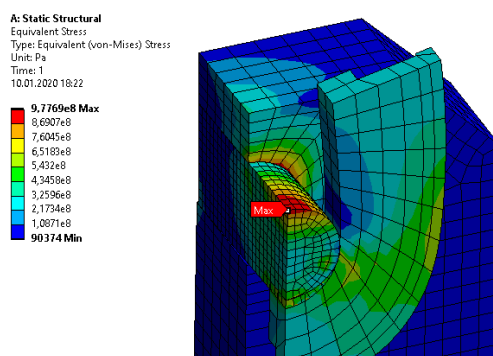
Następnie konieczne było zadanie odpowiednich więzów i obciążeń. Założono, że uchwyt jest utwierdzony z wykorzystaniem podpory stałej „Fixed Support” przyłożonej na powierzchni otworu w miejscu mocowania za pomocą sworznia, znajdującego się w wyposażeniu maszyny wytrzymałościowej. Na powierzchni bocznej karabinka oraz na znajdującej się w tej samej płaszczyźnie powierzchni bocznej wałka założono podporę bez tarcia „Frictionless Support”. Taką samą podporę założono na drugiej powierzchni bocznej wałka. Do górnej powierzchni fragmentu karabinka została przyłożona siła o wartości 9000 N, stanowiąca jedną czwartą całkowitego obciążenia (ze względu na podwójną symetrię uchwyty). Całkowite obciążenie z uwzględnionym współczynnikiem bezpieczeństwa o wartości 1,2, który został przemnożony przez wcześniej uzyskaną w testach [2] wartość siły powodującej zerwanie karabinka ClimbX—około 30 000 N, wyniosło 36 000 N.

W wyniku przeprowadzonej analizy wytrzymałościowej została uzyskana mapa naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa (Rys. 2a) oraz mapa przemieszczeń (Rys. 2b). Największe naprężenia o wartości około 978 MPa występują na górnej powierzchni wałka nad karabinkiem, jednak nie przekraczają one granicy plastyczności wykorzystanego materiału Toolox 44 (Tabela 1). Wysokie naprężenia zredukowane występują również w miejscu kontaktu wałka z otworem uchwyty (Rys. 3).



Rys. 2. Uzyskane wyniki: a) mapa naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa (Pa),  
 b) mapa przemieszczeń (m)

Fig. 2. Obtained results: a) distribution of reduced Huber-Mises stress (Pa),  
 b) distribution of displacement (m)



Rys. 3. Największe naprężenia redukowane wg hipotezy Hubera-Misesa (Pa)  
Fig. 3. Maximum Huber-Mises stress (Pa)

### 3. Wnioski

W celu przeprowadzenia testów wytrzymałościowych karabinka w jego osi podłużnej oraz przy otwartym zamku konieczne okazało się zaprojektowanie specjalnego uchwytu, który będzie spełniał wymagania normy BS EN 12275:2013. Analiza wytrzymałościowa uchwytu została wykonana z zastosowaniem metody elementów skończonych w środowisku ANSYS Workbench. W celu przeprowadzenia analizy konieczne było utworzenie modelu odpowiednio odtwarzającego rzeczywistość. Została uwzględniona podwójna symetria zaprojektowanej geometrii, dzięki czemu analizowana była jedna czwarta uchwytu. Niezbędne okazało się utworzenie odpowiednich kontaktów bez tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami wałka i otworu uchwytu oraz wałka i fragmentu karabinka, a także odpowiednich więzów i obciążeń. W wyniku przeprowadzonej analizy zostały uzyskane: mapa naprężeń redukowanych Hubera-Misesa (Rys. 2a) oraz mapa przemieszczeń (Rys. 2b). Z mapy naprężeń redukowanych wynika, że największe naprężenia występują na górnej powierzchni wałka nad karabinkiem oraz w miejscu kontaktu wałka z otworem uchwytu (Rys. 3), jednak nie przekraczają one granicy plastyczności wykorzystanego materiału (Tabela 1), przy zachowaniu odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa.

### Literatura

1. BS EN 12275:2013 Mountaineering equipment. Connectors. Safety requirements and test methods.
2. Ciszynska B. Ptaszny J., Testy wytrzymałościowe karabinków wspinaczkowych. Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe 2018”, s. 9-12, Politechnika Śląska, Gliwice (2018).
3. <https://www.ssab.com/products/brands/toolox/products/toolox-44> (dostęp: 07.05.2020)
4. Skoć A. Spalek J. Markusik S., Podstawy konstrukcji maszyn. Zarys dynamiki i tribologii, elementy podatne, wały i osie maszynowe, łożyska ślizgowe i toczne, sprzęgła i hamulce, Tom II, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (2008).
5. Zwick Roell, The specimen under control – Specimen grips and tools. [https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku\\_br/04\\_745\\_specimen\\_grips\\_and\\_test\\_tools\\_fp\\_en.pdf](https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_br/04_745_specimen_grips_and_test_tools_fp_en.pdf) (dostęp: 11.05.2020)

# MODELOWANIE PRZEPLYWU COUETTE Z ZASTOSOWANIEM DYSKRETYZACJI TYPU WET-NODE

inż. ADAM DASZYŃSKI

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Anna Korczak

**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy przepływu Couette z zastosowaniem metody siatek Boltzmanna z dyskretyzacją typu "wetnode". Praca obejmuje badanie wpływu parametrów takich jak czas relaksacji oraz prędkość maksymalna na otrzymany wynik. W pracy dokonano analizy przepływu dla dwóch rodzajów warunków brzegowych oraz zbadano wpływ czasu relaksacji na dokładność metody. Napisany także autorski kod w języku Python do automatycznego opracowywania wyników dla zadanych danych.



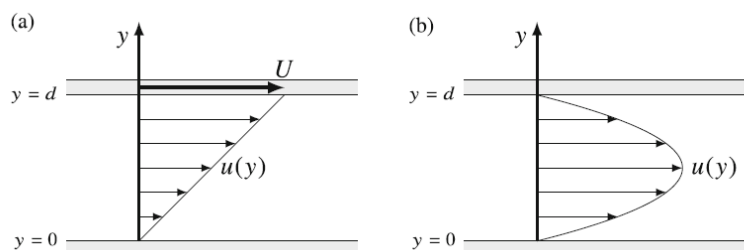
## COUETTE FLOW MODELING USING THE WET-NODE DISCRETISATION

**Abstract.** The aim of this paper was to analyze Couette flow using the lattice Boltzmann method with the wetnode discretization. This work includes the study of the influence of parameters such as relaxation time and maximum speed on the obtained result. A flow analysis was performed for two types of boundary conditions and the influence of relaxation time on the accuracy of the method was examined. The author's code in Python language was written for the purpose of the study. It is used for automatic processing of results for the given data.

### 1. Wprowadzenie

Przepływ płynów jest jednym z podstawowych pojęć kinematyki płynów. W mechanice płynów rozróżnić można dwa podstawowe rodzaje przepływów, są nimi:

- przepływ Couette,
- przepływ Poiseuille.



Rys. 1. Przepływ (a) Couette, (b) Poiseuille [1]

Fig. 1. Flow (a) Couette, (b) Poiseuille [1]

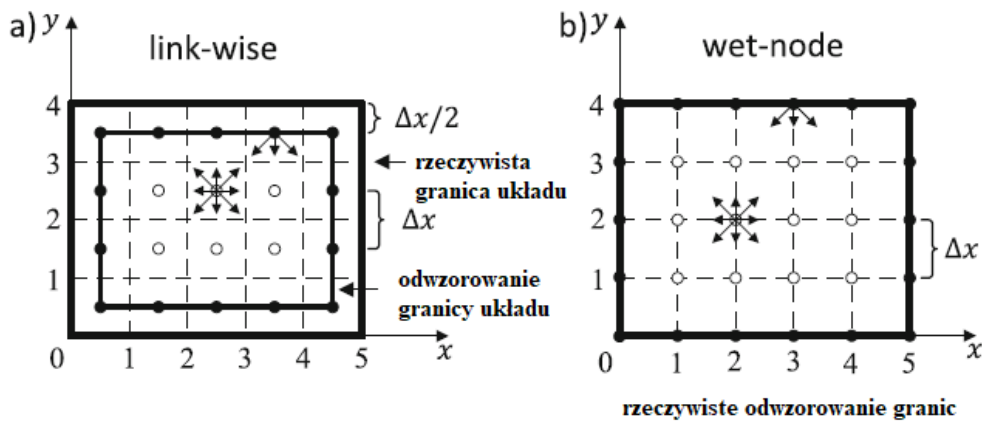
Przepływ Couette jest odwzorowaniem przepływu płynu w kanale otwartym, gdzie prędkość maksymalna znajduje się na powierzchni płynu, natomiast w punkcie styku z ciałem stałym prędkość wynosi 0. W przepływie Poiseuille wykres prędkości przyjmuje kształt paraboli. W skrajnych punktach prędkość wynosi 0, natomiast w środku kanału prędkość przepływu jest największa [2].

## 2. Zastosowanie metody siatek Boltzmann

Podstawą metody siatek Boltzmann (ang. Lattice Boltzmann Method - LBM) jest opis zmiany funkcji dystrybucji  $f_i$  we wszystkich węzłach siatki w kolejnych iteracjach. Warianty tej metody są uzależnione od liczby oraz układu kierunków prędkości. Jednym z najczęściej używanych modeli jest wariant D2Q9, który jest dwuwymiarowy i posiada dziewięć kierunków prędkości (rys 2).

Wyróżniamy dwa typy dyskretyzacji w metodzie siatek Boltzmann (rys. 2):

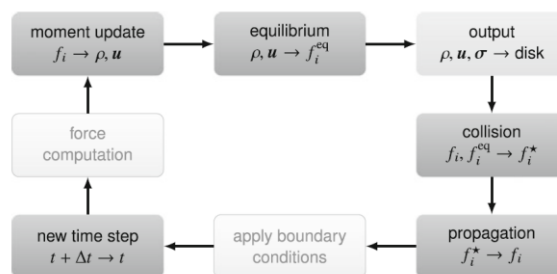
- schemat link-wise – węzły znajdują się w centralnej części komórek siatki,
- schemat wet-node – węzły znajdują się na krawędziach siatek.



Rys. 2. Dyskretyzacja typu link-wise (a) oraz wet-node (b) [1]

Fig. 2. Link-wise (a) and wet-node (b) discretization [1]

Wybór typu dyskretyzacji ma istotny wpływ na implementację warunków brzegowych, w szczególności w analizie złożonych zagadnień.



Rys. 3. Jedna pętla w metodzie siatek Boltzmann [1]

Fig. 3. One loop in the lattice Boltzmann method [1]

Na rys. 3 przedstawiono pełny cykl algorytmu metody siatek Boltzmanna. Ciemniejszym kolorem zaznaczono operacje, które są wymagane do prawidłowego przebiegu symulacji, natomiast jaśniejszym kolorem operacje opcjonalne. Podczas przebiegu każdej iteracji algorytmu dochodzi do propagacji cząsteczek, tzw. streamingu oraz kolizji, opisanych jednym równaniem

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{\Delta t}{\tau} (f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)). \quad (1)$$

Kolizja cząsteczek opiera się na liniowej relaksacji funkcji rozkładu prawdopodobieństwa do wartości równowagowych  $f_i^{eq}(x, t)$ . Natomiast przesunięcie polega na tym, że cząsteczki płynu są przenoszone do sąsiednich węzłów siatki obliczeniowej. Na koniec gęstość oraz momenty prędkości, można wyznaczyć poprzez odpowiednie sumy

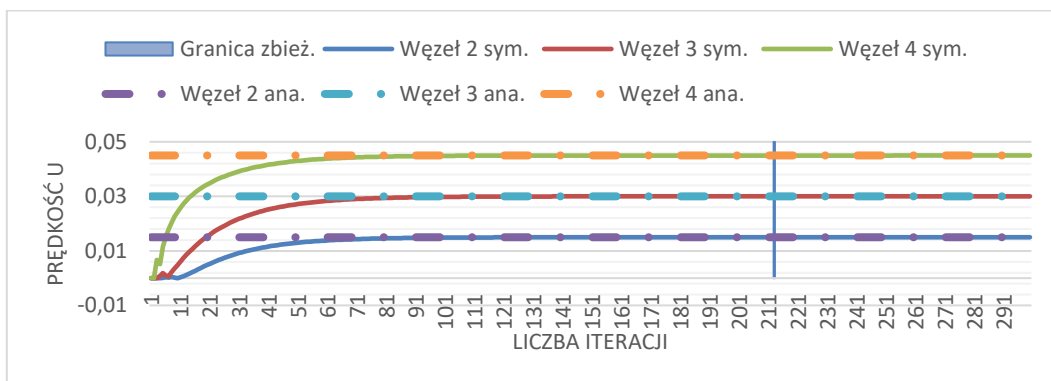
$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t), \quad \rho u(x, t) = \sum_i c_i f_i(x, t). \quad (2)$$

### 3. Praca własna oraz wyniki analiz symulacji

W ramach pracy własnej przeprowadzono 18 symulacji, wykorzystując oprogramowanie typu 'open source'. Symulację algorytmu obliczeniowego metody siatek Boltzmanna przeprowadzono w środowisku obliczeniowym Octave. Natomiast do wprowadzania danych oraz generowania wyników w postaci wykresów wykorzystano środowisko programistyczne Python [3]. W rozdziale 3 zaprezentowane są wyniki dla warunku brzegowego NEEB [1].

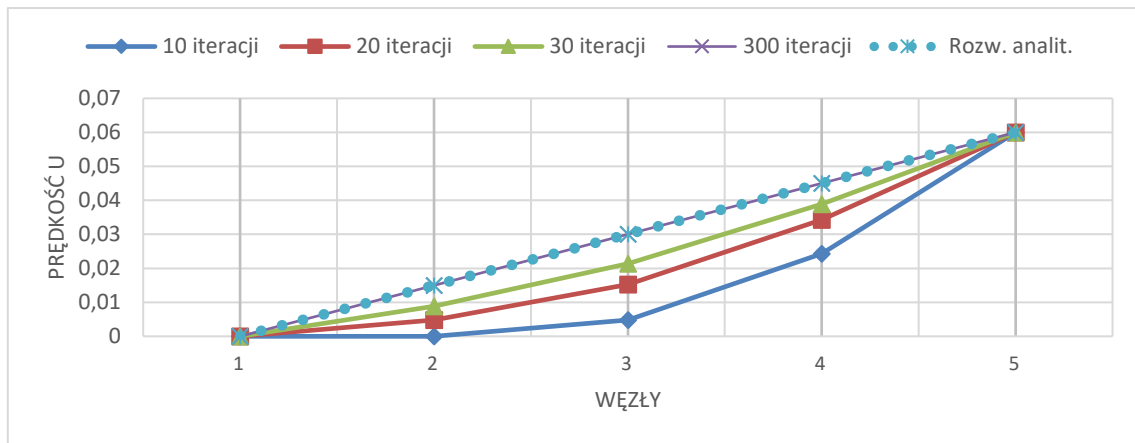
Tabela 1. Wartości zmiennych dla jednej z przeprowadzonych symulacji  
Table. 1. Values of variables for one of the simulations

$\tau$	$u_{\max}$	Liczba Reynoldsa
0.75	0.06	9.0
	0.13	19.5
	0.20	30.0



Rys. 4. Wyniki numeryczne i analityczne dla wybranych węzłów ( $u_{\max} = 0.06$ )  
Fig. 4. Numerical and analytical results for selected nodes ( $u_{\max} = 0.06$ )





Rys. 5. Rozkład prędkości w węzłach w poszczególnych iteracjach ( $u_{\max} = 0.06$ )

Fig. 5. Velocity distributions in nodes in chosen iterations ( $u_{\max} = 0.06$ )

Na podstawie rysunków 4 i 5 potwierdzono zbieżność wyników numerycznych oraz analitycznych analizowanego przepływu. Błąd bezwzględny dla powyższego przypadku wynosi  $1.33 \times 10^{-15}$  po 213 iteracjach, co jest satysfakcjonującym wynikiem.

#### 4. Wnioski

Na podstawie wyników otrzymanych z zastosowaniem warunku brzegowego NEEB można stwierdzić, że:

- we wszystkich węzłach obserwuje się zbieżność do rozwiązania analitycznego,
- zwiększając czas relaksacji, maksymalna prędkość w poszczególnych węzłach jest osiągana wcześniej,
- błąd obliczeń zmniejsza się wraz ze zwiększaniem czasu relaksacji,
- NEEB jest jednym z lepszych warunków brzegowych stosowanym w modelowaniu przepływu płynów, jednak w znacznym stopniu obciąża jednostkę obliczeniową, co wydłuża czas symulacji przy bardziej złożonych modelach.

#### Literatura

1. Krüger T. i in., The Lattice Boltzmann Method, Principles and Practice. Springer International Publishing AG, Switzerland (2017).
2. Bartosik A., Mechanika Płynów. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce (2005).
3. Rother K., Python dla profesjonalistów. Debugowanie, testowanie i utrzymywanie kodu. Wydawnictwo Helion, Gliwice (2018).

# WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA ŚCIAN JEDNO- I DWUWARSTWOWYCH W BUDYNKACH JEDNORODZINNYCH

**inż. MONIKA DOMIŃCZYK**

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Grażyna Kałuża

**Streszczenie.** Tematem artykułu jest wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła przez przegrody. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w dzisiejszych czasach, ponieważ poprawnie zbudowany budynek ma duże znaczenie w kwestii ochrony środowiska. Aby ułatwić dobór materiałów oraz grubość każdej z warstw ścian w budynkach jednorodzinnych posłużył napisany przez Autorkę artykułu program w formie kalkulatora. Dzięki temu programowi można dobrać optymalne rozwiązanie, które jest także zgodne z aktualnie panującymi normami.



## DETERMINATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF SINGLE- AND DOUBLE-LAYER WALLS IN SINGLE-FAMILY BUILDINGS

**Abstract.** The topic of the article is to determine the heat transfer coefficient through partitions. This issue is particularly important nowadays because a properly constructed building is of great importance in terms of environmental protection. In order to facilitate the selection of materials and the thickness of each layer of walls in single-family buildings, the Author of the article has used a program in the form of a calculator. With this program we can choose the optimal solution that also complies with the current standards.

### 1. Wprowadzenie

Współczynnik przenikania ciepła oznacza się symbolem  $U$  i jest on parametrem całej przegrody budowlanej oraz charakteryzuje ją z punktu widzenia ochrony cieplnej. Im mniejszy jest ten współczynnik, tym straty ciepła są mniejsze, co oznacza, że dana przegroda jest lepszym izolatorem.

Do obliczania współczynnika przenikania ciepła uwzględnia się grubość przegrody, a w zasadzie każdej z jej warstw oraz materiał, z którego każda warstwa jest wykonana. Aby wyznaczyć współczynnik  $U$  należy zacząć od obliczenia oporu przejmowania ciepła dla każdej z warstw według zależności [1]:

$$R_n = \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (1)$$

gdzie:  $n$  – ilość warstw w przegrodzie,  $d$  – grubość danej warstwy [m],  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)].

Współczynnik przewodzenia ciepła jest właściwością fizyczną każdego materiału i charakteryzuje intensywność wymiany ciepła przez dany materiał, więc im mniejszy jest, tym lepiej izoluje przed stratami ciepła. Aby otrzymać jego wartość najlepszym rozwiązaniem jest skorzystać z tych podanych w kartach technicznych produktów na stronie producenta.

Następnym krokiem jest zsumowanie wartości oporu cieplnego na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni (w przypadku ścian zewnętrznych jest to odpowiednio 0.13 [(m<sup>2</sup>·K)/W] oraz 0.04 [(m<sup>2</sup>·K)/W]) oraz opor każdej z warstw przegrody. Korzystamy z następującego wyrażenia:

$$R = R_{si} + R_{se} + \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

gdzie:

$R_{si}$  – opór przyjmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni [(m<sup>2</sup>·K)/W],

$R_{se}$  – opór przyjmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni [(m<sup>2</sup>·K)/W],

$R_i$  – obliczeniowe opory cieplne każdej warstwy [(m<sup>2</sup>·K)/W].

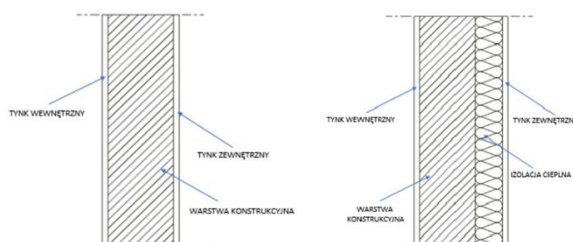
Ostatecznie współczynnik przenikania ciepła dla całej przegrody wyznaczany jest z zależności:

$$U = \frac{1}{R} \quad (3)$$

## 2. Rodzaje ścian zewnętrznych w budynkach jednorodzinnych oraz materiały wykorzystywane do ich budowy

Ścianą zewnętrzną nazywamy przegrodę pionową, która oddziela środowisko zewnętrzne od wewnętrznego. Przenosi ona obciążenia pionowe i poziome.

Pierwszym rodzajem ścian są ściany jednowarstwowe, czyli mury konstrukcyjne wybudowane z jednego rodzaju elementów na całej grubości. Składają się z warstwy konstrukcyjnej oraz warstw wykończeniowych. Drugim rodzajem ścian są ściany dwuwarstwowe, czyli mury z warstwą ocieplenia. Składają się z warstwy konstrukcyjnej, warstw wykończeniowych, a także warstwy izolacyjnej. Na rysunku 1 przedstawiono budowę takich ścian.



Rys. 1. Budowa ściany jednowarstwowej i dwuwarstwowej

Fig. 1. Construction of a single-layer and double-layer wall

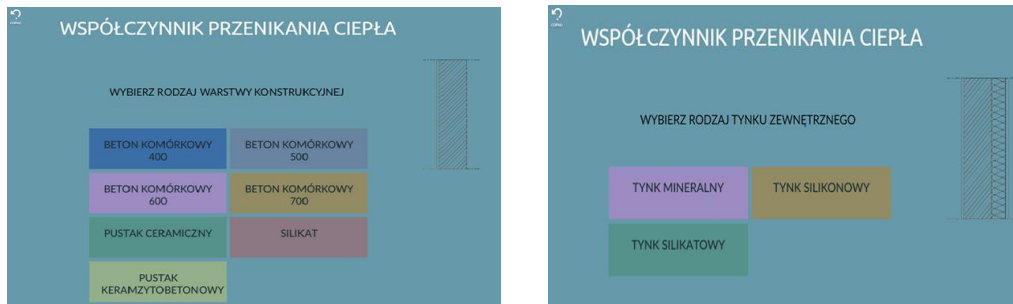
Ściany murowane domów wznosi się z różnych materiałów. Odpowiadają one za bezpieczne przeniesienie obciążeń, wytrzymałość konstrukcji, ochronę przed temperaturami – dlatego tak ważne jest, by odpowiednio je dobrać. W tabeli 1 zestawiono materiały, które są wykorzystywane w budownictwie ścian zewnętrznych.

Tabela 1. Materiały stosowane do budowy ścian zewnętrznych  
 Table 1. Materials that can be used to build external walls

Tynk wewnętrzny	cementowy, cementowo-wapienny, gipsowy
Tynk zewnętrzny	cementowy, cementowo-wapienny, gipsowy, mineralny, akrylowy, silikonowy, silikatowy
Warstwa konstrukcyjna	beton komórkowy (400,500,600,700), pustak ceramiczny, pustak ceramiczny z wkładką, bloczek silikatowy (1.4, 1.6, 1.8), pustak keramzytobetonowy, pustak keramzytobetonowy z wkładką
Warstwa izolacyjna	styropian biały, styropian grafitowy, wełna mineralna

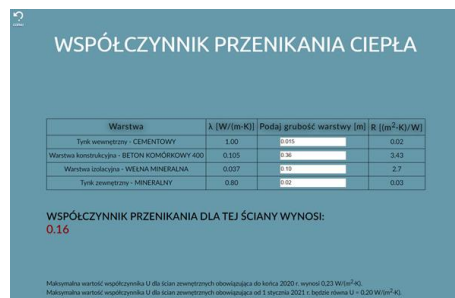
### 3. Kalkulator obliczeniowy

Program do obliczania współczynnika przenikania ciepła został napisany w formie strony internetowej za pomocą trzech technologii tj. HTML, CSS i JavaScript [2]. Strona główna programu umożliwia rozpoczęcie obliczeń, a każda z podstron pozwala na wybór rodzaju ściany oraz możliwych kombinacji materiałów, z jakich może być ona zbudowana. Rysunek 2 ilustruje przykłady podstron.



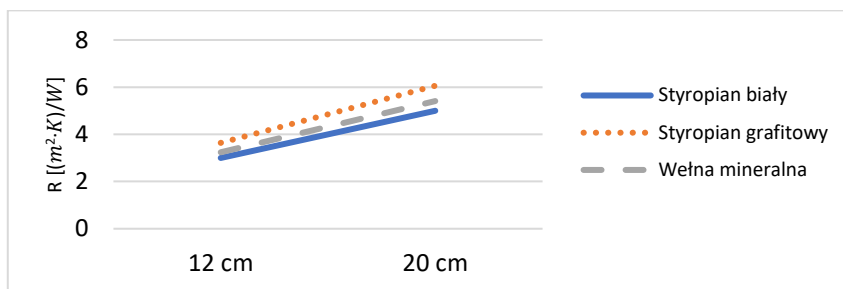
Rys. 2. Wybór rodzaju tynku zewnętrznego i warstwy konstrukcyjnej dla ściany dwuwarstwowej  
 Fig. 2. Choose the type of external plaster and structural layer for a double-layer wall

Po wybraniu wszystkich materiałów aplikacja przekierowuje do strony, gdzie po wpisaniu grubości każdej z warstw w metrach pojawia się wyliczona wartość oporu cieplnego  $R$  dla konkretnej warstwy, a poniżej wyświetla się ostateczna wartość współczynnika  $U$  dla całej ściany – rys. 3. Widnieje również informacja o aktualnych normach regulujących maksymalną wartość tego współczynnika.

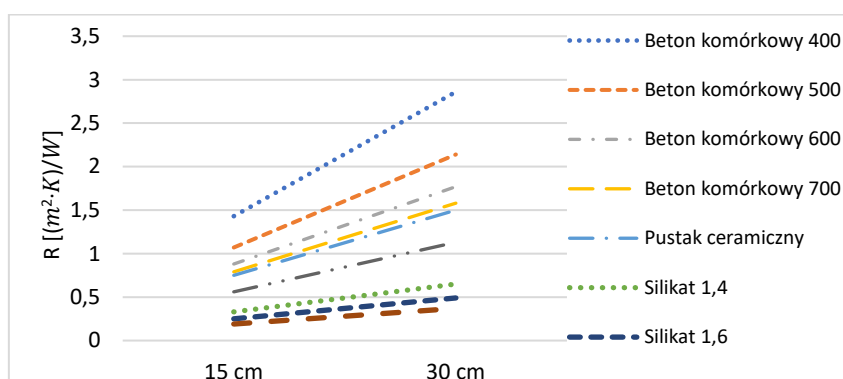


Rys. 3. Strona do obliczania współczynnika  $U$  dla wybranych materiałów  
 Fig. 3. A page for calculating the coefficient  $U$  for selected materials

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależności grubości od oporu cieplnego dla każdej z warstw izolacyjnych oraz warstw konstrukcyjnych.



Rys. 4. Wartości oporu cieplnego dla warstw izolacyjnych  
Fig. 4. Thermal resistance values for insulation layers



Rys. 5. Wartości oporu cieplnego dla warstw konstrukcyjnych  
Fig. 5. Thermal resistance values for construction layers

Jak można zauważyć, w przypadku materiałów izolacyjnych największy opór cieplny uzyska się z użyciem styropianu grafitowego, natomiast zalecanymi materiałami na warstwę konstrukcyjną są bloczki z betonu komórkowego o każdej gęstości.

#### 4. Podsumowanie

W niniejszej pracy stworzono program, za pomocą którego w szybki i łatwy sposób można obliczyć współczynnik przenikania ciepła dla ścian jedno- i dwuwarstwowych w budynkach jednorodzinnych. Użytkownik może dowolnie wybierać warstwy, z których chce skorzystać do budowy domu, a także dobierać grubości tych warstw. Ostateczny wynik pojawia się natychmiastowo, co znacząco ułatwia analizę tychże materiałów.

#### Literatura

1. Siewczyńska M., Domy jednorodzinne. Przewodnik do ćwiczeń projektowych z budownictwa ogólnego, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa (2017).
2. MacDonald M., JavaScript i jQuery nieoficjalny podręcznik, Wydawnictwo Helion, Gliwice (2013).

## PROJEKT ORAZ ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO

**inż. LUKASZ FRĄCZEK,**

Automatyka i Robotyka, AB5, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Arkadiusz Poteralski, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Celem zaprezentowanej pracy było zaprojektowanie oraz weryfikacja wytrzymałościowa MES ramienia uniwersalnego robota przemysłowego. Zaprojektowane ramię posiadało konfigurację antropomorficzną i sześć osi obrotowych. Do osiągnięcia założonego celu wykorzystany został program klasy CAX pozwalający na utworzenie modelu robota oraz przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej.



### DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF THE INDUSTRIAL ROBOT

**Abstract.** Aim of presented work was to design universal robotic arm and analyze its strength using FEM. Designed arm had an anthropomorphic configuration and six rotational joints. To reach the assumed goal, a CAX-class tool was used, which allowed creation of the robot model and its strength analysis.

#### 1. Wprowadzenie

Projektowanie oraz konstruowanie urządzeń technicznych jest stale rozwijaną dziedziną zarówno nauki jak i przemysłu, które często wzajemnie siebie uzupełniają. Szczególną uwagę należy jednak zwrócić na proces projektowy urządzeń automatyki, gdzie potrzebna jest wiedza z wielu różnych dziedzin nauk technicznych, a nowoczesne rozwiązania technologiczne są szybko wdrażane.

Proces projektowy manipulatora poprzedzony był przeprowadzeniem przeglądu komercyjnie dostępnych, sześciooosiowych robotów przemysłowych w celu zapoznania się ze stosowanymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Przegląd obejmował roboty znajdujące się w ofercie liderów rynkowych takich jak ABB, KUKA czy Kawasaki w klasie udźwigu około 10 kg.

Należy również wspomnieć, że proces projektowy realizowany był zgodnie z Metodologią Szkoły Śląskiej Projektowania i Konstruowania, gdzie duży nacisk jest kładziony na metody wspomagające proces projektowo-konstrukcyjny, a w szczególności wspomaganie komputerowe [1].

#### 2. Proces projektowo-konstrukcyjny projektowanego robota

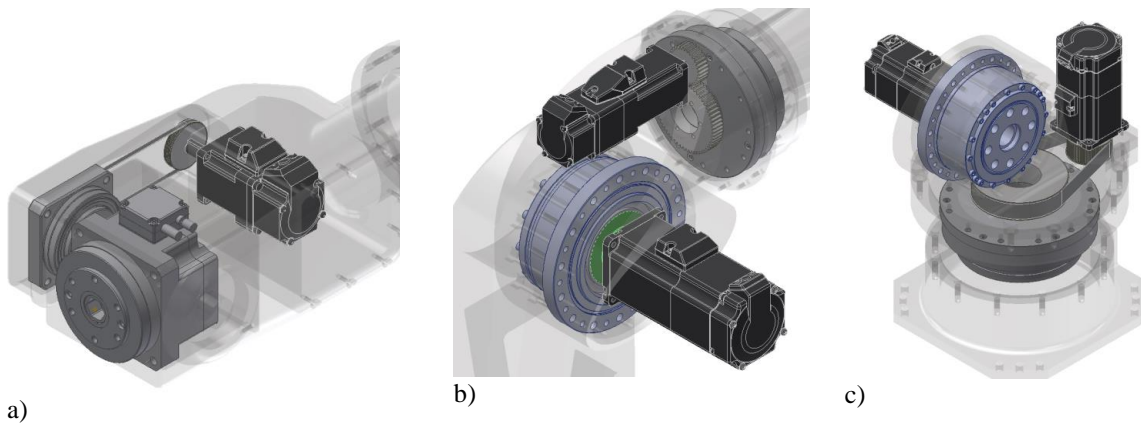
Przedmiotem zadania było opracowanie konstrukcji ramienia sześciooosiowego robota o antropomorficznej strukturze łańcucha kinematycznego. Główne założenia obejmowały ustalenie maksymalnego udźwigu (10 kg), określenie wstępnej wartości zasięgu (1800 mm) oraz preferowanego rodzaju napędu (napęd elektryczny).

W celu opracowania konstrukcji w jak najmniejszej liczbie iteracji postanowiono, że ramię robota będzie konstruowane od końca łańcucha kinematycznego, tzn. od osi szóstej do osi pierwszej. Algorytm konstruowania kolejnych osi przedstawiono na Rys. 1. Dodatkowo, w celu redukcji stopnia skomplikowania środka technicznego, zdecydowano się na zastosowanie kompletnych modułów przekładni falowych oraz elektrycznych silników serwo.



Rys. 1. Proces konstrukcji kolejnych ogniw  
Fig. 1. Design process of subsequent links

Do zamodelowania robota użyty został program CAx Autodesk Inventor 2017 z wykorzystaniem modułu CAD. Poszczególne podzespoły z włączoną przezroczystością obudowy przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Podzespoły: a) osi 6 i 5, b) osi 4 i 3, c) osi 2 i 1  
Fig. 2. Subassemblies: a) axes 6 and 5, b) axes 4 and 3, c) axes 2 and 1

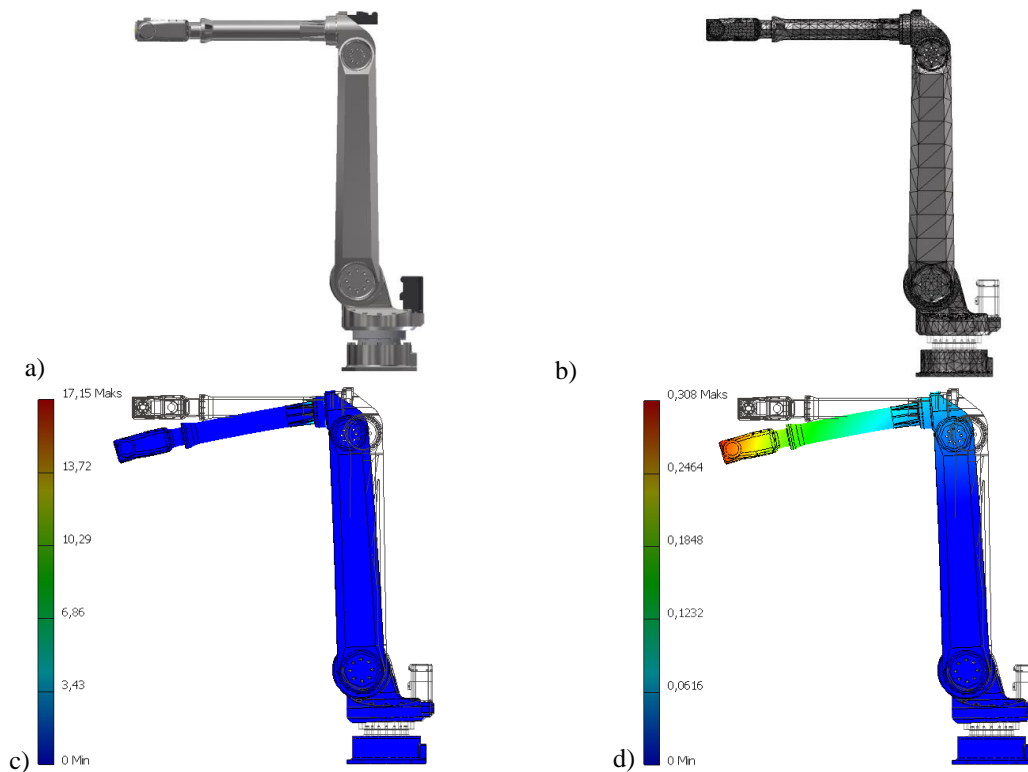
### 3. Analiza wytrzymałościowa

Analiza MES zaprojektowanego ramienia została przeprowadzona wykorzystując moduł MES programu Autodesk Inventor 2017. Analiza obejmowała określenie maksymalnego naprężenia zredukowanego wg hipotezy von Misesa występującego w strukturze nośnej oraz określenie maksymalnego przemieszczenia końcówki manipulatora.

Przed przystąpieniem do analizy należało przygotować utworzoną konstrukcję do badania. W tym celu model manipulatora został uproszczony – podczas analizy wyłączone zostały elementy, które nie powinny przenosić obciążeń. Dotyczyło to w szczególności elementów układu napędowego. Następnie przyporządkowany został materiał definiujący właściwości mechaniczne elementów nośnych manipulatora; z listy dostępnych materiałów wybrany został materiał najbardziej zbliżony do staliwa ogólnego zastosowania GS-45. Kolejnym krokiem było wygenerowanie siatki elementów skończonych. Ze względu na dostępność wystarczającej mocy obliczeniowej komputera oraz duży wpływ zaokrągleń na spiętrzenia

naprężeń, model manipulatora nie został uproszczony względem jego geometrii, czego rezultatem było duże zagęszczenie siatki w miejscach o bardziej złożonej geometrii. Ostatecznie dodane zostały warunki brzegowe symulacji. Robot został utwierdzony w podstawie, przyłożone zostało maksymalne obciążenie do flanszy mocującej równe 100 N oraz włączona została grawitacja.

Analiza manipulatora została przeprowadzona dla dwóch pozycji – pozycji HOME (Rys. 3) oraz największego wyciągu (Rys. 4), dla której powstaje największe ugięcie.



Rys. 3. a) Pozycja HOME, b) Uproszczony model z naniesioną siatką, c) Mapa naprężeń zredukowanych, d) Mapa przemieszczeń  
 Fig. 3. a) HOME position, b) Simplified model with mesh drawn on top, c) Distribution of equivalent stresses, d) Displacements map

Maksymalne naprężenie zredukowane wg hipotezy von Misesa dla pozycji HOME wyniosło 17,15 MPa. Przyjmując naprężenie niebezpieczne jako granicę plastyczności materiału, obliczono, że współczynnik bezpieczeństwa wynosi 14,5.

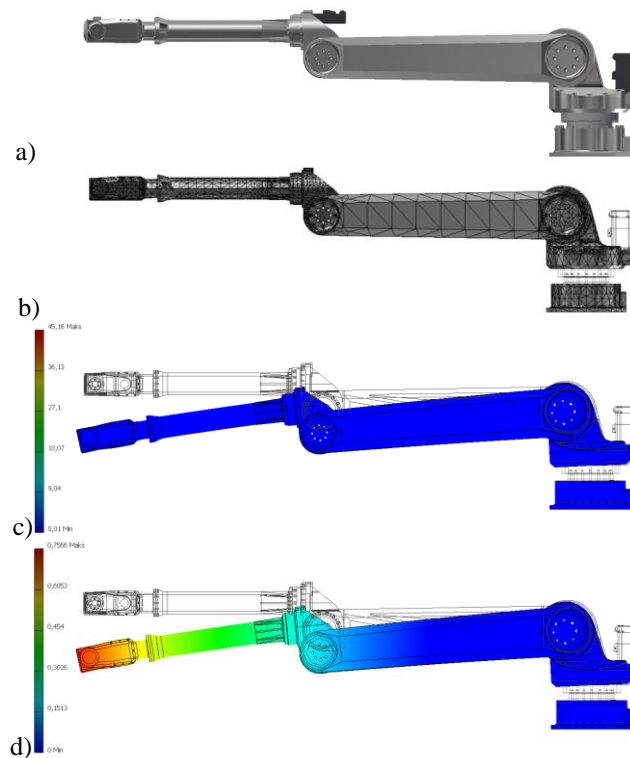
Maksymalne przemieszczenie względem idealnie sztywnego modelu wynosi 0,308 mm dla długości ramienia 980 mm. Stosunek ugięcia do długości ramienia wynosi  $3,143 \cdot 10^{-4}$ .

Dla pozycji największego wyciągu maksymalne naprężenie wyniosło 45,16 MPa, przez co wartość współczynnika bezpieczeństwa wyniosła 5,5.

Przemieszczenie maksymalne wyniosło 0,757 mm na długości ramienia 1880 mm. Na podstawie otrzymanych danych wyznaczono stosunek ugięcia do długości ramienia, który wyniósł  $4,027 \cdot 10^{-4}$ .

Przyjmując, że stosunek ugięcia do długości nie powinien przekraczać  $1 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-5}$  [2], można stwierdzić, że otrzymana sztywność ramienia robota jest zadowalająca.





Rys. 4. a) Pozycja największego wysięgu, b) Uproszczony model z naniesioną siatką,  
 c) Mapa naprężeń redukowanych, d) Mapa przemieszczeń  
 Fig. 4. a) Maximum reach position, b) Simplified model with mesh drawn on top,  
 c) Distribution of equivalent stresses, d) Displacements map

#### 4. Podsumowanie

Wykorzystanie programów klasy CAx nie tylko pozwala na przyspieszenie procesu projektowo-konstrukcyjnego, ale również na zastosowanie wyspecjalizowanych modułów do analizy wytrzymałościowej przyszłego środka technicznego. Należy równocześnie zauważyć, że MES jest wysoce uniwersalną metodą, która pozwala na otrzymanie wystarczająco dokładnych wyników dla problemów trudnych do rozwiązania lub nierozwiązywalnych za pomocą metod analitycznych [3]. Wspomniane cechy okazały się szczególnie przydatne podczas analizy wytrzymałościowej ramienia robota przemysłowego, podczas której wyznaczono parametry wytrzymałościowe takie jak naprężenia i przemieszczenia.

#### Literatura

1. Gendarz P., Chyra P., Rząsiński R.: Wspomaganie komputerowe CAD/CAM (I-DEAS, UNIGRAPHICS, AutoCAD), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2007).
2. Kozak B.: Mechanika techniczna, WSiP, Warszawa (2004).
3. Rudy M.: Na czym polega symulacja i modelowanie komputerowe z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES), <https://gmsystem.pl/blog/na-czym-polega-symulacja-i-modelowanie-komputerowe-z-zastosowaniem-metody-elementow-skonczonych-mes/> (dostęp 07.06.2020).

## ANALIZA WIBROAKUSTYCZNA PRZYRZĄDU BADAWCZEGO LAMPY SAMOCHODOWEJ

**inż. KAMIL GEMBALCZYK**

Mechanika i Budowa Maszyn, Studia dualne, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Celem pracy było wykonanie badań wibracyjnych oraz analiza przyrządu do badań lampy samochodowej. Głównym kryterium był brak częstotliwości własnej w zakresie 0 – 200 [Hz]. Model przyrządu analizowano z wykorzystaniem programu metod elementów skończonych Abaqus, zgodnie ze wszystkimi zadanymi kryteriami klienta. Wyniki analizy umożliwiły wykonanie przyrządu oraz wykonanie badań doświadczalnych. Wyniki analizy umożliwiły fizyczne wykonanie przyrządu oraz wykonanie badań doświadczalnych.



### VIBROACOUSTIC ANALYSIS OF A DEVICE FOR CAR REFLECTOR TESTS

**Abstract.** The goal of the work was to perform vibration tests and vibroacoustic analysis of a device for car reflector tests. The main criterion was the lack of frequency in the range of 0 – 200 [Hz]. Calculation parameters were determined in the Abaqus environment, in which the project had been analyzed according to all customer's criteria. When every single requirement had been accomplished, the production of the instrument began, followed by experimental tests.

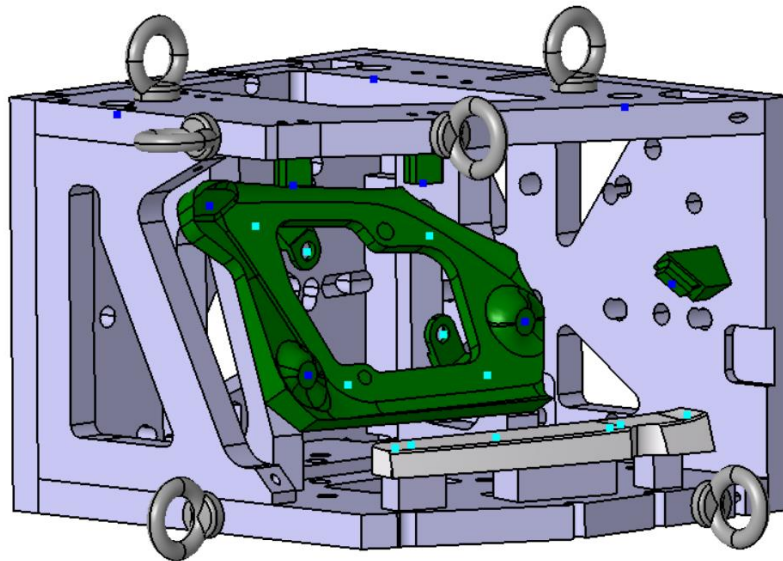
#### 1. Wprowadzenie

Wibroakustyka, czy też akustyka drgań, jest działem akustyki zajmującym się głównie zjawiskami sprzężenia pomiędzy drganiami mechanicznymi i akustycznymi. Głównym zastosowaniem akustyki drgań jest dziedzina związana z diagnostyką maszyn, która określa stan sprawności maszyny lub układu maszyn na podstawie pomiaru wibracji ruchowych poszczególnych elementów oraz wytworzonego hałasu. Analiza drgań przyrządu miała na celu zarówno wyznaczenie najmniej sztywnych miejsc w przyrządzie, jak i zobrazowanie jak badany obiekt będzie się zachowywał w zadanych warunkach. Przedmiotem analizy będzie przyrząd badawczy lampy samochodowej, który jak najdokładniej odwzorowuje elementy współpracujące karoserii samochodu z reflektorem [1, 2].

#### 2. Symulacja drgań przyrządu

Do przeprowadzenia obliczeń numerycznych wykorzystano środowisko Abaqus. Do wyznaczania częstości i postaci drgań własnych zastosowano metodę Lanczosa. Model ten (wyłączając elementy umożliwiające transport) był poddany obliczeniom numerycznym. Model obliczeniowy został podzielony na 3 oddzielne analizy, w artykule został przytoczony

przykład tylko jednej z nich. Model przestrzenny zaprojektowanego przyrządu pokazano rysunku 1.



Rys. 1. Model przestrzenny przyrządu badawczego  
Fig. 1. 3D Model of the testing instrument

Z uwagi na charakter badań zarówno dla symulacji komputerowej, jak i testów doświadczalnych, przyrząd musiał spełnić pewne kryteria. Niektóre z nich przedstawiono poniżej:

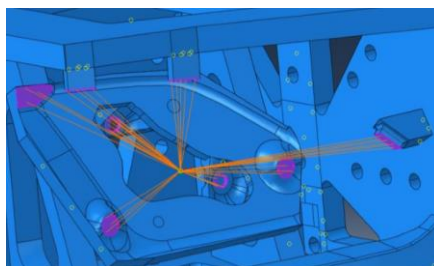
- Przyrząd wraz z zamocowanym reflektorem nie mógł osiągnąć pierwszej częstotliwości własnej drgań w zakresie 5 – 200 [Hz]. W przypadku wymuszenia drgań wzdłuż każdej osi oraz nie mógł osiągnąć dwukrotnie większej odpowiedzi wibracyjnej niż zadane wymuszenie (dwukrotności sygnału wejściowego) w tym zakresie częstotliwości.
- Badania powinny być wykonywane w zakresie częstotliwości drgań 50 – 1000 [Hz].

W tabeli 1 zamieszczono materiały z jakich przyrząd będzie wykonany oraz ich własności.

Tabela 1. Zestawienia właściwości materiałów  
Table 1. List of material properties

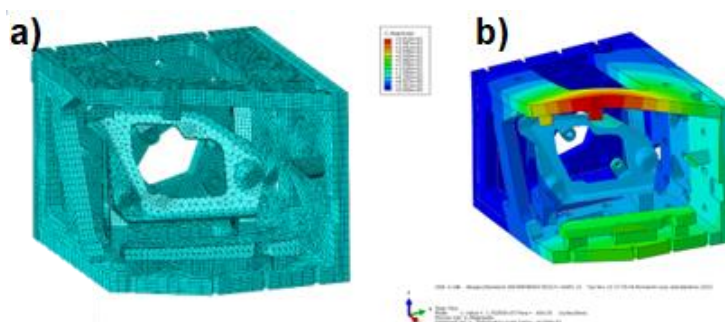
Materiał	Typ	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona
Aluminium (AW-5754)	Izotropowy	2710	70000	0.346
Stal nierdzewna (X38CrMo16)	Izotropowy	7860	200000	0.266

Następnie by zasymulować reflektor należy nadać w punkcie materialnym (o współrzędnych odpowiadających środkowi ciężkości reflektora) masę reflektora oraz ograniczenia wielopunktowe (MPC – multi-point constraints). Warunki takie odpowiadają oddziaływaniu masy reflektora na przyrząd. Rysunek 2 reprezentuje wiązania środka ciężkości lampy z elementami współpracującymi.



Rys. 2. Połączenie środka ciężkości lampy z przyrządem za pomocą wiązań  
 Fig. 2. The connections between center of gravity of the lamp and the testing instrument with constraints

Rysunek 3 przedstawia przyrząd z siatką elementów skończonych oraz odkształcony element drgający z pierwszą częstotliwością własną.



Rys. 3. Model przestrzenny przyrządu: a) z siatką elementów skończonych, b) drgający z pierwszą częstotliwością własną  
 Fig. 3. 3D model of the testing instrument: a) with the finite element mesh, b) vibrating with the first natural frequency

W celu skrócenia czasu obliczeń, zmniejszono zagęszczenie siatki w miejscach, gdzie spodziewano się stosunkowo małych odkształceń [1, 2, 3].

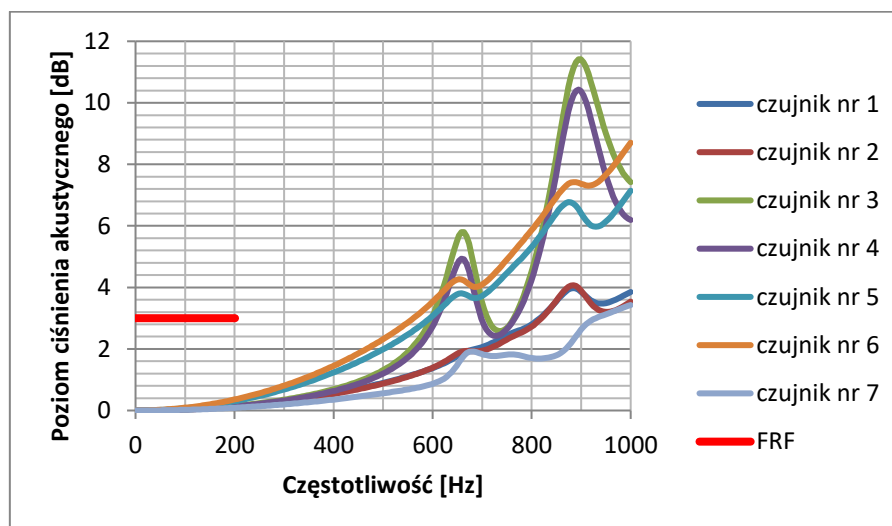
### 3. Analiza wyników symulacji drgań

Wartości częstotliwości drgań własnych przyrządu oraz przemieszczenia zostały umieszczone w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników symulacji drgań modelu  
 Table 2. Comparison of model vibration simulation results

oś	Pierwsza częstotliwość własna		Druga częstotliwość własna		Trzecia częstotliwość własna		Czwarta częstotliwość własna		Piąta częstotliwość własna		Szósta częstotliwość własna	
	f <sub>1</sub> [Hz]	U <sub>1</sub> [mm]	f <sub>2</sub> [Hz]	U <sub>2</sub> [mm]	f <sub>3</sub> [Hz]	U <sub>3</sub> [mm]	f <sub>4</sub> [Hz]	U <sub>4</sub> [mm]	f <sub>5</sub> [Hz]	U <sub>5</sub> [mm]	f <sub>6</sub> [Hz]	U <sub>6</sub> [mm]
X	666	3,913E1	771	2,710E1	892	4,21E1	1004	3,696E1	1364	2,885E1	1479	5,915E1

Symbol  $f$  oznacza częstotliwość własną, a  $U$  odpowiada maksymalnym przemieszczeniom. W celu sprawdzenia warunku akustycznego należy porównać poziom ciśnienia akustycznego osiąganego w trakcie określonych częstotliwości do narzuconego kryterium FRF (Frequency Response Function – reakcja na częstotliwość określona w kryterium klienta w zakresie 0 – 200 [Hz] o wartości 3 [dB], gdzie w przypadku wymuszenia drgań wzdłuż każdej z osi nie może wystąpić częstotliwość własna).



Rys. 4. Wykres odpowiedzi częstotliwości z narzuconą granicą FRF  
 Fig. 4. Frequency response graph with imposed FRF boundary

Czerwona linia, wyznacza granicę wg założeń klienta (0 – 200 [Hz]), w trakcie której żadna częstotliwość własna nie mogła wystąpić. Punkty pomiarowe (czujniki wibracyjne trójosiowe) zostały umieszczone na najbardziej aktywnych miejscach współpracujących. Wykres ten reprezentuje całokształt przebiegu badań numerycznych, które w identyczny sposób są w późniejszym etapie weryfikowane przez testy doświadczalne [2, 4].

#### 4. Podsumowanie

Celem pracy była analiza przyrządu badawczego zgodnie ze wszystkimi zadanymi kryteriami. Podczas badań wyznaczono 6 pierwszych częstotliwości własnych oraz towarzyszących im postaci drgań przyrządu. Zaprojektowany przyrząd spełnia wszystkie stawiane kryteria akustyczne np. przyrząd nie uzyskał pierwszej częstotliwości własnej w zakresie 0 – 200 [Hz]. Ponadto, przyrząd wykazał tylko 3 pierwsze częstotliwości własne w zakresie 0 – 1000 [Hz], co jest korzystną własnością.

#### Literatura

1. Uhl T.: Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych, WNT, Warszawa 1997.
2. Nilsson A., Liu B.: Vibro-acoustics, Springer, Berlin 2014.
3. Thomson W.: Theory of vibration with applications, CRC Press, 1996.
4. He J., Fu Z.F.: Modal analysis, Butterworth-Heinemann, Oxford 2001.

## A CONCEPT OF ICS CYBERSECURITY BENCHMARK PROBLEM

**WOJCIECH HAŃDEREK, Eng.**

Automation and Robotics, semester III, graduate studies

**MICHAŁ KOBIELSKI**

Automation and Robotics, semester IV, undergraduate programme

**PAWEŁ POLNIK**

Automation and Robotics, semester VI, undergraduate programme

Supervisor: Piotr Przyszałka, PhD, DSc, Eng., Prof. at SUT

**Abstract.** The main objective of the paper is to present hardware and software parts of the cybersecurity benchmark problem for industrial automation systems. A laboratory stand was elaborated to simulate cyberattacks on industrial systems. The control system of the new stand was developed using all the possibilities of the Festo stand as well as SCADA system in the Siemens ET 200SP device. The application created using the Snap 7 library allows simulation of cyberattacks on industrial control systems.

### KONCEPCJA PROBLEMU BENCHMARKOWEGO W ZAKRESIE CYBER BEZPIECZŃSTWA SYSTEMÓW ICS

**Streszczenie.** Głównym celem artykułu jest przedstawienie elementów sprzętowych i oprogramowania problemu testowego dotyczącego cyberbezpieczeństwa systemów automatyki. Opracowano stanowisko laboratoryjne do symulacji cyberataków na systemy przemysłowe. System sterowania nowego stanowiska został opracowany z wykorzystaniem wszystkich możliwości stanowiska Festo. Aplikacja utworzona przy użyciu biblioteki Snap 7 umożliwi symulację cyberataków na przemysłowe systemy sterowania.

### 1. Introduction

For the last few years, there were numerous incidents, outages, and other failures that have been detected and identified as the result of a cyberattack. These were mainly situations where fault was nearly impossible to detect. In March 2000 in Maroochy Shire Council, there were detected communication problems with wastewater pumping stations, alarms were not send to system, pumps did not work properly. As the result in the next three months, liters of effluent were released to local waterways. Attack was proceeded by Vitek Boden, who had taken control over 150 sewage pumping stations, using a personal computer and a radio transmitter. Finally, Mr. Boden was arrested, however after his operation, it was very difficult to restore initial state of waterways [1].



In 2008 in Baku-Tbilisi-Ceyhan, a cyberattack was initiated to control system pipeline with petroleum. Alarms were suppressed, and system operators were blind. In result, pipeline was ruptured and that caused an oil ignition and an explosion. Operator spokesperson denied that there was any tampering with computers or communication system. That shows danger of cyberattacks, which could be difficult to notice [2]. Apart from these attacks there are also experiments, that show how cyberattacks can be initiated, and how can we protect industrial control systems. In 2007, Aurora Project was started, which was an experiment by Idaho National Laboratories (INL). This project focused on behavior of controller during a cyberattack. The experiment, made by security researchers shown, the plant could be even destroyed. During this presentation breakers on a diesel generator were opened and closed out of synch, which caused an explosion. Aurora Project was reported in 2007 by CNN, showing the seriousness of security in ICS, mainly in power infrastructure [3]. There were also examples of very complex solutions of cyberattacks, like Stuxnet. Stuxnet is a worm which is a virus on Microsoft Windows system, searching in the local network connected Siemens ICS systems, like PLC controllers and HMI panels [4]. Before Stuxnet in 2008, there was another worm, which began to infecting U.S. military machines and carried into CENTCOM's classified network [5]. In 2012 in corporation Saudi Aramco, a virus was implemented, which attacked control system [6]. In 2014, German article informed that an unnamed steel mill was attacked, and in result it was destroyed [7].

## 2. The laboratory stand and benchmark problem

The main goal of the article is to illustrate a concept of ICS cybersecurity benchmark problem corresponding to the project realized by a student research group called AI-METH. The project includes the design and implementation of a laboratory stand and software to simulate cyber-attacks on industrial control systems. It must be highlighted that the authors of this project do not attempt to find vulnerabilities in software and automation devices or neither do they attempt to find a way to compromise network protocol security. By cyber-attack simulation, we mean a case in which all security systems have already been cracked by a cybercriminal, as a result of which changes are made to the control system through the previously obtained access to the network and/or installed malware.

One of the fundamental elements of the benchmark problem is a laboratory stand made by Festo company for development control methods and process diagnostics. The stand is built of one pressure tank where a current pressure is controlled by a PID module, two tanks where medium levels are also controlled by a PID module, a solenoid valve, a pneumatic actuator responsible for openness level of the valve, a pump, a heater and a sensor system. All devices from SIEMENS were programmed in TIA Portal software - version 15.1. The whole laboratory stand used in this research is shown in Fig. 1.



Fig. 1. Laboratory station for cyberattack simulation

Rys. 1. Stanowisko do symulacji cyberataków na przemysłowe systemy sterowania

The next element of the laboratory station is WebSCADA visualization system. The authors use a new approach for visualization of industrial process. In contrast to basic SCADA system, the authors propose a real photo representation of the laboratory stand which can be applied to show all the changes in the process variables. In such approach it is very important to prepare a detailed graphics for WebSCADA visualization. We mainly use photo layers, on which we get an animation effect by applying layers. The structure of animation process is implemented in HTML 5, where semantic elements are necessary for correct visualization of the process. This part is implemented in CS3. The most important property is z-index, which allows us to set photo on a longitudinal axis Z. An element with greater stack order is always in front of an element with a lower stack order. Z-index property allows us to create three-dimensional animation effect in the case of two-dimensional photos. The main rules of the visualization system are included in PLC SIEMENS S7-300. Visualization data can be downloaded and transferred by the functions implemented in TypeScript with the use of webserver functionalities of the PLC. In this way it is possible to animate all changes of the process variables in real time, e.g. animation of the medium level in a tank, states of valves, values obtained from manometer sensors, temperature sensors, etc.

### 3. A case study

The proposed benchmark problem can be applied to collect data that represents the object acting in different states such as:

- F0 – faultless conditions;
- F1 – cyber-attack leading to the physical damage of the object. For example there can be a situation where a cybercriminal intends to physically damage the components of the installation responsible for cooling the nuclear power plant reactor to cause high material, environmental and human losses. The attack on the object can occur from anywhere in the world at any time. The cybercriminal would break all protections and would change the values of the parameters of PID controller implemented in the PLC responsible for controlling the pressure in the expansion tank. The result might be an unstable pressure control that could lead to the physical damage of one or more components of the installation which is necessary to supply the medium that was needed to cool the reactor. For example, the centrifugal pump might be damaged due to its overload or the tank being the pressure buffer in the system might be broken. As a result of the attack, the power plant might fail. And as a consequence, an ecological disaster covering significant territorial areas;
- F2 – cyber-attack leading to a change in the product formula. Imagine a situation where a cybercriminal intends to change the product formula to cause general anxiety in society. The cybercriminal breaks all firewalls and makes a slight change in the set point at some stage in the production of a popular medicament. A few processes in the pharmaceutical industry are very sensitive to even the smallest changes in parameters. Any deviations from the optimal values of technological parameters have a direct impact on the quality and quantity of the manufactured product. As a result of the attack the final product does not meet the formula requirements adopted by the process technologist. Changes are not detected in the quality control process and the medicament is placed on the market. After some time and in-depth research on the composition, a scandal breaks out because the medicament turns out to be ineffective;
- F3 – cyber-attack leading to dazzling operator. The last considered example of cyber-attack is action aimed at the so-called operator blinding. Blinding the operator involves making



changes in the control system and falsifying values in the process visualization system. Therefore, the personnel supervising the process (operator/ dispatcher/ technologist) observes the values of artificially generated process variables and has the impression that the process is running correctly. This action can lead to serious damage because the operator is not aware of what is really going on in the control process. As a rule, this type of attack occurs with other attacks and is designed to delay or prevent detection.

One of the examples of a cyber-attack is discussed below. A symptom of the one of designed cyberattacks simulated on the stand (F2) is the change in the set point value of the liquid level in the tank 102. In the SCADA system implemented on the ET 200SP the change is visible, the value 10 is displayed instead of 100, it is shown in Fig. 2. However, it is not possible for the operator to know the values of all process variables for a given documentation of the production process. To see a change in a parameter, the operator responsible for the process must check the documentation and compare all values of the process variables or ask a technologist for help. As a result of the simulated cyber-attack, the recipe is changed, and at a later stage the obtained product does not comply with the initial assumptions of the production process.

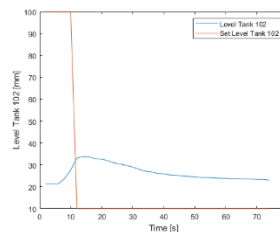


Fig. 2. Value of level in tank 102 – set and measured

Rys. 2. Wartość poziomu w zbiorniku 102 – zadana i mierzona

## References

1. G. Hughes, The cyberspace invaders, The Age, June 22, 2003 paragraph 2 – 7 <https://www.theage.com.au/national/the-cyberspace-invaders-20030622-gdvx44.html>
2. Robert M. Lee, Michael J. Assante, Tim Conway, SENS ICS - ICS Defense Use Case (DUC) Dec 20, 2014, pages 1 – 2 <https://ics.sans.org/media/Media-report-of-the-BTC-pipeline- Cyber-Attack.pdf>
3. J. Meserve, CNN.com. Sources: Staged cyber-attack reveals vulnerability in power grid, [http://articles.cnn.com/2007-09-26/us/power.at.risk\\_1\\_generator-cyber-attack\\_electricinfrastructure](http://articles.cnn.com/2007-09-26/us/power.at.risk_1_generator-cyber-attack_electricinfrastructure). September 26.2007 (cited: November 3.2010).
4. E. Chien, Symantec. Stuxnet: a breakthrough, <http://www.symantec.com/connect/blogs/stuxnet-breakthrough>, November 2010 (cited: November 16.2010), Paragraph 1 - 5
5. Graham Messick CBS News, Cyber war: sabotaging the system, <http://www.cbsnews.com/stories/2009/11/06/60minutes/main5555565.shtml>, November 8, 2009 (cited: November 3.2010)
6. Nicole Perlroth - In Cyberattack on Saudi Firm, U.S. Sees Iran Firing Back, New York Times, Paragraph 1 – 3, <https://www.nytimes.com/2012/10/24/business/global/cyberattack-on-saudi-oil-firm-disquiets-us.html>
7. Kim Zetter, A Cyberattack Has Caused Confirmed Physical Damage for the Second Time Ever, January.08.2015 <https://www.wired.com/2015/01/german-steel-mill-hackdestruction/>

## STANOWISKO LABORATORYJNO DYDAKTYCZNE DO BADANIA SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH

**inż. FILIP HRAPEĆ**

Automatyka i Robotyka, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Arkadiusz Kolka

**Streszczenie.** Zrealizowany projekt miał na celu umożliwienie zapoznania się z podstawami budowy i wykorzystania technologii fotowoltaicznych oraz wykorzystanie praktyczne z zakresu projektowania i budowy układów mechatronicznych. Zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko umożliwiające badania porównawcze wpływu różnych czynników na efektywność działania układu fotowoltaicznego zarówno w układzie statycznym jak i nadążnym.



### TESTING DEVICE FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEM RESEARCH

**Abstract.** Realized project was invented for collect knowledge about photovoltaic system build and exploitation. Project was useful for expand skill in designing and use of mechatronic unit construction. Photovoltaic test device with moving PV panel have been designed, enabling research on influences of different factors on efficiency of static and moving system for electric energy production. Description of device build and some experimental works are presented in the paper.

#### 1. Wprowadzenie

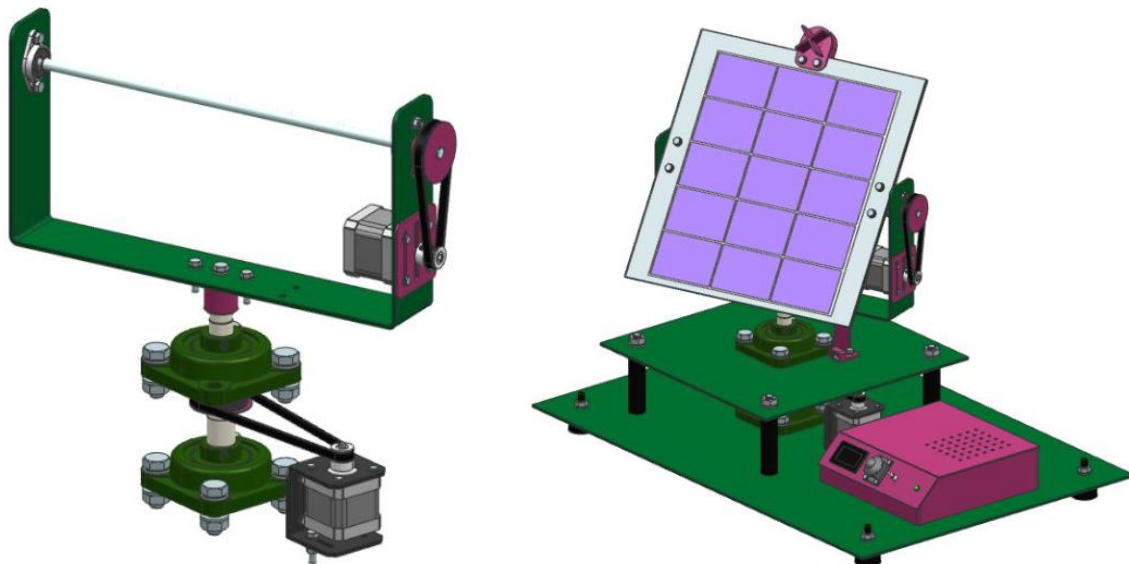
Dzięki ogniwom fotowoltaicznym możemy produkować czystą, bez emisyjną energię elektryczną a układy nadążające za słońcem pozwalają zwiększać efektywność wykorzystania ogniw. Projekt będący przedmiotem tego artykułu umożliwił wykorzystanie umiejętności mechatronicznych, obejmujących mechanikę, elektronikę i informatykę do budowy stanowiska laboratoryjnego, za pomocą którego można badać parametry elektryczne ogniwa fotowoltaicznego w różnych warunkach oświetleniowych. W trakcie realizacji projektu zapoznano się z niezwykle postacią jaką był Jan Czochralski, wybitny polski chemik, metaloznawca i wynalazca Metoda Czochralskiego opracowana w 1916 r. Metoda wytwarzania monokryształów krzemu pozwoliła na powstanie wynalazków takich jak tranzystory, komputery czy ogniwa fotowoltaiczne. Niedoceniony za życia za jego innowacyjną metodę, po śmierci nazywany jest ojcem współczesnej elektroniki.

Podstawą każdego ogniwa fotowoltaicznego jest płytka krzemowa mono- lub polikrystaliczna w której utworzono złącze p-n oraz elektrody ujemna (przednia) oraz dodatnia (tylna). Ogniwa wytwarza się poprzez cięcie bloku krzemu o średnicy kilkunastu cm na plasterki o grubości ok. 0,3 milimetra<sup>3</sup>. Blok krzemu wytwarzany metodą J. Czochralskiego pozwala uzyskać ogniwo monokrystaliczne, a blok krzemu powstały poprzez odlanie i kontrolowane chłodzenie, ogniwo polikrystaliczne. Kilkadziesiąt ogniw łączy się szeregowo

ze sobą za pomocą taśm przewodzących w moduły, a kilka modułów w panele. Ogniwa w modułach umieszczone są między dwoma szybami wprawionymi w ramę.

## 2. Budowa stanowiska badawczego

Fotowoltaicznym systemem nadążnym nazywamy układ, który pozycjonuje panele fotowoltaiczne, tak aby ilość energii elektrycznej generowanej przez taki system była jak największa. Panele fotowoltaiczne ustawione prostopadle do padania promieniowania absorbują maksymalną ilość energii, w wyniku czego moc wyjściowa także jest największa. Stosuje się dwa rozwiązania systemów nadążnych: jedno- i dwuosiowe. Systemy dwuosiowe produkują do 30% więcej energii, a jednoosiowe do 20% więcej energii w stosunku do systemów stacjonarnych<sup>1</sup>. Systemy jednoosiowe mogą obracać się ze wschodu na zachód lub północ południe. Pierwsza metoda sprawdza się w miejscach o większej szerokości geograficznej, gdzie słońce jest relatywnie nisko nad horyzontem, natomiast drugą metodę obrotu stosuje się bliżej równika.

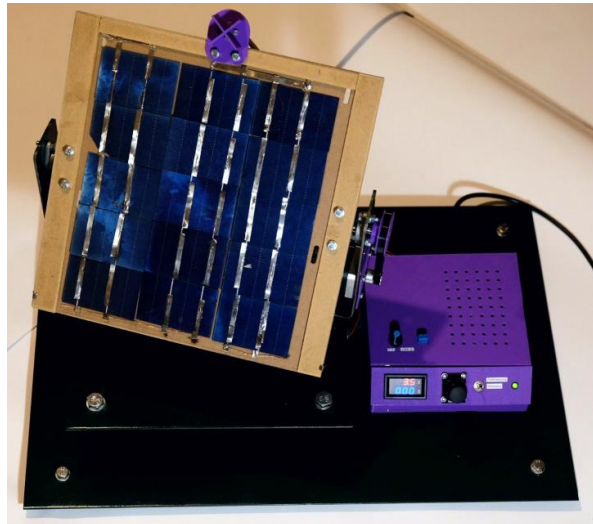


Rys. 1. Model CAD zaprojektowanego stanowiska badawczego  
Fig. 1. CAD model of designed research stand

Projektując stanowisko założono, że powinno być niezbyt dużych rozmiarów, w miarę możliwości mobilne, dające się postawić na stole w celu przeprowadzenia określonych badań. Ruch nadążny powinien być realizowany, za pomocą niewielkich silników prądu stałego oraz odpowiednich przekładni, aby jak najefektywniej pozycjonować ogniwa fotowoltaiczne do kierunku padania światła. System pozycjonowania ma działać na zasadzie sprzężenia zwrotnego, aby układ mógł podążać za dowolnym źródłem światła w sali laboratoryjnej, a przede wszystkim za słońcem. Panel użytkownika powinien posiadać możliwość przełączania między trybami automatycznym i manualnym. Użytkownik ponadto powinien mieć możliwość odczytu podstawowych parametrów pracy modułu fotowoltaicznego w zależności od aktualnego ustawienia układu.

Na rys. 1 przedstawiono końcową postać modelu CAD opracowanego stanowiska.

Można tu wyróżnić kilka głównych zespołów. Podstawę stanowiska stanowi stabilna i sztywna na której zamocowano wsporniki podpór łożyskowych oraz układ sterowania. Zespół obrotnicy, na którym umocowany jest panel wykorzystuje oś pionową łożyskowaną przez parę węzłów łożyskowych, na którą za pomocą paska zębatego przenoszony jest napęd z silnika. Na końcu osi w formie litery U jest umieszczone jarzmo soi obrotowej poziomej, na której sztywno osadzony jest panel PV. W jarzmie przewidziano mocowanie drugiego silnika, który za pomocą przekładni paskowo zębatej napędza oś obracającą panel. Na górze panelu PV umiejscowiono czujnik określający jego pozycję względem źródła światła. Rys.2 Przedstawia widok wykonanego stanowiska.

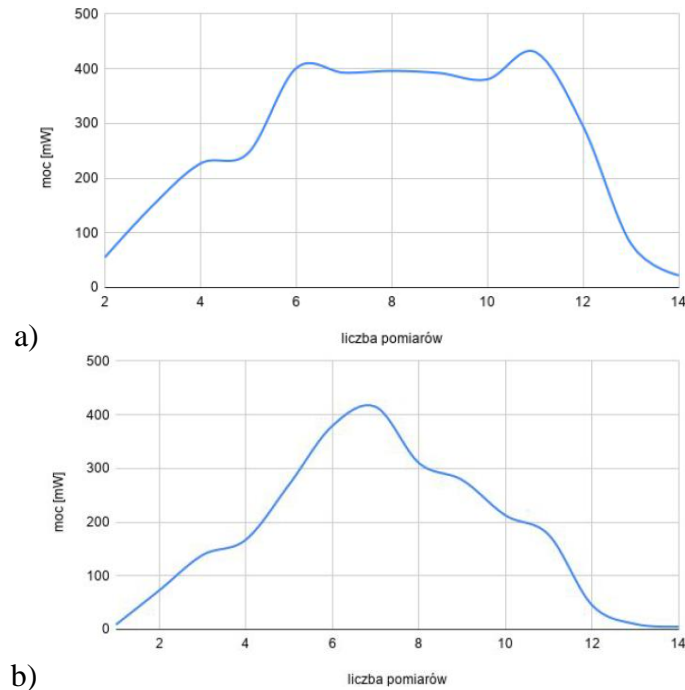


Rys 2. Widok wykonanego stanowiska badawczego  
Fig 2. View of research stand

Układ sterowania oparto o mikrokontroler Arduino Nano, który steruje silnikami krokowymi NEMA 17. Do prawidłowego działania silników potrzebne są także odpowiednie sterowniki A4988, których zadaniem jest wysyłanie odpowiednich impulsów sterujących do silnika oraz dostarczenie do niego zasilania. Do mikrokontrolera dostarczane są sygnały z czujników krańcowych oraz przełącznika trybu wyboru pracy automatycznej lub manualnej. Innym źródłem sygnałów wejściowych jest czujnik położenia źródła światła, który zbudowano w oparciu o dwie pary fotorezystorów. Dzięki nim mikrokontroler określa, w kierunku obrotu panelu PV. Dodatkowo wprowadzono możliwość ręcznej zmiany pozycji poprzez użycie joysticka. Wspólny zasilacz dostarcza energii niezbędnej do pracy układu napędowego i sterowania. W układzie sterowania zabudowano woltomierz i amperomierz oraz wyjścia dla zewnętrznych urządzeń rejestracyjnych.

### 3. Badania rozpoznawcze

Ponieważ Panel PV został zbudowany samodzielnie, z pojedynczych ogniw polikrystalicznego krzemu, konieczne było przeprowadzenie badań charakterystyki prądowo napięciowej, których dokonano przy sztucznym świetle. Wyznaczono znaczone charakterystykę prądowo napięciową oraz zależność mocy od napięcia. Uzyskano wyniki w których napięcie obwodu otwartego wynosi 4,8 V, natomiast prąd zwarcia 152,4 mA.



Rys.3. Charakterystyka generowanej mocy a) układ nadążny b) układ stacjonarny  
 Fig. 3. Generated power chart a) moving PV unit ; b) stationary PV unit

Wyznaczono punkt mocy maksymalnej 378,9 mW, któremu odpowiada mu napięcie 3,2 V i natężenie 118,4 mA. Obliczony współczynnik wypełnienia FF wynosi 0,52.

Dalszą część badań eksperymentalnych stanowiło porównanie uzysku energetycznego dla układu dwuosowego nadążnego i stacjonarnego. Uzyskane wykresy przebiegów czasowych uzyskiwanych mocy przedstawiono na rys.3.

#### 4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań porównawczych wykazano efektywność układu nadążnego dwuosowego o 28,4% większą niż układu stacjonarnego, co potwierdziło doniesienia literaturowe. Zbudowane stanowisko pozwala na przeprowadzenie dalszych badań eksperymentalnych w różnych warunkach oświetleniowych zarówno światłem sztucznym jak i słonecznym.

#### Literatura

1. Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, BTC, Legionowo, 2010.
2. Waclawek M., Rodziewicz T.: Ogniwa słoneczne wpływ środowiska naturalnego na ich pracę, WNT, Warszawa, 2014.
3. Góralczyk I., Tytko R.: Fotowoltaika Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków, 2015.
4. F.Hrapeć: Stanowisko laboratoryjno dydaktyczne do badania systemów fotowoltaicznych – Projekt inżynierski, Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, 2019.

## NUMERYCZNA ANALIZA MODALNA OSŁONY UKŁADU WYDECHOWEGO

**Mgr inż. JOACHIM JAROSZ**

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień  
Tenneco Automotive Polska Sp. z o.o., Rybnik  
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł poświęcony jest numerycznej analizie modalnej z wykorzystaniem metody elementów skończonych osłony układu wydechowego. W ramach pracy utworzono modele geometryczne oraz numeryczne wybranej osłony stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym. W praktyce osłony tego typu posiadają przetłoczenia w celu zwiększenia sztywności samej osłony oraz projektowania jej częstotliwości rezonansowych. Obliczenia MES wykonano w systemie Altair HyperWorks dla różnych wariantów geometrycznych przetłoczeń w osłonie.

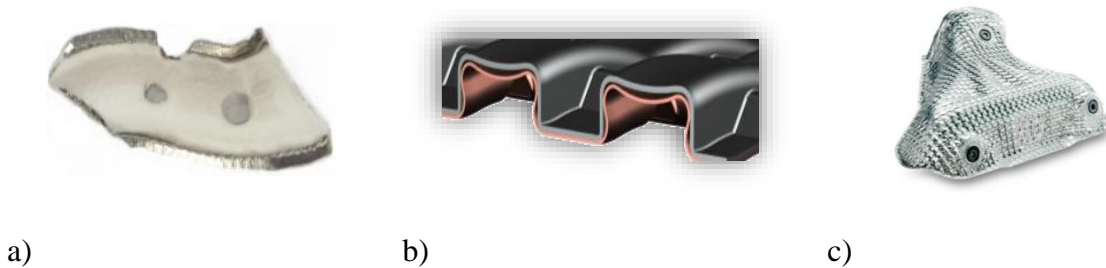


## NUMERICAL MODAL ANALYSIS OF THE EXHAUST SYSTEM SHIELD

**Abstract.** The article is devoted to numerical modal analysis using the finite element method of exhaust system shielding. In the work the geometric and numerical models of the typical shield used in the automotive industry were created. In practice, such shields have additional embossing in order to increase the stiffness and predict its resonance frequencies. FEM calculations have been performed in Altair HyperWorks software for different geometric variants of the embossing in the shield.

### 1. Wprowadzenie

Rola osłon na przestrzeni ostatnich lat znacznie ewoluowała, z roli czysto chroniącej elementy otaczające układ, do roli utrzymania odpowiedniej temperatury spalin by pewne procesy chemiczne mogły zaistnieć. Dotyczy to przede wszystkim eliminacji zanieczyszczeń takich jak tlenki azotu, wodorotlenki itp. Osłony te, aby spełnić swoją rolę muszą odznaczać się niską przewodnością cieplną (wysoka odporność termiczna), wysoką emisyjnością i dobrą stabilnością termiczną (ogniotrwałość). Są zwykle wykonywane z żaroodpornej i cienkiej blachy, której grubość waha się od 0.25mm do nawet 2.5mm. Często materiałem stosowanym do ich budowy jest aluminium. Dzięki wysokiej odporności cieplnej nie ulegają one uszkodzeniu nawet w wysokich temperaturach. Osłony termiczne występują w wielu konfiguracjach. Najprostsze z nich wytwarzane są z pojedynczej warstwy blachy. Podstawową ich zaletą jest łatwość formowania, ale wadą jest to, że nie redukują skutecznie hałasu oraz mają tendencję do wibracji. Dlatego też niektóre odmiany stosowane dzisiaj, są wyklejane odpowiednimi matami odpornymi na wysokie temperatury od wewnątrz, polepszając tym samym znacznie ich skuteczność cieplną i zdolność do tłumienia drgań (Rys. 1a). Kolejną odmianą osłon są tzw. osłony dwuwarstwowe, składające się z dwóch arkuszy blachy o różnych grubościach każda, ze szczeliną powietrzną lub materiałem izolacyjnym pomiędzy nimi. Są one zwykle lepsze pod względem zdolności do ograniczenia przenoszenia ciepła, hałasu i wibracji w porównaniu do ich jednowarstwowej odmiany (Rys. 1b).



Rys.1 Rodzaje osłon układu wydechowego  
Fig. 1. Different types of the exhaust system shield

Osłony tego typu wykonywane są również z aluminium, stopów aluminium lub innych kompozytów, wraz z ceramiczną powłoką termoizolacyjną w celu poprawy izolacji cieplnej. Tego typu osłony są przykręcane lub przyspawane do elementów, które mają izolować. (Rys. 1c). Jednym z ważniejszych aspektów dotyczących projektowania osłon, jest ich optymalny kształt niwelujący prawdopodobieństwo powstania zjawiska rezonansu. Odpowiednio zaprojektowany i zoptymalizowany, pozwala uniknąć problemów w fazie testowania i późniejszej eksploatacji układu. Powierzchnia elementu, jego grubość, a także grubość materiału izolacyjnego, oraz liczba i położenie połączeń śrubowych, ma istotny wpływ na powstawanie lub przenoszenie drgań.

Równania opisujące teoretyczne podstawy drgań własnych w układach mechanicznych, wyprowadza się z ogólnego równania ruchu dla drgań wymuszonych tłumionych [1,3]. Dla układu o jednym stopniu  $x$  swobody ma ono postać:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P * \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

gdzie:  $m$  jest masą układu,  $k$  sztywnością,  $c$  współczynnikiem tłumienia,  $P$  siłą wymuszającą. Po obustronnym podzieleniu przez masę, równanie przyjmuje postać:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_o^2 x = \frac{P}{m} * \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

gdzie:

$$2h = \frac{c}{m} \quad \omega_o^2 = \frac{k}{m} \quad (3)$$

stała  $h = \frac{c}{2m}$  jest współczynnikiem tłumienia względnego, natomiast

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

jest częstością drgań własnych.

W przypadku nietłumionych drgań swobodnych o jednym stopniu swobody, równanie (1) przybiera postać:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (5)$$

Rozwiązaniem równania drgań własnych jest całka ogólna równania, dla której  $x$  przyjmuje postać

$$x = C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t) \quad (6)$$

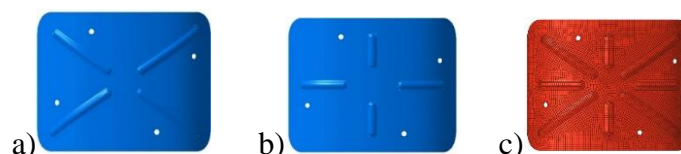
W rozwiązaniu należy uwzględnić również warunek początkowy w postaci:

$$x_o = A_o \sin(\omega t) \quad (7)$$

gdzie:  $\omega$  jest częstością drgań własnych,  $A_o$  jest amplitudą początkową drgań własnych.

## 2. Model geometryczny oraz numeryczny osłony

W pracy rozważano modele o wielu stopniach swobody. Do rozwiązania równań opisujących zagadnienie drgań własnych (przedstawione w poprzednim rozdziale) wykorzystano metodę elementów skończonych [2,4]. Opracowano odpowiednie modele geometryczne oraz numeryczne MES, dla trzech różnych wariantów przetłoczeń w osłonie (Rys. 2). Utworzono modele osłon z blachy o grubości 1mm, powierzchni 365cm<sup>2</sup>, oraz czterech otworach montażowych, za pomocą których mocowane są one do płaszcza tłumika. Przetłoczenia (uźebrowania) mają przekrój okrągły o średnicy  $\varnothing 6$ mm.



Rys. 2. Model geometryczny (a, b) oraz MES (c) osłony z różnymi wariantami przetłoczeń  
Fig. 2. CAD (a, b) and FEA (c) numerical model with different embossing variants

Model numeryczny, został przygotowany przy pomocy preprocesora oprogramowania HyperWorks firmy Altair. Zbudowany jest z liniowych powłokowych elementów skończonych typu QUAD4 oraz TRIA3. Mocowanie do płaszcza tłumika (otwory) zamodelowano, jako elementy typu RBE2. Materiałem osłony jest standardowa stal aluminiowana o grubości 1.0mm, module Younga  $E=2.1e5$  MPa, współczynnika Poisson'a 0.3 i gęstości  $7.85e-9$  kg/m<sup>3</sup>. Obliczenia zostały przeprowadzone za pomocą solvera Optistruct.

## 3. Rezultaty analiz numerycznych

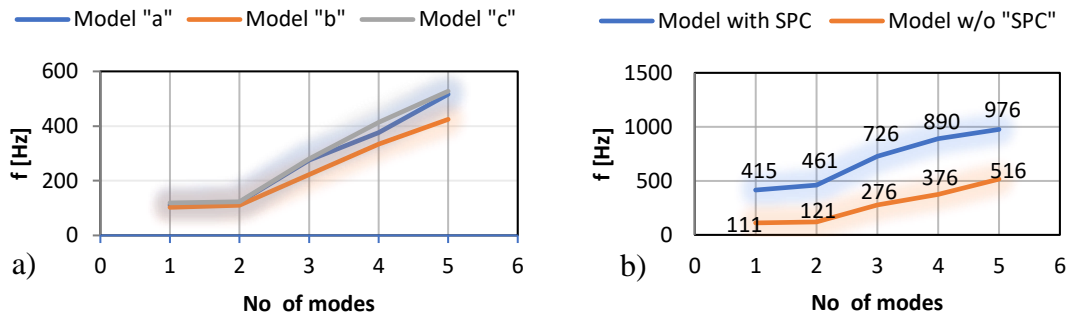
Dla osłon o podanych powyżej parametrach przeprowadzono analizy modalne, których celem było znalezienie pierwszych pięciu wartości częstości oraz postaci drgań własnych. Przeprowadzono analizy modalne dla przypadku modeli utwierdzonych w miejscach mocowania (model SPC, *ang. single point constraint*) oraz dla przypadków swobodnego podparcia, wszystkich trzech wariantów osłon. W pracy zaprezentowano jedynie wybrane rezultaty analiz numerycznych.

W tabeli 1 zestawiono pięć pierwszych częstotliwości drgań dla wariantów nieutwierdzonej osłony. Na Rys. 4a przedstawiono wykres zależności częstości drgań własnych rozpatrywanych wariantów osłon, natomiast Rys. 3b przedstawia porównanie częstości drgań własnych osłon utwierdzonych. Na Rys. 4 przedstawiono postaci dla pierwszych pięciu częstości drgań własnych osłony dla wariantu trzeciego (model „c”).

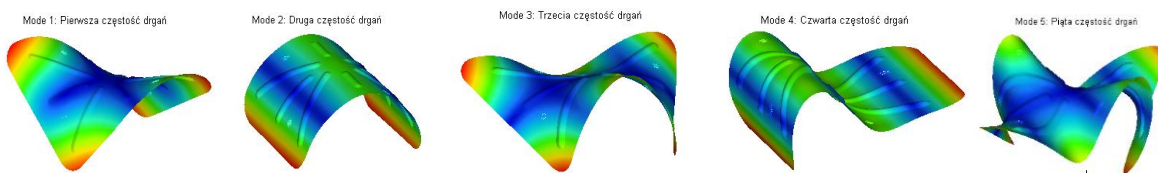
Tabela 1. Pierwsze pięć częstotliwości drgań własnych dla osłon o grubości 1.0 mm  
Table 1. The first five eigenfrequencies of the shield with 10 mm thickness

częstotliwość drgań [Hz]			
Mode	Model a	Model b	Model c
1	110,91	102,62	118,89
2	120,6	109,67	123,46
3	275,55	222,61	279,53
4	375,7	334,02	413,47
5	516,37	424,40	527,49





Rys. 3. Częstotliwości drgań własnych dla rozpatrywanych wariantów osłon  
Fig. 3. Natural vibration frequency charts for the considered shielding variants



Rys. 4. Postać pierwszych pięciu częstotliwości drgań własnych osłony  
Fig. 4. The first five eigenfrequencies of the shield

#### 4. Podsumowanie

Zgodnie ze wzorem (4) wyższa sztywność przenosi częstotliwość drgań w wyższe zakresy. Ze względu na częstotliwości wymuszenia (drżania generowane przez silnik) podstawowym celem jest zaprojektowanie osłon dla których częstotliwości rezonansowe będą wyższe od 230 Hz. Porównując rezultaty dla rozpatrywanych modeli można zauważyć niewielki wpływ kierunku zastosowanych przetłoczeń. Na podstawie Tabeli 1 oraz wykresu (Rys.1a) najniższą pierwszą częstość drgań wykazuje osłona o najkrótszych przetłoczeniach umiejscowionych w płaszczyźnie osi symetrii. Wprawdzie przetłoczenia z modelu „b” są krótsze, natomiast skośny kierunek przetłoczeń w modelu „a” daje o około 8% wyższą wartość pierwszej częstości drgań (modele „a” i „b” posiadają tę samą liczbę przetłoczeń). Dla modelu „c” otrzymano najwyższe wartości częstotliwości rezonansowych osłony. Na podstawie Rys. 4b można stwierdzić, że utwierdzenie osłony w otworach montażowych podnosi pierwszą częstość drgań prawie 4-krotnie. Postacie drgań własnych osłony (Rys. 5) niosą ponadto cenną informację dla konstruktora, ponieważ pozwalają poprawnie dobrać elementy usztywniające oraz miejsce mocowania osłony. Zaproponowane w pracy miejsce mocowania osłon oraz ilość i kształt przetłoczeń z pewnością nie są optymalne, więc można je poprawić powodując dodatkowe przesunięcie częstotliwości rezonansowych do wyższych wartości. Będzie to celem dalszych prowadzonych prac w tym zakresie.

#### Literatura

1. Arczewski K., Pietrucha K., Szuster J.T., Drgania układów fizycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
2. Bąk R., Burczyński T., Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego, WNT, Warszawa 2013.
3. Hartog J.P., Den, Drgania Mechaniczne, PWN, Warszawa 1971.
4. Zienkiewicz O.C., Metoda elementów skończonych. WNT Arkady, Warszawa 1972.

## OPTIMALIZACJA TORU RUCHU ROBOTA W OPARCIU O ALGORYTM NAJKRÓTSZEJ DROGI W SIECI

**inż. TOBIAS JASIULEK,**

Automatyka i Robotyka, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Marek Jasiński, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Praca dotyczy wykorzystania algorytmu najkrótszej drogi w sieci do planowania drogi robota. Wykonano aplikację komputerową umożliwiającą wprowadzenie struktury sieci oraz graficzną prezentację tej struktury i wyników obliczeń. Przedstawiono przykładowe obliczenia dotyczące drona poruszającego się po hali produkcyjnej.



## OPTIMIZATION OF ROBOT'S MOTION PATH BASED ON THE SHORTEST PATH ALGORITHM

**Abstract.** The work concerns the use of the shortest path method for planning a robot motion. A computer application was made which allows to input the network structure as well as a graphical representation of the network and results of calculations. As an example the calculation concerning movements of the drone in production hall was done.

### 1. Wprowadzenie

W czasach, gdy roboty mobilne są bardzo popularne oraz dostępne, nie tylko dla firm, ale także dla klientów indywidualnych, istnieje coraz większe zapotrzebowanie na algorytmy wspomagające proces programowania owych robotów. Niewątpliwie jest, że jedną z najważniejszych cech robotów mobilnych jest jego autonomiczność. Jest to zdolność do wykonania jak największej liczby czynności bez konieczności ingerencji użytkownika [1].

Algorytm najkrótszej drogi w sieci (NDS) wykorzystywany jest do optymalizacji ścieżki, w pewnej sieci o strukturze grafu, z wierzchołka początkowego do wszystkich pozostałych wierzchołków. Oznacza to, że może on znaleźć zastosowanie we wszystkich dziedzinach, gdzie zaistniały problem można przedstawić za pomocą grafu. Przykładowe zastosowania algorytmu mogą być związane np. z optymalizacją czasu działania, kosztu działania, czasu podróży lub też odległości podróży.

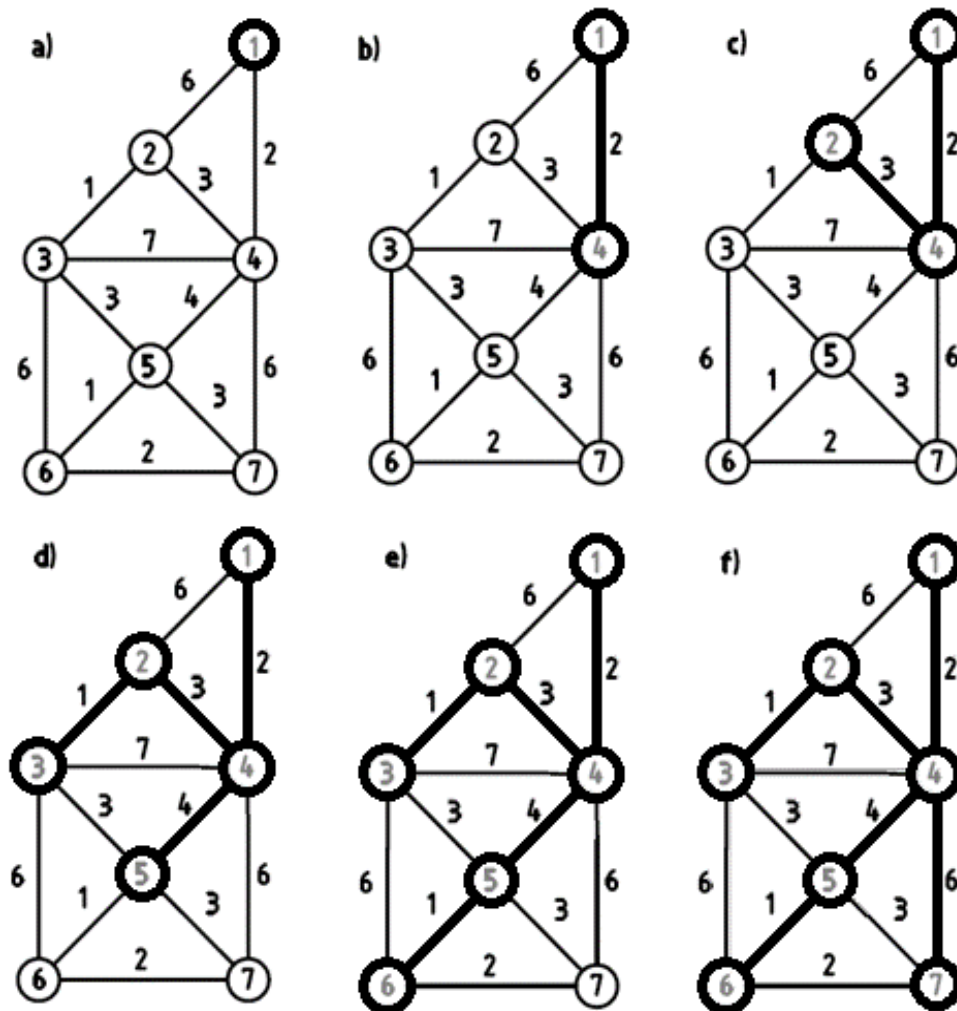
Zaletą algorytmu jest mała liczba danych wejściowych potrzebnych do rozwiązania zadania w porównaniu z wieloma innymi algorytmami oraz możliwość wyznaczenia najkrótszej ścieżki z wierzchołka początkowego do wszystkich pozostałych wierzchołków, przy jednokrotnym uruchomieniu algorytmu.

Wadą algorytmu jest konieczność porównania każdego łuku, co wpływa na zwiększenie potrzebnej mocy obliczeniowej. Wada ta jest zauważalna dopiero przy bardzo dużej ilości połączeń między wierzchołkami.

## 2. Algorytm najkrótszej drogi w sieci (NDS)

Danymi wejściowymi do algorytmu są struktura grafu, wartości wag łuków oraz numer wierzchołka startowego. Wynikiem pracy algorytmu jest najkrótsza ścieżka od wierzchołka początkowego do pozostałych wierzchołków, a także sumy wag łuków tych ścieżek. Zasada działania algorytmu opiera się na dodawaniu do zbioru wierzchołków połączonych, wierzchołka o najmniejszej odległości od wierzchołka startowego.

Na rys. 1 przedstawiono kolejne etapy realizacji algorytmu NDS. Przyjęto, że wierzchołkiem początkowym jest wierzchołek 1. W kolejnych krokach metody, w oparciu o wagi łuków przyznawane są kolejnym wierzchołkom tzw. etykiety tymczasowe, określające odległość danego wierzchołka od wierzchołka początkowego oraz numer wierzchołka, z którego nastąpiło połączenie. Następnie etykiety tymczasowe są porównywane i wierzchołek o najmniejszej odległości od wierzchołka początkowego dołączany jest do zbioru wierzchołków połączonych. Połączonym wierzchołkom w danym kroku przyznaje się etykiety stałe, które są identyczne z ich etykietami tymczasowymi, na podstawie których zostały dołączone [2].



Rys. 1. Kolejne etapy działania algorytmu najkrótszej drogi w sieci  
 Fig. 1. Successive iterations of the shortest path method algorithm

Po połączeniu wszystkich wierzchołków, czyli po przyznaniu każdemu wierzchołkowi etykiety stałej (Tabela 1), określa się najkrótsze drogi od poszczególnych wierzchołów w sieci do wierzchołka początkowego. Przykładowo, dla sieci z rys. 1 najkrótsza droga z wierzchołka startowego do wierzchołka 6 to: 1-4-5-6, a długość tej drogi to 7.

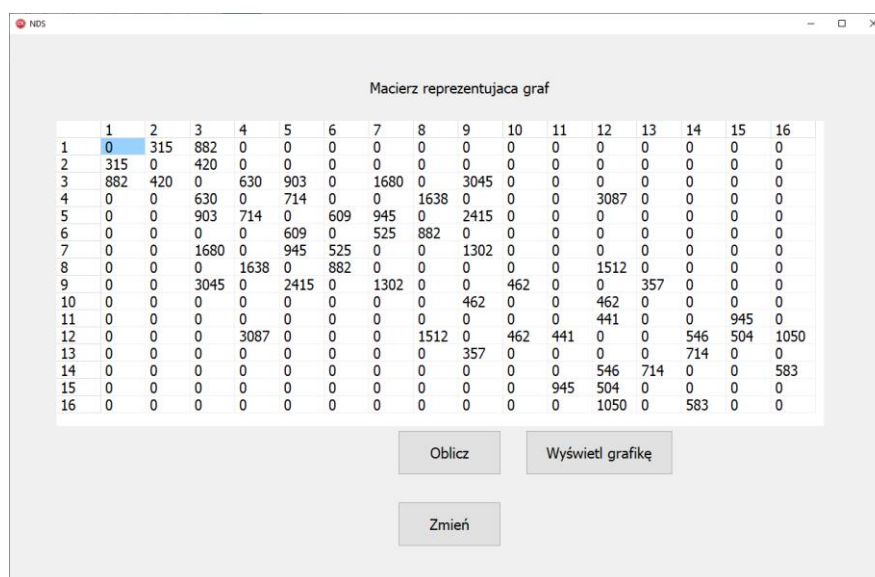
Tabela 1. Etykiety stałe dla przykładowej sieci (Rys. 1)  
Table 1. The permanent labels for exemplary network (Fig. 1)

Nr. wierzchołka	Etykieta stała	
	odległość od wierzchołka startowego	wierzchołek, z którego nastąpiło połączenie
1	0	start
2	5	4
3	6	2
4	2	1
5	6	4
6	7	5
7	8	4

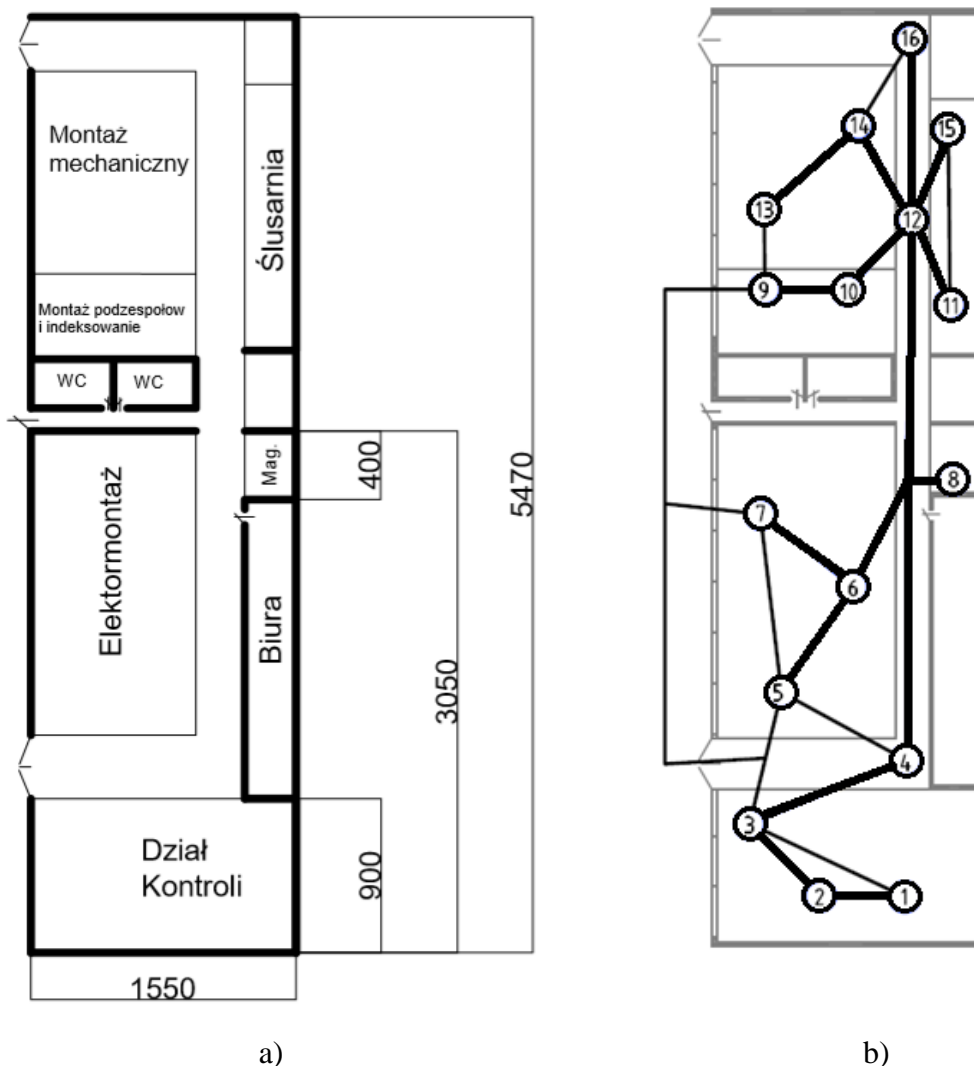
### 3. Aplikacja komputerowa

Stworzono aplikację komputerową z implementacją algorytmu najkrótszej drogi w sieci. Została ona napisana w języku C++ i wyposażona w interfejs graficzny umożliwiający intuicyjne wprowadzanie danych oraz prezentację sieci i wyników obliczeń.

Aplikacja została wykorzystana do rozwiązania przykładowego zadania optymalizacji toru ruchu robota mobilnego, jakim jest dron. Zadaniem robota jest transport drobnych elementów niezbędnych do produkcji szaf sterowniczych np. przewody, tulejki zaciskowe, nakrętki i śruby z magazynu do odpowiednich stanowisk pracy. Na Rys. 2. przedstawiono sposób prezentacji analizowanego grafu w programie, natomiast na Rys. 3 pokazano plan rozpatrywanej hali produkcyjnej wraz z wynikami obliczeń, przy czym wierzchołek 8 (magazyn) był wierzchołkiem startowym.



Rys. 2. Reprezentacja struktury sieci w aplikacji  
Fig. 2. Network structure's representation in computer application



Rys. 3. Plan hali produkcyjnej (a) oraz schemat sieci wraz wynikami obliczeń (b)  
 Fig. 3. Plan of the production hall (a) and network with the results of calculations (b)

#### 4. Podsumowanie

Stworzony program umożliwia usprawnienie procesu programowania robotów mobilnych pracujących w środowisku ustrukturyzowanym. Program umożliwia również rozwiązanie dowolnego innego problemu optymalizacji jednokryterialnej, jeżeli zadanie to można przedstawić za pomocą grafu nieskierowanego.

#### Literatura

1. M. Stania i in., Modelowanie kinematyki mobilnego robota transportowego, Zeszyty naukowe instytutu pojazdów, 2011, z. 4(85), ss. 73-84
2. M. Garbacz, Planowanie ścieżki dla robota mobilnego na podstawie informacji z czujników odległościowych, Automatyka / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2006, T. 10. z. 3, ss.135-141

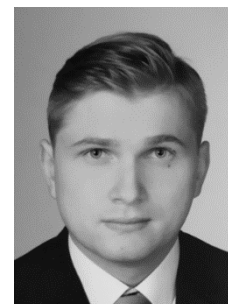
## DYNAMIC ANALYSIS OF THE EXPLORATION ROBOT CHASSIS IN COPPELIASIM SOFTWARE

**MARCIN JURECZKO, BSc. Eng.**

Automatics and Robotics, semester I, master's programme

Supervisors: Prof. Piotr Przystałka, PhD, DSc, Eng.

Wawrzyniec Panfil, PhD, Eng.



**Abstract.** The aim of this paper is to present a research on a dynamic analysis of the robot chassis. The analysis provided information about the torque needed to drive the rover on different kinds of terrain, and the torque needed for steering the robot. There were also conducted tests of the chassis behavior under certain conditions.

### ANALIZA DYNAMICZNA PODWOZIA ROBOTA EKSPLOKACYJNEGO W OPROGRAMOWANIU COPPELIASIM

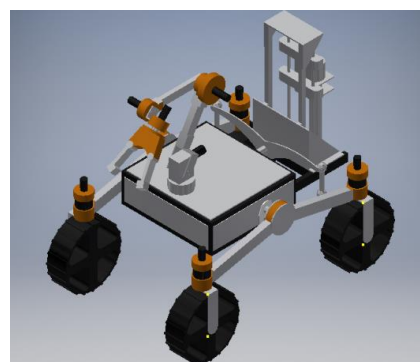
**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy dynamicznej podwozia robota eksploracyjnego. Analiza dostarczyła informacji dotyczących momentów napędowych potrzebnych do napędzenia kół jak i osi skrętnych. Przeprowadzone zostały testy zachowania się podwozia w różnych warunkach terenowych.

#### 1. Introduction

Silesian Phoenix is a team created within Application of Methods of Artificial Intelligence Student Scientific Group. The team has designed and built a mars rover that is able to participate in various competitions e.g. ERC (European Rover Challenge [1]). Following the ERC 2019 competition the team decided to further develop the robot. Part of the development process included conducting a dynamic analysis of the robot chassis. For that reason a simplified CAD model was designed. The model includes previously agreed upon mechanical changes. The analysis provided information about the torque needed to drive the rover on different kinds of terrain, and the torque needed for steering the robot. There were also conducted tests of the chassis behavior under certain conditions.

Rover Phoenix II CAD model (Fig. 1) consists of three main components:

- Chassis - based on Rocker-bogie design with the bogie component left out. It has four wheel drive and four wheel steering. A differential-drive mechanism was used to keep the chassis stable.
- Manipulator - 5 DoF (Degrees of freedom) robotic arm with a specifically designed gripper for performing competition tasks.
- Soil sampling system - The system's purpose is to extract and analyze a sample of the soil and seal it off.



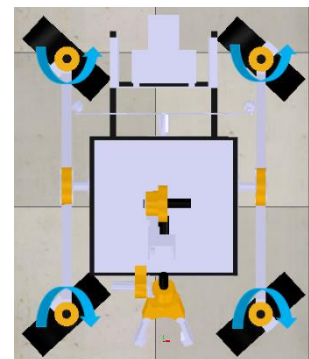
Rys. 1. Model CAD robota  
Fig. 1. CAD model of the robot

## 2. Analysis

Assumptions stated before analyses were as follows:

- General assumptions:
  - Changing the six wheel design to a four wheel design;
  - Robot will be remotely controlled via gamepad;
  - The robot should be wider and its construction should be more modular;
  - Decreasing the rover mass;
  - Increasing the wheels diameter and width;
  - Increasing robots clearance.
  
- Geometrical assumptions:
  - Max. width - 75 [cm];
  - Max. length - 115 [cm];
  - Min. clearance - 30 [cm];
  - Wheelbase - 85 [cm];
  - Wheel diameter - 30 [cm];
  - Wheel width - 10 [cm].
  
- Simulation assumptions:
  - The software used for simulation is CoppeliaSim;
  - ODE (Open Dynamics Engine[2]) physics engine applied;
  - Real time simulation with 50 [ms] time step;
  - Robot max velocity - 2 [m/s];
  - Constant friction coefficient for all simulations;
  - Restricting max. driving torque to 15 [Nm].

CoppeliaSim software accepts .stl and .obj files only. Therefore the CAD model needs to be converted to either of those formats before importing. It is important to align the coordinate systems of CAD software and CoppeliaSim. The robot model is imported as one solid block. CoppeliaSim provides the tools to divide the block into appropriate parts as the model was previously in the CAD software. Another option could be to import all the parts separately. When the model is correctly divided it is essential to check if the model is not to “heavy” i.e. the models mesh does not contain to many triangles that would slow down the simulation. If the model is to heavy there are tools to reduce the number of triangles but it deforms the original part. Appropriate moments of inertia of each part have to be manually entered. After that the joints have to be applied. The joints connect the parts together and describe their relations with each other. In the simulation the robot is controlled via a gamepad. To move the robot forwards or backwards the angular velocity of the appropriate joints is changed. To make the robot turn (Fig. 2) the position of each steering joint is changed. For steering the built-in PID module was used. Movement of the robotic arm is controlled by a built-in Inverse Kinematic module. All used algorithms were written in Lua[3] language.



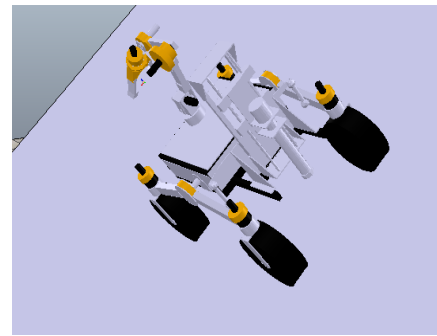
Rys. 2. Skręt w lewo  
Fig. 2. Left turn

### 3. Testing

Conducted tests were as follows:

- Stability test;
- Driving moments test;
- Terrain traverse test.

In the stability test the maximal ramp inclination was determined at which the robot can keep a stable position as shown (Fig. 3). Maximal inclination with the robotic arm in safe position is  $41^\circ$  and with the arm extended is  $37^\circ$ . The inclination at which the robot can freely move in any direction at maximal speed is  $7^\circ$ .



Rys. 3. Test stabilności  
Fig. 3. Stability test

Some results of the conducted driving moments test are shown in tables below. In Tab.1 average torques driving the wheels while driving on flat terrain are shown.

Tabela 1. Wartości średnie momentów napędowych kół w [Nm] – podłoże płaskie  
Table 1. Average torque driving the wheels in [Nm] – flat terrain

Time [s]	Wheel 1	Wheel 2	Wheel 3	Wheel 4	Action
2,05-3,5	4,26	4,11	5,02	3,59	Acceleration
3,55-8	0,31	0,36	0,37	0,38	Drive forward
8,05-11,3	13,16	5,08	8,21	9,72	Turn right
11,35-13,9	0,76	0,74	0,72	0,62	Drive forward
13,95-17,3	8,10	10,24	13,19	4,86	Turn left
17,35-21,55	0,33	0,35	0,39	0,26	Drive forward
21,55-22,9	4,67	4,64	3,65	4,57	Deceleration

In Tab.2 average torques driving the steering axes while driving on flat terrain are shown.

Tabela 2. Wartości średnie momentów napędowych osi skrętnych w [Nm] – podłoże płaskie  
Table 2. Average torque driving the steering axes in [Nm] – flat terrain

Time [s]	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 4	Action
2,05-3,5	0,32	0,88	0,41	0,70	Acceleration
3,55-8	0,19	0,20	0,30	0,16	Drive forward
8,05-11,3	1,40	0,90	2,21	3,12	Turn right
11,35-13,9	0,14	0,20	0,29	0,18	Drive forward
13,95-17,3	2,49	3,49	2,05	0,96	Turn left
17,35-21,55	0,08	0,12	0,22	0,18	Drive forward
21,55-22,9	0,70	0,37	0,55	0,36	Deceleration



In Tab.3 average torques driving the wheels while driving in a straight line on tilted terrain are shown.

Tabela 3. Wartości średnie momentów napędowych kół w [Nm] – podłoże nachylone  
Table 3. Average torques driving the wheels in [Nm] – tilted terrain

Time [s]	Wheel 1	Wheel 2	Wheel 3	Wheel 4	Action
0,3-0,5	19,59	17,48	19,43	16,47	Acceleration
0,55-3,1	6,25	4,38	3,66	2,81	10° Tilt
3,15-5,1	11,74	7,27	8,54	5,91	20° Tilt
5,15-7,6	12,97	8,77	13,72	7,91	30° Tilt
7,65-7,8	18,85	19,55	17,81	17,35	Deceleration
7,85-10	12,29	11,32	13,75	10,21	Braking

Terrain traverse test concluded that the newly introduced modifications will definitely improve the capability to overcome difficult terrain given our experience with the actual robot. The new chassis should be able to overcome obstacles up to 25 [cm] of height.

#### 4. Summary

The CoppeliaSim software proved to be a very capable tool in the process of designing a mobile robot. It provides a lot of data and helps to catch design faults early. It allows to analyze the behavior of the chassis under dynamic circumstances giving an early idea if the changes to the robot can be considered as improvements. Besides that, the model and scenes from simulations could be used as a platform for developing or improving existing software because CoppeliaSim supports ROS (Robot Operating System[4]).

#### References

1. ERC Team: About ERC. Available online: <http://roverchallenge.eu/about-erc/> (accessed on 23 February 2020)
2. Russ Smith: Open Dynamics Engine. Available online: <http://www.ode.org/> (accessed on 23 February 2020)
3. PUC-Rio: Lua. Available online: <https://www.lua.org/home.html> (accessed on 23 February 2020)
4. Willow Garage and Stanford Artificial Intelligence Laboratory: ROS. Available online: <https://www.ros.org/> (accessed on 23 February 2020)

## WPLYW ZASTOSOWANIA SUPERELEMENTU UPRASZCZAJĄCEGO MODEL NUMERYCZNY NA CZAS OPTYMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ

**mgr inż. MARCIN KALINOWSKI**

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień, Alstom Konstal S.A., Chorzów

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, prof. PŚ

**Streszczenie.** Optymalizacja topologiczna coraz częściej znajduje zastosowanie w fazie projektowania podzespołów pojazdów szynowych. W celu zwiększenia efektywności optymalizacji poprzez skrócenie czasu procesu, zdecydowano się na zastosowanie tzw. superelementu. W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji topologicznej wspornika siedzenia przeprowadzonej bez oraz z wykorzystaniem superelementu. Porównano otrzymane wyniki a także czas obliczeniowy.



### SPECIAL FEM SUPERELEMENT IMPACT ON THE TIME CONSUMPTION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION

**Abstract.** Topological optimization is increasingly used in the design phase of rail vehicle components. In order to increase the efficiency of optimization by reducing the process time, it was decided to use the so-called superelement. The article presents the results of topological optimization of the seat cantilever carried out without and with the use of a superelement. The results obtained and the calculation time were compared.

#### 1. Wprowadzenie

Optymalizację można zdefiniować jako automatyczny proces, dzięki któremu system lub komponent w najwyższym stopniu spełnia postawione kryterium/kryteria przy zachowaniu określonych założeń projektowych. Zadanie optymalizacji przedstawione w niniejszym artykule a także analizy numeryczne zostały wykonane w oprogramowaniu Altair HyperWorks (HW) z wykorzystaniem modułu obliczeniowego OptiStruct. Istnieje wiele różnych algorytmów optymalizacji. Oprogramowanie OptiStruct HW bazuje na algorytmie gradientowym wykorzystanym w metodzie optymalizacji topologicznej. Jest to technika matematyczna, która pozwala uzyskać zoptymalizowany kształt i rozkład materiału dla optymalizowanego komponentu w danym obszarze. OptiStruct rozwiązuje problemy optymalizacji topologicznej przy użyciu metody litego materiału izotropowego z penalizacją (SIMP), z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) [1,2]. Metoda SIMP przewiduje optymalny rozkład materiału w danej przestrzeni projektu dla określonych przypadków obciążenia, warunków brzegowych, ograniczeń produkcyjnych i wymagań wydajnościowych. Gęstość materiału w obszarze pojedynczego elementu skończonego zdyskretyzowanej struktury przyjmuje wartość w zakresie od 0 do 1, definiując odpowiednio element jako zbędny lub niezbędny, adekwatnie poniżej lub powyżej zadeklarowanej wartości granicznej. Za wartość graniczną przyjmuje się zazwyczaj gęstość elementu równą 0.7. Elementy skończone o wartości niższej uznawane są za zbędne. [4,5]

Zadanie optymalizacji topologicznej wymaga przeprowadzenia szeregu iteracji w celu

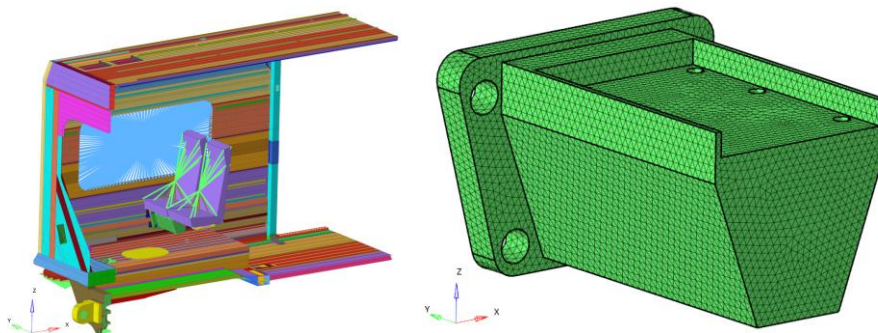
znalezienia rozwiązania, co wiąże się z dużą konsumpcją czasu. Na czas każdej iteracji, a więc i całkowity czas procesu optymalizacji wpływa przede wszystkim złożoność problemu brzegowo-początkowego, na którą wpływa z kolei ilość elementów skończonych w modelu. W konstrukcji pojazdów szynowych do wyznaczenia optymalnej postaci poszczególnych komponentów/podzespołów wymagane jest przeprowadzanie procesu optymalizacji, który obejmuje optymalizowany komponent a także całość lub część struktury wagonu (otoczenie). Uwzględnienie otoczenia komponentu z jednej strony jest niezbędne dla dokładnego odwzorowania sztywności konstrukcji oraz sposobu połączenia optymalizowanego podzespołu z resztą złożonej konstrukcji, z drugiej zaś strony wpływa na znaczne wydłużenie czasu obliczeń. W celu minimalizacji ilości elementów skończonych w modelu zdecydowano się na zastąpienie otoczenia przez superelement [3]. Superelement to specjalny element skończony o określonych własnościach. W przypadku niniejszej pracy definiowany jest poprzez grupowanie i przetwarzanie zestawu wybranych elementów skończonych modelu (otoczenia). Zastosowanie superelementu nie tylko wpływa na czas potrzebny do rozwiązania zadania optymalizacji, ale również niejednokrotnie, w przypadku bardzo obszernych problemów optymalizacji, umożliwia rozwiązanie zadania niwelując ograniczenia sprzętowe.

## 2. Założenia konstrukcyjne

Komponentem poddanym zadaniu optymalizacji jest wspornik siedzenia. W celu odwzorowania sztywności układu oraz sposobu mocowania wspornika, model numeryczny został rozszerzony o część struktury nośnej wagonu (Rys. 1). Założono, że materiałem, z którego wykonany będzie wspornik jest stop aluminium o właściwościach zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Własności materiałowe stopu aluminium AW6082-T6  
Table 1. Material properties of aluminum alloy AW6082-T6

Moduł Younga [MPa]	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Moduł Poissona
$7 \cdot 10^4$	2,7	0,3



Rys. 1. Zdyskretyzowany model geometryczny: a) model uwzględniający część struktury wagonu, b) model z wprowadzonym superelementem zastępującym strukturę wagonu.

Fig. 1. A discrete geometric model: a) a model taking into account a part of the car structure, b) a model with an introduced superelement replacing the car structure.

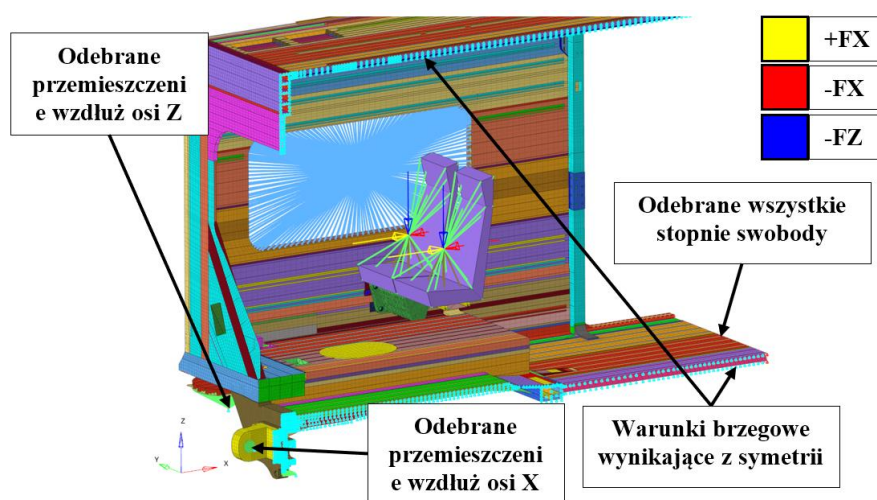
## 3. Model numeryczny, warunki brzegowe podparcia i obciążenia

Model dyskretny dla zadania optymalizacji wspornika został utworzony z elementów powłokowych i bryłowych, zawiera 290000 elementów, odpowiednio 150000 elementów typu

quad4 i 140000 elementów typu tetra10 oraz 335000 węzłów, natomiast model samego wspornika składa się z 140000 elementów typu tetra10 oraz 198000 węzłów.

Model został podparty poprzez odebranie wszystkich stopni swobody w płaszczyźnie przecięcia (YZ) oraz przez odebranie stopni swobody w płaszczyźnie XZ, zgodnie z warunkami symetrii. Dodatkowo odebrano możliwość przemieszczeń wzdłuż osi Z w miejscu sprężyny powietrznej (drugorzędowe zawieszenie pomiędzy wózkiem a strukturą pociągu) a także wzdłuż osi X w miejscu sprzęgu.

Model wspornika został obciążony siłami wynikającymi z masy dwóch siedzeń (2 x 21 kg), oraz przyjętej masy dwóch pasażerów (2 x 70 kg). Przyjęto współczynnik bezpieczeństwa równy 3, zgodnie z normą PN 12663. Siła wypadkowa działająca na wspornik siedzenia wynosi 5371 N i została równomiernie rozłożona na obydwa siedzenia i przyłożona w środku ciężkości każdego zestawu (siedzenie + pasażer). Rozpatrzono 3 przypadki obliczeniowe: siła działająca w kierunku +X, siła działająca w kierunku -X oraz siła działająca w kierunku -Z. Warunki brzegowe oraz przyłożone obciążenia zostały przedstawione na Rys. 2.



Rys. 2. Warunki brzegowe podparcia i obciążenia  
Fig. 2. Boundary conditions of support and load

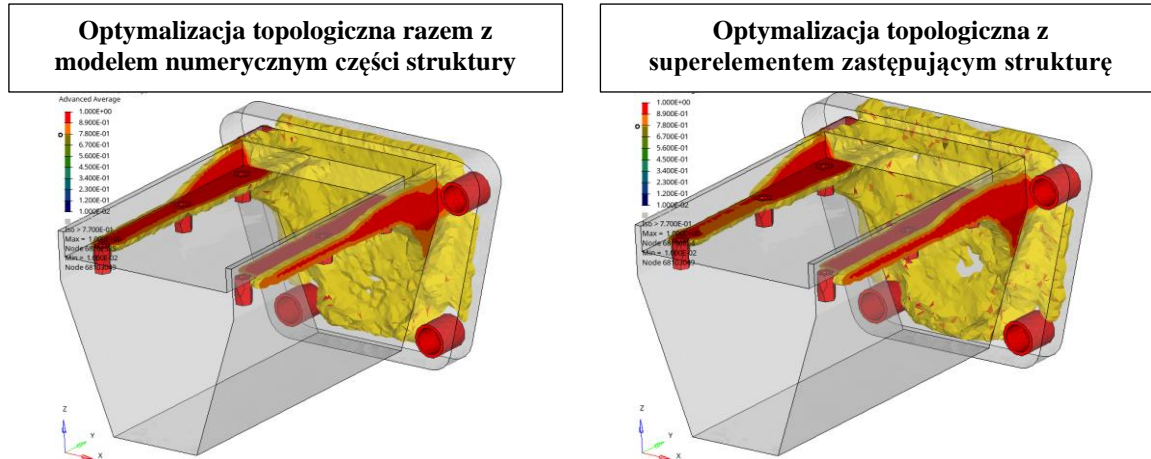
#### 4. Optymalizacja topologiczna

Komponentem poddanym zadaniu optymalizacji jest wspornik siedzenia. Zadanie polega na minimalizacji masy, przy założonym ograniczeniu nałożonym na maksymalne naprężenia zredukowane (Huber-von Mises) występujące we wsporniku. Założono, że maksymalne naprężenia nie mogą przekraczać 70 MPa. Przeprowadzono optymalizację topologiczną wspornika dla modelu numerycznego uwzględniającego część struktury wagonu oraz dla przypadku z wprowadzonym superelementem zastępującym strukturę wagonu.

Superelement w oprogramowaniu HW jest generowany przy użyciu metody statycznej kondensacji [3, 4]. Metoda ta polega na utworzeniu wiązań w węzłach występujących w płaszczyźnie styku otoczenia z optymalizowanym podzespołem. Pierwszym krokiem w procesie przygotowania modelu numerycznego z wykorzystaniem superelementu jest analiza całego złożenia bez optymalizowanego komponentu i wyznaczenie pola przemieszczeń w płaszczyźnie styku. Na powierzchni styku części podlegającej optymalizacji z otoczeniem zostały utworzone wiązania typu ASET, które są używane do transformacji otrzymanego pola przemieszczeń i określenia superelementu. Kolejnym krokiem była analiza w wyniku której Optistruct wygenerował plik wynikowy zawierający zredukowaną macierz sztywności superelementu zastępującego otoczenie.

## 5. Wyniki

Na Rys. 3 przedstawiono porównanie optymalnej postaci uzyskanej w wyniku optymalizacji topologicznej wspornika dla modelu numerycznego uwzględniającego część struktury wagonu oraz dla przypadku z wprowadzonym superelementem zastępującym strukturę wagonu. W przypadku obydwu metod otrzymane wyniki są prawie identyczne. Należy zwrócić jednak uwagę na znaczną oszczędność czasu w przypadku zastosowania superelementu (Tabela 2).



Rys. 3. Wyniki optymalizacji topologicznej  
Fig. 3. Topological optimization results

Tabela 2. Porównanie czasu obliczeniowego  
Table 2. Comparison of calculation time

	Optymalizacja modelu numerycznego uwzględniającego część struktury wagonu	Optymalizacji modelu z wprowadzonym superelementem
Czas [h:m:s]	04:57:44	01:31:20
Redukcja masy dla gęstości elementów mniejszej od 0.7	83.0%	83.5%

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz można zauważyć, iż zastosowanie superelementu zamiast modelu numerycznego części struktury wagonu nie wpływa na otrzymane wyniki (w tym przypadku na redukcję masy) oraz postać optymalną a znacząco redukuje czas obliczeniowy.

## Literatura

1. Zienkiewicz O.C., The Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals, ELSEVIER, (2013).
2. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa (2007).
3. Materiały szkoleniowe firmy Alstom i Altair
4. Pomoc programu Altair HyperWorks
5. Bendsøe M.P., Kikuchi N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 71, 197-224, (1988)

## MODELOWANIE PRZEPLYWU W KANALE PROSTOKĄTNYM Z PRZESZKODĄ

**inż. MARCIN KARPETA**

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak,

mgr inż. Mikołaj Stryczyński



**Streszczenie.** W artykule przedstawiony został algorytm numeryczny pozwalający modelować przepływ płynu w kanale prostokątnym z przeszkodą. Opracowany algorytm pozwala na wyznaczenie rozkładu prędkości oraz temperatury przepływającego płynu. W modelu uwzględniono również chłodzenie przeszkody. Przeprowadzono dwie analizy dotyczące chłodzenia przeszkody.

### MODELING OF FLOW IN A RECTANGULAR CHANNEL WITH AN OBSTACLE

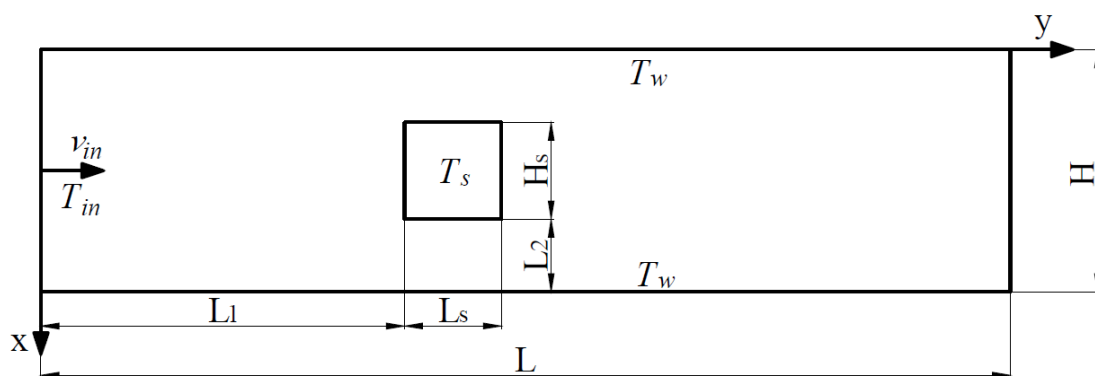
**Abstract.** The paper presents the numerical algorithm allowing to model fluid flow in a rectangular channel with an obstacle. An algorithm is used to determine velocity and temperature distribution of fluid. In the model a cooling of an obstacle is also included. Two analysis concerning the obstacle cooling problem are performed.

#### 1. Wprowadzenie

Stały rozwój urządzeń i zwiększone wymagania użytkowników co do ich wydajności wymuszają stosowanie bardziej zaawansowanych układów chłodzenia. Projektowanie takich zespołów chłodzących może sprawiać trudności. Pomocne podczas procesu projektowo - konstrukcyjnego mogłoby być oprogramowanie obliczeniowe. Jednakże dostępna jest niewielka liczba odpowiednich pakietów obliczeniowych, które mogą być również niedostępne dla projektanta. Ponadto należy zwrócić uwagę, że dostępne pakiety obliczeniowe mogą nie być w stanie odpowiednio modelować szczególnych przypadków zagadnień. Z tego powodu istnieje potrzeba tworzenia aplikacji rozwiązujących konkretne zagadnienia. Wstępem do rozwiązywania problemów przy pomocy autorskich aplikacji może być opisane w artykule modelowanie przepływu w kanale prostokątnym z przeszkodą.

#### 2. Sformułowanie zadania

Rozpatruje się dwuwymiarowy, nieustalony przepływ cieczy w kanale prostokątnym z przeszkodą (rys. 1). Na wlocie kanału prędkość cieczy jest równa  $v_{in}$  natomiast jej temperatura wynosi  $T_{in}$ . Temperatura górnej i dolnej ścianki kanału ma wartość  $T_w$ , a temperatura początkowa przeszkody jest równa  $T_s$ . Celem obliczeń jest określenie czy dla danych warunków brzegowych przeszkoda zostanie ochłodzona. Wyznaczono również czas potrzebny do ochłodzenia przeszkody i uzyskania stanu ustalonego.



Rys. 1. Kanał prostokątny z przeszkodą  
Fig. 1. Rectangular channel with an obstacle

### 3. Model matematyczny

Model matematyczny procesów ciepłno - przepływowych zachodzących w kanale prostokątnym z przeszkodą składa się z następujących równań [1-3]:

- równanie pędu w kierunku osi  $x$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

- równanie pędu w kierunku osi  $y$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

- równanie ciągłości

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

- równanie Fouriera-Kirchhoffa dla podobszaru cieczy

$$c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

- równanie Fouriera dla podobszaru przeszkody

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

gdzie  $u, v$  są składowymi prędkościami odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ ;  $p$  oznacza ciśnienie;  $\lambda, c, \rho$  są to współczynniki przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstość cieczy;  $\nu$  jest kinematycznym współczynnikiem lepkości cieczy;  $\lambda_s, c_s, \rho_s$  to parametry termofizyczne materiału, z którego wykonana jest przeszkoda,  $T$  i  $T_s$  oznaczają odpowiednio temperaturę cieczy i przeszkody, natomiast  $t$  to czas.

Na styku cieczy i przeszkody przyjęto warunek idealnego kontaktu

$$\begin{cases} T = T_s \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \end{cases} \quad (6)$$

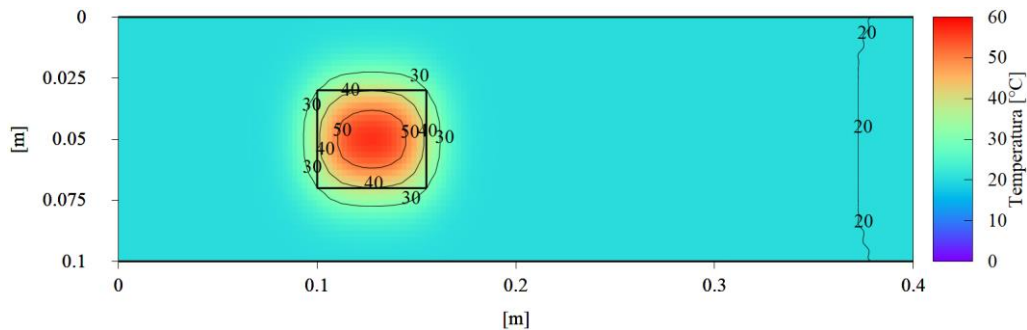
gdzie  $\partial(\cdot)/\partial n$  oznacza pochodną w kierunku normalnym. Prędkość cieczy na wlocie kanału wynosi  $v = v_{in}$ , a temperatura jest równa  $T = T_{in}$ , ponadto  $\partial u/\partial n = 0$ . Na powierzchniach  $x = 0$ ,  $x = H$  przyjęto warunki brzegowe:  $u = 0$  oraz  $\partial v/\partial n = 0$ . Na wylocie kanału założono  $\partial u/\partial n = 0$ ,  $v = v_{in}$ ,  $\partial T/\partial n = 0$ . Temperatura powierzchni  $x = 0$ ,  $x = H$  jest równa  $T_w$ . Znane są również warunki początkowe:  $u = v = 0$  oraz  $T = T_{in}$ . Prędkości w kierunku prostopadłym do przeszkody są równe zero. Również pochodne prędkości względem współrzędnej geometrycznej w kierunku stycznym są równe zero (tzw. *free slip boundary conditions*).

Zadanie rozwiązano stosując metodę różnic skończonych z zastosowaniem przesuniętych siatek uzupełnioną procedurą korekty ciśnienia [1-3]. Autorską aplikację realizującą obliczenia przygotowano w języku programowania C++ [3].

#### 4. Przykłady obliczeń

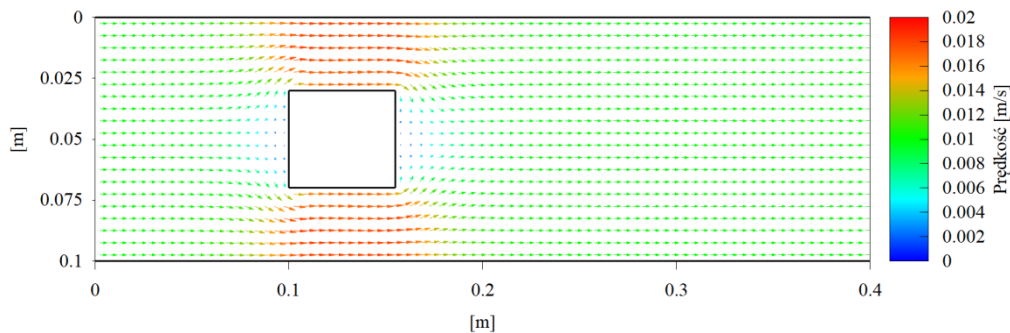
Analizę przeprowadzono dla kanału o długości  $L = 0.4$  m, oraz szerokości  $H = 0,1$  m. Przeszkoda posiadała wymiary  $L_s = 0,06$  m,  $H_s = 0,04$  m i położona była w odległości  $L_1 = 0.1$  m od wlotu kanału. Założono również, że przeszkoda znajduje się w równej odległości od obu ścianek kanału. Badanym płynem była woda o temperaturze początkowej  $T = 20$  °C ( $\rho = 998,3$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda = 0,6$  W/(mK),  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,  $c = 4190$  J/(kgK)). Natomiast przeszkoda wykonana była z aluminium ( $\rho = 2700$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda = 37$  W/(mK),  $c = 900$  J/(kgK)) i posiadała temperaturę początkową  $T_s = 60$  °C. Prędkość płynu na wlocie oraz wylocie kanału była stała i wynosiła  $v_{in} = 0,01$  m/s.

Dla powyższych warunków przeprowadzono dwie analizy. W pierwszej z nich temperatura ścianek kanału  $T_w$  była równa temperaturze płynu na wlocie kanału  $T_{in}$ . W drugiej analizie temperatura ścianek  $T_w$  była taka sama jak temperatura początkowa przeszkody  $T_s$ . Na rysunkach 2 - 5 przedstawiono otrzymane wyniki.



Rys. 2. Rozkład temperatury w kanale po 0,05 s - analiza nr 1

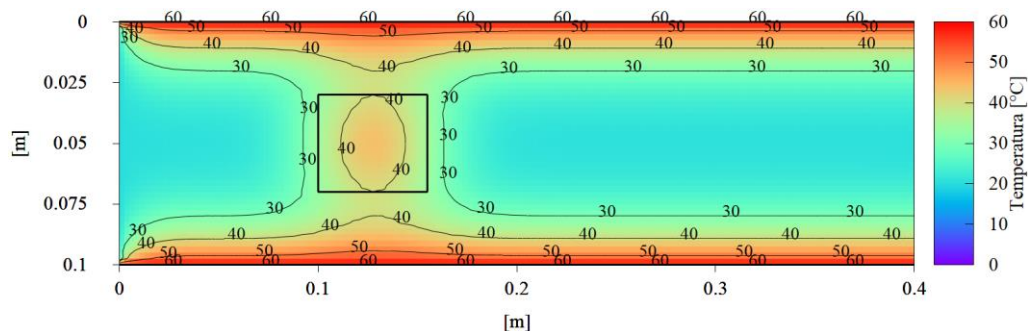
Fig. 2. Temperature distribution after 0.05 s - analysis nr 1



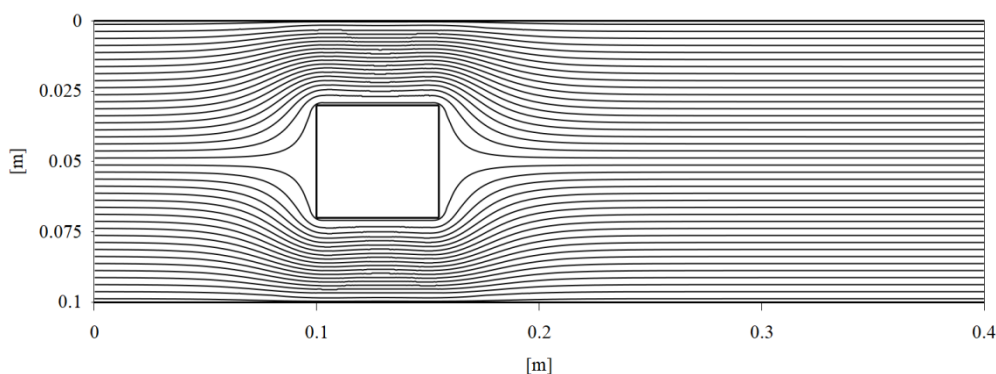
Rys. 3. Rozkład prędkości w kanale po 0,05 s - analiza nr 1

Fig. 3. Velocity distribution after 0.05 s - analysis nr 1





Rys. 4. Rozkład temperatury w kanale po 0,15 s - analiza nr 2  
 Fig. 4. Temperature distribution after 0.15 s - analysis nr 2



Rys. 5. Linie prądu po 0,15 s - analiza nr 2  
 Fig. 5. Streamlines after 0,15 s - analysis nr 2

## 5. Wnioski

W pracy zaprezentowano przykłady analizy chłodzenia cieczą przeszkody w kanale prostokątnym. Przedstawione zostały efekty przejściowe ukazujące chłodzenie przeszkody. W pierwszej analizie przeszkoda została ochłodzona do temperatury przepływającego płynu. Stan ustalony osiągnięto po około 1 s. Z kolei druga analiza pokazała, że przy założonych warunkach brzegowych wystąpi chwilowe ochłodzenie przeszkody (rys. 4). Następnie temperatura w kanale zacznie rosnąć, aż do osiągnięcia temperatury ścianek po około 1,5 s.

Informacje uzyskane przy użyciu opracowanego algorytmu mogą być istotne w procesie projektowania układów chłodzenia. Należy jednak zaznaczyć, że ilość informacji jakie można uzyskać z przedstawionego modelu zależy od stopnia uproszczenia rzeczywistego układu. Jednakże niewątpliwą zaletą prezentowanego algorytmu obliczeń jest jego relatywna prostota. Umożliwia to stworzenie podobnej aplikacji przez czytelnika.

## Literatura

1. Scannapieco E., Harlow H. Introduction to finite-difference methods for numerical fluid dynamics, Los Alamos National Laboratory, 1995.
2. Strczyński M., Majchrzak E., Modeling of heat transfer and fluid flow in the rectangular channel with an obstacle, Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics, 2020 (in print).
3. Karpeta M., Modelowanie przepływu w kanale prostokątnym z przeszkodą, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, 2020 (w przygotowaniu).

## ANALIZA TERMICZNA HAMULCA TARCZOWEGO

**inż. MATEUSZ KITA**

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia analizę termiczną hamulca osiowego tarczowego z uwzględnieniem konwekcji zależnej od prędkości poruszania się pojazdu. Bazę modelu matematycznego stanowi równanie Fouriera uzupełnione o odpowiednie warunki brzegowo-początkowe. Analizę termiczną przeprowadzono, wykorzystując oprogramowanie Ansys Workbench. Obliczenia numeryczne wykonano dla tarczy wentylowanej oraz niewentylowanej na przykładzie układu hamulcowego Audi q5.



## THERMAL ANALYSIS OF THE DISC BRAKE SYSTEM

**Abstract.** In the paper the thermal analysis of the axial disc brake is presented. The base of the mathematical model is the Fourier equation supplemented by the appropriate boundary and initial conditions. Thermal analysis has been prepared using Ansys Workbench software. Numerical calculations were made for the ventilated and non-ventilated disc on the example of Audi q5 brake system.

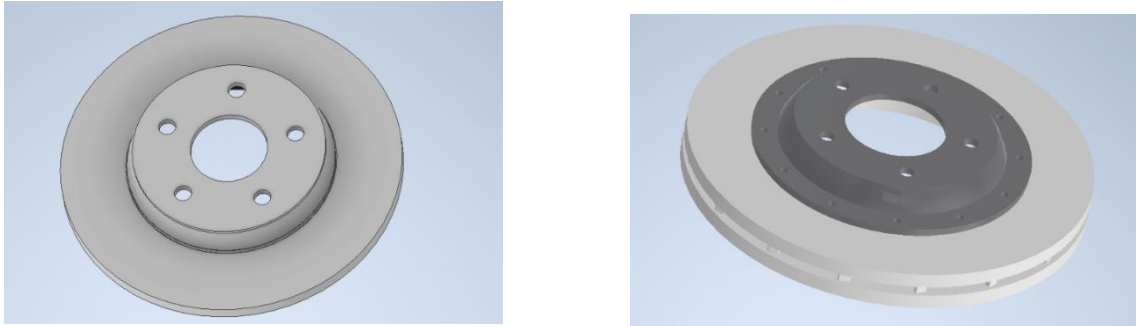
### 1. Wprowadzenie

Hamulce tarczowe są ważnym elementem budowy każdego samochodu. Mają one bardzo duże możliwości indywidualizacji, można je stosować zarówno w pojazdach lekkich np. rower jak i w ciężkich samolotach transportowych. „Wyróżnia się cztery typy hamulców tarczowych: jednotarczowe stożkowe, jednotarczowe szczękowe, wielotarczowe szczękowe oraz wielotarczowe płaskie” [1].

Ważnym kryterium jest także dobór odpowiedniego materiału. Do produkcji tarcz hamulcowych oprócz materiałów standardowych, takich jak żeliwo czy stale węglowe, stosuje się również materiały nowej generacji np. stale węglowe pokryte powłokami ceramicznymi (pociągi ekspresowe, samoloty) oraz ceramikę węglową do samochodów wyczynowych.

### 2. Analiza termiczna hamulca osiowego tarczowego

Pierwszym etapem analizy było przygotowanie geometrii modelu, który po wczytaniu do oprogramowania Ansys, został poddany analizie. Opisany samochód posiada hamulce tarczowe wentylowane, dwuczęściowe, wzmocnione z przodu oraz pełne z tyłu. Ze względu na jednostopniową pompę hamulcową, założono stały rozkład sił hamowania na poszczególne osie. Do wykonania modelu 3D oraz rysunku wykonawczego tarczy hamulcowej wykorzystano program Autodesk Inventor 2020. Gotowe modele tarcz zostały zamieszczone na rys. 1.



a)

b)

Rys. 1. Modele 3D tarcz hamulcowych: a) osi tylnej, b) osi przedniej

Fig. 1. 3D models of brake discs: a) rear axle, b) front axle

Powyższe modele zostały „wczytane” do oprogramowania Ansys, gdzie została przeprowadzona analiza termiczna. Jako materiał do tarczy tylnej zastosowano żeliwo szare sferoidalne. Następnie narysowano dwa okręgi na powierzchni bieżni tarczy hamulcowej o średnicach  $d_1 = 200 \text{ mm}$  oraz  $d_2 = 290 \text{ mm}$ . Na powstałej w ten sposób powierzchni będzie poruszał się klocek. Dla tarczy przedniej natomiast zdecydowano się na zastosowanie materiału z bazy danych *structural steel* na bieżnię tarczy oraz *aluminium alloy* na dzwon, a okręgi po których będzie poruszał się klocek przedni mają średnice:  $d_3 = 320 \text{ mm}$  i  $d_4 = 189 \text{ mm}$ . Dla wszystkich materiałów zastosowano stałą zależność gęstości od temperatury.

Następnie dla tarczy tylnej, dokonano zagęszczenia siatki w miejscu styku flanszy z bieżnią i narzucono wielkość elementu **1 mm**. Drugiego zagęszczenia dokonano na dzwonie tarczy i narzucono wielkość elementu **4 mm**. Dla tarczy przedniej wykorzystano opcję *face meshing* na powierzchni styku klocka z tarczą oraz opcję *Use Adaptive sizing* na pozostałych elementach. Efektem końcowym jest siatka składająca się ze **156240** elementów oraz **290576** węzłów.

Ostatnim etapem w analizie MES, było narzucenie odpowiednich warunków brzegowych. Zdecydowano się założyć warunek brzegowy II rodzaju w postaci strumienia ciepła na wcześniej narysowanym fragmencie bieżni tarczy po obu stronach, który ma za zadanie symulację tarcia pary klocków o tarczę. Dodatkowo tarcza hamulcowa wymienia ciepło z otoczeniem, co wymagało uwzględnienia konwekcji na całej powierzchni styku tarczy z powietrzem w postaci założenia warunku brzegowego III rodzaju. Dla tarczy tylnej zastosowano domyślną konwekcję zależną od temperatury, natomiast dla tarczy przedniej założono występowanie konwekcji zależnej od prędkości, ze względu na chłodzenie tarczy powietrzem. Przedstawia to wzór zamieszczony poniżej:

$$h_c = 10,45 - v + 10\sqrt{v}. \quad (1)$$

Aby ustalić wartość strumienia ciepła, skorzystano z metody Ferrodo, bazującej na zasadzie zachowania energii, pokazanej poniżej:

$$K.E. = \gamma k \frac{m \Delta v^2}{2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot s}, \quad t = \frac{v}{a}, \quad (3)$$

$$P_b = \frac{K.E.}{t}, \quad Q = \frac{P_b}{A}. \quad (4)$$

gdzie:

m - masa samochodu [kg],

v - prędkość samochodu  $\left[\frac{m}{s}\right]$ ,

$\gamma$  - stosunek obciążenia tyłu samochodu do obciążenia całego samochodu,

a - opóźnienie podczas hamowania  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ ,

k - ilość pochłoniętej energii,

t - czas [s],

A - powierzchnia działania klocka  $[m^2]$ ,

K.E. - energia hamowania samochodu [J]

$P_b$  - moc hamowania [W],

Q - strumień ciepła padający na tarczę hamulcową  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ ,

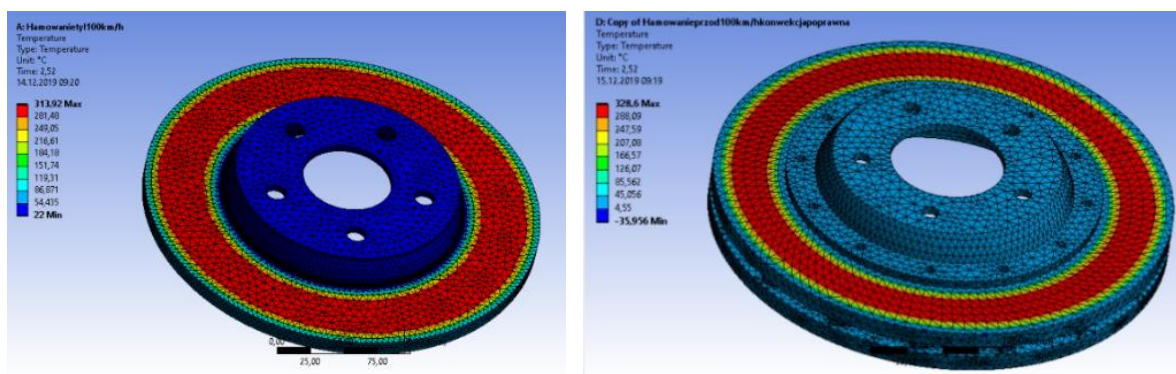
s - droga hamowania tzn. droga od momentu wciśnięcia pedału hamulca [m].

Zakładając rozkład siły hamowania rzędu 40% na oś tylną oraz 60% na oś przednią i dzieląc obie proporcje przez 2, otrzymano ilość energii kinetycznej absorbowanej przez tarczę przednią i tylną, uzyskując współczynnik  $\gamma$ . Korzystając z równań (3) i (4) oraz zakładając ilość pochłoniętej energii przez tarcze na poziomie k=90%, otrzymano strumień ciepła  $Q_1 = 1630184 \frac{W}{m^2}$  dla tarczy tylnej oraz  $Q_2 = 2445277 \frac{W}{m^2}$ .

Podczas obliczeń przyjęto drogę hamowania awaryjnego z prędkością  $v = 100 \frac{km}{h}$  na dystansie  $s = 35,1 m$ .

### 3. Wyniki obliczeń numerycznych

Rysunek 2 przedstawia otrzymane rozkłady temperatur dla tarczy tylnej oraz przedniej, natomiast na rysunku 3 zobrazowano krzywe nagrzewania podczas hamowania dla poszczególnych tarcz.

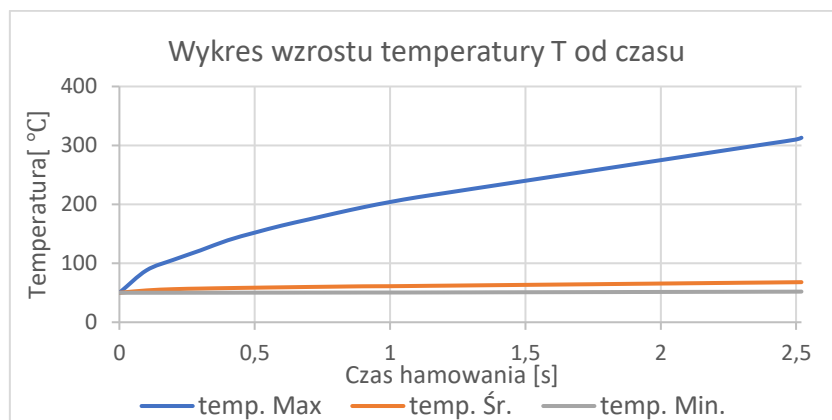


a)

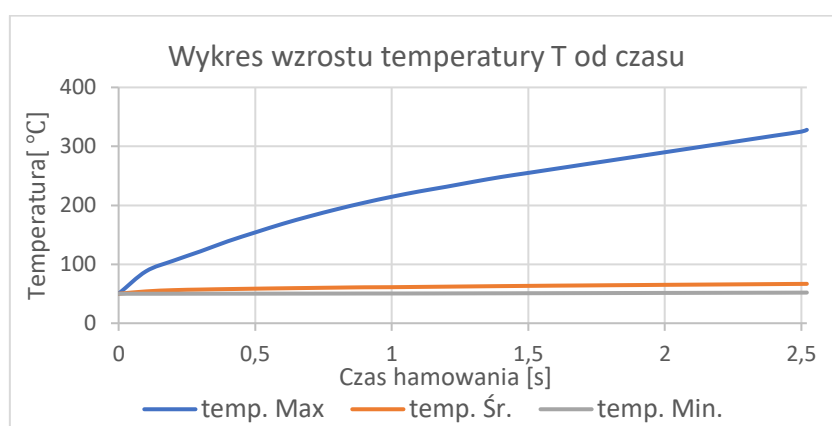
b)

Rys. 2. Rozkład temperatury: a) tarczy tylnej, b) tarczy przedniej

Fig. 2. Temperature distribution: a) rear rotor b) front rotor



a)



b)

Rys. 3. Krzywe nagrzewania: a) tarczy tylnej, b) tarczy przedniej  
 Fig. 3. Heating curves: a) rear rotor b) front rotor

#### 4. Wnioski

Temperatura tarczy wentylowanej podczas hamowania awaryjnego jest podobna do temperatury tarczy litej, co spowodowane jest zakumulowaniem większej o 50 % energii hamowania i wynosi około **300°C**. Tarcza hamulcowa wentylowana nagrzewa się natomiast znacznie równomierniej w stosunku do tarczy litej, co zmniejsza naprężenia powstałe w wyniku zmian temperatury. Zastosowanie konwekcji powietrza chłodzącego tarczę wentylowaną, poprzez kanały w pasie przednim samochodu w czasie hamowania powoduje znaczny spadek temperatury średniej z **99°C** do **69°C**, dzięki czemu zjawisko przegrzania hamulców następuje znacznie wolniej.

Kolejnym etapem prac będzie stworzenie analizy tarcz hamulcowych z uwzględnieniem ruchomego źródła ciepła, co spowoduje uzyskanie jeszcze dokładniejszych wyników oraz przeprowadzenie badań doświadczalnych, które potwierdzą przeprowadzone analizy numeryczne.

#### Literatura

1. Osiński Z., Sprzęgła i hamulce, PWN, Warszawa, 2000.
2. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., Wymiana ciepła, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2009.

## WPLYW MODELU MATERIAŁU NA ZACHOWANIE ABSORBERA ENERGII

**inż. TOMASZ KŁOSOWSKI**

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekunowie naukowci: dr inż. Krzysztof Mazurek, dr hab. inż. Jacek Ptaszny, prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy komputerowego modelowania kolumnowych absorberów energii. Porównywane są wyniki symulacji numerycznej absorberów rurowych wykonanych z materiału AL 6061-T6 z innymi wynikami numerycznymi oraz wynikami dynamicznej próby zgniatania, zaczerpniętymi z literatury. Modelowany jest również absorber, który może być wykorzystany w stojakach górniczych typu SHC. Zastosowanie modelu materiału uwzględniającego wpływ prędkości odkształcenia istotnie wpływa na pracę absorbera.

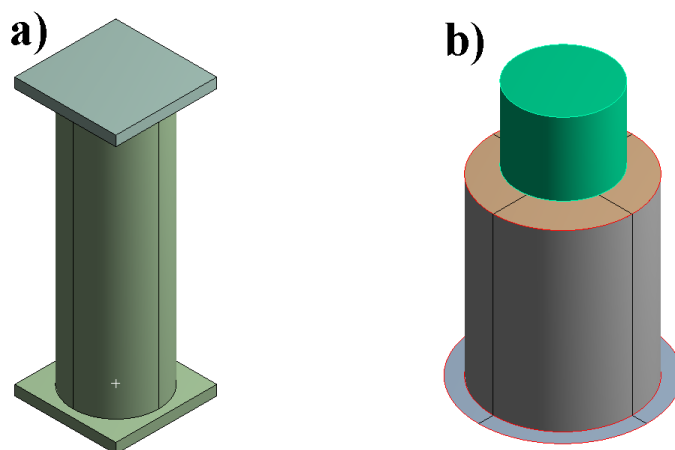


### THE INFLUENCE OF THE MATERIAL MODEL ON THE BEHAVIOUR OF THE ENERGY ABSORBER

**Abstract.** The article deals with computer modelling of column energy absorbers. The results of numerical simulation of tubular absorbers made of AL 6061-T6 material are compared with other numerical simulation and the dynamic crushing test taken from the literature. The absorber, which can be used in SHC mining racks, is also modelled. Application of a material model taking into account the deformation speed has a significant impact on the absorber behaviour.

#### 1. Wprowadzenie

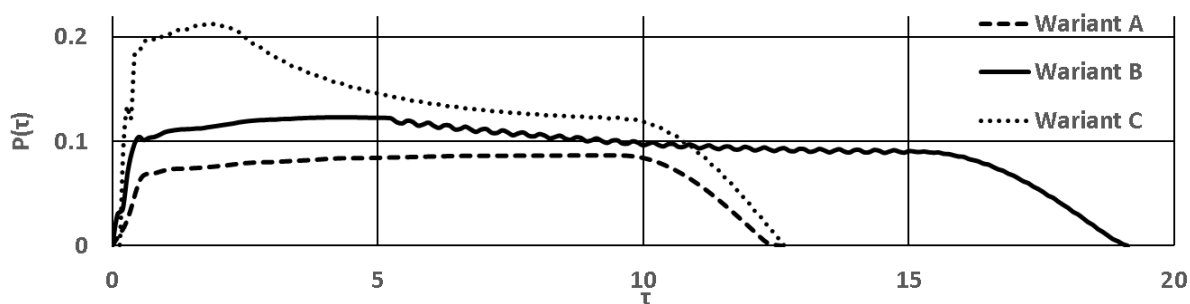
Elementy zabezpieczające konstrukcje przed obciążeniami dynamicznymi, które zazwyczaj nakładają się na obecne już obciążenia, są stosowane w wielu maszynach i konstrukcjach. Głównym zadaniem absorbera jest zamiana energii kinetycznej w inny rodzaj energii (zjawisko dyssypacji energii). W przypadku absorberów kolumnowych, odbywa się to wskutek plastycznych odkształceń absorbera [1, 2, 3, 4]. Analizowane są dwa rodzaje modeli absorberów energii. Do zamodelowania geometrii stosowany jest program ANSYS SpaceClaim, a do analiz dynamicznych moduł Explicit. Modele dyskretyzowane elementami przestrzennymi mają trzy elementy skończone wzdłuż grubości rury. Pierwsza grupa modeli służy do porównania wyników symulacji z danymi literaturowymi dynamicznej próby zgniatania (rysunek 1a) [5]. W cytowanej pracy zastosowany jest tylko sprężysto-plastyczny model materiału, nie uwzględniający prędkości odkształcenia. Symulacje są przeprowadzane w dwóch wariantach. W pierwszym z nich absorber stoi nieruchomo na podłożu, a w drugim porusza się z tą samą prędkością co bijak. Drugim rodzajem jest model absorbera o grubości ścianki równej 3 mm wykorzystany do symulacji całkowitego zgniatania. Model jest dyskretyzowany za pomocą elementów powłokowych (rysunek 1b). Badany jest wpływ modelu materiału na charakterystykę pracy [1, 4]. Głównym założeniem jest, aby absorber stracił stateczność w momencie osiągnięcia siły zgniatającej równej  $800 \text{ kN} \pm 5\%$ , przy wcześniejszym wstępnym obciążeniu statycznym siłą równą  $240 \text{ kN}$ .



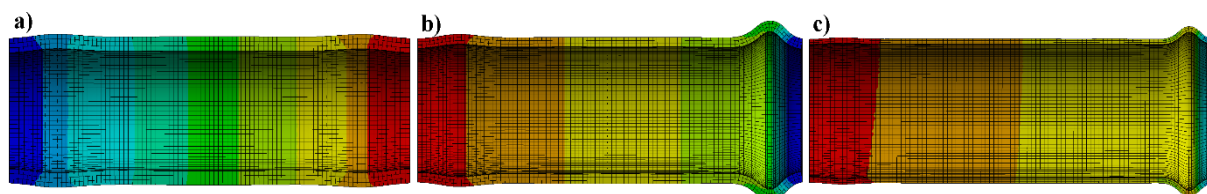
Rys. 1. Model geometryczny absorbera: a) model zastosowany do dynamicznej próby zgniatania [5], b) model absorbera do stojaka SHC  
 Fig. 1. Geometrical model of absorber: a) model for the dynamic crushing test [5], b) absorber model for SHC rack

## 2. Wyniki symulacji modelu do dynamicznej próby zgniatania

Pierwszy z modeli został zbudowany w oparciu o literaturę. Modele oznaczone symbolami A, B, C, M38, Tube4/13/17/20/22 różnią się między sobą geometrią, sposobem zamocowania oraz prędkością obciążenia. Stosowane oznaczenia są takie same jak w artykule [5]. Do zamodelowania własności stopu AL 6061-T6 wykorzystany jest model Steinberga-Guinana, który, w przeciwieństwie do modelu zastosowanego w cytowanej pracy, uwzględnia prędkość odkształcenia. Przebieg sił dla prób przy małej prędkości obciążenia i nieruchomych absorberach pokazano na rysunku 2, a ich kształt po próbie na rysunku 3. Wartości sił i czasu są znormalizowane [5]. Przebiegi sił oraz kształt absorberów w przypadku małych prędkości obciążenia są zbliżone do literaturowych.



Rys. 2. Wykresy siły w zależności od czasu  
 Fig. 2. Force-time history



Rys. 3. Odształcone modele: a) model A, b) model B, c) model C.  
 Fig. 3. Deformed models: a) model A, b) model B, c) model C.

Ponadto wyznaczane są górna i dolna średnica niedaleko końców absorbera po próbie, skrócenie powłoki i czas zgniatania. Porównanie wyników przedstawione są w Tabeli 1 i Tabeli 2. W przypadku większych prędkości obciążenia widoczne są różnice w czasie trwania próby uzyskane przy zastosowaniu różnych modeli materiału.

Tabela 1. Porównanie wyników symulacji dla nieruchomego modelu

Table 1. Comparison of simulation results for a stationary model

Wariant	Skrócenie powłoki [mm]			Średnice z symulacji [mm]		Średnice z eksperymentu [mm] [5]		Średnice z modelu [mm] [5]	
	Symulacja	Eksperyment [5]	Model [5]	Góra	Dół	Góra	Dół	Góra	Dół
A	5,50	5,80	5,54	26,97	26,97	26,69	26,61	26,91	26,80
B	7,66	8,35	8,09	31,84	26,92	30,72	26,42	31,14	27,10
C	4,15	6,55	6,21	30,30	26,01	29,05	26,42	31,42	26,15
M38	11,80	13,00	12,70	-	31,32	-	31,00	-	30,95

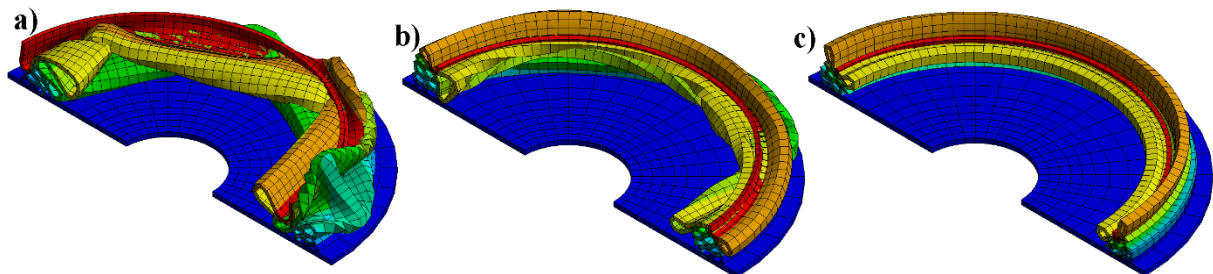
Tabela 2. Porównanie wyników symulacji dla poruszającego się modelu

Table 2. Comparison of simulation results for a moving model

Wariant	Dodana masa [g]	Prędkość [m/s]	Skrócenie powłoki [mm]			Czas próby [ $\mu$ s]		
			Symulacja	Eksperyment [5]	Model [5]	Symulacja	Eksperyment [5]	Model [5]
Tube 4	127	101,3	12,78	13,9	13,1	266	260	288
Tube 13	127	104,3	14,83	13,9	14,7	266	269	316
Tube 17	120	120,5	17,94	17,3	17,9	300	271	320
Tube 20	120	125,3	20,18	19,8	19,2	366	286	330
Tube 22	300	75	16,63	15,5	16,9	400	432	510

### 3. Wyniki symulacji modelu absorbera do stojaka SHC

Dla drugiego modelu absorbera wykonane są trzy symulacje z trzema modelami materiałowymi odpowiadającymi stali S-275 JOH [6]: sztywno-plastycznym, biliniowym oraz Johnsona-Cooka. Odkształcone modele pokazane są na rysunkach 4a, 4b i 4c.

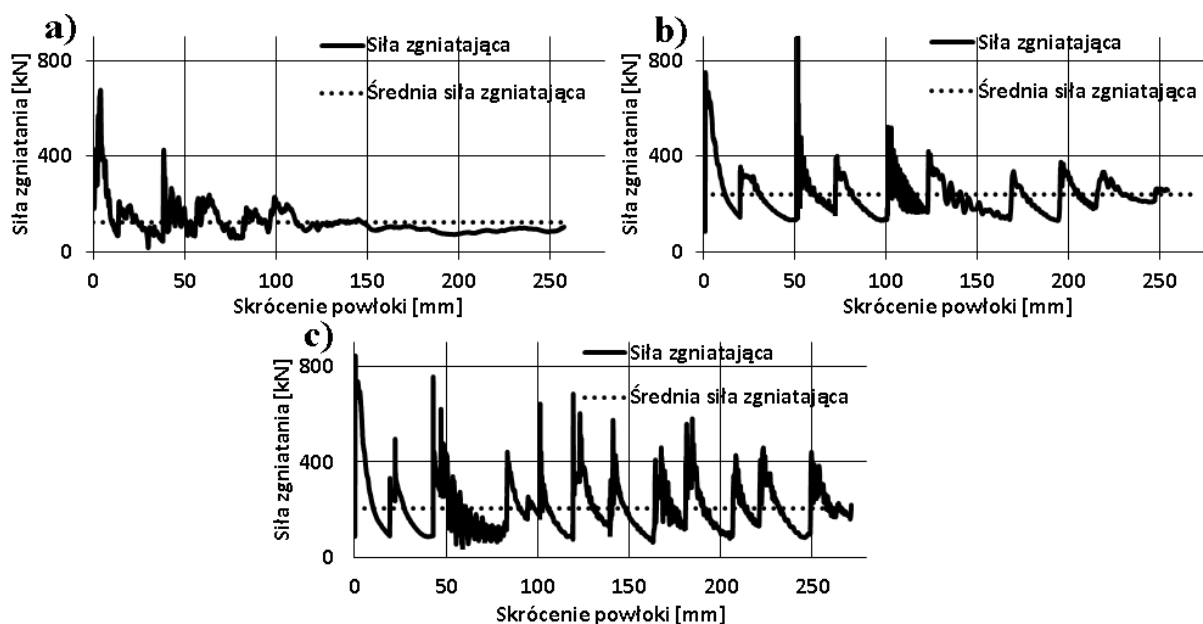


Rys. 4. Odkształcony model absorbera z przyjętym modelem materiału: a) sztywno-plastycznym, b) biliniowym, c) Johnsona-Cooka

Fig. 4. Deformed model: a) bilinear model, b) rigid-plastic model, c) Johnson Cook model



Badane są przebiegi sił w czasie trwania próby. Przebiegi te pokazane są na rysunkach 5a, 5b i 5c. Widoczne są różnice pomiędzy tymi przebiegami, a także wynikające z nich różnice średniej siły zgniatającej.



Rys. 5. Charakterystyka osiowego zgniatania: a) model model sztywno-plastyczny, b) model biliniowy, c) model Johnsona-Cooka.

Fig. 5. Characteristic of axisymmetric crushing: a) rigid-plastic model, b) bilinear model, c) Johnson-Cook model.

#### 4. Wnioski

Symulacje pokazały, że zastosowanie modelu materiału uwzględniającego prędkość odkształcenia wpływa na zachowanie się absorbera podczas osiowego zgniatania, w stosunku do modeli które nie uwzględniają prędkości odkształcenia. Zastosowany model materiału wpływa zarówno na zmianę siły przenoszonej przez absorber jak i na jego kształt po zgnieceniu.

#### Literatura

1. Pacześniowski K., Analiza możliwość zastosowania kolumnowych absorberów energii jako elementów upodatniających zmechanizowaną obudowę ścianową, prace naukowe GIG, s. 115-122 Konferencje nr 40. Katowice 2002.
2. Chen D.H., Crush Mechanics of Thin-Walled Tubes, 2016, CRC Press.
3. PN-G-15536:2013-06. Górnicza obudowa indywidualna - Stojaki hydrauliczne centralnie zasilane.
4. Pawłowski P., Systemy adaptacyjnej absorpcji obciążeń uderowych, rozprawa doktorska, 2011, [https://www.ippt.pan.pl/\\_download/doktoraty/pawlowski\\_piotr\\_doktorat.pdf](https://www.ippt.pan.pl/_download/doktoraty/pawlowski_piotr_doktorat.pdf) (dostęp 04.06.2020)
5. Karagiozova D., Norman J., Dynamic elastic-plastic buckling of circular cylindrical shells under axial impact, International Journal of Solids and Structures 37 (2000) s. 2005-2034.
6. Paz J., Díaz J., Romera L., Costas M., Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled energy absorption devices, Finite Elements in Analysis and Design 91(2014) s. 30–39.

## NUMERICAL ANALYSIS OF THE STENT-ARTERY SYSTEM WITH THE USE OF NON-LINEAR MATERIAL MODELS

**MAGDALENA KOGUT, BEng.**

Mechanical Engineering, MB4, semester III, master's programme

Supervisor: Grzegorz Kokot, BEng, PhD, DSc, Prof. SUT

**Abstract.** The purpose of this work is to examine the applications of the new material model for modelling the arterial walls proposed by Gasser, Ogden & Holzapfel (2005) [1] and implemented in the MSC Marc Mentat 2019 program. The main stage of analysis will be the modelling of a 7,2 mm diameter peripheral artery (a carotid artery) with a stent placed in it and checking its response to systolic blood pressure. The results will be compared with those obtained for other material models such as the Mooney-Rivlin model and the Ogden model.



### ANALIZA NUMERYCZNA UKŁADU STENT-TĘTNICA Z ZASTOSOWANIEM NIELINIOWYCH MODELI MATERIAŁU

**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy jest zbadanie zastosowań nowego modelu materiałowego do modelowania ścian tętnic zaproponowanego przez Gassera, Ogdena i Holtzapfela (2005) [1] oraz zaimplementowanego w programie MSC Marc Mentat 2019. Głównym etapem analizy będzie zamodelowanie tętnicy obwodowej (tętnicy szyjnej) o średnicy 7,2 mm z umieszczonym w niej stentem oraz sprawdzenie jej odpowiedzi na obciążenie ciśnieniem skurczowym. Wyniki zostaną porównane z tymi, które zostały uzyskane dla innych modeli materiałowych, takich jak model Mooneya-Rivlina oraz model Ogdena.

#### 1. Introduction

The area of analysis in the field of blood vessels is constantly developing due to the fact that it concerns priority fields of science. Numerical calculations are used more and more often, which allow the obtaining of more accurate test results. Artery walls are considered to be made of atypical materials. They can be modelled as hyperelastic materials in many different ways. The less complicated models demand a smaller number of experimentally determined material parameters to describe behaviour, but on numerous occasions it is difficult to choose a proper model.

The hyperelastic materials can undergo large elastic deformations under acting forces and at the same time they keep their original properties. This type of material shows non-linear behaviour. It means that their deformation is not directly proportional to the applied load. The hyperelastic materials have found application in various fields of research and thanks to the ability to analyse numerical modelling have become a significant element in the development of many fields of knowledge. In order to model and design the hyperelastic material, it is important to select the appropriate deformation energy function and determine the material constant for the chosen function [1].

## 2. The main part of the analysis

The previously mentioned dimensions of the carotid artery are coming from „Peripheral vascular structure and function in hypertrophic cardiomyopathy” by Rowley et al. [2]. The geometrical model and its division into finite elements was made in the MSC Apex program. 3006 elements and 17957 nodes were obtained in general. Mesh size for the stent and the artery was equal to 0,5 mm.

To reflect the effect of pressure on the inner wall of the artery and its behaviour at rest, systolic blood pressure of 120 mm Hg (which is equal to 0,0159987 MPa) was added on the internal surface. To perform the analysis a ramp for lineal grow of pressure was added. To demonstrate the behaviour of the artery, fixed displacement in z-axis and fixed rotations in x, y and z-axis were used at one side of the artery. The displacement in y-axis was fixed in the horizontal plane and the displacement in x-axis was fixed in the vertical plane. The model with all the boundary conditions is shown in Figure 1.

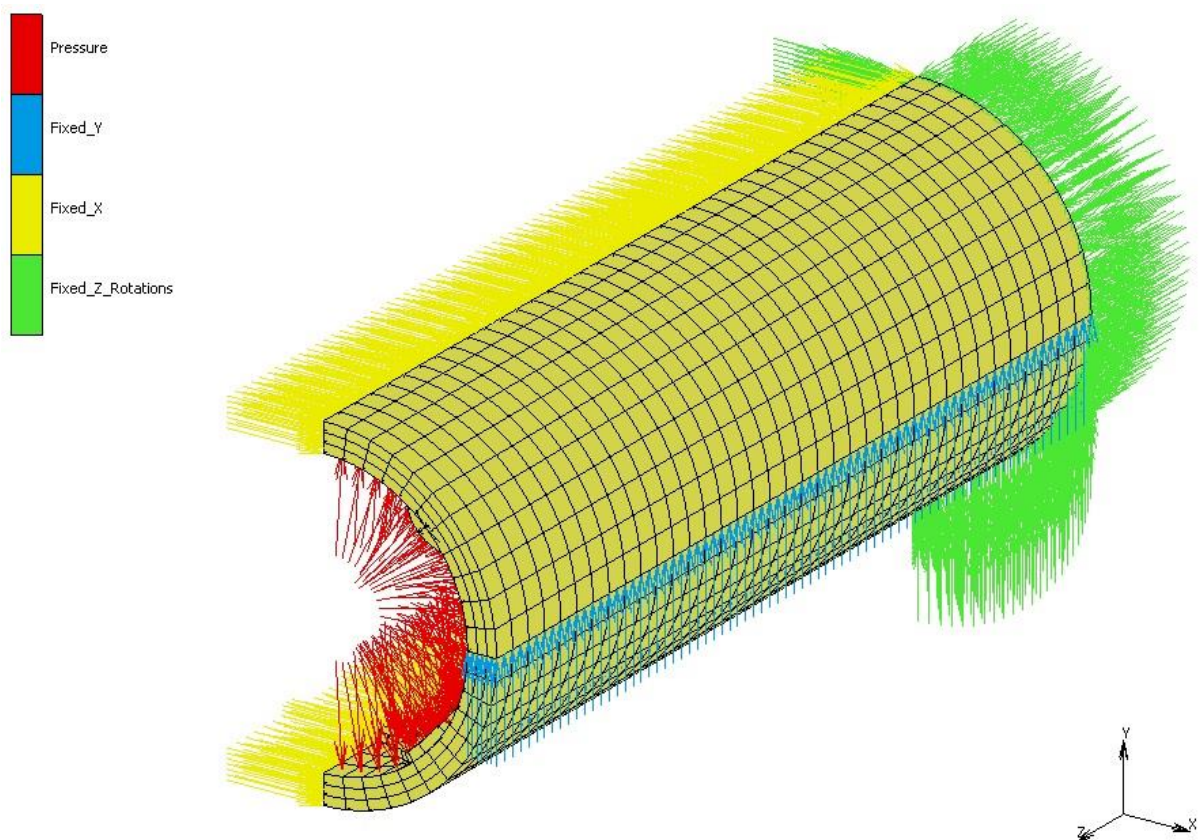


Fig. 1. The model of artery with all the boundary conditions

Rys. 1. Model tętnicy ze wszystkimi warunkami brzegowymi

The material parameters for the Gasser, Ogden and Holtzapfel model are  $C_{10} = 3,82$  kPa,  $k_1 = 996$  kPa and  $k_2 = 524,6$ . The number of fibre families is 2 and the structure parameters for this analysis are  $\gamma = 49,98^\circ$  and  $\kappa = 0,266$  [3].  $\kappa$  defines the increase of the dispersion of the collagen fibres within each family. Figure 2 shows the displacement in x-axis, the displacement in y-axis and the equivalent of stress for the model with  $\kappa = 0,266$  and systolic blood pressure.

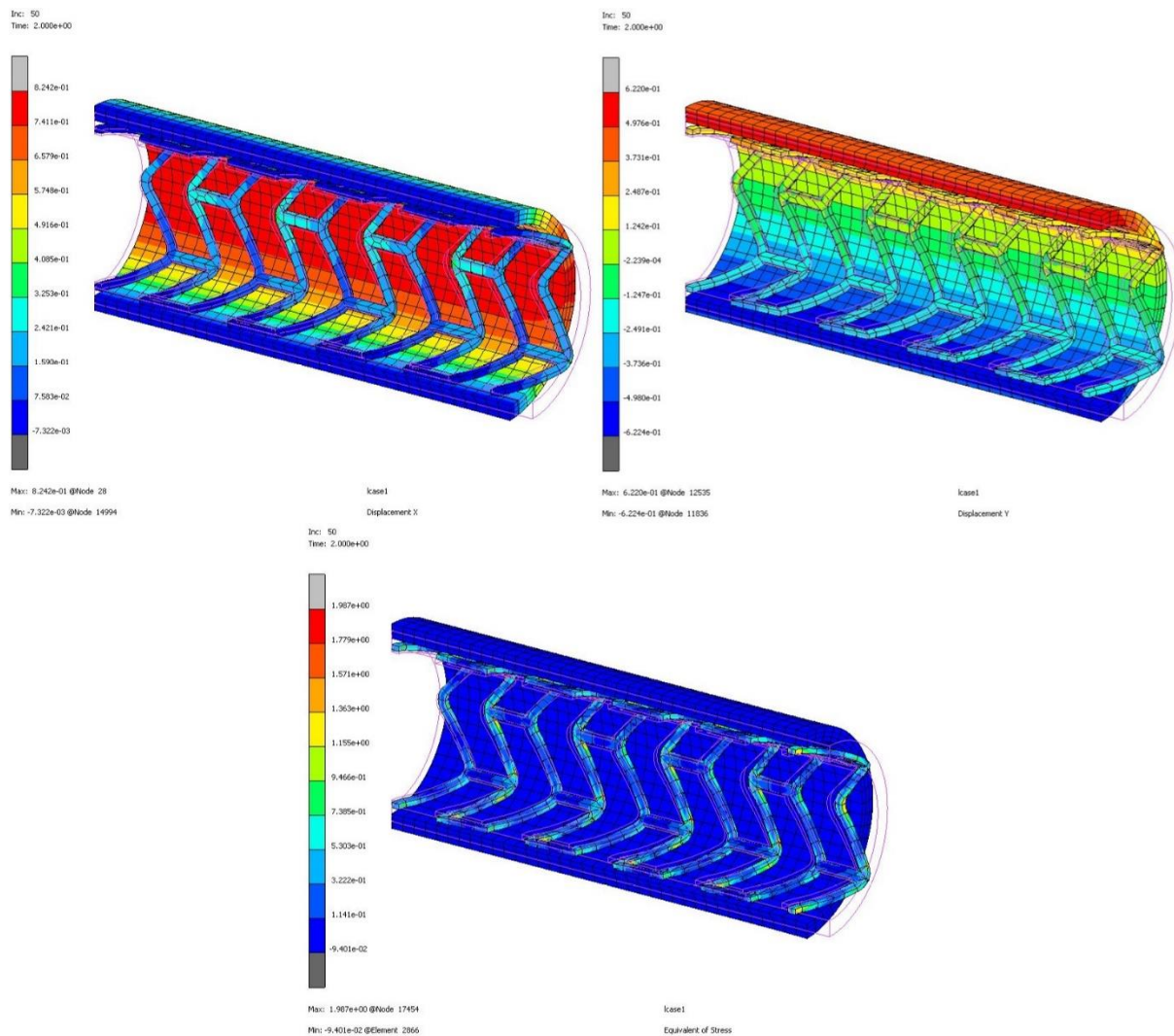


Fig. 2. From top left: Displacement in x-axis, displacement in y-axis and the equivalent of stress for the Gasser, Ogden and Holtzapfel model ( $\kappa = 0,266$ )

Rys. 2. Od lewej na górze: Przemieszczenie w osi x, przemieszczenie w osi y i naprężenia zredukowane dla modelu Gassera, Ogdena i Holtzapfela ( $\kappa = 0,266$ )

The same analysis for artery with systolic blood pressure was carried out with the five-term Mooney-Rivlin type of material. Artery hyperelastic coefficients used for this material were as follows:  $C_{10} = 0,0189$  [MPa],  $C_{01} = 0,00275$  [MPa],  $C_{11} = 0,5904$  [MPa],  $C_{20} = 0,08572$ ,  $C_{30} = 0$  [MPa]. The last model of material used in this analysis was the Ogden model. For this test the Ogden modulus  $\mu$  was equal to 900 [kPa] and the Ogden exponent  $\alpha$  had a value of 2,5.

Table 1 shows the comparison of results obtained in basic numerical analyses for a simplified geometric model, which was a fragment of a cylinder with the diameter of 7,2 mm with a stent placed inside. The model was loaded with systolic pressure. The material was simulated with the Gasser, Ogden & Holtzapfel model (with dispersion of the collagen fibres), as well as the Mooney-Rivlin model and the Ogden model.

Table 1. Comparison of the results for the analysis for 120 [mm Hg]  
Tabela 1. Porównanie wyników analizy dla ciśnienia 120 [mm Hg]

Type of model	Maximal displacement in x-axis [mm]	Maximal displacement in y-axis [mm]	Equivalent of Stress [MPa]
The Gasser, Ogden & Holzapfel model ( $\kappa = 0,266$ )	0,8242	0,6220	1,9870
The Mooney-Rivlin model	0,3503	0,3309	1,9870
The Ogden model	0,3503	0,3309	1,9870

### 3. Conclusions

Artery walls can be modelled with the use of hyperelastic materials in many different ways and the area of analysis in the field of blood vessels is constantly developing due to the fact that it concerns priority fields of science. Numerical calculations are used more often than in the past and the knowledge of material parameters is continuously increasing. It results in the obtaining of more accurate values of the analysis. The less complicated models demand a smaller number of experimentally determined material parameters to describe behaviour, but on numerous occasions it is difficult to choose a proper model. Also the values obtained for different models vary from each other. For this reason, more research on hyperelastic materials is highly recommended.

### References

1. Gasser, T.C., Ogden, R.W. & Holzapfel, G.A., Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations, *J. R. Soc. Interface* 3, 15–35 (2006).
2. Rowley, N., Green, D., George, K., Thijssen, D., Oxborough, D., Sharma, S., Somauroo, J., Jones, J., Sheikh, N. & Whyte, G., Peripheral vascular structure and function in hypertrophic cardiomyopathy, *British Journal of Sports Medicine*, 46 (2012).
3. MSC.Marc, Volume E, 8.122: Simple Tension of Fibrous Membrane Strips, 2697-2701 (2014).

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA KOMPOZYTOWEJ FELGI BOLIDU FORMUŁY STUDENT

**mgr. inż. PIOTR LUBSZCZYK**

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Celem tego artykułu jest przeprowadzenie analizy wytrzymałości kompozytowej obręczy samochodu wyścigowego (rys. 1.), tj. wdrożenie pierwszego etapu w kolejnym planowanym procesie optymalizacji rozkładu włókien węglowych przy założonych kryteriach minimalizacji podatności systemu. Artykuł opiera się na pracach prowadzonych w studenckim zespole PolSI Racing.

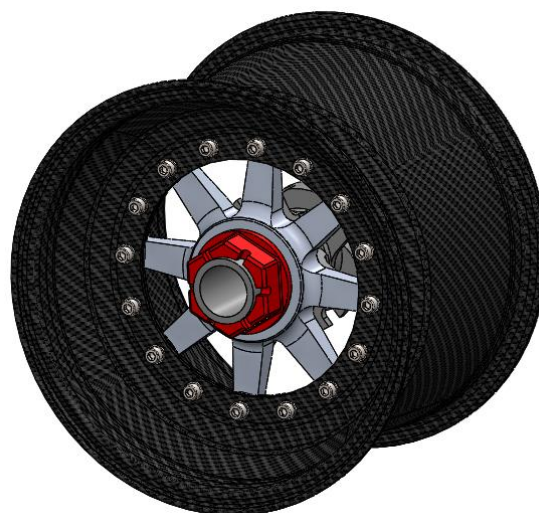


### STRENGTH ANALYSIS OF COMPOSITE FORMULA STUDENT CAR RIM

**Abstract.** The purpose of this article is to conduct a strength analysis of a composite race car rim (fig. 1.), i.e. the implementation of the first stage in the subsequent planned process of optimizing the distribution of carbon fibers with assumed criteria of minimizing susceptibility of the system. Article is based on work of PoSI Racing student team.

#### 1. Wprowadzenie

Pięcioletnia historia Studenckiego Koła Naukowego PolSI Racing z Politechniki Śląskiej zaowocowała zbudowaniem dwóch bolidów wyścigowych klasy Formula Student oraz motocykla elektrycznego "Elektra", biorącego udział w zawodach SmartMoto Challenge. Zespół nie przerywa intensywnych prac rozwojowych i ciągle wprowadza nowe technologie do swoich pojazdów. Jednym z założonych kierunków rozwoju w układzie zawieszenia trzeciego bolidu SW-03e, o napędzie elektrycznym, jest użycie autorskich felg z włókna węglowego. Rozwiązanie to pomoże jeszcze bardziej zredukować masę konstrukcji. Zespół, korzystając z ciągle zdobywanego doświadczenia na torach wyścigowych, w dalszym stopniu optymalizuje również wcześniej stworzone konstrukcje, czego efektem jest zbliżanie się do założonych wartości naprężeń i sztywności konstrukcji.



Rys. 1. Analizowana felga oraz piasta

Fig. 1. Analysed rim and hub

Celem niniejszego artykułu jest przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej kompozytowej felgi samochodu wyścigowego (rys. 1.), czyli realizacja pierwszego etapu w planowanym następnie procesie optymalizacji rozmieszczenia włókien węglowych.

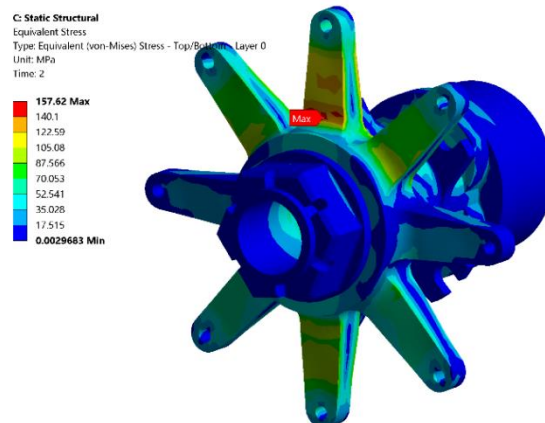
Wstępnym etapem wspomagającym projektowanie felgi jest wykonanie modelu numerycznego całości felgi oraz części bezpośrednio z felgą współpracujących i mających wpływ na powstające obciążenia. W tym celu wykorzystano oprogramowanie Ansys Mechanical. W celu zamodelowania anizotropowych własności materiałowych obręczy wykorzystano dedykowany moduł Ansys Composite Pre – Post. Materiał z jakiego wykonana jest piasta, nakrętka oraz centralna część felgi to aluminium PA9, natomiast obręcze są wykonane z prepregu węglowego o splocie plain.

Siły przyjęte w analizie wytrzymałościowej odpowiadają maksymalnym przeciążeniom działającym na odpowiednie komponenty bolidu FSAE podczas jazdy po torze wyścigowym. Ich wartości zostały wyznaczone w oprogramowaniu OptimumG podczas symulacji jazdy projektowanego samochodu przy założeniu warunków przejazdu odpowiadających tym, które występują podczas wyścigów. W obliczeniach uwzględnia się szereg parametrów pojazdu, takich jak masa, położenie środka ciężkości, charakterystyka opon, geometria i twardość zawieszenia. W związku z tym otrzymywane wyniki są zwykle zbliżone do rzeczywistości. Założone w symulacjach wartości maksymalnych obciążeń potwierdził system zapisu danych pomiarowych, który zastosowano podczas testów i startów w zawodach FSAE pierwszym bolidem zbudowanym przez PolSl Racing.

## 2. Analiza złożenia felgi

W celu uproszczenia modelu przyjętego do obliczeń usunięto połączenia śrubowe i zastosowano kontakt typu Bonded na powierzchni styku z piastą koła. Innym uproszczeniem jest utwierdzenie końca piasty z pominięciem wpływu zawieszenia. Zabieg taki zwiększa sztywność układu, co przekłada się jednocześnie na wzrost naprężeń oraz obniżenie wartości współczynnika bezpieczeństwa w stosunku do jego wartości rzeczywistej. Obciążenia wyliczone w programie OptimumG zostały zadane jako obciążenia statyczne (takie podejście wpływa na znaczne przyspieszenie procesu optymalizacji) poprzez Remote Force, dodatkowo uwzględniono obciążenie ciśnieniem w oponie oraz napięcie wstępne wywołane przez nakrętkę typu center lock, którą koło jest dokręcane do piasty.

Kontakt pomiędzy obręczą oraz ramionami felgi zamodelowano jako kontakt Frictionless, ponieważ tarcie w tym obszarze nie wpływa w sposób znaczący na wyniki analiz. Kontakt pomiędzy nakrętką a rotorem oraz pomiędzy rotorem a piastą zamodelowano w podobny sposób. Ponieważ elementy będące w kontakcie przylegają równomiernie na całej powierzchni, jako metodę detekcji wybrano punkty Gauss'a oraz algorytm Augmented Lagrange. Aby kontakt tarciowy, w dodatku ze stosunkowo dużym współczynnikiem tarcia, nie powodował problemów ze zbieżnością analizy, wybrano pełny algorytm Newtona – Raphsona z niesymetryczną macierzą sztywności elementów tam, gdzie jest to możliwe. Wydłuża to czas obliczeń pojedynczej iteracji, ale często umożliwia osiągnięcie zbieżności rozwiązania w mniejszej liczbie iteracji przy zastosowaniu kontaktów tarciowych. Wyniki przeprowadzonych analiz dla złożenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Naprężenia zredukowane wg. Hipotezy Hubera - Misesa w przypadku jazdy w zakręcie

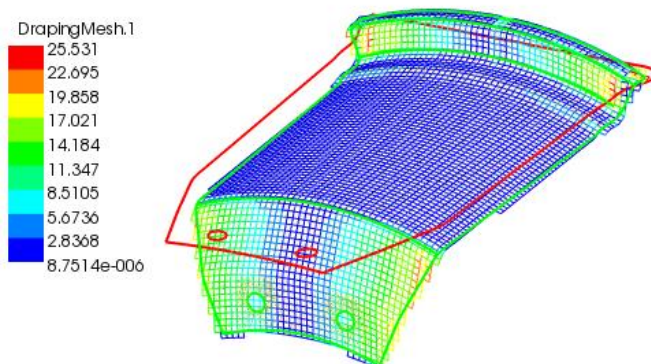
Fig. 2. Huber - Von Mises stress in corner loadcase

Przy największym obciążeniu naprężenia zredukowane w piaście i rotorze wynoszą 157 MPa, a więc znacznie mniej niż wynosi granica plastyczności stosowanego materiału. Felga samochodu jest układem narażonym na obciążenia zmęczeniowe, dlatego też dla rozwiązania otrzymanego w drodze optymalizacji zostanie wyznaczona dodatkowo minimalna liczba cykli (wykres Wöhler'a) jaką komponent będzie mógł wykonać wykona komponent. Wynik zostanie porównany z normatywną liczbą cykli charakterystycznych dla powszechnie stosowanych felg aluminiowych.

### 3. Analiza kompozytowych obręczy

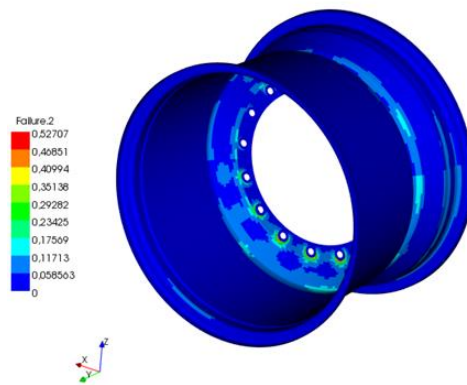
Kompozytowe obręcze zamodelowano jako model powłokowy. Ze względu na to, że obręcze posiadają krzywiznę w dwóch kierunkach, wykonano analizę drapingu (rys. 3) tzn. zdolności włókna do dopasowywania się do kształtu formy. W wyniku dopasowania włókien ulegają one skoszeniu względem siebie, co prowadzi do zmiany własności mechanicznych struktury kompozytowej. Analiza drapingu pozwala na zobrazowanie kształtu warstwy co jest cenną informacją w procesie produkcji. Największe skoszenie wynosi około 25 stopni i występuje w miejscach, gdzie felga jest w kontakcie z oponą oraz w miejscach gdzie występują największe naprężenia, co ma istotny wpływ na wyniki.

Ze względu na ograniczony dostęp do danych materiałowych zastosowano tylko najprostsze kryteria dekohezji dla kompozytów. Nie uwzględniają one bardziej złożonych postaci utraty spójności, jak np. delaminacji, przez co obręcze zostały zaprojektowane tak, aby osiągnąć jak największy współczynnik bezpieczeństwa.



Rys. 3. Analiza drapingu dla jednej z warstw kompozytu  
Fig.3. Draping analysis for one composite ply





Rys. 4. Odwrotny współczynnik bezpieczeństwa w przypadku jazdy w zakręcie  
 Fig. 4. Inversed reserve factor in corner loadcase

Odwrótny współczynnik bezpieczeństwa (rys. 4) wynosi 0.52 przy największym obciążeniu. Uznano więc, że projektowana konstrukcja spełnia założenia projektowe, a stworzony model numeryczny stanowi bazę do optymalizacji felgi oraz piasty. Przy takich samych obciążeniach i drobnych zmianach geometrii, czy też układu włókien, nie powinno być problemów z uzyskaniem zbieżności kolejnych analiz.

### Literatura

1. Chandrupatla T.R., Belegundu A.D.: *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Pearson; 4th edition (October 29, 2011)
2. Bąk R., Burczyński T.: *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, WNT, Warszawa 2001

## MINIMALIZACJA MASY WIEŻY KONKURSOWEJ Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY WYBOCZENIOWEJ

**inż. DANIEL MAZUREK**

Budownictwo, RB3, semestr II, 2 stopień

**JAKUB GROŃ**

Budownictwo, RB3, semestr VIII, 1 stopień

*Koło Naukowe Metod Komputerowych w Mechanice Budowli "Model"*

Opiekun naukowy: dr inż. Andrzej Cińcio

*Katedra Mechaniki i Mostów, Wydziału Budownictwa Pol. Śl.*



**Streszczenie.** Praca przedstawia opis praktycznego sposobu minimalizacji masy modelu konstrukcji wieży z drewna balsowego, z wykorzystaniem programu *Autodesk Robot Structural Analysis*. Uzyskane wyniki numeryczne porównano z wynikami pomierzonymi w ramach IX-tej edycji ogólnopolskiego konkursu „Wybudujemy Wieżę 2019” w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Kryterium konkursowym było uzyskanie jak najmniejszej masy wieży przy jednoczesnej największej jej wytrzymałości na ściskanie.

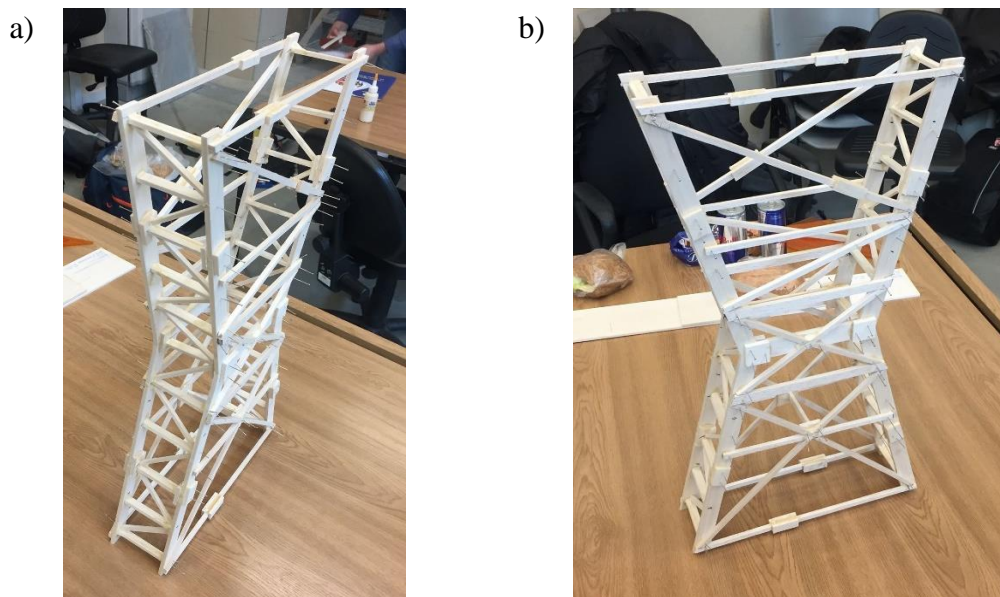
## MINIMIZING THE WEIGHT OF COMPETITION TOWER USING BUCKLING ANALYSIS

**Abstract.** The work presents a way of minimizing the weight of balsa tower using Autodesk Robot Structural Analysis. The results were compared with the actual load-bearing capacity of the built tower model, which was carried out during the nationwide competition 'We Build the Tower 2019' at the Warsaw University of Life Science. The criterion was to obtain the smallest tower mass while at the same time its highest compressive strength.

### 1. Wprowadzenie

Analizowana wieża konkursowa, o wysokości 550 mm została wykonywana z drewna balsowego, którego elementy łączono klejem do drewna. Stosownie do wymagań, wieża była wykonana jako ustrój prętowy, który po upływie 24 godzin został poddany próbie wytrzymałościowej, w celu określenia siły niszczącej. Kształt konstrukcji określony był dopuszczalną obwiednią graniczną, z wymaganym załamaniem w środku jej wysokości, a mniejszy wymiar przekroju każdego z prętów składowych wynosił 4 mm lub 5 mm. Wykonaną wieżę konkursową przedstawiono na rys. 1.

Decydującym kryterium konkursu był wskaźnik określony jako iloraz siły niszczącej do masy wieży. Wykonana wieża uzyskała wskaźnik równy  $w=30,95$  N/g (obliczony dla pomierzonej siły niszczącej  $N=3144,8$  N i dla masy równej  $m=101,6$  g). Tym samym wieża ta zajęła pierwsze miejsce w konkursie. Przygotowując się do konkursu rozważono szereg różnych modeli, wybierając najbardziej efektywny. W tym celu wykorzystano analizę wyboeczeniową w programie Autodesk Robot Structural Analysis, bazującym na metodzie elementów skończonych (MES).



Rys. 1. Wykonana wieża konkursowa: a) układ poprzeczny, b) stężenia  
 Fig. 1. Competition tower: a) cross-section, b) braces

## 2. Przyjęte założenia

Z uwagi na fakt, że drewno balsowe jest materiałem niejednorodnym, anizotropowym oraz parametry wytrzymałościowe zakupionego drewna takie jak wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, zginanie i moduł sprężystości wzdłuż włókien co do wartości mogą wykazywać ponad dwukrotną rozbieżność [1]. W obliczeniach założono uśrednioną wartość modułu Younga  $E_{0,mean} = 3570 \text{ MPa}$ , wytrzymałość na ściskanie  $f_{c,0,k} = 14 \text{ MPa}$ , współczynnik Poissona  $\nu = 0,38$  [2] oraz gęstość objętościowa  $\rho = 0,16 \text{ g/cm}^3$ . Ponadto w modelu numerycznym wieży przyjęto bezprzegubowe połączenia prętów w węzłach, z pominięciem ewentualnych mimośrodków. Aby najlepiej odwzorować warunki brzegowe wynikające z badań w maszynie wytrzymałościowej, przyjęto w modelu podpory przegubowo-nieprzesuwne przy podstawie wieży oraz przegubowo-przesuwne w kierunku pionowym na jej szczycie.

## 3. Sposób optymalizacji modelu wieży

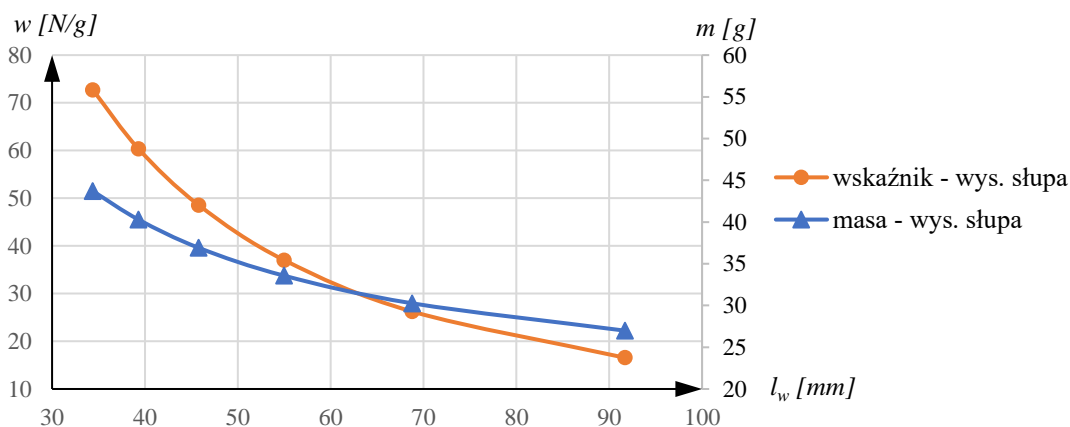
W pierwszej kolejności posłużono się uzyskanymi wynikami sił niszczących oraz masy modeli wież, które wykonano w poprzednich edycjach konkursu. Zbudowano także adekwatny model numeryczny sprawdzając zgodność uzyskanych wyników analizy wyboczeniowej. Następnie zmodyfikowano model numeryczny wieży, w taki sposób aby było możliwe uzyskanie siły krytycznej  $N_{kr} > 3 \text{ kN}$ .

Następnym etapem była weryfikacja wstępnie założonej geometrii konstrukcji wieży, aby możliwa była ona do wykonania w regulaminowym czasie, przy największej precyzji wykonania. Założono, że poprzeczny układ konstrukcji będzie składał się z dwóch kratownic typu „W” (rys. 1a), które połączone będą ze sobą stężeniami (rys. 1b). Natomiast załamanie w środku wysokości wieży pomiędzy głównymi układami poprzecznymi będzie wzmocnione dodatkowymi belkami (rys. 1b).

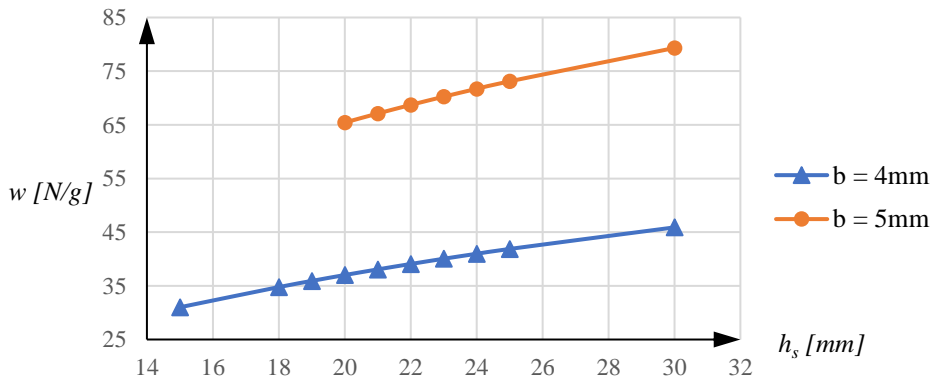
W dalszej kolejności zostały wykonane obliczenia w celu określenia optymalnej odległości pomiędzy ryglami w układzie poprzecznym, oraz dobrano optymalne wymiary przekroju poprzecznego słupków. W tym celu skorzystano ze wzoru na siłę krytyczną (1) oraz ze wzoru określającego konkursowy wskaźnik  $w$  stosunku siły niszczącej do masy wieży.

$$N_{kr} = \frac{E_{0,mean} \cdot I \cdot \pi^2}{l_w^2} \quad (1)$$

Wyniki obliczeń zależności odległości pomiędzy węzłami głównego układu poprzecznego  $l_w$  (rozstaw pomiędzy ryglami) do wskaźnika konkursowego  $w$ , w odniesieniu do masy jednego układu poprzecznego przedstawiono na rys. 2, natomiast zależność wskaźnika konkursowego  $w$  do wymiarów poprzecznych słupa  $b_s$  i  $h_s$  przedstawiono na rys. 3.



Rys. 2. Zależność  $l_w - w$  oraz  $l_w - m$  w układzie poprzecznym  
Fig. 2. Dependence  $l_w - w$  and  $l_w - m$  in cross-section



Rys. 3. Zależność  $h_s - w$  z uwzględnieniem grubości przekroju  
Fig. 3. Dependence  $h_s - w$  taking into account the thickness of the cross-section

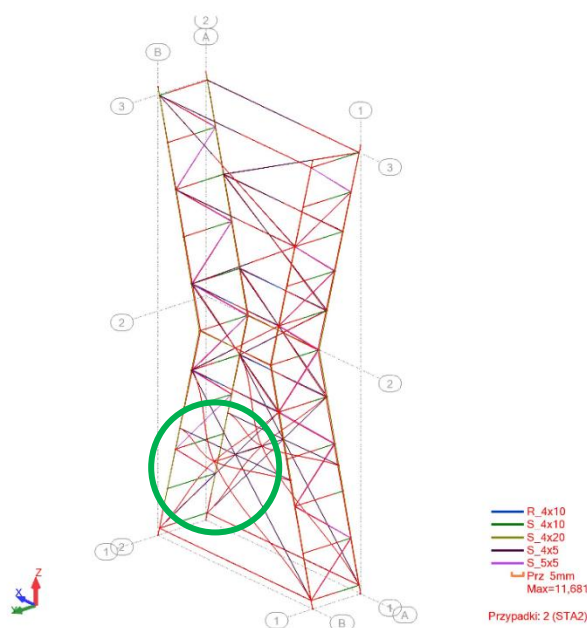
Z uwagi na fakt, że osiowy rozstaw pomiędzy słupkami w układzie poprzecznym wynosił 70 mm przyjęto odległość między węzłami (rozstaw między ryglami) równą 55 mm tak aby kąt pomiędzy skratowaniem a słupkiem zbliżony był do  $45^\circ$ . Na podstawie tego, porównując do siebie wskaźniki  $w$  dobrano wymiary poprzeczne słupków równe 4 x 20 mm.

W dalszej kolejności wykonano siedem różnych wariantów modeli numerycznych wież w programie z przyjętym wcześniej układem poprzecznym. W tym etapie poszukiwane było optymalne stężenie podłużne wieży tak aby maksymalnie zredukować masę zachowując wskaźnik  $w$  powyżej granicy 35 N/g. W tym celu skorzystano z analizy wybozeniowej wyznaczając pierwszą siłę krytyczną  $N_{kr}$  jako wartość najniższą spośród sił krytycznych wyższych rzędów. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki analizy wyboczeniowej  
Table 1. Results of buckling analysis

Przyjęty wariant stężenia wieży	1	2	3	4	5	6	7
Masa wieży $m$ [g]	100,08	104,25	98,69	99,14	96,83	103,35	107,16
Siła krytyczna $N_{kr}$ [N]	4380,0	6340,0	3576,0	4048,0	4060,0	6612,0	4384,0
Wskaźnik $w$ [N/g]	43,77	47,67	36,24	40,83	41,93	48,09	40,91

Ostatecznie wybrano pierwszą wersję modelu, mimo iż 2 i 6 wykazują wyższe wartości wskaźnika. Zrezygnowano z wersji 2 i 6 ze względu na trudność techniczną oraz czasochłonność wykonania stężeń. Pierwsza postać wyboczenia w modelu numerycznym (rys. 4) pokazuje, że wyboczenie nastąpi w zaznaczonej na rysunku części stężenia wieży.



Rys. 4. Analiza wyboczeniowa – pierwsza postać wyboczenia  
Fig. 4. Buckling analysis – first form of buckling

#### 4. Wnioski

Uszkodzenie wieży, podczas badania w maszynie wytrzymałościowej w ramach konkursu, nastąpiło w miejscu zgodnym z pierwszą postacią wyboczenia uzyskaną w programie Robot. Ponadto stosunek siły krytycznej wyznaczonej programem do siły uzyskanej w w/w badaniu wyniósł 1,39. Pokazuje to, że pomimo mało precyzyjnych danych o materiale udało się dosyć dokładnie oszacować wartość siły niszczącej oraz określić miejsce zaistnienia zniszczenia. Uzyskano to posiłkując się uzyskanymi wynikami analizy wyboczeniowej. Pozwoliło to na zminimalizowanie masy wieży i uzyskanie optymalnej konstrukcji konkursowej wieży.

#### Literatura

1. <https://edroga.pl/drogi-i-mosty/analiza-porownawcza-konstrukcji-z-balsy-050717069>; dostęp: 28.05.2020.
2. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Balsa>; dostęp: 28.05.2020.

## KONCEPCJA STANOWISKA EKSPERYMENTALNEGO DO ANALIZY ZACHOWANIA STENTÓW W NACZYNIU KRWIONOŚNYM IN VITRO

**mgr inż. NATALIA MOŁĘDA**

Inżynieria Mechaniczna, semestr IV, 3 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Kokot, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Stenty są protezami naczyniowymi, które umieszczane są w zwężonych, w wyniku choroby, naczyniach krwionośnych. Jednak przed umieszczeniem stentu w organizmie ludzkim stent musi przejść wiele testów, aby sprawdzić czy nie spowoduje niekorzystnych interakcji. Testy proponowane w literaturze dotyczą symulacji numerycznych lub badań doświadczalnych na zwierzętach. W wyniku tego pojawiła się innowacyjna koncepcja aby stworzyć stanowisko, które pozwoli na wykonywanie badań eksperymentalnych, ale nie będzie wymagało w początkowych fazach badań testów in vivo.



## THE CONCEPT OF AN EXPERIMENTAL STAND FOR THE ANALYSIS OF STENT BEHAVIOUR IN A BLOOD VESSEL IN VITRO

**Abstract.** Stents are vascular prostheses that are placed in narrowed blood vessels. However, before placing the stent in the human body, the stent must pass a series of tests to see if it will cause adverse interactions. The tests proposed in the literature relate to numerical simulations or experimental studies on animals. As a result, an innovative concept has emerged: to create a position that will allow for experimental research, but will not require in vivo testing.

### 1. Wprowadzenie

Choroby serca to jedne z głównych chorób cywilizacyjnych. W zakresie metod ich leczenia jednym z podstawowych zabiegów jest zabieg angioplastyki, gdzie głównym elementem jest implantacja stentu. Stenty to protezy naczyniowe, które wstawia się w zwężone naczynia krwionośne. Mogą to być naczynia wieńcowe, których zwężenie powoduje problemy z przepływem krwi w kierunku serca, a ich zamknięcie może stać się przyczyną zawału serca. Mogą to być również naczynia obwodowe, których zamknięcie skutkuje w znacznej ilości przypadków niedokrwieniem kończyn dolnych, a także istotnie zwiększa śmiertelność w przypadku występowania jednoczesnej choroby naczyń wieńcowych.

Z punktu widzenia mechaniki stent należy traktować jako złożoną konstrukcję poddaną obciążeniom mechanicznym wynikającym z naporu ścian tętnic jak również przepływu krwi wraz z zaburzeniami w postaci blaszki miażdżycowej czy też wytwarzania neointymy (tkanki powstającej w wyniku podrażnienia błony tętnicy) [1].

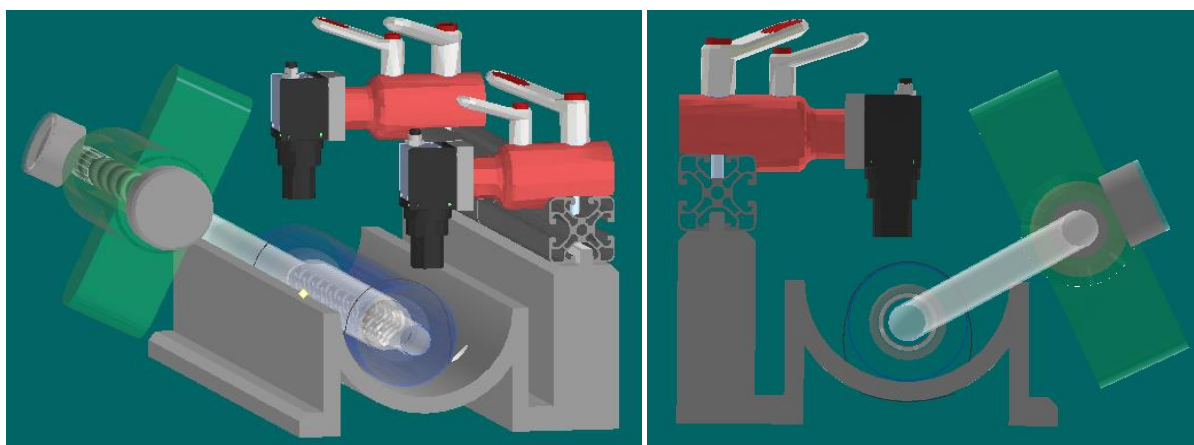
Ze względu na mnogość wcześniej wymienionych czynników przed umieszczeniem stentu w organizmie należy przeprowadzić wiele różnorodnych testów i analiz, w tym symulacji mechanicznych. W literaturze pojawiają się artykuły prezentujące jak za pomocą symulacji numerycznych można sprawdzić różne aspekty. Po pierwsze są to prognozy dla różnych

geometrii stentu [2]. Jest to jeden z kluczowych czynników ze względu na to, że stent musi wykazywać pamięć kształtu – wytwarza się go w zamkniętej formie, wprowadza w zwężone naczynie krwionośne i tam się go otwiera. Kolejne artykuły dotyczą współpracy stentu z tętnicą: czy stent po wprowadzeniu do tętnicy i otwarciu będzie w stanie podeprzeć naczynie krwionośne bez jego uszkodzenia i nastąpi otwarcie światła tętnicy pomimo obciążenia generowanego przez tętnicę [3]. W literaturze można także spotkać badania eksperymentalne stentów. Jedne z nich dotyczą analizy własności mechanicznych stentów, przykładowo w próbie trójpunktowego zginania, czy też próbie rozciągania [4]. Inne artykuły prezentują wyniki zabiegu angioplastyki na psach oraz świniach. Dotyczą one kwestii zarówno powikłań w trakcie operacji jak i długoterminowych obserwacji stentów wszczepionych in vivo [5, 6].

## 2. Koncepcja stanowiska

Jak wynika z przeglądu literaturowego obecnie prezentowane są dwa podejścia do analizy zachowania stentów po zabiegu angioplastyki: symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne na żywych organizmach. Stąd zrodził się pomysł na inne podejście: badania rzeczywistego obiektu, ale bez konieczności badań eksperymentalnych typu in vivo. W ramach tej idei powstała koncepcja zbudowania stanowiska badawczego pozwalającego na symulację zachowania protezy naczynia, podczas wcześniej wspomnianego zabiegu. Budowa takiego stanowiska wykluczy nie tylko mogące się pojawić komplikacje po operacji, ale także niepowodzenie doświadczenia spowodowane zachowaniem organizmów żywych oraz znacznie rozszerzy powtarzalność badań.

Koncepcja stanowiska bazuje na wykorzystaniu zestawu do angioplastyki wraz z protezą naczynia krwionośnego. Stanowisko wyposażone zostanie w układ generujący ciśnienie oraz optyczny system pomiaru deformacji.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

Fig. 1. Test stand

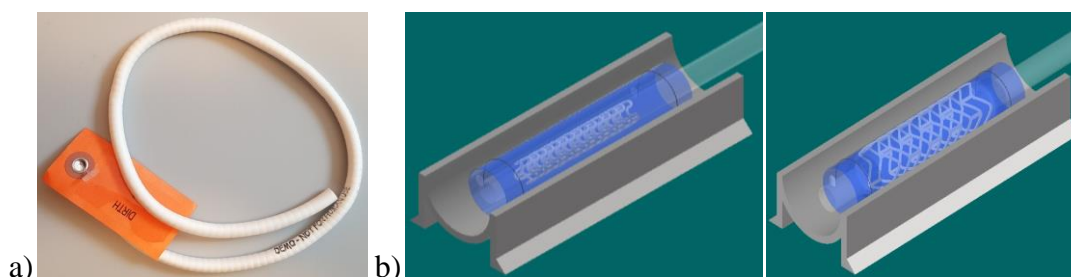
W pierwszym etapie budowy stanowiska obejmuje wytworzenie stentu, który zaprojektowano w programie CAD. Proteza ta przejdzie weryfikację własności wytrzymałościowych za pomocą symulacji numerycznej.

W następnym etapie stent w wytworzonej, zamkniętej formie zostanie umieszczony na drucie prowadzącym ręcznej pompki cewnika balonowego (rysunek 2).



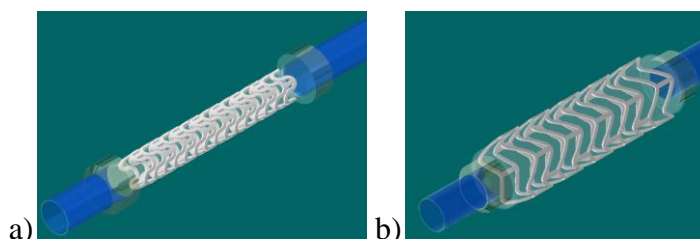
Rys. 2. Ręczna pompa cewnika balonowego  
Fig. 2. Manual balloon catheter pump

W kolejnym kroku nastąpi implementacja stentu w stanowisku badawczym. Na początku cewnik z jeszcze nierozprężonym balonem, na którym umieszczono stent, będzie wprowadzona do protezy naczyniowej, która zastępuje w początkowych badaniach naczynie krwionośne (tętnicę). Proteza przedstawiona na rysunku 3a pozyskano od firmy W. L. Gore & Associates Polska Sp. z o.o. Jest ona elementem, który jest wykorzystywany w trakcie operacji kardiologicznych jako substytut naczynia krwionośnego. W koncepcji stanowiska badawczego proteza ta leży na podstawie i jest do niej zamocowana za pomocą dwóch zacisków jak prezentuje rysunek 3b.



Rys. 3. Proteza naczyń krwionośnych a) fizyczna, b) model CAD  
Fig. 3. Blood vessel prosthesis a) actual, b) CAD model

W kolejnym kroku nastąpi zaciśnięcie zacisków na sztucznym naczyniu krwionośnym oraz rozprężenie balonika znajdującego się drucie prowadzącym cewnika. W wyniku tej czynności nastąpi otwarcie stentu i dociśnięcie go do naczynia krwionośnego. Następnie cewnik zostaje usunięty z protezy naczyniowej. Stent przed rozprężeniem zaprezentowano na rysunku 4a, natomiast już po na rysunku 4b.

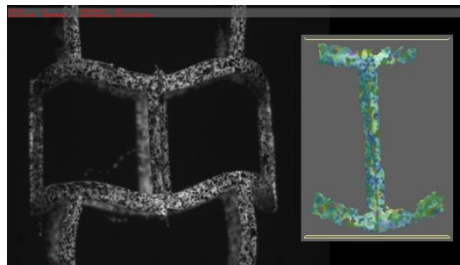


Rys. 4. Model stentu: a) zamkniętego, b) otwartego  
Fig. 2. Stent model a) contracted, b) expanded

W wyniku wszystkich wcześniej wykonanych czynności będzie można zaobserwować jak



otwarty stent współpracuje z naczyniem krwionośnym. Przewiduje się obserwacje stanu deformacji oraz odkształceń na zewnętrznej powierzchni sztucznej tętnicy przy wykorzystaniu metody optycznej. Zastosowana zostanie metoda cyfrowej korelacji obrazu. Przykładowy wynik eksperymentalnych badań mechanicznych dla stentu wykonany w ramach wcześniej prowadzonych badań przedstawia rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowy wynik badań doświadczalnych dla stentu  
Fig. 5. Sample result of experimental tests for a stent

### 3. Podsumowanie

Stanowisko badawcze do analizy zachowania stentów w naczyniu krwionośnym *in vitro* pozwoli na walidację modeli, które otrzymano podczas symulacji numerycznych. Tak zbudowane stanowisko pozwoli na umieszczenie stentu w sztucznej protezie naczynia krwionośnego i zaobserwowanie interakcji wywołanej po tym zabiegu za pomocą systemu DIC. Jest to podstawowa koncepcja stanowiska, w której zbadamy własności mechaniczne stentu oraz warunki współpracy stentu z naczyniem krwionośnym. W kolejnych etapach tworzenia stanowiska będą dołożone elementy opowiadające za generację przepływu cieczy w naczyniu krwionośnym. Przepływ ten ma symulować ruch krwi w tętnicy i dzięki niemu sprawdzimy nie tylko jak stent radzi sobie z obciążeniami wywołanymi przez tętnicę, ale również z obciążeniami spowodowanymi ciśnieniem krwi wewnątrz naczynia krwionośnego.

### Literatura

1. Kokot G. i in., A project of bioresorbable self-expanding vascular stents. The crimping process numerical simulation. Proceedings of the 22nd International Conference on Computer Methods in Mechanics, Vol. 1, s. 070004-1 – 070004-6 (2018).
2. Zhao F. i in., Composite self-expanding bioresorbable prototype stents with reinforced compression performance for congenital heart disease application: Computational and experimental investigation, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 84, s. 126-134 (2018).
3. Torkia M. M., Hassanajilia S., Jalisib M. M., Design optimizations of PLA stent structure by FEM and investigating its function in a simulated plaque artery, Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 169, s. 103-116 (2020).
4. Wang Q. i in., Computational and experimental investigation into mechanical performances of Poly-L-Lactide Acid (PLLA) coronary stents, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 65, s. 415-427 (2017).
5. Yamawaki T. i in., Intramural delivery of a specific tyrosine kinase inhibitor with biodegradable stent suppresses the restenotic changes of the coronary artery in pigs *in vivo*, Journal of the American College of Cardiology, Vol. 32, s. 780-786 (1998).
6. Duprat G. i in., Self-expanding metallic stents for small vessels: an experimental evaluation, Radiology, Vol. 162, s. 361-367 (1987).

## APLIKACJA OPERATORA ROBOTA EKSPLOKACYJNEGO

**inż. MARCIN NAGI**

Automatyka i Robotyka, semestr I, 2 stopień

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Piotr Przyszałka, Prof. PŚ

dr inż. Wawrzyniec Panfil

**Streszczenie.** Projekt polegał na zaprojektowaniu oraz implementacji intuicyjnej aplikacji operatorskiej robota eksploracyjnego - łazika marsjańskiego *Phoenix II*. Projekt został zrealizowany w ramach działań studenckiego koła naukowego *Zastosowania metod sztucznej inteligencji AI – METH*. Zakres prac obejmował: przygotowanie makiet graficznych interfejsu użytkownika, dostosowanie koncepcji oprogramowania do istniejącego systemu komunikacji, wdrożenie oprogramowania i przeprowadzenie testów weryfikacyjnych.

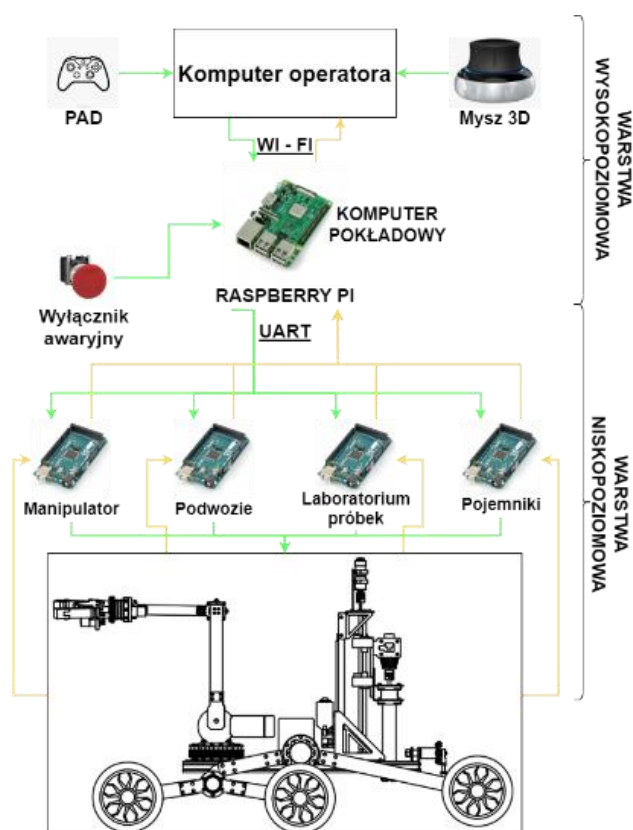


### OPERATOR'S CONTROL SOFTWARE FOR THE EXPLORATION ROBOT

**Abstract.** The purpose of the project was to design and implement an intuitive operator's control software for the exploration robot – Martian rover Phoenix II. The project was carried out as a part of activities of the interfaculty student research group “Applications of methods of artificial intelligence AI – METH”. The scope of work included: preparation of graphic user interface mockups, adaptation of the software concept to the existing communication system, implementation of the software and carrying out verification tests.

#### 1. Wprowadzenie

Łazik marsjański *Phoenix II* składa się z 4 głównych modułów: podwozia, manipulatora 5DOF wraz z chwytakiem, urządzenia do pobierania próbek gleby wraz z pojemnikami i systemu bezpieczeństwa. Schemat sterowania robota eksploracyjnego (Rys. 1) zawiera główną koncepcję komunikacji między modułami robota. Polecenia wydawane przez operatora zostają wysyłane do komputera pokładowego, a z niego trafiają do mikrokontrolera dla każdego z modułu, aby ostatecznie aktuatory modułu wykonały zadaną czynność. Moduły manipulatora, podwozia, laboratorium próbek oraz pojemników sterowany są za pomocą Arduino MEGA, natomiast system bezpieczeństwa to osobny program uruchomiony na Raspberry Pi, gdzie wykorzystany został moduł wejść - wyjść, w celu wyzwolenia hard stopu jak i reakcji na wciśnięcie czerwonego przycisku wyłącznika awaryjnego. Kolorem zielonym zaznaczono przepływ poleceń wydawanych przez operatora, natomiast kolor pomarańczowy ukazuje przepływ informacji zwrotnej.



Rys. 1. System sterowania robota eksploracyjnego  
 Fig. 1. Control scheme of exploration robot

## 2. Założenia

Aplikacja operatora powinna pozwalać na intuicyjne oraz przystępne sterowanie robotem. W celu zabezpieczenia robota przed niespodziewanym zaprzestaniem działania któregoś z modułów, zostały utworzone pojedyncze aplikacje do sterowania każdą częścią z osobna. Sterowanie robotem odbywa się z jednego komputera operatora. Wysyłanie oraz odbieranie informacji zostało zaimplementowane dzięki wykorzystaniu środowiska *Robot Operating System*. Wstępne szkice graficznego interfejsu użytkownika utworzone zostały przy pomocy programu *Balsamiq Mockups 3*. Do zaprojektowania docelowych okienek posłużył *QtDesigner* w wersji 5, zawierający podstawowe widżety. Oprogramowanie zostało napisane w języku *Python 3* z wykorzystaniem biblioteki *PyQt5* (nakładka na bibliotekę *Qt*). Zatem postanowiono, aby aplikacja operatora składała się z pomniejszych podaplikacji dla każdego z modułów robota. Taka decyzja została podjęta z uwagi na możliwość nieprzewidzianego zaprzestania działania okienka i utraty kontroli nad całym robotem. Rozproszenie aplikacji w przypadku niespodziewanego wyłączenia jednego okienka dla danego modułu zapewnia dalszą kontrolę nad pozostałą częścią robota. Każde okienko w zależności od wymagań charakteryzuje się innymi funkcjonalnościami.

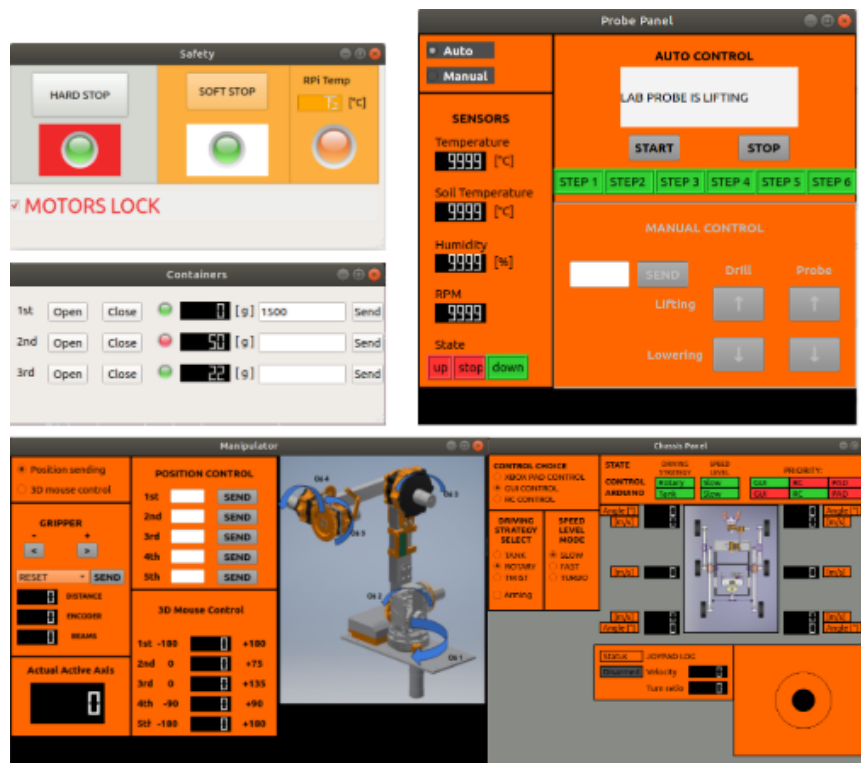
## 3. Opracowanie projektu aplikacji

Podczas rozwoju oprogramowania dla różnych zastosowań, w celu rozwiązania często występujących problemów z zakresu architektury oprogramowania, stosuje się wzorce architektoniczne struktury aplikacji. Utworzone oprogramowanie panelu operatorskiego

powstało w oparciu o wzorzec *Model-View-Controller* (MVC). Zastosowanie środowiska ROS do opracowania aplikacji należało do najbardziej istotnych etapów powstania oprogramowania, ponieważ oferuje ono sprawdzone, wydajne i łatwe do wdrożenia mechanizmy komunikacji w aplikacjach rozproszonych [1]. Wykorzystując wzorzec MVC dodano kolejny czynnik wpływający na obieg danych w aplikacji [2]. Dla prawidłowego działania i łączenia się środowiska ROS z właściwymi tematami wiadomości każde z okienek stanowi oddzielny węzeł. Węzeł ten jest zarówno nadawcą jak i odbiorcą [3]. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu największej zalety tego środowiska, mianowicie rozproszenia sieci. Nie jest wymagane, aby wszystkie dane musiały przejść przez *roscore*, tylko komunikują się na zasadzie modelu komunikacyjnego peer-to-peer. Nakładka *PyQt5* dzięki oferowanym funkcjom sygnałów i slotów bardzo prosto pozwala połączyć ze sobą nadawcę i odbiorcę z kontrolerem.

#### 4. Implementacja oprogramowania

W ramach projektu opracowano następujące aplikacje (Rys. 2): aplikacja podwozia, manipulatora, laboratorium próbek wraz z pojemnikami oraz aplikacja systemu bezpieczeństwa. Okna zawierają widżety wizualizujące poszczególne stany robota, wykonywane czynności, a także odczyty z czujników, takich jak potencjometry czy czujniki Halla itp. Ważnym zaprojektowanym widżetem był wirtualny joystick używany do sterowania podwoziem, który działał w ten sam sposób jak kontroler XBOX. Zmieniające się kolory podświetlenia etykiet i wskaźników lamp pozwoliły na płynną interpretację zdarzeń przez operatora.



Rys. 2. Okienka utworzonej aplikacji operatora  
 Fig. 2. Windows of the operator's control panel application

## 5. Weryfikacja

Ważnym etapem w rozwoju oprogramowania jest weryfikacja poprawności jego działania, która stanowi zwieńczenie wszystkich prac. W tym celu przeprowadzono szereg testów w celu ustalenia, czy przyjęte założenia zostały spełnione lub nie. Wymaga to zastosowania odpowiednich metodologii testów i przygotowania scenariuszy weryfikacji. Dla każdego interfejsu użytkownika przeprowadzono testy jednostkowe (przykładowe podano w Tab. 1) na podstawie przygotowanej listy kontrolnej zawierającej scenariusz testowy i oczekiwany wynik dla wszystkich widżetów i funkcjonalności. Drugim etapem było przeprowadzenie ogólnych testów w celu sprawdzenia opóźnień aplikacji, działania myszy 3D i niezawodności aplikacji. Zarówno testy jednostkowe, jak i test ogólny nie wykazały błędów. Opóźnienia nie były widoczne, a aplikacja działa niezawodnie.

Tabela 1. Przykładowe testy jednostkowe  
Table 1. Example of unit tests

L.p.	Opis	Oczekiwany rezultat	Wynik
1.	Kliknięcie przycisku <i>Position sending</i>	Wysyłanie wartości 2 typu UInt8 na topic <i>manipulator/controlChoice</i> . Włączenie ramki <i>POSITION CONTROL</i> .	Pozytywny
2.	Publikowanie wartości 0, typu ChassisState na topic <i>chassis/state - chassisMode</i> .	Zmiana napisu etykiety Arduino na <i>None</i> i koloru tła na szary.	Pozytywny

## 6. Wnioski

Zadaniem do rozwiązania w projekcie było opracowanie aplikacji operatora, która pozwala sterować robotem w intuicyjny i przystępny sposób. Powstała aplikacja operatora pozwala na realizację założonych początkowo funkcjonalności. Aplikacja działa szybko i jest niezawodna, ale nie jest całkowicie odporna na uszkodzenia. Przeprowadzone testy wykazały błędy powstałe w trakcie implementacji oprogramowania, natomiast dzięki temu, że aplikacja jest rozproszona na mniejsze moduły, zapobiega to całkowitemu wyłączeniu i utracie kontroli nad robotem.

## Literatura

1. Open Source Robotics Foundation, Documentation, <http://wiki.ros.org/>. (dostęp - 8.06.2020).
2. Jason M. O’Kane, A Gentle Introduction to ROS, 2013.
3. Wikipedia. Pattern model – view – controller. <https://en.wikipedia.org/wiki/Model-View-Controller>. (dostęp - 8.06.2020).

## MODELOWANIE I OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA WYBRANEJ STRUKTURY KOMPOZYTOWEJ

**inż. KRZYSZTOF NOWAK**

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Witold Beluch, prof. PŚ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono rozwiązanie zagadnienia wielokryterialnej optymalizacji struktury kompozytowej CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Workbench. Wykonano model struktury kompozytu warstwowego wzmocnianego tkaniną i przeprowadzono homogenizację numeryczną pojedynczej warstwy kompozytu. Następnie podjęto próbę ustalenia najbardziej korzystnej orientacji ułożenia warstw kompozytowych dla przyjętych kryteriów optymalizacji. Jako zmienne projektowe przyjęto kierunki ułożenia włókien węglowych w poszczególnych warstwach kompozytu.



### MODELING AND OPTIMIZATION OF SELECTED COMPOSITE STRUCTURE

**Abstract.** The paper presents a solution to the issue of multi-criteria optimization of CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) composite structure using ANSYS Workbench software. A model of the structure of the fabric-reinforced layered composite was made and numerical homogenization of a single layer of the composite was performed. Next, an attempt was made to determine the most advantageous orientation of the arrangement of composite layers for the assumed optimization criteria. The directions of carbon fibres in particular layers of the composite were assumed to be design variables.

#### 1. Wprowadzenie

Metody optymalizacji są nieodzownym narzędziem w racjonalnym projektowaniu, umożliwiając dobór odpowiednich własności materiałowych czy postaci konstrukcyjnej dając w efekcie optymalne lub suboptymalne rozwiązanie. W ogólności zadanie optymalizacji polega na znalezieniu optimum funkcji bądź funkcjonału spełniające zadane warunki ograniczające w pewnym obszarze rozwiązań dopuszczalnych. Kompozyty stanowią bardzo ważną grupę materiałów konstrukcyjnych. Ich łatwość kształtowania w połączeniu z potencjalnie wysokimi własnościami wytrzymałościowymi powodują, że wykorzystuje się je w wielu dziedzinach techniki. Projektując odpowiednio strukturę kompozytu, a w szczególności jego wzmocnienia, można w pewnym zakresie kształtować parametry wytrzymałościowe kompozytu.

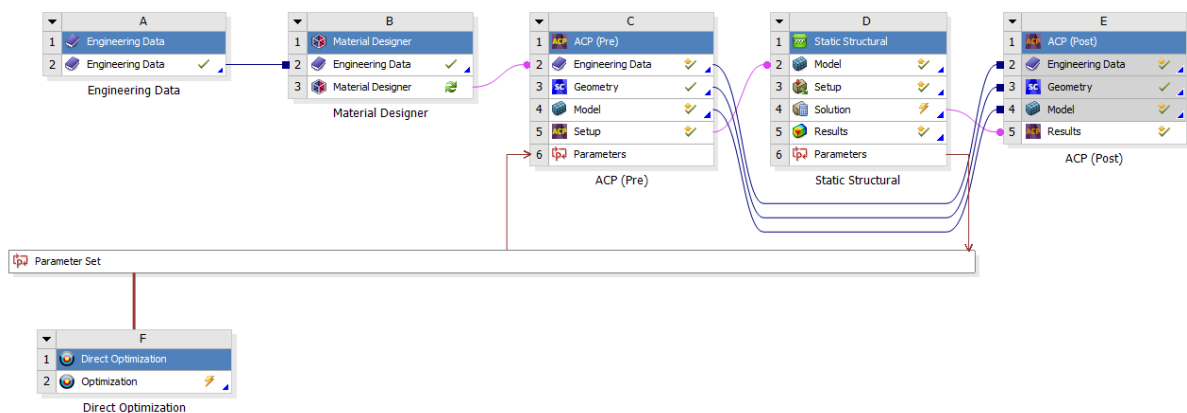
W niniejszej pracy wybraną strukturą kompozytową której optymalizacja została przeprowadzona z wykorzystaniem wielokryterialnego algorytmu ewolucyjnego, jest struktura wielowarstwowa składająca się z tkaniny z włókna węglowego w osnowie z żywicy epoksydowej. Celem pracy było znalezienie optymalnego ułożenia wzmocnienia w postaci tkaniny w poszczególnych warstwach kompozytu.

## 2. Oprogramowanie użyte w badaniach

Całość prac związanych z modelowaniem, homogenizacją numeryczną oraz optymalizacją wykonano z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Workbench 2019R3. W tym celu wykorzystano następujące moduły oprogramowania [1]:

- Material Designer – do wykonania modelu numerycznego struktury pojedynczej warstwy laminatu i przeprowadzenia homogenizacji numerycznej,
- Composite PrepPost (ACP) – do wykonania modelu całej struktury, w tym określenia liczby oraz kierunków ułożenia włókien w poszczególnych warstwach,
- Static Structural – do przeprowadzenia statycznej analizy wytrzymałościowej,
- Direct Optimization – do przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego.

Schemat wykorzystanych modułów przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat połączenia wykorzystanych modułów w programie ANSYS Workbench  
Fig. 1. Connection diagram for modules used in the ANSYS Workbench

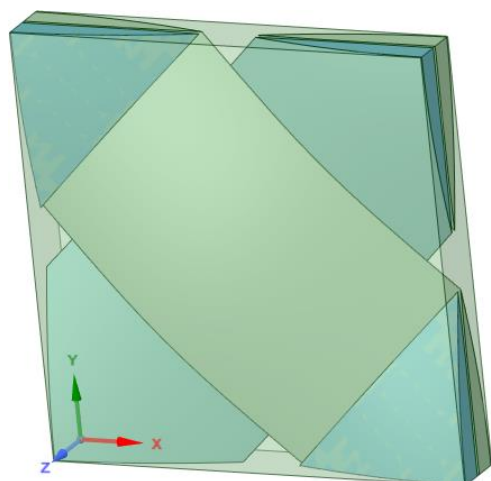
## 3. Numeryczna homogenizacja warstwy kompozytowej

W tabeli 2 zestawiono parametry materiałowe wzmocnienia oraz osnowy (kierunek  $x$  jest zgodny z osią włókna).

Tabela 1. Parametry materiałowe włókna węglowego i żywicy epoksydowej  
Table 1. Material parameters of carbon fiber and epoxy resin

Rodzaj materiału	Włókno węglowe	Żywica epoksydowa
	ortotropowy, liniowosprężysty	izotropowy, liniowosprężysty
Moduł Younga $E_x$ [GPa]	234	5.35
Moduł Younga $E_y$ [GPa]	15	
Moduł Younga $E_z$ [GPa]	15	
Współczynnik Poissona $n_{xy}$	0.279	0.354
Współczynnik Poissona $n_{xz}$	0.49	
Współczynnik Poissona $n_{yz}$	0.279	

W module Material Designer wykonano model struktury kompozytowej i dokonano numerycznej homogenizacji własności materiałowych. Rysunek 2 przedstawia model numeryczny wycinka struktury oraz wyniki w postaci efektywnych własności materiałowych pojedynczej warstwy kompozytowej.



a)

Name	Value	Unit
<b>Engineering Constant</b>		
E1	3,0213E+10	Pa
E2	3,0214E+10	Pa
E3	1,1317E+10	Pa
G12	2,5423E+10	Pa
G23	3,5615E+09	Pa
G31	3,5616E+09	Pa
nu12	0,53898	
nu13	0,24788	
nu23	0,24789	
<b>Fabric Fiber Angle</b>		
phi	45	degree

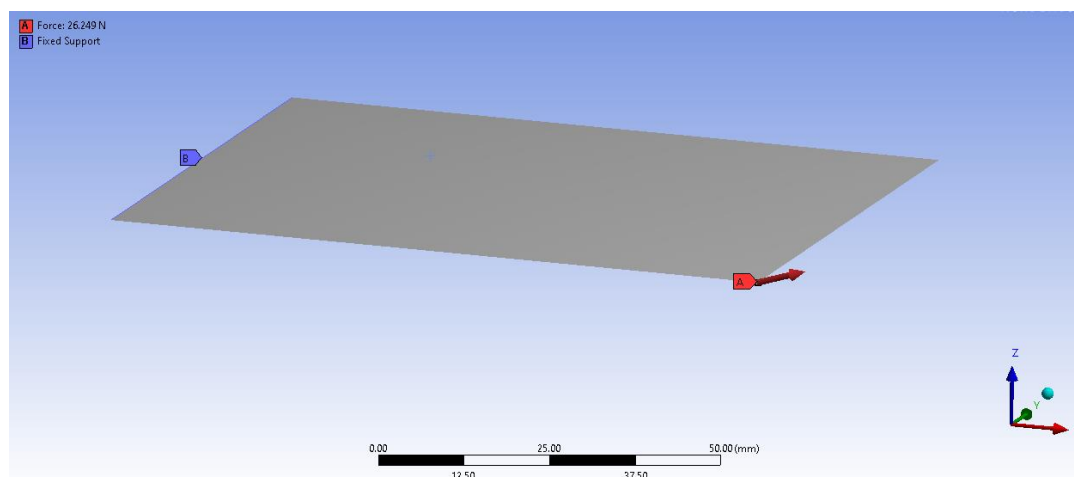
b)

Rys. 2. a) Model struktury warstwy pojedynczej kompozytu i b) wyniki homogenizacji dla warstwy kompozytowej otrzymane w module Material Designer

Fig. 2. a) Structure of the single composite layer and b) homogenisation results for composite layer obtained in the Material Designer module

#### 4. Optymalizacja wielokryterialna struktury kompozytowej

Rozpatrywano zadanie optymalizacji prostokątnej płyty kompozytowej o wymiarach 100x80x1 mm składającej się z 5 warstw 1-5 (numeracja od góry) o grubości 0.2 mm każda. Płyta została jednostronnie utwierdzona oraz obciążona siłą skupioną  $F$  o składowych  $F_x = 40$  N oraz  $F_z = 10$  N (Rys. 3). W module Direct Optimization spośród dostępnych algorytmów optymalizacyjnych wybrano MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) bazujący na algorytmie genetycznym NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) [2].



Rys. 3. Płyta kompozytowa: geometria i warunki brzegowe

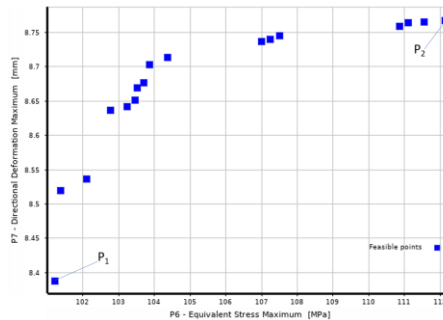
Fig. 3. The composite plate: geometry and boundary conditions

Zmiennymi projektowymi (genami) w algorytmie ewolucyjnym były kąty kierunków głównych tkaniny z włókna węglowego, mieszczące się w zakresie od 0 do 45° ze zmianą co 1° dla poszczególnych warstw kompozytu. Rozpatrywano następujące kryteria optymalizacji:

- i) minimalizacja maksymalnego naprężenia zredukowanego w płycie,
- ii) maksymalizacja maksymalnego przemieszczenia w płycie w kierunku osi z.



Przyjęto liczebność populacji równą 50 osobników. Jako kryterium zatrzymania przyjęto kryterium minimalnej szybkości poprawy w postaci 20 pokoleń bez poprawy rozwiązania. Pozostałe parametry algorytmu zostały przyjęte jako proponowane przez środowisko ANSYS. Wyniki optymalizacji w postaci frontu Pareto przedstawia rysunek 4. W tabeli 2 przedstawiono wartości funkcji celu i zmiennych projektowych dla skrajnych punktów ( $P_1$  i  $P_2$ ) frontu Pareto.



Rys. 4. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej – front Pareto  
Fig. 4. Multiobjective optimization results – Pareto front

Tabela 2. Wartości funkcji celu i zmiennych projektowych dla punktów  $P_1$  i  $P_2$   
Table 2. Values of objective functions and design variables for points  $P_1$  and  $P_2$

Punkt	$P_1$	$P_2$
Maksymalne napr. redukowane [MPa]	101.23	112.14
Maksymalne przem. $u_z$ [mm]	8.389	8.77
kąt w warstwie 1 [°]	29	30
kąt w warstwie 2 [°]	1	33
kąt w warstwie 3 [°]	36	31
kąt w warstwie 4 [°]	31	20
kąt w warstwie 5 [°]	42	28

## 5. Wnioski

Wyniki przedstawione w pracy pozwalają stwierdzić, że dobór odpowiednich kierunków osi włókien wypełniających poszczególnych warstw kompozytowych wpływa istotnie na własności wytrzymałościowe struktury. Za pomocą oprogramowania ANSYS Workbench można w prosty i przejrzysty sposób zamodelować strukturę kompozytową oraz wyznaczyć zastępcze własności materiałowe korzystając z wbudowanych w środowisko metod homogenizacji numerycznej.

Wykorzystanie metod optymalizacji globalnej, jakimi są algorytmy ewolucyjne, umożliwi znalezienie optymalnego ułożenia poszczególnych warstw materiału kompozytowego. Przewidywane jest zastosowanie przedstawionej procedury do rozwiązywania rzeczywistych problemów optymalizacji wielokryterialnej struktur kompozytowych w postaci laminatów wzmacnianych tkaninami, jak np. felgi samochodowe.

## Literatura

1. Dokumentacja środowiska ANSYS.
2. Deb K., Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, John Wiley & Sons (2001).

# WSPÓŁCZYNNIK PRZENIKANIA CIEPŁA DACHÓW DREWNIANYCH W DOMACH JEDNORODZINNYCH

inż. KRZYSZTOF OKÓLSKI

Automatyka i Robotyka, semestr VII, 1 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Grażyna Kałuża

**Streszczenie.** W artykule rozpatrywano zagadnienie dotyczące obliczania współczynnika przenikania ciepła w przegrodach dachowych. Przedstawiono różne możliwości zastosowania izolacji i sposób szybkiego obliczania analizowanego współczynnika za pomocą kalkulatora stworzonego w programie Microsoft Excel. W końcowej części artykułu dokonano analizy porównawczej różnych sposobów izolacji, czyli zilustrowano różnicę wartości współczynników przenikania ciepła dla różnych materiałów.



## THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF WOODEN ROOFS IN SINGLE-FAMILY HOUSES

**Abstract.** In the article was considered the issue of calculating the heat transfer coefficient in roof partitions. There were presented various possibilities of applying insulation and a method of quick calculation of the analyzed coefficient using a calculator created in Microsoft Excel. In the final part of the article was carried out a comparative analysis of different insulation methods, i.e. there was illustrated the difference in the values of heat transfer coefficients for different materials.

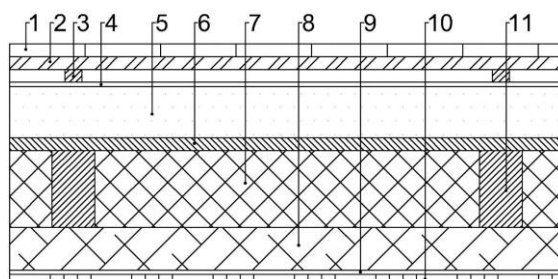
### 1. Wprowadzenie

Współczynnik przenikania ciepła dachów drewnianych w domach jednorodzinnych jest bardzo istotny. Jest to najważniejszy parametr, którego używa się do określania izolacji termicznej przegrody. Im parametr jest niższy tym lepsza jest izolacyjność. Maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła  $U$  dla dachów wynosi obecnie  $0,18 [W/(m^2 \cdot K)]$ .

Przez źle ocieplony dach ucieka bardzo dużo ciepłego powietrza. Aby dach był dobrze ocieplony, przegroda dachowa musi spełniać odpowiednie normy. Należy wówczas określić, jaki materiał izolacyjny wybrać i o jakiej grubości. Nie jest to łatwe do wyznaczenia, ponieważ występuje wiele zależności i etapów obliczeniowych. Dlatego stworzony został program narzędziowy, który w łatwy sposób umożliwia użytkownikowi wprowadzenie potrzebnych danych i otrzymanie wartości współczynnika  $U$  dla danej przegrody.

### 2. Budowa przegrody dachowej

Przegroda dachowa składa się z wielu warstw. Na rysunku 1 jest przedstawiona budowa przegrody dachu drewnianego z krokiewiami dla trzech możliwych rodzajów izolacji. W tej przegrodzie występuje warstwa niejednorodna.



Rys. 1. Budowa przegrody dachowej  
Fig. 1. Construction of a roof partition

Oznaczenia:

- 1 – pokrycie dachu, 2 – łąty, 3 – kontrłąty, 4 – folia paroprzepuszczalna, 5 – materiał izolacyjny pierwszy, 6 – deskowanie, 7 – materiał izolacyjny drugi, 8 – materiał izolacyjny trzeci, 9 – folia paroizolacyjna, 10 – płyta karton-gips, 11 – krokwie.

Wyróżniamy trzy rodzaje ocieplenia dachu:

- **Izolacja nakrokwkowa** – znajduje się od strony zewnętrznej dachu, układana jest na deskowaniu lub na specjalnych deskach montażowych.
- **Izolacja międzykrokwkowa** – umieszczana jest pomiędzy krokiewiami, wykorzystując wolną przestrzeń między nimi.
- **Izolacja podkrokwkowa** – znajduje się od strony wewnętrznej dachu, umieszcza się ją zaraz pod krokiewiami.

Aby izolacja dobrze spełniała swoją rolę, należy wybrać odpowiedni materiał izolacyjny. Istnieje wiele materiałów izolacyjnych, najczęściej wykorzystywane to wełna mineralna, styropian, pianka poliuretanowa lub płyta PIR. Podczas wyboru materiału izolacyjnego kierujemy się wieloma czynnikami, jednak najistotniejszym parametrem jest współczynnik przewodzenia ciepła materiału  $\lambda$ . Im niższy współczynnik tym materiał jest lepszym izolatorem [1]. W tabeli 1 przedstawiono materiały izolacyjne wraz z wartościami współczynnika przewodzenia ciepła.

Tabela 1. Materiały izolacyjne i ich współczynniki  $\lambda$   
Table 1. Insulation materials and their coefficients  $\lambda$

<i>Materiał izolacyjny</i>	<i>Współczynnik <math>\lambda</math> [W/(m·K)]</i>
Wełna mineralna skalna	0,035
Wełna mineralna szklana	0,033
Styropian ekspandowany EPS	0,036
Styropian grafitowy	0,030
Styropian ekstrudowany XPS	0,032
Pianka poliuretanowa otwarto-komórkowa	0,038
Pianka poliuretanowa zamknięto-komórkowa	0,024
Płyta PIR	0,023

Współczynnik przenikania ciepła  $U$  wyrażony jest następującym wyrażeniem:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

gdzie  $R_T$  to całkowity opór cieplny.

Obliczanie całkowitego oporu cieplnego dachów drewnianych jest skomplikowane i wymaga wielu etapów obliczeń. Spowodowane jest to występowaniem warstwy niejednorodnej, czyli warstwy dachu w miejscu występowania krokwi.

### 3. Narzędzie obliczeniowe

W programie autorskim wykorzystano materiały izolacyjne i ich współczynniki przewodzenia ciepła  $\lambda$ , które wybiera się z listy rozwijanej. Użytkownik dokonuje wyboru, które warstwy występują w jego przegrodzie. Następnie wybiera jeden materiał do dalszych obliczeń. W podobny sposób podaje grubość materiału izolacyjnego. Po wypełnieniu wszystkich danych i po wciśnięciu przycisku „Oblicz” pojawi nam się wynik dla uzupełnionych danych [2]. Na rysunku 2 przedstawiono okno programu dla przykładowych danych.

Reset	Podaj szerokość przegrody I [cm] Zakres: (0-200)	100	Oblicz
	Podaj szerokość krokwi II [cm] Zakres: (1-40)	10	
	Podaj grubość krokwi III [cm]	20	
Materiał izolacyjny 1	Materiał izolacyjny 1 - brak		
Materiał izolacyjny 2	Wybierz materiał izolacyjny 2	Współczynnik $\lambda$ [W/mK]	Podaj grubość materiału izolacyjnego d2=dk [cm]
	Włna mineralna szklana	0,083	20
Materiał izolacyjny 3	Materiał izolacyjny 3 - brak		
Płyta karton-gips	Płyta karton-gips	Współczynnik $\lambda$ [W/mK]	Podaj grubość d4 [cm]
		0,25	1,2
Deskowanie	Deskowanie		

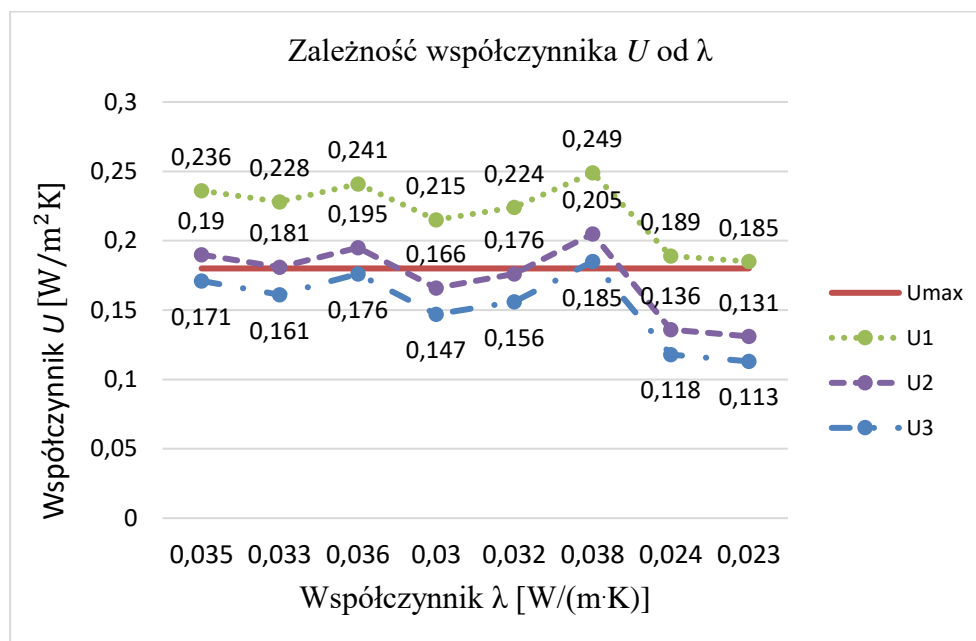
Współczynnik przenikania ciepła dla przegrody dachowej wynosi	0,225 [W/m <sup>2</sup> K]	Przegroda nie spełnia wymagań
Maksymalny współczynnik przenikania ciepła dla przegrody dachowej wynosi	0,18 [W/m <sup>2</sup> K]	

Rys. 2. Program po uzupełnieniu danych  
Fig. 2. The program after completing the data

Na podstawie stworzonego programu, przeprowadzono analizę porównawczą. Przedstawiono jak zmienia się współczynnik przenikania ciepła w zależności od zastosowania różnych rodzajów izolacji oraz jak wpływa na zmianę współczynnika  $U$  wartość współczynnika  $\lambda$ . Na rysunku 3 zostały wygenerowane wartości współczynnika przenikania ciepła dla określonych danych. „U<sub>max</sub>” oznacza maksymalną wartość współczynnika dla dachów. „U<sub>1</sub>” dotyczy warstwy niejednorodnej, znajdującej się pomiędzy krokiewiami - grubość materiału izolacyjnego wynosi 20 [cm]. „U<sub>2</sub>” przedstawia połączenie dwóch rodzajów warstw: warstwy jednorodnej i niejednorodnej, każda po 10 [cm] grubości, natomiast „U<sub>3</sub>” ukazuje wyniki dla warstwy jednorodnej, której grubość wynosi również 20 [cm].

Po przeprowadzonej analizie można stwierdzić, że izolacja składająca się z warstwy jednorodnej jest lepsza niż z warstwy niejednorodnej. Wynika to z występowania krokwi, które mają wyższy współczynnik przewodzenia ciepła niż materiał izolacyjny. Krokwie wpływają w ten sposób negatywnie na izolacyjność przegrody, podnosząc współczynnik przenikania ciepła. To przez nie ucieka najwięcej ciepła. W przypadku przegrody jednorodnej ten problem nie występuje. Materiał izolacyjny umieszczony jest na całej szerokości. Gwarantuje on w ten

sposób niższą wartość  $U$ . Dobrym sposobem jest łączenie obu rodzajów izolacji. Poprawia to znacząco izolacyjność przegrody, wykorzystując przy tym wolną przestrzeń między krokwiemi.



Rys. 3. Analiza porównawcza  
Fig. 3. Comparative analysis

#### 4. Podsumowanie

Współczynnik przenikania ciepła to najważniejszy parametr określający izolacyjność cieplną przegrody. Wpływa na niego zastosowany rodzaj izolacji, materiał izolacyjny i grubość materiału.

Obliczanie współczynnika przenikania ciepła korzystając z aplikacji stworzonej przez Autora umożliwi o wiele szybsze sprawdzenie, czy przegroda o określonych danych spełnia wymagania termoizolacji. W programie możemy w każdej chwili zmieniać dane i obserwować jak wpływają one na końcowy wynik. W przypadku obliczania konwencjonalnego nie mamy takiej możliwości. Trzeba dla każdego przykładu przeprowadzać obliczenia osobno.

Używając programu, użytkownik może tworzyć dowolne konfiguracje przegród dachowych zbudowanych z różnych rodzajów izolacji. Stosując przy tym materiały izolacyjne o różnych współczynnikach przewodzenia ciepła i o różnych właściwościach.

Im materiał izolacyjny posiada niższy współczynnik przewodzenia ciepła tym jest lepszym izolatorem. Pozwala to stosować materiały izolacyjne o mniejszej grubości zachowując dobre własności izolacyjne przegrody.

#### Literatura

1. PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
2. Excel: tworzenie zaawansowanych aplikacji / Sergiusz Flanczewski. - Gliwice : Wydawnictwo Helion, cop. 2012.

## MODERNIZACJA MANIPULATORA ROBOTA EKSPLOKACYJNEGO

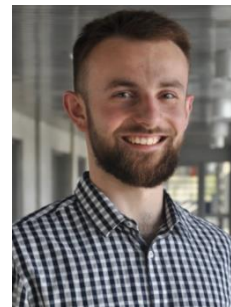
inż. PRZEMYSŁAW OLSZÓWKA

Automatyka i Robotyka, semestr I, 2 stopień

Opiekunowie naukowci: dr hab. inż. Piotr Przyszałka, Prof. PŚ

dr inż. Wawrzyniec Panfil

**Streszczenie.** Celem projektu było usprawnienie manipulatora robota eksploracyjnego przygotowanego z myślą o starcie w studenckich zawodach łazików marsjańskich. Zdobyte doświadczenie podczas debiutu na zawodach, a także zmiany regulaminowe zaowocowały koniecznością przeprowadzenia modernizacji dotychczasowej konstrukcji, co przedstawiono w niniejszym artykule.



## MODERNIZATION OF MANIPULATOR FOR EXPLORATION ROBOT

**Abstract.** The aim of the project was to improve the manipulator of an exploratory robot prepared for the students rover competitions. The experience gained during the debut at the competition, and new rules made it necessary to carry out modernization the existing structure, presented in this paper.

### 1. Wprowadzenie

Wiek dwudziesty jest punktem zwrotnym w historii ludzkości w kategoriach eksploracji przestrzeni kosmicznej. Intensywne prace wielu krajów nad rozwiązaniami w zakresie badań kosmosu zaowocowały wieloma zaawansowanymi wynalazkami. Obserwacje astronomiczne z powierzchni Ziemi pozwalają na odkrywanie gwiazd i planet, a także na wysuwanie wielu ważnych teorii. Kolejnym krokiem w poznawaniu otaczającego naszą planetę wszechświata jest bezpośrednio badanie obiektów niebieskich. Z tego powodu przez okres ostatnich 60 lat przeprowadzono wiele misji kosmicznych. Wiązały się one z opracowaniem rakiet, specjalistycznych kapsuł i systemów dla ludzkiego funkcjonowania w przestrzeni kosmicznej. Odległe misje kosmiczne w niezbadane przestrzenie pozaziemskie wiążą się z ogromnym ryzykiem i niebezpieczeństwem. Załogowe, odległe loty kosmiczne mają zarówno swoich zwolenników jak i przeciwników<sup>[1]</sup>. Przed wysłaniem ludzi na odległą planetę, konieczne jest zebranie informacji o środowisku i warunkach panujących w danym miejscu. Z tego powodu koniecznym było opracowanie samobieżnych robotów mobilnych, pozwalających na samodzielną eksplorację nieznanymi obszarów. W celu przybliżenia idei budowy łazików, zrodziła się inicjatywa konkursów dla studentów takich jak European Rover Challenge i University Rover Challenge. Studenci mogą konkurować z prototypami opracowanymi przez najmłodszych naukowców z uniwersytetów podczas zadań symulujących warunki marsjańskie.

## 2. Pierwszy prototyp manipulatora

Zespół Silesian Phoenix<sup>[2]</sup> opracował pierwszy prototyp robota w ramach swojego debiutu w konkursie European Rover Challenge 2018. Prototyp składał się z samojezdnej, mobilnej platformy gąsienicowej, prototypu manipulatora oraz laboratorium próbek. Każdy z elementów robota miał precyzyjnie zdefiniowane zadania do wykonania. Opracowane ramię robota było przeznaczone do wykonywania czynności manipulacyjnych na panelu operatora, podnoszenie i przenoszenie próbek oraz wykonywanie otworów w glebie. Pierwszy prototyp manipulatora został opracowany na podstawie gruntownej analizy regulaminu dotyczącego konkurencji. Konstrukcja miała 5 stopni swobody, umożliwiając wykonywanie wszystkich niezbędnych czynności manipulacyjnych. Rama została wykonana z grubościennego profilu aluminiowego, który gwarantował odpowiednią sztywność i wytrzymałość. Do napędzania poszczególnych osi wykorzystano silniki szczotkowe prądu stałego. W celu zapewnienia odpowiedniego momenty i prędkości ruchu poszczególnych osi, zostały zastosowane odpowiednie gotowe przekładnie lub opracowano własne prototypy. Kluczową kwestią napędów było również gwarantowanie samohamowności przekładni. Wśród rozwiązań napędu wykorzystano siłownik liniowy, który był odpowiedzialny za napęd trzeciej osi. Węzeł pierwszej i piątej osi opierał się o gotowe rozwiązanie przemysłowe, pracujące na łożyskach ślizgowych. Pozostałe węzły łożyskowe wykonane zostały z frezowanych elementów aluminiowych, giętych blach oraz elementów drukowanych 3D, również z wykorzystaniem łożysk ślizgowych. System elektryczny obejmował zasilanie 5V i 12V przeznaczone odpowiednio dla części logicznej oraz układów mocy. Głównym układem sterowania był mikrokontroler STM32 Nucleo. Układ sterowania zakładał wykorzystanie środowiska Robot Operating System do zdalnego sterowania całego robota. Ramię robota ważyło 18kg.

## 3. Główne założenia dotyczące modernizacji prototypu

Opracowany projekt pozwolił na start w pierwszej edycji konkursu. Udział w zawodach zaowocował wieloma nowymi spostrzeżeniami i cennymi doświadczeniami. W celu zmodernizowania istniejącego prototypu, zostały opracowane główne założenia konstrukcyjne (Tabela 1).

## 4. Identyfikacja potrzebnych zmian

Na podstawie zdobytych doświadczeń wyciągnięto wnioski dotyczące niezbędnych zmiany w konstrukcji prototypu:

- Zmniejszenie wagi ramienia poprzez wymianę głównych profili konstrukcyjnych na lżejsze. Ciężkie rozwiązania dedykowane dla urządzeń przemysłowych muszą być zastąpione lżejszymi odpowiednikami. Wymiana ciężkich i dużych silników pierwszej i drugiej osi na mniejsze, współpracujące z odpowiednimi przekładniami.
- Zwiększenie zakresu ruchu trzeciej osi, wiążące się z opracowaniem nowego, samohamownego napędu.
- Ujednoczenie systemu zasilania do 12V dla napędów i 5V dla elektroniki.

- Opracowanie alternatywnego, dodatkowego systemu sterowania, pozwalającego na wykonywanie ruchów manipulacyjnych bez konieczności uruchamiania całej sieci ROS.
- Zastosowanie jednolitego systemu łącz gwarantującego bezpieczną i pewną pracę, a także standardu komunikacji pomiędzy głównym komputerem pokładowym robota, a układem sterowania chwytakiem
- Opracowanie nowego algorytmu sterowania na platformie Arduino Mega i zintegrowanie jej z nowym systemem sieci ROS.

Tabela 1. Założenia w zakresie konstrukcji manipulatora  
Table 1. Assumptions on the design of the manipulator

Założenia		
Parametr	Wartość	Uzasadnienie
Obciążenie	1,2-2kg (bez chwytaka)	Potrzeba podniesienia koszyka z 4 próbkami podczas zadania „Collection Task”
Przestrzeń robocza	-0,1 do 1,5m (w płaszczyźnie pionowej)	- Obsługa panelu operatora w zakresie wysokości 0,4m do 1,5m - Wykonanie rowu o głębokości 10cm
	360 stopni zakresu pracy w płaszczyźnie poziomej	Pobranie próbki zarówno z przodu łazika jak i z boku robota oraz umieszczenie ich w dedykowanych pojemnikach na robocie
	Mobilność	Szeroki zakres ruchu kątownego dla każdej z osi, możliwość pracy na zarówno w pełni wyprostowanym ramieniu jak i maksymalnie złożonym
Masa całkowita	Max 12kg	Masa całkowita łazika nie powinna przekraczać 50kg
Zasilanie	Elektryczne, max 22V	Wykorzystanie 22V akumulatora, oraz przetwornic 12V i 5V
System sterowania	Kinematyka prosta	Konieczność opracowania algorytmu do sterowania manipulatora, informującego operatora o aktualnej pozycji chwytaka.

## 5. Zmodernizowany prototyp manipulatora

Nowa koncepcja manipulatora powinna ważyć poniżej 12 kg. W celu zmniejszenia wagi, postanowiono użyć sklejk drewnianej do budowy głównej konstrukcji ramy ramienia. Elementy wykonane z aluminium zostały zastąpione elementami drukowanymi z tworzyw sztucznych. Silnik pierwszej osi został zastąpiony przez mniejszy silnik z dodatkową, opracowaną przekładnią. Liniowy siłownik został użyty do napędu drugiej osi. Przekładnia ślimakowa wykonana z Nylonu i ABS jest odpowiedzialna za napęd trzeciej osi. Wymianie uległ również silnik czwartej osi, na odpowiednio mocniejszy. Trzeci człon manipulatora, którym był wykonany z blach aluminiowych, w nowej koncepcji został wykonany z wydrukowanych elementów.

W przygotowanym układzie sterowania zastosowano algorytm kinematyki prostej, pozwalający na łatwe kontrolowanie położenia końca chwytaka w przestrzeni. W pętli sprzężenia zwrotnego wykorzystano wyłączniki krańcowe i potencjometry. Prototyp może być kontrolowany za pomocą komunikacji szeregowej UART lub z użyciem Bluetooth i przygotowanej aplikacji, która została opracowana w oprogramowaniu MIT App Inventor.<sup>[3]</sup>





Rys. 1. Zmodernizowany prototyp manipulatora  
Fig. 1. Modernized manipulator prototype

## 6. Testy weryfikacyjne

Testy weryfikacyjne zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym kroku sprawdzono poprawność funkcjonowania poszczególnych elementów: napędów, układu elektronicznego oraz systemu sterowania. Po przeprowadzeniu testów jednostkowych, działanie prototypu zostało sprawdzane podczas wykonywania zadań symulujących zawody. Sprawdzono wymaganą nośność poprzez uniesienie 2kg ciężaru. W następnym kroku zweryfikowano dokładność pozycjonowania poprzez wykonanie sekwencji ruchów każdej z osi, a następnie powrót do początkowych pozycji kątowych. Dokładność pozycjonowania końca manipulatora wynosi około 1-2cm. Zgodnie z założeniami, manipulator może wykonywać czynności manipulacyjne za pomocą chwytaka w zakresie od -25cm do 130cm względem poziomu gruntu oraz dla 360 stopni obrotu względem pierwszej osi.

## 7. Podsumowanie

Nowy prototyp manipulatora waży 10 kg, co stanowi prawie połowę wagi początkowej przed jego modernizacją. Konstrukcja jest lekka i solidna. Układy napędowe generują odpowiedni moment obrotowy i zapewniają właściwą prędkość ruchu. Mechanizmy te wymagają jednak dopracowania w zakresie dokładności ruchu i luzów w przekładni. Wykonany układ elektroniczny zapewnia prawidłową pracę, bez niepożądanych zakłóceń i zawieszenia się komunikacji. Opracowana aplikacja sterująca działa z lekkim opóźnieniem, ale pozwala na swobodną kontrolę ramieniem robota. Algorytm sterowania pozycją manipulatora powinien zostać zmodyfikowany. Konieczne jest zastosowanie enkoderów w celu zwiększenia dokładności odczytu pozycji oraz zastosowania regulatorów typu PID. Wykorzystanie sklejk drewnianej jako głównego elementu konstrukcyjnego znacznie zmniejszyło sztywność konstrukcji dla momentów skręcających, jednak zastosowane dodatkowych, drukowanych wzmocnień wystarczająco rozwiązało ten problem.

## Bibliografia

- [1] Richard Wagner Robert Zubrin. The case for mars. The Plan to Settle the Red Planet and Why We Must, Simon Schuster, 1997.
- [2] <https://sknaimeth.polsl.pl/lazik-marsjanski/> dostęp 23.02.2020
- [3] <https://appinventor.mit.edu/> dostęp 23.02.2020

## OPRACOWANIE ALGORYTMU OPTIMALIZACJI GLOBALNEJ TYPU FIREWORKS ALGORITHM

**inż. PAWEŁ PAŹDZIOR,**

Inżynieria Mechaniczna, semestr VI, 3 stopień

FX Carbonelements Sp. z o.o., Wilkowice

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ



**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy jest prezentacja opracowanego algorytmu fajerwerkowego (ang. Fireworks Algorithm) - algorytmu optymalizacji w sensie globalnym - stosowanego w celu przeszukiwania przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań dla znajdowania ekstremów globalnych funkcji. Algorytm ten należy do grupy heurystycznych algorytmów optymalizacji.

### DEVELOPMENT OF GLOBAL OPTIMIZATION FIREWORKS ALGORITHM

**Abstract.** The main purpose of this work is to present the Fireworks Algorithm developed for global optimization - used to search the space of permissible solutions for finding extremes of global functions. This algorithm belongs to the group of heuristic optimization algorithms.

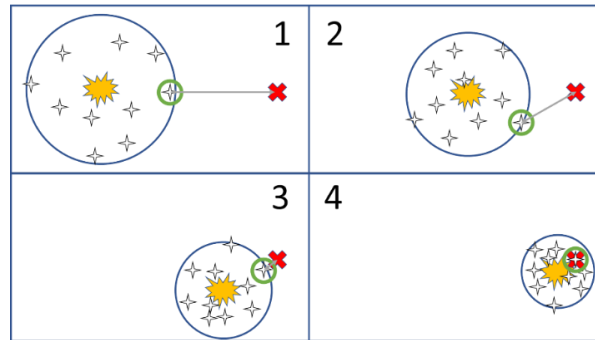
#### 1. Wprowadzenie

Od początku rozwoju informatyki znane są próby zastosowań heurystycznych algorytmów optymalizacji. Szczególnie pozytywne efekty dały algorytmy oparte o obserwacje zjawisk zachodzących w naturze, które pozwalają na efektywniejsze rozwiązanie złożonych problemów inżynierskich. Symulują one zachowania danych przedstawicieli fauny przy poszukiwaniu pożywienia, przewodzeniu stada, przekazywaniu informacji itp. W zastosowaniach numerycznych algorytmy te są oparte o generatory liczb pseudolosowych i probabilistyczne reguły wyborów co czyni je zdolnymi do znajdowania ekstremów globalnych z dużym prawdopodobieństwem. Ich zastosowanie pozwala ograniczyć konieczną ilość wykonanych operacji w celu znalezienia poszukiwanego rozwiązania.<sup>[1]</sup>

W poszukiwaniach lepszych rozwiązań poddano analizie nie tylko zjawiska zachodzące w dzikiej naturze, ale również inne podlegające mechanizmom losowości. Jednym z bardziej interesujących zjawisk jest eksplozja, w tym przypadku oparta na rozbłysku sztucznych ogni (ang. fireworks). W przypadku sztucznych ogni pojedyncza eksplozja generuje wiele małych rozbłysków (iskier), a ich rozkład jest podobny do algorytmów bio-inspirowanych i charakteryzuje się pseudolosowością.

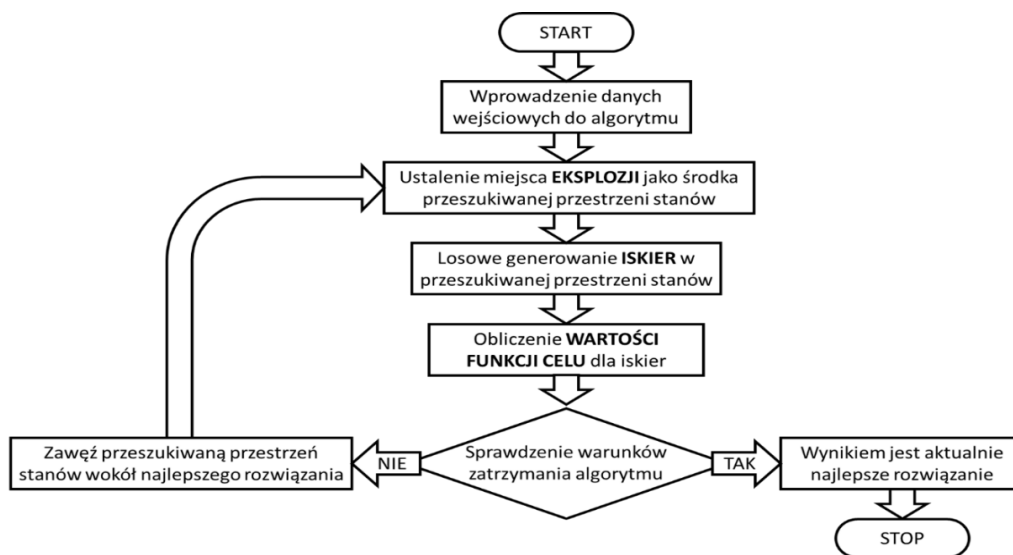
#### 2. Algorytm fajerwerkowy (FA)

W algorytmie typu FA eksplozja odpowiada jednej iteracji algorytmu w której to iskry rozchodzą się promieniście od źródła. W kolejnej iteracji algorytmu (nowa eksplozja) w miejscu, gdzie znajdowała się najlepsza z iskier następuje kolejna eksplozja i sytuacja się powtarza (rys. 1).<sup>[2][3]</sup>



Rys. 1. Uproszczona wizualizacja działania algorytmu  
Fig. 1. Algorithm simplified visualization

Zgodnie ze schematem blokowym przedstawionym na rys. 2 na początku należy określić funkcję celu (wraz z ilością zmiennych projektowych  $X$ ), przedziały zmienności i kroki dyskretyzacji każdego  $X$ , ograniczenia i zależności, warunki zatrzymania algorytmu i parametry sterujące:  $A$  – stopień zawężenia przedziału zmienności zmiennych  $X$ ,  $R$  – prawdopodobieństwo wylosowania wartości danego  $X$  spoza zawężonego przedziału zmienności (ale mieszczącego się w ograniczeniach) oraz  $I$  – liczba iskier powstających w czasie eksplozji (ilość wywołań funkcji celu w czasie jednej iteracji).



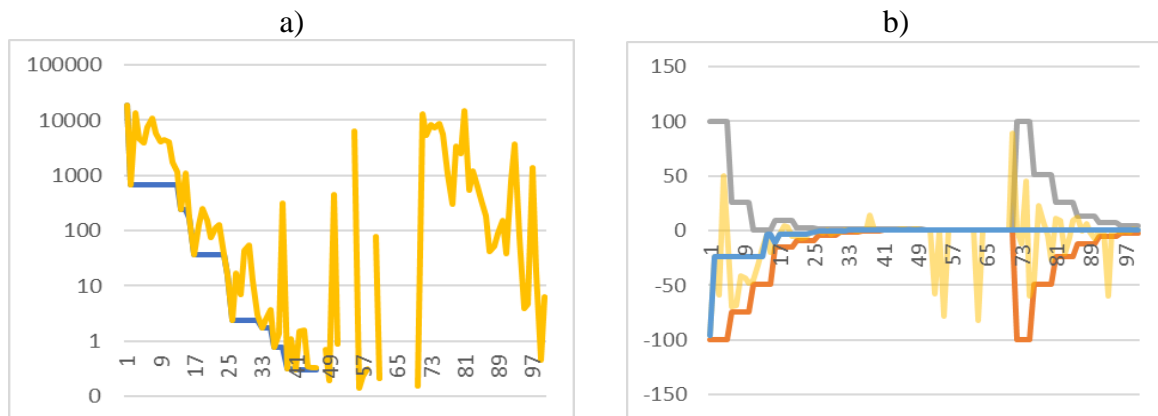
Rys. 2. Schemat działania FA.  
Fig. 2. FA flowchart.

Kolejnym krokiem jest określenie przedziału zmienności każdego  $X$ . Następnie przy użyciu generatora liczb pseudolosowych losuje się zestaw zmiennych  $X$  dla każdej z  $I$  iskier i następuje obliczenie funkcji celu.

Kolejną pozycją schematu jest blok warunkowy – sprawdzenie czy osiągnięto którykolwiek z warunków zatrzymania algorytmu. Jeśli „TAK”, to zestaw zmiennych projektowych  $X$  z najlepszego rozwiązania jest ostatecznym rozwiązaniem. Jeżeli „NIE”, algorytm rozpoczyna kolejną iterację zawężając przestrzeń stanów wokół najlepszego rozwiązania.

Przykładowe wykresy przebiegu zmienności  $X$  od ilości wywołań funkcji celu obrazują sposób przeszukiwania przestrzeni i zawężania amplitudy. Na rys. 3a przedstawiono wartości

funkcji celu zmieniające się wraz z kolejnymi iteracjami (żółty) oraz aktualnie najlepsze rozwiązanie (niebieski) w skali logarytmicznej. Rys. 3b prezentuje zmienność wartości X1 w tej samej dziedzinie (żółty) i wartość X przy której została osiągnięta najlepsza wartość funkcji celu (niebieski) oraz zawężającą się amplitudę (szary i pomarańczowy). Od połowy wykresu 3b można zauważyć iskry spoza zawężonej amplitudy. Dalej widoczny jest charakterystyczny skok dopuszczalnej amplitudy X1. Mocne zawężenie amplitudy X, spowodowało, że niemożliwe było uzyskania nowych rozwiązań. W takiej sytuacji, by uniemożliwić utknięcie w optimum lokalnym maksymalizuje się przedział zmienności.

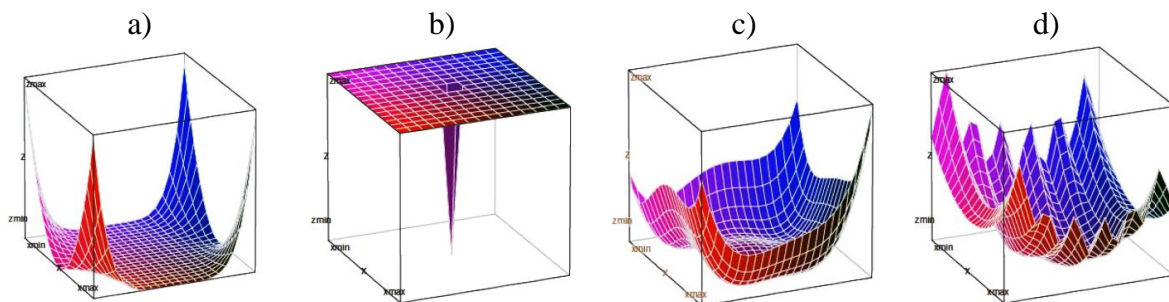


Rys. 3. Wykresy: a) wartości funkcji celu, b) wartości X1  
 Fig. 3. Plot a)  $f(X)$ , b) value of X

### 3. Przykładowe funkcje testowe

W celu prezentacji skuteczności działania algorytmu posłużono się następującymi funkcjami testowymi (rys. 4):

a) Beale'a, b) Easoma, c) Himmemblau, d) Levy'ego,<sup>[4]</sup> e) Rastrigina,<sup>[5]</sup> f) Sphere Model, g) Step Function.<sup>[6]</sup>



Rys. 4. Wizualizacje funkcji: a) Beale'a, b) Easoma, c) Himmemblau, d) Levy'ego.<sup>[4]</sup>  
 Fig. 4. Function of: a) Beale, b) Easom, c) Himmelblau, d) Levy.<sup>[4]</sup>

### 4. Wyniki obliczeń

Dobry algorytm optymalizacji powinien uzyskiwać wynik przy jak najniższej liczbie wywołań funkcji celu i znajdować optimum globalne z dużym prawdopodobieństwem. Opracowany algorytm przy odpowiednio dużej liczbie iteracji skutecznie znajduje ekstremum globalne, a dzięki odpowiednio dobranym parametrom możliwa jest minimalizacja liczby wywołań funkcji celu, co automatycznie skraca czas obliczeń. Prezentowane w tabeli 1

wyniki obliczeń odnoszą się do średnich uzyskanych na podstawie 10 kolejnych uruchomień algorytmu działającego aż do osiągnięcia optimum globalnego z podaną dokładnością. Wyniki zostały porównane do wyników osiągniętych przy zastosowaniu algorytmu genetycznego AIGen.<sup>[4][5][6]</sup>

Tabela 1. Wyniki obliczeń  
Table 1. Results of calculation

Funkcja	Zakres $x_i$	Dyskretyzacja X	Ilość X	Dokładność rozwiązania	A	R	I	Wywołan f. celu	
								FA	AIGen
Beale'a	(-4,5; 4,5)	0,01	2	0,1	0,33	0,83	12	80	94 <sup>[4]</sup>
Easoma	(-10; 10)	0,01	2	0,01	0,35	0,97	15	124	135 <sup>[4]</sup>
Himmemblau	(-6; 6)	0,01	2	0,1	0,47	0,78	6	40	89 <sup>[4]</sup>
Levy'ego	(-10; 10)	0,01	2	0,1	0,32	0,37	5	91	102 <sup>[4]</sup>
Rastrigin	(-5,12; 5,12)	0,1	5	0,1	0,21	0,01	68	1750	2250 <sup>[5]</sup>
Sphere model	(-5,12; 5,12)	0,001	10	0,001	0,91	0,23	6	654	443 <sup>[6]</sup>
Step Function	(-5,12; 5,12)	1	100	0,1	0,15	0,7	26	35	1120 <sup>[6]</sup>

## 5. Wnioski

Prace są prowadzone w kierunku optymalizacji parametrów procesów technologicznych charakteryzujących się często dużą ilością zmiennych o małej amplitudzie zmienności i dużej liczbie dodatkowych zależności. Analizując uzyskane wyniki dla przykładu o takiej charakterystyce zaobserwowano największą różnicę w stosunku do algorytmu AIGen. Niestety opracowany algorytm jest niezwykle wrażliwy na zmianę parametrów wejściowych. W zależności od charakterystyki funkcji celu podstawowe parametry różnią się od siebie znacząco. Sprowadza się to do konieczności dodatkowej adaptacyjnej optymalizacji parametrów algorytmu przed rozpoczęciem właściwych obliczeń. Otrzymane wyniki wskazują na dobrą skuteczność i efektywność algorytmu FA w porównaniu z AIGen.

W publikacji przedstawiono znacznie okrojony opis działania algorytmu. Istnieje kilkanaście parametrów sterujących pracą algorytmu umożliwiających dopasowanie go do poszczególnych zadań. Zaproponowano również autorską wersję algorytmu hybrydowego uzyskaną poprzez zastosowanie operatorów ewolucyjnych: krzyżowania i mutacji. Zauważono przy tym poprawę efektywności algorytmu.

## Literatura

1. Lisowski J., Metody roju cząstek w optymalizacji procesów transportowych i logistycznych. <https://www.researchgate.net/publication/322164684>, s.2-3 (2016).
2. Baidoo E., Fireworks algorithm for unconstrained function optimization problems, Applied Computer Science, vol.13, s.61–74 (2017).
3. Tan Y., Zhu Y., Fireworks Algorithm for Optimization. Advances in Swarm Intelligence, First International Conference, ICSI 2010, Beijing, China (2010).
4. Wiatrak M., Figielska E., Zastosowanie algorytmu optymalizacji rojem cząstek do znajdowania ekstremów globalnych wybranych funkcji testowych. Zeszyty Naukowe WWSI, vol.9, s.7-19 (2015).
5. Pijarski P., Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej Lublin, s.72 (2019).
6. Augustyn D. R., Wyciślik Ł., Heurystyczny algorytm optymalizacji parametrycznej dedykowany problemom wielowymiarowym. Studia Informatica, vol. 28 (2007).

## KAMERTONY TERAPEUTYCZNE – MODELOWANIE, OPTIMALIZACJA I SYMULACJE NUMERYCZNE

**inż. KAMIL PIEC**

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Grzegorz Kokot, prof. PŚ

**Streszczenie.** W artykule opisano proces modelowania kamertonu, przeprowadzenia analizy modalnej oraz modyfikacji geometrii kamertonu w celu osiągnięcia zadanej częstotliwości drgań własnych. Wykorzystując metodę elementów skończonych, przy użyciu oprogramowania ANSYS Workbench, oraz zaimplementowanego w nim modułu Design Exploration służącego do optymalizacji, a także parametryzacji została przeprowadzona optymalizacja geometrii kamertonu.



### THERAPEUTIC TUNING FORKS - MODELING, OPTIMIZATION AND NUMERICAL SIMULATIONS

**Abstract.** The article describes the process of modeling a tuning fork, performing modal analysis, and modifying the geometry of the tuning fork to achieve the set natural frequency. Using the finite element method, using ANSYS Workbench software, and the Design Exploration module implemented in it for optimization and also parameterization, the tuning fork was optimized.

#### 1. Wprowadzenie

Analiza modalna jest powszechnie stosowana do wyznaczania własności dynamicznych różnych obiektów. Po wykonaniu analizy modalnej otrzymuje się model modalny, w postaci zbioru częstości drgań własnych, jak również postaci drgań i współczynników tłumienia. Znajomość tych parametrów umożliwia prognozę zachowania się danego obiektu wskutek dowolnego zaburzenia równowagi. Aspekt drgań jest też powszechnie wykorzystywany w akustyce. Instrumenty, lub kamertony drgając wytwarzają słyszalny dla ludzkiego ucha dźwięk. Jednak kamertony nie są tylko wykorzystywane w muzyce. Kamertony znalazły również zastosowanie w medycynie, a dokładnie w muzykoterapii dogłębnej (komórkowej). Są to tak zwane kamertony terapeutyczne. Na podstawie badań Dr Barbary Hero, która udowodniła, że organy wewnętrzne człowieka posiadają własne określone częstości drgań własnych opracowano skalę dźwięków, które dostrajają organy człowieka do częstotliwości wzorcowej. W komórkach dochodzi do wibracji, a ona dostraja je do wzorcowej częstotliwości. Jest to ułatwione, ponieważ ciało człowieka w dużej mierze składa się z wody. Fabian Maman wykonał w 1981 roku badanie na Uniwersytecie w Paryżu, które przedstawia komórkę nowotworową HeLa, która ulega rozpadowi pod wpływem działania dźwięków skali C – dur, którym została poddana. Jest to spowodowane brakiem umiejętności dostrojenia się do danej częstotliwości [1, 2, 3].

W poniższej pracy przedstawiono proces modelowania kamertonu, przeprowadzenie analizy modalnej w celu poznania jego częstości drgań własnych, a następnie proces optymalizacji geometrii w celu uzyskania zadanej częstości drgań własnych kamertonu.

## 2. Tok postępowania

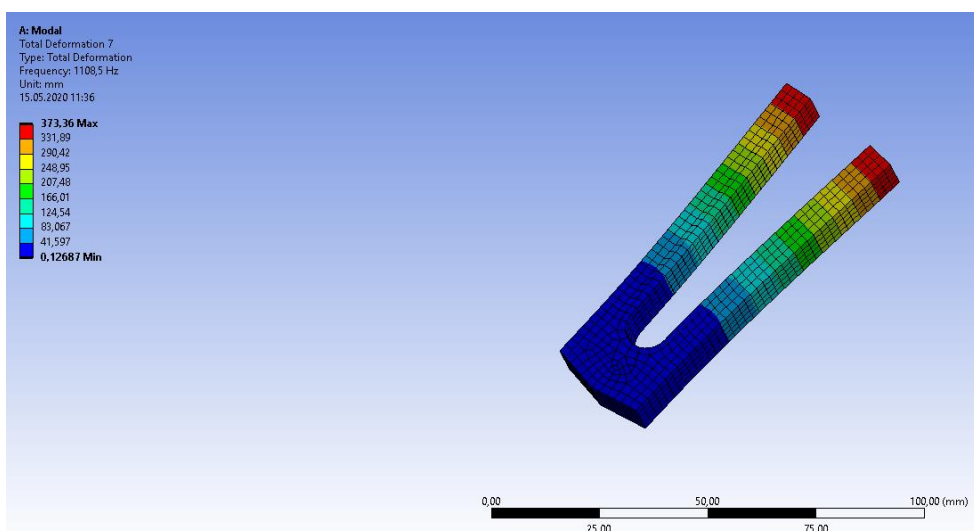
W poniższej pracy rozpatrywany będzie kamerton widelkowy o częstości drgań własnych równej 1122 Hz, wykonany ze stopu aluminium AW 2014 (Rys. 1).



Rys. 1. Rozpatrywany kamerton 1122 Hz  
Fig. 1. Considered tuning fork 1122 Hz

Wymiary przedstawionego powyżej kamertonu są w większości znane jednak nie wszystkie, tak więc wynik powinien być jedynie zbliżony do wzorcowego. Geometria kamertonu zostanie uproszczona, ponieważ wpływ uchwytu kamertonu oraz zaokrągleń przy podstawie ma pomijalnie mały wpływ na otrzymany wynik, a w znacznym stopniu upraszcza zadanie oraz przyspiesza czas obliczeń.

Geometria została utworzona w programie Design Modeler. Po określeniu parametrów materiałowych oraz warunków brzegowych została przeprowadzona analiza modalna. Otrzymano następujący wynik (Rys. 2)



Rys. 2. Otrzymana częstość drgań własnych kamertonu (1108,5 Hz)  
Fig. 2. Received natural frequency of tuning fork (1108,5 Hz)

Otrzymano częstość drgań równą 1108,5 Hz. Aby otrzymać częstość wzorcową równą 1122 Hz należy zmodyfikować geometrię. Realizacja tego zadania ręcznie byłaby

nieefektywna i bardzo czasochłonna, więc zastosowano optymalizację. Przeprowadzono ją w module Design Exploration w który jest wyposażony Ansys. W tym celu sparametryzowano szerokość ramienia (parametr wejściowy) oraz częstotliwość drgań własnych (parametr wyjściowy).

Na potrzeby realizacji zadania optymalizacji kamertonu została użyta funkcja „Response Surface Optimization”. Dzięki zastosowaniu tego narzędzia można wybrać parametry, które będą optymalizowane, ustalić ich limity, a następnie wyliczyć minimalną oraz maksymalną wartość parametru wyjściowego. Możliwe jest również wyznaczenie konkretnej wartości parametru wejściowego, podając żadaną wartość parametru wyjściowego.

Analizie poddana została szerokość ramienia kamertonu. Po ustaleniu górnej oraz dolnej granicy jego wymiaru oraz po wykonaniu obliczeń otrzymano następujący zakres częstotliwości możliwy do uzyskania przy tych granicach (Rys. 3).

Table of Outline A9: Min-Max Search			
	A	B	C
1	Name	P8 - szerokosc_ramie (mm)	P10 - Total Deformation 7 Reported Frequency (Hz)
2	Output Parameter Minimums		
3	P10 - Total Deformation 7 Reported Frequency	6,48	1004,6
4	Output Parameter Maximums		
5	P10 - Total Deformation 7 Reported Frequency	7,92	1212,6

Rys. 3. Minimalna oraz maksymalna wartość parametru wyjściowego  
 Fig. 3. Minimum and maximum value of the output parameter

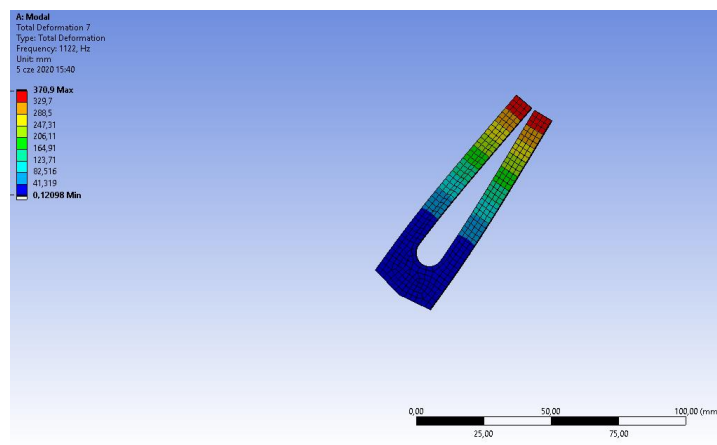
Jak można zauważyć na powyższym rysunku (Rys. 3) Częstotliwość 1122 Hz znajduje się w przedziale 1004,6 – 1212,5 [Hz]. Kolejnym i ostatnim etapem jest ustalenie konkretnego wymiaru, dla którego można uzyskać zadaną częstotliwość drgań własnych 1122 Hz. Po wykonaniu obliczeń otrzymano następujące punkty spełniające to kryterium (Rys. 4).

Table of Schematic B4: Optimization , Candidate Points					
	A	B	C	D	E
1	Reference	Name	P8 - szerokosc_ramie (mm)	P10 - Total Deformation 7 Reported Frequency (Hz)	
2				Parameter Value	Variation from Reference
3	☉	Candidate Point 1	7,2933	★★★ 1122	0,00%
4	☉	Candidate Point 2	7,2937	★★★ 1122	0,00%
5	☉	Candidate Point 3	7,2928	★★★ 1121,9	-0,01%
*		New Custom Candidate Point	7,2		

Rys. 4. Obliczone parametry wejściowe  
 Fig. 4. Calculated input parameters

Obliczenia te wykonane przy pomocy oprogramowania Ansys w zawartym w nim module Design Exploration zostały przeprowadzone z wykorzystaniem wielokryterialnego algorytmu genetycznego (MOGA - multi objective genetic algorithm). Dla tak uzyskanego wyniku została przeprowadzona ponowna analiza modalna w celu wizualizacji wyniku. Wynik analizy przedstawiono poniżej (Rys. 5).

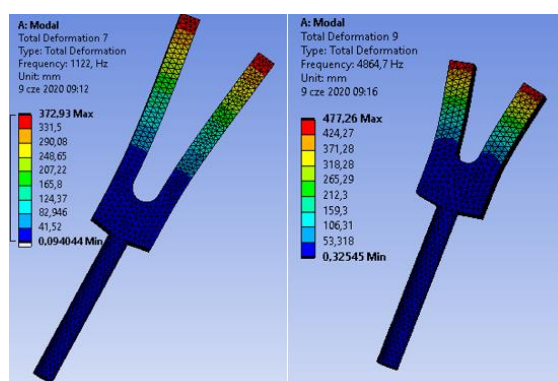




Rys. 5. Otrzymana częstość drgań własnych kamertonu po optymalizacji (1122 Hz)  
 Fig. 5. Received natural frequency of tuning fork after optimization (1122 Hz)

Jak można zauważyć po modyfikacji geometrii kamertonu według wytycznych, które zostały wyznaczone w procesie optymalizacji otrzymano częstość drgań własnych wynoszącą 1122 Hz, a więc została osiągnięta wartość, która była celem optymalizacji.

Poniżej na rysunku 6 przedstawiono porównanie geometrii kamertonów o znacznie różniących się częstościach drgań własnych.



Rys. 6. Kamertony o częstości drgań własnych 1122 Hz (po lewej)  
 oraz 4864,7 Hz (po prawej)

Fig. 6. Tuning forks with natural frequency 1122 Hz (left) and 4864,7 Hz (right)

### 3. Podsumowanie

Proces optymalizacji geometrii z użyciem oprogramowania Ansys oraz modułu Design Exploration w znacznym stopniu skraca czas poszukiwania parametrów wyjściowych dla których spełniony jest zadany warunek wyjściowy. W połączeniu z analizą modalną można w szybki sposób otrzymać szereg zadanych częstości drgań własnych kamertonów.

### Literatura

1. B. Żółtowski Badania dynamiki maszyn Bydgoszcz 2002r.
2. <http://solfeggio.pl/o-kamertonach/co-to-jest-i-jak-dziala-kamerton/> (dostęp 25.05.2020)
3. <http://www.euro-med.net.pl/pl/nasza-oferta/medycyna-naturalna/leczenie-kamertonami.html> (dostęp 25.05.2020)

# MODELLING OF UNSTEADY HEAT FLOW IN 1D METAMATERIAL BY FOURIER AND C-V EQUATIONS AND THE KANSA METHOD

**mgr inż. OLAF POPCZYK**

Inżynieria Mechaniczna, semestr IV, 3 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

**Abstract.** In this work, the problem of one-dimensional unsteady heat flow in thermal metamaterial with spatially-variable thermophysical parameters was considered. As part of the research, solutions obtained using the classical heat equation and Cattaneo-Vernotte (C-V) equation were compared. The equations were solved using the Kansa method in combination with a multiquadric radial basis function. The algorithm proposed by Popczyk and Działkiewicz was used to find the good value of the shape parameter. The results of the numerical analysis showed that the approach used is suitable for solving the considered class of problem using both the classical heat equation and C-V equation.



## 1. Introduction

Heat flow is one of the most fundamental phenomena in nature. The first comprehensive mathematical description of heat flow was proposed by Joseph Fourier who in 1822 composed and solved the equation later called the heat equation (Fourier equation). Its one-dimensional, unsteady form is as follows:

$$\gamma\rho u_t = \kappa u_{xx}, \quad (1)$$

where  $u$  is field variable (temperature),  $\kappa$  is thermal conductivity,  $\gamma$  is specific heat capacity,  $\rho$  is density, and subscript indicated for which variable (space coordinate –  $x$ , or time –  $t$ ) the derivative is calculated. Eq. 1 assumes the spatial invariance of thermophysical parameters. However, modern materials such as thermal metamaterials exhibit spatial variability in thermophysical parameters, making Eq. 1 no longer suitable for this type of medium. Assuming spatial variability of thermophysical parameters  $\kappa = \kappa(x)$ ,  $\gamma = \gamma(x)$ ,  $\rho = \rho(x)$ , Eq. 1 takes the following form:

$$\gamma\rho u_t = \kappa_x u_x + \kappa u_{xx}. \quad (2)$$

Eq. 2 is a better approximation of reality than Eq. 1, however, there is still a wide range of problems for which it is not suitable. Eq. 2 indicates a parabolic evolution of temperature. It implies that a sudden temperature disturbance is felt simultaneously by the whole part of the medium, in other words, the unphysical infinite propagation speed of thermal disturbance. For many engineering problems, this is a good approximation, but not for those with a sudden heat pulse. Researchers began to pay attention to this problem in the late 1940s. Cattaneo and Vernotte [1, 2] stated that for heat conduction in gases, under the imposed sudden temperature disturbance, a certain amount of time is needed to accelerate the carriers of thermal energy. Therefore, a time delay should exist between the heat flux and the temperature gradient. They

proposed the modification of the Fourier's heat equation which was later called the Cattaneo-Vernotte (C-V) equation:

$$\gamma\rho(T\mathbf{u}_{tt} + \mathbf{u}_t) = \kappa_x\mathbf{u}_x + \kappa\mathbf{u}_{xx}, \quad (3)$$

where  $T$  is relaxation time. Eq. 3 is a hyperbolic wave equation. The purpose of this work is to compare the solution obtained using the Fourier heat equation with the solution obtained using the C-V equation for the problem of one-dimensional heat flow in thermal metamaterial with spatially-variable thermophysical parameters.

## 2. Governing equations and numerical methods

The one-dimension initial-boundary value problem was considered in the paper. As part of it, Eq. 3 was solved, while the initial conditions were as follows:

$$\begin{cases} \mathbf{u}(t = 0) = \mathbf{u}_0(x) \\ \mathbf{u}_t(t = 0) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (4)$$

where  $u_0$  is temperature distribution at time  $t = 0$ . In the case of the Fourier equation, the second initial condition is not used. The first-kind boundary conditions used in the simulations are as follows:

$$\begin{cases} \mathbf{u}(x = 0) = \mathbf{u}_L \\ \mathbf{u}_t(x = L) = \mathbf{u}_R \end{cases} \quad (5)$$

Where  $u_L$  is the temperature at the left end of the computational domain,  $u_R$  is the temperature at the right end of the computational domain, and  $L$  is the length of the computational domain. The problem was solved using the Kansa method in a coefficient formulation. In the Kansa method, the fundamental role is played by radial basis functions (RBF). A radial basis function is a real-valued function whose value depends only on the distance from the origin (distance between two points) [2]:

$$\varphi(x, x_j) = \varphi(\|x - x_j\|) \quad (6)$$

where  $x$  is the point for which RBF is calculated and  $x_j$  is the  $j$ -th point from the considered set of points. In Kansa method it is assumed that the value of a variable (for example temperature) at a given point can be expressed as a linear combination of radial basis functions [2]:

$$u(x) = \sum_{j=1}^n \varphi(\|x - x_j\|) c_j, \quad (7)$$

where  $c_j$  are the coefficients in the linear combination. In this work, the general multiquadric RBF was used:

$$\varphi(x, x_j) = \left( (x - x_j)^2 + \varepsilon^2 \right)^p. \quad (8)$$

$\varepsilon$  is the shape parameter whose value is of great importance in the Kansa method. Algorithms for the selection of good value  $\varepsilon$  remain the subject of open scientific debate. The algorithm proposed by Popczyk and Dziatkiewicz [4] was used. Backward Euler method was used as a time integration scheme. The coefficient vector for the next time step is obtained from the coefficient vector from the previous time step:

$$\mathbf{A}\mathbf{c}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{c}_k, \quad (9)$$

where  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  are matrices dependent on radial basis function, shape parameter, thermal parameters distributions, time-step size, boundary conditions, initial conditions and other numerical parameters. To investigate the accuracy of the solution, the obtained results were compared with the solutions obtained with two other methods: the analytical steady-state solution and the implicit finite difference method (FDM) solution. Two error measures were used  $\Delta_{AK}$  and  $\Delta_{FK}$ . The first one represents the average relative percentage error of solution in the last time step compared to the analytical solution for the steady-state. The second one describes the average relative percentage error of solution in all time-steps compared to the FDM solution for the unsteady-state. The first norm was used to investigate whether the Kansa method solution converges to the analytical steady-state solution. The second norm was used to investigate whether the way of convergence of the Kansa method solution to the steady-state is correct.

### 3. Numerical results

Two simulations were carried out in the work, one using the Fourier heat equation, the other using the C-V model. The following numeric setup was used:

- The linear distribution of thermophysical parameters i.e. the  $\gamma(x)$ ,  $\rho(x)$ ,  $\kappa(x)$  distributions can be described by a function  $a\frac{x}{L} + b$ ,
- Temperatures at boundaries  $u_L = 300 K$ ,  $u_R = 400K$ ,
- The initial condition function  $u_0(x)$  is a quadratic function which has values  $u_L$  and  $u_R$  at the left and right ends, respectively,
- Multiquadric RBF power  $p = 0.5$ ,
- Number of collocation points  $n = 101$ ,
- Size of space-step  $\frac{\Delta x}{L} = \frac{1}{50}$ ,
- Length of time-step  $\Delta t = 0.1 s$ ,
- Number of time-steps - the simulations lasted until the average relative difference between the solutions for two consecutive time steps was less than  $10^{-5} \%$ ,
- Relaxation time  $T = 0.1 s$ ,  $1 s$ ,  $10 s$ , and  $0 s$  (the Fourier model test case).

Figure 1 shows the error measures for the analysed test cases while Figure 2 shows the evolution of temperature over time for the coordinate  $\frac{x}{L} = \frac{1}{2}$  using the C-V model (with various relaxation times) and the Fourier model, respectively.

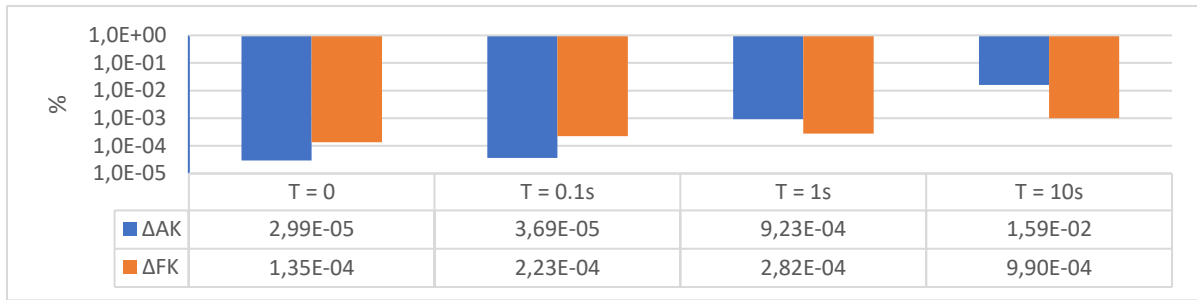


Fig. 1 Error measures obtained for analysed test cases

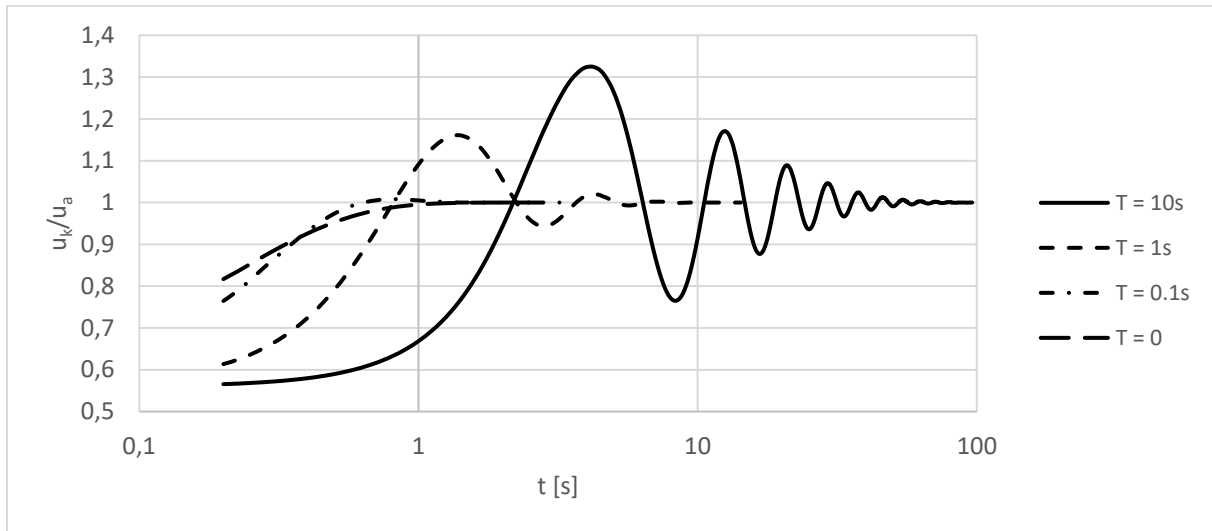


Fig. 2 Evolution of temperature over time for the coordinate  $\frac{x}{L} = \frac{1}{2}$  using the CV model

#### 4. Conclusions

The presented results show that the Kansa method in conjunction with the selected algorithm for finding the good value of shape parameter is suitable for solving the problem of one-dimensional heat flow in thermal metamaterial with spatially-variable thermophysical parameters. It is worth noting that good results have been obtained both in combination with the Fourier heat equation and the C-V equation which, due to its hyperbolic nature, causes more numerical problems. As expected, the higher the relaxation time, the more the flow shows the wave nature. Figure 1 clearly shows that the lower the relaxation time value, the lower the norm values, consequently for the parabolic case when  $T = 0$  the unsteady-state solution is the closest to the FDM solution and in the steady-state to the analytical solution. Nevertheless, even in hyperbolic test cases, the accuracy of the solution was satisfactory.

#### Literature

1. Cattaneo C., Sulla conduzione del calore. Atti Sem Mat Fis Univ Modena, 3:83–101 (1948)
2. Vernotte P., Paradoxes in the continuous theory of the heat equation, CR Acad Sci 246:3154–3155 (1958)
3. Fasshauer G., Meshfree approximation methods with MATLAB, World Scientific (2007).
4. Popczyk O., Dziatkiewicz G., Kansa's method for analysis of one-dimensional heat flow in thermal metamaterials, AIP Conference Proceedings 2239, 020043 (2020)

# OCENA ZMIANY JAKOŚCI PROCESU MONTAŻU POŁĄCZENIA GWINTOWEGO ZA POMOCĄ MODELU REGRESYJNEGO ZE ZMIENNĄ FIKCYJNĄ

**mgr inż. RAFAŁ POPIEL**

Inżynieria Mechaniczna, semestr IV, 3 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, Prof. PŚ

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zastosowanie modelu regresyjnego ze zmienną fikcyjną do oceny zmiany jakości procesu montażu połączenia gwintowego, ze względu na zmianę dostawcy łącznika. Wprowadzono miarę w postaci względnej zmiany uogólnionej sztywności połączenia, spowodowanej zmianą warunków tarcia, w zakresie odkształceń sprężystych elementów połączenia. Ocenę zmiany jakości zilustrowano przykładem problemu powstałego w warunkach przemysłowych.



## EVALUATION OF CHANGES IN THE QUALITY OF THE BOLTED JOINT ASSEMBLY USING A REGRESSION MODEL WITH A DUMMY VARIABLE

**Abstract.** The paper presents the use of a regression model with a dummy variable to assess the change in the quality of the bolted joint assembly process due to the change of the connector supplier. A measure was introduced in the form of a relative change in the generalized joint stiffness caused by a change in friction conditions assuming the elastic deformation of the connection elements. The assessment of quality change is illustrated by an example of a problem arising in industrial conditions.

### 1. Wprowadzenie

Do najważniejszych procesów montażowych we współczesnym przemyśle motoryzacyjnym należą procesy montażu połączeń gwintowych, które muszą charakteryzować się wysoką jakością, wpływającą bezpośrednio na bezpieczeństwo konstrukcji. Jakość połączenia gwintowego wynika z uzyskania, podczas montażu, wymaganego momentu dokręcenia. Równanie Kellermanna-Kleina [2, 3] wyraża zależność między momentem dokręcenia  $M$ , a siłą osiową w śrubie  $N$ :

$$M = \left[ \frac{1}{2} \frac{h + 1,154\pi\mu_{th}d_2}{\pi - 1,154\mu_{th} \frac{h}{d_2}} + \mu_b \frac{D_0 + d_r}{4} \right] N, \quad (1)$$

gdzie w (1)  $h$  oznacza skok gwintu,  $d_2$  średnicę podziałową gwintu,  $D_0$  średnicę zewnętrzną powierzchni oporowej,  $d_r$  średnicę otworu przejściowego podkładki lub powierzchni oporowej, a  $\mu_{th}$  i  $\mu_b$  to współczynniki tarcia między zwojami gwintu śruby i nakrętki oraz na

powierzchni oporowej pod łbem śruby lub nakrętki, odpowiednio. Jeżeli rozważa się zakres odkształceń sprężystych w połączeniu gwintowym, to prosty jednowymiarowy model uwzględniający jedynie statyczne odkształcenia wzdłużne pozwala wyznaczyć zależność między siłą osiową  $N$  w śrubie, a kątem obrotu łba śruby lub nakrętki  $\phi$ , co daje zależność:

$$N = \frac{h}{2\pi(c_b + c_p)} \phi, \quad (2)$$

gdzie  $c_b$  i  $c_p$  to zastępcze podatności wzdłużne śruby i elementów łączonych, odpowiednio. Wielkości te zależą od własności sprężystych materiałów w połączeniu oraz ich cech geometrycznych. Mając równania (1) i (2) można wprowadzić, w zakresie odkształceń sprężystych, wielkość charakteryzującą połączenie i wiążącą relacją dwie ważne, z punktu widzenia procesu montażu, wielkości – moment dokręcenia  $M$  oraz kąt obrotu łba śruby  $\phi$ :

$$C = \frac{\partial M}{\partial \phi} = \left[ \frac{1}{2} \frac{h+1,154\pi\mu_{th}d_2}{\pi-1,154\mu_{th}\frac{h}{d_2}} + \mu_b \frac{D_0+d_r}{4} \right] \frac{h}{2\pi(c_b+c_p)}. \quad (3)$$

Uogólniona sztywność  $C$  połączenia stanowi ważną wielkość, która może być wyznaczana w pośredni sposób podczas operacji dokręcania, wykonując pomiary kąta obrotu łba śruby lub nakrętki oraz momentu dokręcania. Jak widać z (3) uogólniona sztywność połączenia  $C$  opisuje charakterystykę liniową. Estymacja  $C$  wynika z zastosowanego modelu fenomenologicznego (1)-(3), co prowadzi do liniowego modelu regresyjnego postaci:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad (4)$$

gdzie zmienna objaśniana  $y_i$  to mierzona wartość momentu dokręcania  $M$ ,  $x_i$  to zmienna objaśniająca – kąt obrotu łba śruby  $\phi$ ,  $i$  przebiega zbiór pomiarów, a  $\varepsilon$  to reszta modelu; współczynnik kierunkowy  $\beta_1$  prostej regresji (4) estymuje uogólnioną sztywnością połączenia  $C$ ; wyraz wolny  $\beta_0$  określa wartość momentu dokręcania dla zerowego kąta obrotu łba śruby, czyli momentu wstępnego w połączeniu, istniejącego przed rozpoczęciem pomiarów.

W warunkach przemysłowych często zachodzi potrzeba oceny zmiany jakości procesu montażu połączenia gwintowego, przy zmianie dostawcy, np. łącznika. Nominalnie, parametry geometryczne i materiałowe nowego łącznika odpowiadają stosowanemu dotychczas, lecz często zmiana dostawcy pociąga za sobą zmianę warunków tarcia w połączeniu, np. ze względu na inny proces osadzania powłok na powierzchni gwintu łącznika. Prowadzi to do zmiany sztywności połączenia  $C$ , przy czym względną zmianę sztywności można aproksymować jako:

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \left( \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial \mu_{th}} \right) \Bigg|_{\mu_{th}=\mu_{th}^0} \Delta \mu_{th} \approx \left( \frac{\partial \ln C}{\partial \ln \mu_{th}} \right) \Bigg|_{\mu_{th}=\mu_{th}^0}, \quad (5)$$

gdzie w (5) uwzględniono stałość parametrów sprężystych, cech geometrycznych i warunków tarcia na powierzchni oporowej w połączeniu;  $\Delta$  oznacza bezwzględny przyrost skończony danej wielkości, odniesiony do wartości nominalnej  $\mu_{th}^0$  współczynnika tarcia na powierzchni

gwintu. W niniejszej pracy wprowadzono metodę oceny zmiany jakości procesu montażu połączenia gwintowego za pomocą modelu regresyjnego ze zmienną fikcyjną, prowadzącego do aproksymacji zależności (5).

## 2. Model regresyjny charakterystyki połączenia gwintowego ze zmienną fikcyjną

W procesie montażu pewnego połączenia śrubowego nastąpiła zmiana dostawcy łącznika (śruby), co może wpłynąć na jakość procesu, więc istnieje potrzeba oceny zmiany jakości. Dla dotychczas stosowanych łączników znano pośrednio charakterystykę połączenia, wykonując pomiary momentu i kąta, reprezentowane przez pary  $(x_i^s, y_i^s)$  jak w modelu (4). Zmiana łącznika wprowadza nową kategorię danych pomiarowych, reprezentowaną przez pary  $(x_j^n, y_j^n)$ , gdzie indeks  $j$  przebiega przez zbiór pomiarów  $M$  i  $\varphi$ , dla nowego łącznika. Wprowadza się nową zmienną fikcyjną  $D$ , typu dychotomicznego [4, 5], która reprezentuje kategorię łącznika:

$$D = \begin{cases} 0 & \text{przed zmianą} \\ 1 & \text{po zmianie} \end{cases} \quad (6)$$

Można wtedy wprowadzić jeden model regresyjny charakterystyki połączenia, z interakcją między zmienną ilościową objaśniającą  $x$  i zmienną fikcyjną typu kategorii  $D$ , co prowadzi do rozwiązania jednego problemu regresji liniowej [1, 5] dla zbioru par pomiarów, składającego się z dwóch podgrup  $\{(x_i^s, y_i^s), (x_j^n, y_j^n)\}$ :

$$y_k = \beta_0 + \beta_1 x_k + \beta_2 D + \beta_3 x_k D + \varepsilon_k, \quad (7)$$

gdzie indeks  $k$  przebiega przez zbiór wszystkich pomiarów. Można zauważyć, że dla procesów przed i po zmianie łącznika, modele regresyjne, w sensie wartości oczekiwanej, mają postać [5]:

$$E[y(D=0)] = \beta_0 + \beta_1 x, \quad E[y(D=1)] = \beta_0 + \beta_2 + (\beta_1 + \beta_3)x, \quad (8)$$

Jeżeli model (7) jest istotny statystycznie, to ocenę zmiany jakości procesu można wtedy prowadzić na podstawie wartości wskaźnika  $\delta_1$ :

$$\delta_1 = 100(\beta_3/\beta_1), \quad \delta_2 = 100(\beta_2/\beta_0), \quad (9)$$

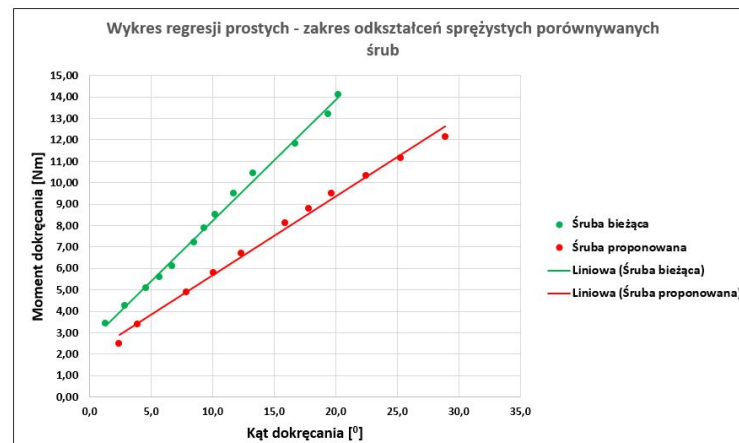
który szacuje względną procentową zmianę wartości uogólnionej sztywności połączenia  $C$ ;  $\delta_2$ , szacuje względną procentową zmianę wartości momentu wstępnego dokręcenia.

## 3. Przykład obliczeniowy

Rozważano połączenie śrubowe ze śrubą o klasie wytrzymałości 10.9. Dostawca przekazał tylko jedną nową śrubę, więc wykonano 2 eksperymenty w postaci operacji dokręcania dla aktualnie stosowanej i proponowanej nowej śruby. Zastosowano ręczne narzędzie dynamometryczne typu 1, umożliwiające jednoczesny pomiar momentu oraz kąta dokręcania. Dla aktualnie stosowanej śruby uzyskano 13 pomiarów, a dla proponowanej nowej 11. Test równości wariancji dla zmiennej objaśnianej w obu kategoriach wskazał, że nie ma podstaw



do odrzucenia hipotezy  $H_0$  o równości wariancji. Stosując model z interakcją (7) uzyskano rozwiązanie problemu regresji liniowej w postaci pary prostych, co pokazuje Rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyka połączenia gwintowego – regresja ze zmienną fikcyjną  
Fig.1. The characteristic of a bolted joint – regression with a dummy variable

Dla poziomu istotności 0,05 uzyskano równanie regresji postaci:  $y \approx 2,578 + 0,564x - 0,557D - 0,197xD$ . Skorygowany współczynnik determinacji wyniósł  $R^2 \approx 0,995$ . Analiza wariancji wykazała istotność zidentyfikowanego modelu regresyjnego. Również test  $t$ -Studenta wykazał istotność wszystkich współczynników równania regresji. Wykonano również częściowy  $F$ -test porównujący dwa modele regresyjne, co jest równoważne testowaniu hipotez:

$$H_0 : \beta_2 = \beta_3 = 0, \quad H_1 : (\beta_2 \neq 0) \vee (\beta_3 \neq 0). \quad (10)$$

Na podstawie obliczeń odrzucono hipotezę  $H_0$  i przyjęto hipotezę alternatywną  $H_1$ , co można interpretować, że zastosowanie proponowanego przez dostawcę nowego łącznika istotnie zmienia charakterystyką połączenia, co wpływa na jakość procesu. Wskaźnik z (9) wyniósł  $\delta_1 \approx -34,97\%$ , co oznacza znaczący spadek uogólnionej sztywności połączenia, po zastosowaniu proponowanego nowego łącznika. Należy zauważyć, że w przypadku strategii dokręcania na określony moment, w połączeniu gwintowym o niższej uogólnionej sztywności  $C$ , dochodzi do większych odkształceń sprężystych, przede wszystkim łącznika, co prowadzi do wzrostu wartości siły osiowej w śrubie, zgodnie z (2). Wzrost ten może spowodować zniszczenie połączenia.

## Literatura

1. Alkharusi H., Categorical variables in regression analysis: a comparison of dummy and effect coding, *International Journal of Education*, Vol. 4 (2), s. 202-210 (2012).
2. Bickford J. H., *Introduction to the design and behavior of bolted joints*, CDC Press, Boca Raton (2008).
3. Popiel R., Działkiewicz G., Modelowanie empiryczne i statystyczne sterowanie procesem montażu połączeń gwintowych z uwzględnieniem efektu bruzdowania, *Modelowanie Inżynierskie*, Vol. 34 (65), s. 97-101 (2017).
4. Tutz G., *Regression for categorical data*, Cambridge University Press, Cambridge (2012).
5. Yip P. S. L., Tsang E. W. K., Interpreting dummy variables and their interaction effects in strategy research, *Strategic Organization*, Vol. 5 (1), s. 13-30 (2007).

# NIESPRZEŻONA METODA HOMEGENIZACJI W MODELOWANIU WIELOSKALOWYM KOMPOZYTÓW Z WTRĄCENIAMI W POSTACI WŁÓKIEN HIPERSPRĘŻYSTYCH

mgr inż. MARTYNA POREBA-SEBASTJAN

**Streszczenie.** W pracy wykorzystano niesprzężoną metodę wieloskalową wraz z algorytmem ewolucyjnym, do wyznaczenia zastępczych własności materiałowych kompozytu z wtrąceniami w postaci włókien. Analizowany model materiałów osnowy i wtrącenia jak również materiał po homogenizacji, był materiałem hipersprężystym. Wyznaczone własności materiałowe dla jednorodnego modelu w skali mikro, wykorzystano do analizy uszczelnienia w połączeniu kołnierzowym.



## DECOUPLED HOMOGENIZATION METHOD IN MULTISCALE MODELING OF COMPOSITES WITH HYPERELASTIC FIBERS

**Abstract.** The work uses a decoupled multiscale method together with evolutionary algorithm to determine the equivalent homogenized material properties of a composite with fiber inclusions. The analyzed matrix and inclusion materials model, as well as homogenized material was hyperelastic. The determined material properties for a homogeneous model on a micro scale were used to analyze the seal in a flange coupling.

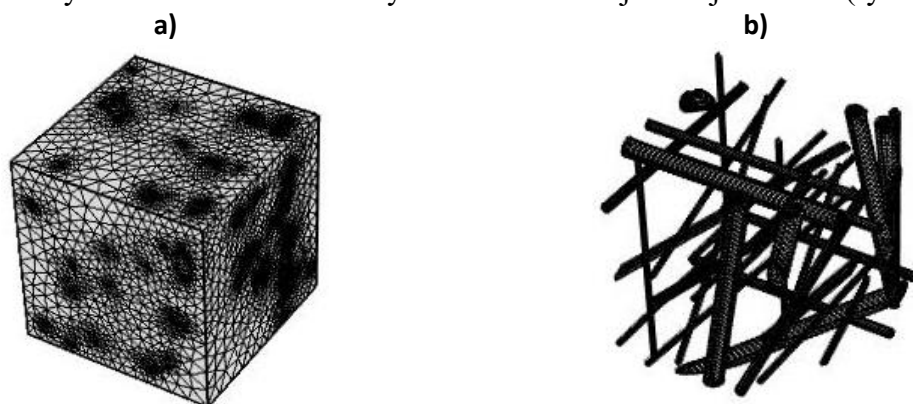
### 1. Wprowadzenie

Metoda niesprzężona wieloskalowa [1] charakteryzuje się analizowaniem niejednorodnych modeli w różnych skalach w sposób odosobniony. Skomplikowane geometrycznie elementy odzwierciedlane są za pomocą jednorodnej struktury w tej samej skali, co znacznie przyspiesza proces obliczeniowy i zmniejsza nakład pracy użytkownika. Proces tworzenia zastępczych własności materiałowych w postaci jednorodnej struktury nazywany jest homogenizacją. Utworzenie elementu ze strukturą niejednorodną, może być wykonane z wykorzystaniem reprezentatywnego elementu objętościowego RVE (*Representative Volume Element*) [2]. Do przeprowadzenia procedury homogenizacji wykorzystano algorytm ewolucyjny [3]. Użyto podejścia z wieloma populacjami, które wpływają na przyspieszenie procesu ewolucji i charakteryzuje się ewolucją małych podpopulacji w częściowo odosobniony sposób.

W niniejszej pracy analizowane są kompozyty z materiałów hipersprężystych [4], czyli takich, które mogą ulegać dużym odkształceniom sprężystym, bez wystąpienia odkształceń trwałych. Zależność pomiędzy odkształceniem, a naprężeniem podczas deformacji jest nieliniowa. Do wyznaczenia równań konstytutywnych stosuje się równania bilansu energii mechanicznej.

## 2. Homogenizacja modelu w skali mikro

Model kompozytu z wtrąceniami w postaci włókien tworzył sześcian o wymiarach  $10 \times 10 \times 10 \mu\text{m}$ . Zdyskretyzowany model w programie Comsol posiadał 787273 czworobocznych elementów skończonych o kwadratowej funkcji kształtu (rys 1.)



Rys. 1. Zdyskretyzowany kompozyt z wtrąceniami w postaci włókien:  
a) osnowa; b) wtrącenia

Fig. 1. FEM model of a composite with inclusions in the form of fibers:  
a) matrix; b) inclusions

Analizowany kompozyt posiadał osnowę oraz wtrącenia z modelu materiałowego neo-Hooke'a [5]. Wartości parametrów materiałowych przedstawiono w tabeli 1.

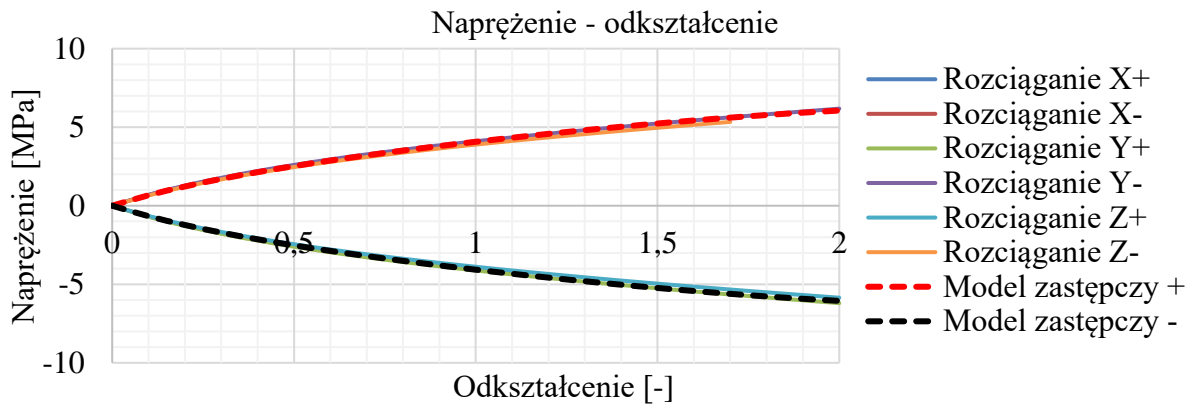
Tabela 1. Dane materiałowe dla materiału kompozytu [5]  
Table 1. Material data for composite material [5]

Własności materiałowe	Osnowa	Wtrącenia
C10 [MPa]	1	25
D1 [GPa]	0.2	0.0185
gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1200	1200

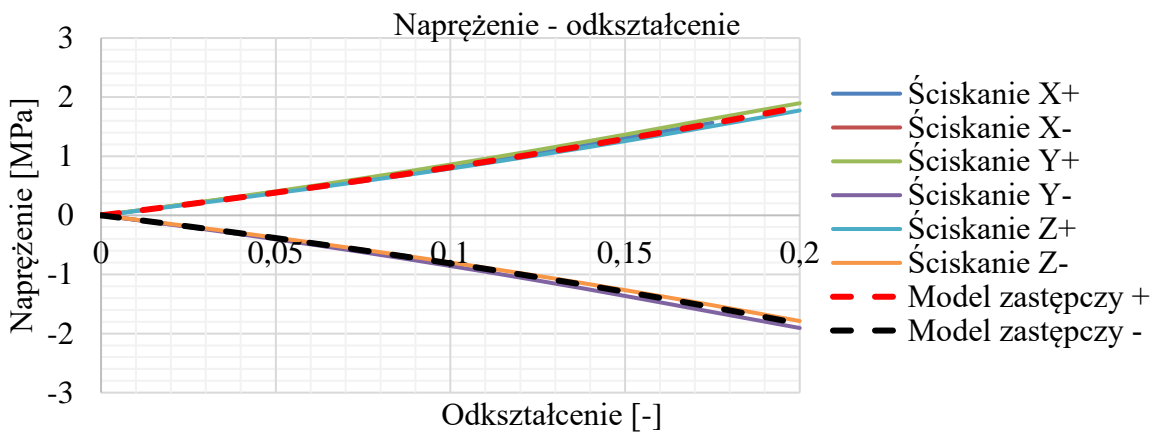
Model numeryczny poddano obciążeniom dla 18 różnych przypadków w różnych kierunkach z różnymi wartościami odkształceń, w celu wyznaczenia własności zastępczych kompozytu. Wszystkie rodzaje obciążeń pokazano na wykresach zależności naprężenia od odkształcenia (rys. 2–4).

Model zastępczy posiadał ten sam rozmiar co model niejednorodny. Liczba elementów skończonych została zredukowana do 216 sześcianów o kwadratowej funkcji kształtu. Dla tego modelu, szukano własności zastępczych dla modelu Yeoh'a. Wykorzystany algorytm ewolucyjny posiadał 2 populacje po 16 osobników, w którym zastosowano selekcję turniejową, operatory krzyżowania równomiernego (0.1) i arytmetycznego (0.1) oraz mutacje równomierną (0.1) i z rozkładem Gaussa (0.7). Zadaniem optymalizacji była minimalizacja różnic odpowiedzi modelu jednorodnego oraz niejednorodnego dla takich samych zestawów oraz wartości obciążeń. Zmiennymi projektowymi były parametry materiału jednorodnego modelu (3 stałe modelu Yeoh). W związku ze stochastycznym charakterem algorytmu ewolucyjnego, zostało przeprowadzonych 20 testów. Dla najlepszego testu wartości zmiennych projektowych wynosiły  $C_1 = 1.10 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,  $C_2 = -3130 \text{ Pa}$ ,  $C_3 = -392 \text{ Pa}$ .

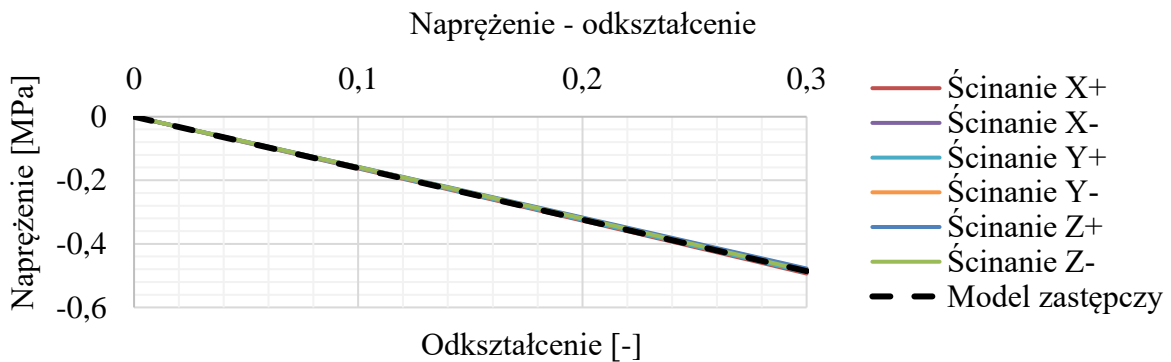
Wykresy zależności naprężenia od odkształcenia zarówno dla modelu niejednorodnego oraz dla modelu z parametrami materiałowymi po homogenizacji przedstawiono na rys. 2-4. Można zaobserwować dużą zgodność wyników.



Rys. 2. Wykres zależności naprężenia [MPa] od odkształcenia [-] dla rozciągania  
Fig. 2. Graph of the dependence of stress [MPa] on strain [-] for extension



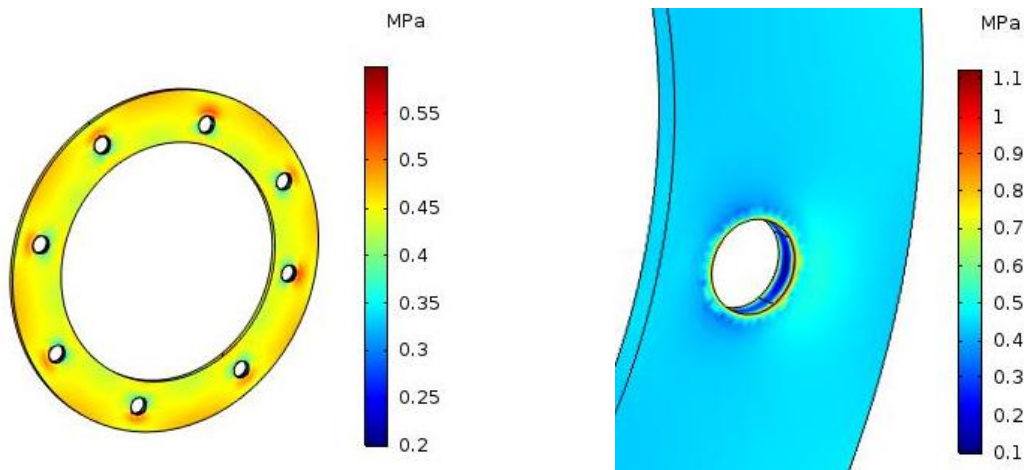
Rys. 3. Wykres zależności naprężenia [MPa] od odkształcenia [-] dla ściskania  
Fig. 3. Graph of the dependence of stress [MPa] and strain [-] for compression



Rys. 4. Wykres zależności naprężenia [MPa] od odkształcenia [-] dla ścinania  
Fig. 4. Graph of the dependence of stress [MPa] versus strain [-] for shear

### 3. Wieloskalowa analiza numeryczna uszczelki

Przeprowadzono analizę wieloskalową uszczelki wykonanej z materiału analizowanego w punkcie 2. Wymiary geometryczne analizowanego elementu to średnica zewnętrzna –  $\Phi$  200 mm, średnica wewnętrzna –  $\Phi$  140 mm, średnica otworów –  $\Phi$  10 mm, grubość uszczelki – 6 mm. Model zdyskretyzowano na 24672 sześciennie elementy skończone o kwadratowej funkcji kształtu. Odebrano możliwość przemieszczeń w miejscach występowania otworów pod śruby oraz przyłożono ciśnienie o wartości 1 MPa na powierzchnię uszczelki. Otrzymano rozkład naprężeń redukowanych Misesa [MPa], które zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Rozkład naprężeń redukowanych Misesa [MPa]  
Fig. 5. The Mises stress distribution [MPa]

### 4. Wnioski

Metoda wieloskalowa niesprężona umożliwiła analizowanie modeli w sposób odrębny dla każdej ze skal, co doprowadziło do przyspieszenia czasu obliczeń, a zarazem uwzględnienia skomplikowanej mikrostruktury. Kluczowym czynnikiem, który wpływa na określenie zastępczych parametrów materiałowych jest zastosowanie algorytmów ewolucyjnych. Przedstawiono zastosowanie metody w praktycznym zadaniu modelowania uszczelki wykonanej z materiału o skomplikowanej mikrostrukturze.

### Literatura

1. Terada K., Kato J., Hirayama N., Inugai T., Yamamoto K., A method of two-scale analysis with micro-macro decoupling scheme: application to hyperelastic composite materials, *Computational Mechechanics*, Vol. 52, s. 1199-1219 (2013).
2. Mirkhalaf S.M., Andrade Pires F.M., Simoes R., Determination of the size of the representative volume element (RVE) for the simulation of heterogeneous polymers at finite strains, Elsevier, *Finite elements in analysis and design*, Vol. 119, s. 30-44 (2016).
3. Burczyński T., Kuś W., Długosz A., Poteralski A., Szczepanik M., Optimization and defect identification using distributed evolutionary algorithms, Elsevier, *Engineering applications of artificial intelligence*, Vol. 17, s. 337-344 (2004).
4. Jemioło S., *Relacje konstytutywne hipersprężystości*, PAN, Warszawa (2016).
5. Goldberg N., Donner H., Ihlemann J., Evaluation of hyperelastic models for unidirectional short fibre reinforced materials using a representative volume element with refined boundary conditions, *Technische Mechanik*, Vol. 35, s. 80-99 (2015)

## A PROTOTYPE MOBILE PLATFORM OF ANALOG MARS EXPLORATION ROVER

### WOJCIECH PYKA

Mechatronics, semester VI, undergraduate programme

### JAKUB BRĘCZEWSKI

Automatics and Robotics, semester II, undergraduate programme

Supervisors: Piotr Przystałka, PhD, DSc, Eng., Prof. at  
SUT, Wawrzyniec Panfil, PhD, Eng.

**Abstract.** This paper's aim is to present the process of modelling the analog mars exploration rover Phoenix II by introducing the project's assumptions, the overview of existing solutions, the material assortment and strength analyses. The paper ends with the results of the verification study including conclusions.



## PROTOTYPOWA PLATFORMA MOBILNA ANALOGOWEGO EKSPLORACYJNEGO ŁAZIKA MARSJAŃSKIEGO

**Streszczenie.** Praca ma na celu prezentację procesu modelowania prototypu eksploracyjnego łazika marsjańskiego Phoenix II poprzez omówienie założeń projektowych, przeglądu rozwiązań, doboru materiałów, analiz wytrzymałościowych. Artykuł kończy studium badań weryfikacyjnych wraz z wnioskami.

### 1. Introduction

Phoenix II is an analog Mars rover built as a project in Application of Methods of Artificial Intelligence Student Research Group at the Silesian University of Technology. The rover was built with the intention to participate in international rover competitions, i.e. European Rover Challenge [1] or University Rover Challenge [2]. The idea of such competitions is to design and develop a new generation of Mars/Moon rovers. Such kinds of rovers are supposed to freely traverse demanding desert terrain, as an exploration platform they are equipped with manipulator and probe laboratory, giving access to remote analysis of objects and possibility of simple analysis of geological samples [3]. One of the most important subsystems of the rover is a mobile platform.

### 2. The solution overview

Bearing in mind the current state of art in this area, it can be noted that quite new design solutions are elaborated, guaranteeing a very high level of mobility of the platform [4]. However, many of the solutions are still based on the well-known rocker-bogie suspension system [5], [6]. It can be seen as the variations of the original one. The idea of a rocker-bogie

suspension is based on connection of the rocker part of frame with the main rover's body. At one end of the rocker a wheel is attached, while on the other end, the bogie is mounted on a joint. Bogie is a frame with two wheels mounted, with possibility of free one-axis rotation in regard to rocker. Two sides of the suspension are connected through a pitch averaging mechanism, which provides fine balance. Rocker-bogie is a six wheeled chassis capable of traversing rough terrain using an efficient high degree of mobility suspension system (Fig. 1). Improving the performance of a simpler four wheel rover has also been explored [4]. Rocker-bogie type construction provides approximately equal pressure on each wheel, while keeping all the wheels on the ground even on uneven surfaces. This creates superb traction and maneuverability. However, one of the major disadvantages is the rotation of the mechanism regardless the conditions. Providing an individual motor to every single wheel causes arise in costs and complexity of the design.



a) HAL-062 reverse rocker-bogie rover [5]

b) Curiosity rocker-bogie rover by NASA [6]

a) Łazik HAL-062 o podwoziu rocker-bogie typu odwróconego [5]

b) Podwozie rocker-bogie łazika Curiosity opracowane przez NASA [6]

Fig. 1 Examples of different configurations of rocker-bogie Martian Rovers  
Rys. 1 Przykłady różnych konfiguracji łazików marsjańskich typu rocker-bogie

### 3. The project assumptions and the material assortment

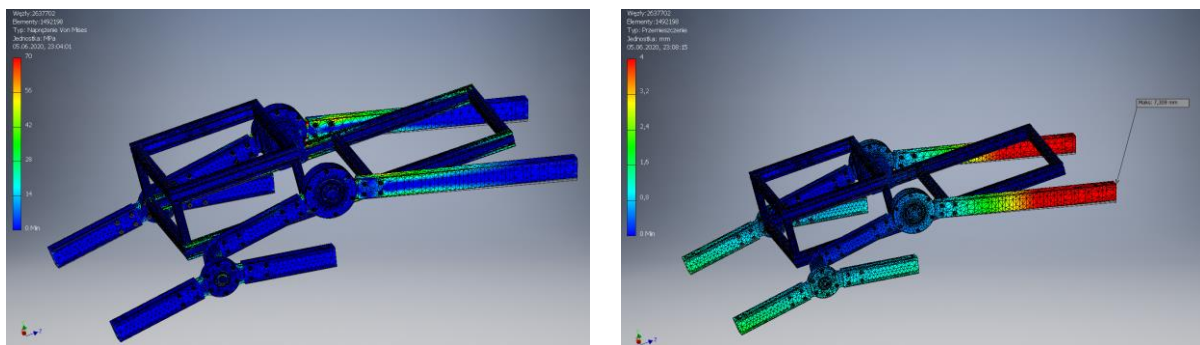
The Phoenix II rover's chassis was designed to create a durable and stable construction, which would be lightweight and modular at the same time. Since all the conditions set are tough to achieve, certain compromises had to be made. The solution fulfilling all of the key-driving conditions was a rocker-bogie type chassis. The variation of reversed rocker-bogie including pitch averaging mechanism [4] was chosen due to its fine load distribution, as analytical models have shown [8]. The construction is modular – welding has been avoided in order to enable an easy exchange of i.e. aluminum profiles. The main body was built from universal aluminum profiles, enabling rapid assembly and disassembly of modules, perfectly fitting into the idea of the European Rover Challenge competition, demanding the use of various modules for specific tasks. The frame of the chassis has been built from 6005-A aluminum alloy due to vast availability of semi-finished products and satisfactory durability of this particular alloy. Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology was used to create dozens of elements – both the ones carrying load (i.e. cycloidal gearboxes) and the ones almost completely unloaded (i.e. spacers).



Fig. 2 The Phoenix II rover during the ERC 2019 contest  
Rys. 2 Łazik Phoenix II podczas zawodów ERC 2019

#### 4. Strength analysis

The entire construction was carefully analyzed using Finite Element Method (FEM) [7], giving deep insight into the state of load and deformations, and at the same time giving a possibility to cut out spare material under little or no load. However, FEM analyses were backed by dynamic simulations of the rover and analytical models [8] – complex static calculations and basic dynamic computations. Not only did the usage of FEM allow confirmation of basic analytical mechanical models, but also made it possible to locate unexpected stress concentration areas in the complex model of the entire chassis. As shown in Fig. 3, the most critical load situation shown in dynamic simulations in CoppeliaSim [9] was regarded, including heavy dynamic overload and reaction forces while turning. This particular overload simulation was regarded when it comes to the mechanical design. Furthermore, the load state was backed by security factor  $k=2$ .



- a) Von Mises stress distribution  
a) Rozkład naprężeń Von Mises'a

- b) Displacement distribution  
b) Rozkład przemieszczeń

Fig. 3 FEM analysis of the chassis' main frame for the critical dynamic load situation  
Rys. 3 Wyniki analizy MES ramy podwozia dla sytuacji krytycznego obciążenia dynamicznego



The FEM analysis (Fig. 3) faces test results well except for the bogie mount, where a deformation occurred due to minimization of the security factor, resulting from strict mass limits the team had to fulfill. It may be concluded that the construction presented in Fig. 2 and Fig. 3 is far from the optimal load carriage. It is the result of the usage of standard off-the-shelf components, as well as the modular concept of designing the chassis, resulting in simple implementation of improved parts.

## 5. Verification study and conclusions

When it comes to the comparison of the accurate digital model and real chassis, three major issues occurred during tests and competition. First of all, very early tests highlighted that due to many variables the chassis had issues turning in its original concept – without steering wheels. As a result, they were rapidly prototyped using the 3D printing technology with the mechanism based on cycloidal gearboxes. Secondly, after the assembly of all the components, it turned out that certain contacts in real corpse of the rover were not as stiff as assumed in the FEM analysis. Therefore the construction had to be reinforced with 5 mm aluminum sheet. Finally, at the initial stage of the design, a certain mass of all the components had to be assumed with a specific margin. Eventually, the construction weighted 15 kgs more than expected. On account of the exceeded mass, the dynamic load has significantly grown, exceeding loads accepted in the durability analyses. As a result, concentration of stress has heavily grown in sheets fixing the bogie, causing them to bend. Other observations have shown proper behavior of the chassis – fine grip to the ground on different kinds of demanding terrain – bumpy sand or plentiful rocks, satisfactory stability on steep hills even during the manipulator's labor, appropriate mobility and superb behavior on different mass distribution on the body. To sum up, having regarded the milestones set at the design phase, the result of the chassis' project is satisfactory to the entire team, bearing in mind the fact the entire process – cogitation, analytical models, dynamic simulations, modeling, verification, execution and tests were included in less than year.

## References

1. European Rover Challenge website <http://roverchallenge.eu/pl/home/>
2. University Rover Challenge website <http://urc.marssociety.org/home/urc-news>
3. European Rover Challenge rules <http://roverchallenge.eu/pl/dla-druzyny/zgloszenia/>
4. Sandin P.: Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated, McGraw-Hill/TAB Electronics (2003)
5. HAL-062 Rover <http://knr.meil.pw.edu.pl/>
6. Curiosity rocker-bogie Rover chassis <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/summary/>
7. Zagrajek T., Marek P., Krzesiński G.: Finite Element Method – Scientific Applications – Problems and Exercises, Warsaw, OWPW (2006)
8. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Strength of materials, Vol. 1, 2, Warsaw, WNT (2013)
9. CoppeliaSim <https://www.coppeliarobotics.com/>
10. Silesian Phoenix Team website <https://sknaimeth.polsl.pl/lazik-marsjanski/>

## ANALIZA MODALNA KIEROWNICY TURBINY NISKIEGO CIŚNIENIA SILNIKA TURBOWENTYLATOROWEGO

**mgr inż. RAFAŁ ROBAK**

Inżynieria Mechaniczna, semestr III, 3 stopień

Avio Polska Sp. z o. o., Bielsko-Biała

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł poświęcony jest analizie modalnej kierownicy turbiny niskiego ciśnienia stosowanej w silnikach turbowentylatorowych. Przedstawia porównanie wyników uzyskanych z zastosowaniem metody elementów skończonych z wynikami pochodzącymi z rzeczywistego eksperymentu. Wyniki wykazują dobrą zgodność obydwu opracowanych modeli. Praca stanowi wstęp do dalszych analiz oraz badań dotyczących optymalizacji parametrów dynamicznych kierownic turbin niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji.



## MODAL ANALYSIS OF NOZZLE GUIDE VANE IN LOW PRESSURE TURBINE SYSTEM OF AIRCRAFT ENGINE

**Abstract.** The aim of the article is to present modal analysis of nozzle guide vane in low pressure turbine system of aircraft engine. Compared finite element model results with experimental one in terms of frequencies and modal forms. Demonstrated consistent results which will be used in further analyses and researches related to the optimization of dynamic characteristics with method of artificial intelligence.

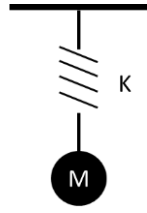
### 1. Wprowadzenie

Analiza modalna [1, 2] stanowi jedną z podstawowych symulacji wykonywanych w procesie projektowania nowego silnika bądź też modyfikacji jego komponentów. Podstawowym kryterium w przypadku tego typu konstrukcji jest zapewnienie bezawaryjnej pracy. W tym celu niezbędne jest poznanie odpowiedzi dynamicznej konstrukcji. Obecnie mamy do dyspozycji szereg narzędzi wspomagających pracę konstruktora (komercyjnych programów MES [3]) umożliwiających przeprowadzenie analizy dla komponentów i całych systemów jeszcze zanim powstaną prototypy.

### 2. Analiza modalna

Rezultatem numerycznej analizy modalnej jest postać oraz częstotliwość drgań własnych znormalizowanych do jednostkowej masy modalnej bądź też do jednostkowego przemieszczenia. Oznacza to, że wartości naprężeń modalnych nie są rzeczywiste, gdyż wynikają z opisanej normalizacji.

Przykładem najprostszego systemu jest masa „m” zamocowana przy pomocy sprężyny o sztywności „k” jak pokazano na rysunku 1.



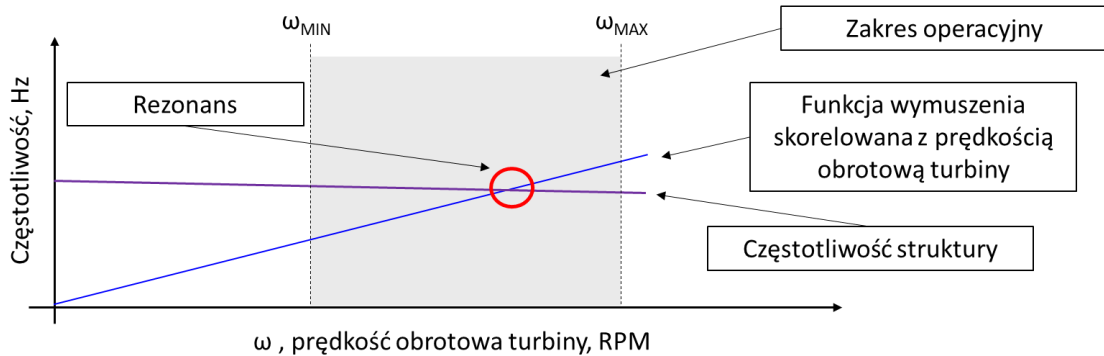
Rys. 1. Klasyczny oscylator harmoniczny; masa – sprężyna  
Fig. 1. Mass-spring system

Częstotliwość takiego układu można wyznaczyć przy pomocy poniższego wzoru:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ Hz}; \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość,  $\omega$  – częstość kołowa,  $k$  – sztywność,  $m$  – masa.

Informacje o charakterystyce dynamicznej należy zestawić z funkcją wymuszającą i ocenić czy w zakresie operacyjnym może dojść do zjawiska rezonansu, czyli nałożenia się częstotliwości funkcji wymuszenia oraz częstotliwości drgań własnych układu.



Rys. 2. Diagram Campbell'a (schemat)  
Fig. 2. Campbell diagram (scheme)

W praktyce, analiza oraz identyfikacja potencjalnych zagrożeń z powodu rezonansu jest rozpatrywana w oparciu o diagram Campbell'a przedstawiony schematycznie na rysunku 2. Wymuszeniami w module turbiny są wzbudzenia pochodzące od części wirującej, zarówno te mechaniczne (niewyważenie rotora) jak również aeromechaniczne (harmoniczna zmiana ciśnienia pochodząca od łopatek rotora).

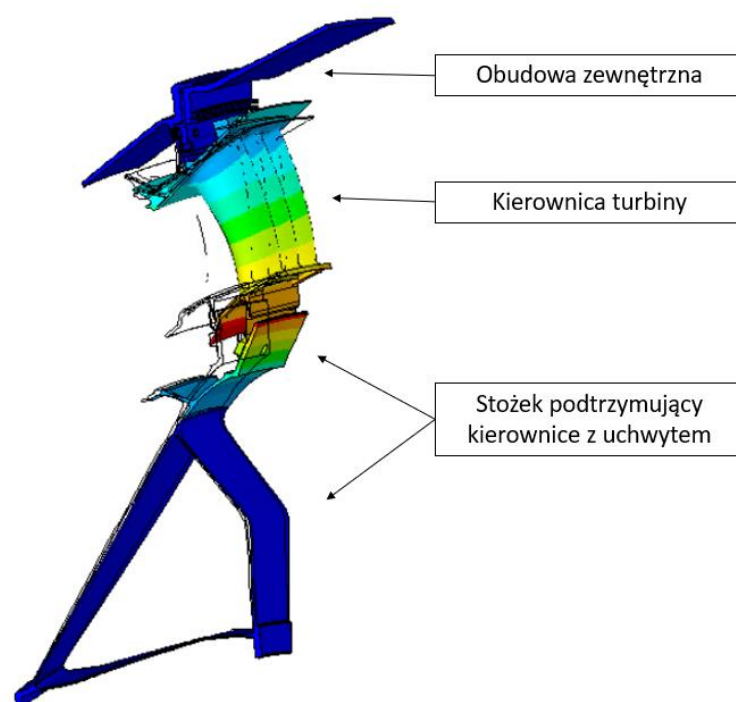
Rozwiązanie zadania polega na rozwiązaniu równania (2):

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2)$$

gdzie:  $M$  – macierz mas,  $K$  – macierz sztywności,  $x$  - przemieszczenie.

W celu rozwiązania powyższego równania zastosowano metody numeryczne. Przeprowadzając analizę należy tak przygotować model numeryczny, aby w najwyższym możliwym stopniu spełniał warunki panujące w rzeczywistości. W przypadku omawianej kierownicy turbiny oprócz samego komponentu, uwzględnia się również fragmenty obudowy

oraz odpowiedni dla nich sposób połączenia. Pozwala to na uwzględnienie odpowiedniej sztywności. Ponadto, uwzględniane są dodatkowe komponenty, które partycypują w postaciach systemowych (obudowa turbiny oraz stożek podtrzymujący), które przedstawiono na rysunku 3, przedstawiającym dodatkowo pierwszą postać własną kierownicy.



Rys. 3. Pierwsza postać własna kierownicy – wahadłowa - osiowa  
Fig. 3. First system mode – pendulum - axial

Analizując powyższy przykład przez pryzmat energii odkształcenia oraz energii kinetycznej, z fizycznego punktu widzenia można uprościć go do klasycznego oscylatora harmonicznego, którego podstawowe elementy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dystrybucja energii odkształcenia dla postaci wahadłowej  
Table 1. Modal strain energy distribution for pendulum mode-shape

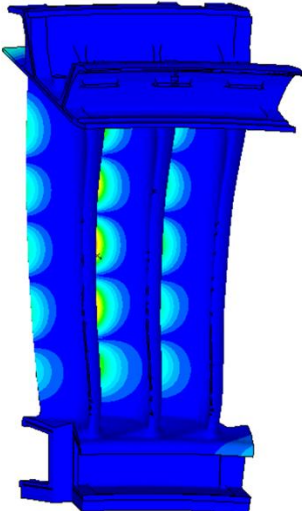
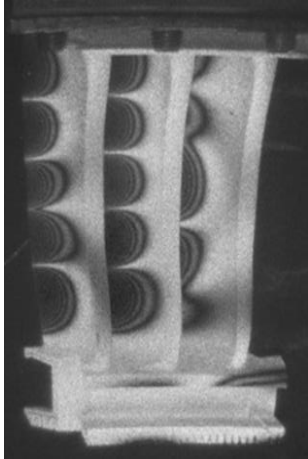
Komponenty oscylatora harmonicznego (uproszczenie)	Energia odkształcenia
Kierownica turbiny, element masowy	5%
Obudowa oraz stożek podtrzymujący, element sprężysty	95%

Założenie to pozwala na podjęcie poprawnych decyzji projektowych w sytuacji, gdy aktualna konfiguracja znajduje się w zakresie operacyjnym a celem jest zwiększenie częstotliwości. Konstruktor może w takiej sytuacji modyfikować geometrię zarówno po stronie kierownicy (obniżając jej masę) jak i stożek podtrzymujący (dodając materiału w strefie koncentracji energii odkształcenia). Obie czynności zwiększają częstotliwość drgań własnych układu.

### 3. Walidacja

Jednym ze sposobów walidacji wyników analizy numerycznej jest przeprowadzenie testu w warunkach rzeczywistych oraz upewnienie się, że model MES jest poprawny, w odniesieniu do postaci oraz częstotliwości drgań własnych. Eksperyment przeprowadza się na stanowisku badawczym, gdzie analizowany komponent montuje się w uchwycie. Następnie uchwyt poddaje się oscylacjom harmonicznym w konkretnych częstotliwościach ustalonych na podstawie „ping testu” (test impulsowy młotkiem modalnym). Porównanie przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie wyników analizy MES oraz eksperymentu  
Table 2. Comparison of modal analysis results between FEM and experiment

Postać piąta fleksyjna	
Numeryczna analiza modalna	Eksperyment - Test komponentowy
	

### 4. Wnioski

Wykonanie testu miało na celu potwierdzenie poprawności modelu MES w kontekście uzyskanych form modalnych a przez to również rozkładów odkształceń, które są kluczowe w kolejnych fazach walidacji dynamiki konstrukcji.

Modele numeryczne uwzględniają nie tylko złożoną geometrię komponentu, ale również zaawansowane technologicznie materiały (odlewane kierunkowo monokryształy), które wykazują cechy materiałów ortotropowych.

### Literatura

1. Bąk R., Burczyński T.: Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego. Warszawa: WNT, 2001.
2. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa (2007).
3. Zienkiewicz O.C., The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, ELSEVIER, (2013).
4. <https://www.ansys.com/>

## MODELOWANIE I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA EGZOSZKIELETU REHABILITACYJNEGO KOŃCZYNY GÓRNEJ

**inż. MACIEJ RUTKOWSKI**

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Antoni John

**Streszczenie.** Egzoszkielety rehabilitacyjne to nowoczesne, zrobotyzowane urządzenia, pomagające ich użytkownikom poprawić kondycję części ruchowych organizmu, odzyskać utraconą sprawność, a nawet umożliwić samodzielne poruszanie się osobom sparaliżowanym. W pracy przedstawiono model urządzenia rehabilitacyjnego kończyny górnej o jednym stopniu swobody, umożliwiającego trening stawu łokciowego. Parametry gabarytowe urządzenia dobrano w wyniku pomiaru odległości rozmieszczenia stawów u przeciętnej osoby dorosłej. Przy doborze materiału kierowano się, bezpieczeństwem oraz wygodą użytkowania. Model urządzenia wykonano przy pomocy programu Autodesk Inventor 2020. Wytrzymałość egzoszkieletu przeanalizowano przy pomocy zintegrowanego modułu programu Inventor, pozwalającego na analizę powstałych naprężeń, przemieszczeń i odkształceń metodą elementów skończonych.



## MODELING AND STRENGTH ANALYSIS OF THE UPPER LIMB REHABILITATION EXOSKELETON

**Abstract.** Rehabilitation exoskeletons are modern, robotic devices that help their users improve the condition of the body's motion parts, regain lost fitness, and even allow paralyzed people to move independently. The paper presents a model of upper limb rehabilitation device with one degree of freedom, enabling elbow joint training. The overall dimensions of the device were selected as a result of measuring the distance between joints of an average adult. The choice of material was guided by safety and convenience of use. The device model was made with the help of the Autodesk Inventor 2020 program. The exoskeleton's strength analysis was performed using the integrated Inventor program module, which allows analysis of the resulting stresses of displacements and deformations using the finite element method.

### 1. Wprowadzenie

Pełna lub częściowa utrata funkcji kończyny górnej jest coraz bardziej powszechna z powodu urazów sportowych, zawodowych, urazów rdzenia kręgowego i udarów mózgu. Zazwyczaj leczenie tych schorzeń opiera się na wdrożeniu procedur fizjoterapeutycznych, które wymagają niezwykle intensywnej pracy. Chociaż istnieją mechaniczne urządzenia wspomagające, są one rzadkością dla górnej części ciała.

### 2. Rola egzoszkieletów w rehabilitacji

Terapia rehabilitacyjna niejednokrotnie musi być kontynuowana przez większość życia pacjentów dlatego może być pracochłonna i kosztowna. Stwierdzono, że istnieje wiele czynników przyczyniających się do szybszego powrotu do sprawności ruchowej,

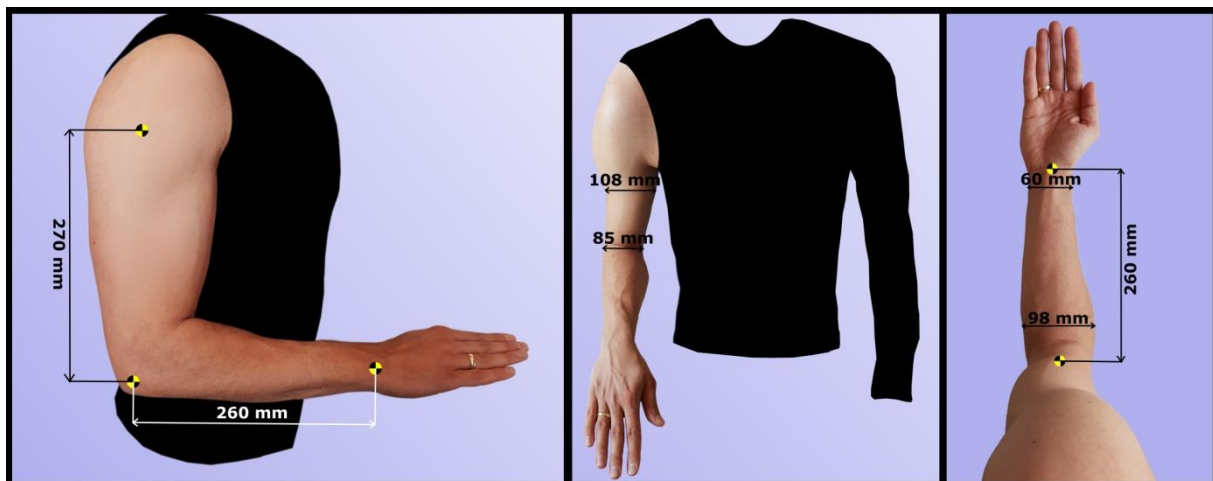
których nie wykorzystano w pełni ze względu na brak usług rehabilitacyjnych. Wiadomo, że terapia jest najskuteczniejsza, jeśli zostanie wdrożona wkrótce po udarze, ale nie zawsze jest dostępna. Ponadto badania wykazały, że intensywna terapia i ćwiczenia zadaniowe w znacznym stopniu przyczyniają się do regeneracji ruchowej. Roboty egzoszkieletowe mogą zaspokoić rosnące zapotrzebowanie, z którym stara się sobie poradzić konwencjonalna terapia manualna. W porównaniu z terapią manualną, egzoszkielety mogą zapewniać konsekwentną, intensywną rehabilitację przez dłuższy czas, niezależnie od umiejętności i poziomu zmęczenia terapeuty. Urządzenia te mogą leczyć pacjenta bez obecności terapeuty, umożliwiając częstsze leczenie, potencjalnie obniżając koszty. Ponadto zintegrowany moduł pomiarowy może dokładnie zmierzyć dane ilościowe w celu oceny stanu pacjenta. Zastosowanie specjalnie zaprojektowanych wirtualnych gier z egzoszkieletem może zapewnić bardziej atrakcyjne doświadczenia terapeutyczne, zachęcając pacjenta (co ważne - także tego najmłodszego) do włożenia własnego wysiłku w ćwiczenia.

### 3. Opis modelu

Zaprojektowane urządzenie rehabilitacyjne posiada jeden stopień swobody, wykonuje ruch zginania / prostowania stawu łokciowego. Z założenia przeznaczone jest dla osób, które w wyniku wszelakich okoliczności (przebytych urazów, operacji, paraliżu) doznały upośledzenia ruchu stawu zawiasowego w stawie łokciowym. Egzoszkielet umożliwia trening w trzech przypadkach ułożenia dłoni:

- wierzch dłoni skierowany do góry,
- wierzch dłoni skierowany do dołu,
- wierzch dłoni ułożony prostopadle do części przedramiennej urządzenia.

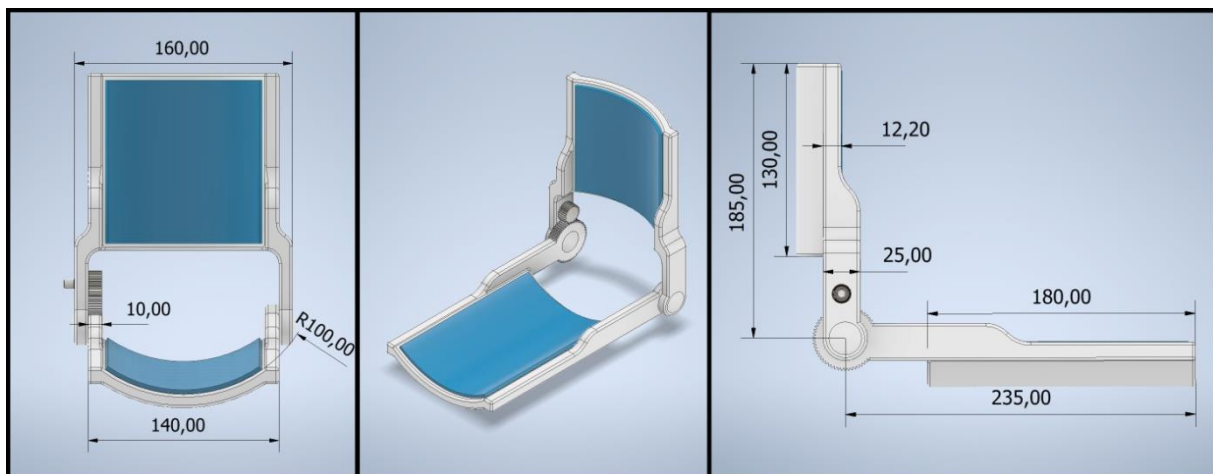
Przeznaczony jest dla typowej osoby dorosłej o przeciętnej budowie ciała. W trakcie projektowania sugerowano się rozmiarami ramienia oraz przedramienia mężczyzny w wieku 33 lat o 177 cm wzrostu. Pomiary wykazały wartości widoczne na Rys. 1.



Rys.1. Wymiary anatomiczne kończyny górnej  
Fig.1. Anatomical dimensions of the upper limb

Biorąc pod uwagę w/w wartości liczbowe, zaprojektowano urządzenie o takich wymiarach, aby stanowiło stabilne podparcie poruszanych elementów kończyny, umożliwiło jej pewne i bezpieczne zapięcie oraz nie kolidowało z innymi elementami ciała człowieka. Głównymi elementami egzoszkieletu są dwie „tacki” przyczepiane odpowiednio do części ramiennej

oraz przedramiennej kończyny, połączone ze sobą za pomocą sworzni w przegubach urządzenia. Urządzenie może zostać przyczepiane do kończyny za pomocą trwałych, elastycznych rzepów. Napędem urządzenia z założenia może zostać niewielki silniczek elektryczny, który przymocowany wpustowo do wału umieszczonego w ramiennej „tacce” urządzenia obracać będzie kołem zębatym umieszczonym na drugim końcu tego wału. Koło współpracujące z zębatką wydrążoną w przegubie części przedramiennej urządzenia, wprawia je w ruch góra/ dół w zależności od kierunku obrotu wału. Urządzenie posiada zakres ruchu odpowiadający maksymalnemu wyprostowaniu oraz maksymalnemu zgięciu ludzkiej ręki. W celu zapewnienia wygody użytkowania, rynienki tacek wyścielono miękką pianką *foam*, która zapobiega przesuwaniu się kończyny w urządzeniu, izoluje od temperatury oraz wchłania wilgoć. Materiałem dobranym do wykonania egzoszkieletu jest Poliamid PA 2200. Materiał ten to poliamid w postaci białego proszku - dokładny oraz wysoko wytrzymały materiał druku 3D. Posiada zbalansowane właściwości oraz zapewnia wiele różnorodnych zastosowań. Wałek, sworznie, zawlecзки oraz koło zębate wykonane są ze stali narzędziowej. Tuleje wykonano z brązu oraz osadzono na kleju mocującym Loctite 638 (Rys. 2 i 3).



Rys.2. Wygląd i wymiary zamodelowanego egzoszkieletu  
 Fig.2. Appearance and dimensions of the modeled exoskeleton

#### 4. Analiza wytrzymałościowa modelu

Podstawowym kryterium w fazie modelowania jest wytrzymałość i sztywność wytwarzanych elementów. Aby mieć pewność, że konstrukcja spełnia te wymogi należy poddać ją analizie wytrzymałościowej. Tu z pomocą przychodzi szereg programów inżynierskiego wspomaganie projektowania i obliczeń metodą elementów skończonych (MES). Jednym z nich jest zintegrowane środowisko „Analiza naprężeń” programu Autodesk Inventor 2020. Jednak sam program to jeszcze nie wszystko. Do rzetelnej analizy potrzebna jest znajomość wielu danych w celu prawidłowego odwzorowania zachowania badanego modelu. Określenie geometrii układu, dobór rodzaju dyskretyzacji, znajomość właściwości materiałowych podzespołów, warunków podparcia oraz obciążenia układu to podstawowe wytyczne każdej analizy metodą elementów skończonych. Znając te dane można przystąpić do analizy, której efektem będzie rozkład powstałych w analizowanym obiekcie naprężeń, odkształceń oraz przemieszczeń w postaci barwnych map rozkładu tych wartości w badanej części lub zespole elementów.

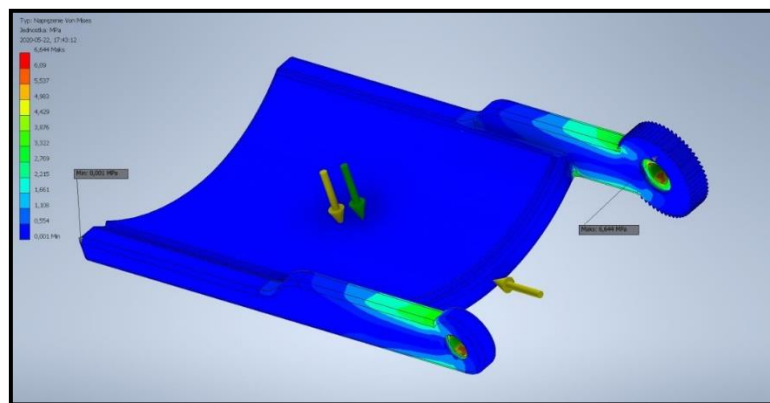


W przypadku rozpatrywanego egzozszkieletu jako główną siłę obciążającą układ przyjęto sumę masy własnej egzozszkieletu (0,7kg) oraz masy kończyny górnej (2,8kg). Należy ją przyłożyć w taki sposób aby jak najdokładniej odzwierciedlała rzeczywisty nacisk.

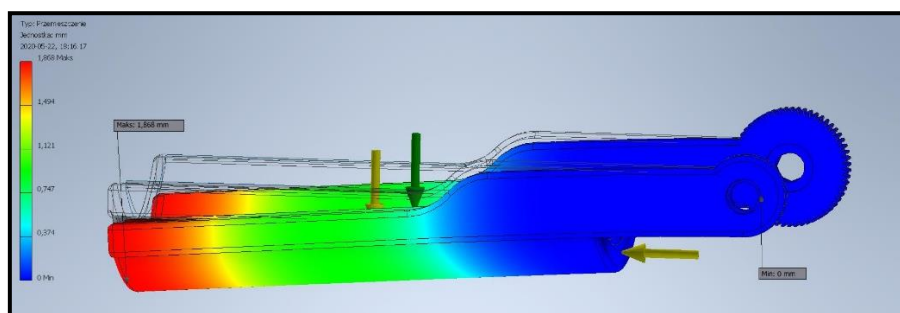
Podstawowe parametry materiałowe Poliamidu PA 2200 to: moduł Young'a – 1,7 GPa, współczynnik Poissona – 0,41, granica plastyczności – 50 MPa, wytrzymałość na rozciąganie – 50 MPa, gęstość - 0,926 g/cm<sup>3</sup>.

Model poddawano obciążeniom w wielu wariantach. Najistotniejsze z nich wynikające z charakteru pracy urządzenia to obciążenia prostopadłe oraz styczne do krawędzi modelu. Wzięto również pod uwagę występowanie siły grawitacyjnej. Model został utwierdzony sztywno w miejscu połączenia elementów – w sworzniach.

Przeprowadzona symulacja dała wyniki przedstawione na rysunkach 4 i 5. Uzyskane wartości naprężeń są mniejsze od dopuszczalnych a przemieszczenia małe w porównaniu z głównymi wymiarami urządzenia. Można przyjąć, że kryterium wytrzymałości i sztywności zostało spełnione. Przedstawione w pracy wyniki mają charakter poglądowy. W przypadku profesjonalnej analizy należałoby zbudować i przeanalizować model w jednym z komercyjnych systemów MES (np. MSC.Software lub Ansys).



Rys.3. Rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa (maks. 6,64 MPa)  
Fig.3. Distribution of reduced stress according to the Huber-Mises hypothesis (max. 6,64 MPa)



Rys.4. Rozkład przemieszczeń wypadkowych (maksymalna wartość 1,868 mm)  
Rys.4. The resultant of displacement distribution (maximum value 1.868 mm)

## Literatura

1. N.G. Tsagarakis, D.G. Caldwell, "Development and control of a 'soft-actuated' exoskeleton for use in physiotherapy and training", Auto.Robots, t.15, nr 1, ss.21-33, 2003.
2. H. S. Lo, S. Q. Xie, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects", Med. Eng. Phys., t. 34, nr 3, ss. 261-268, 2012.

# IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW HETEROGENICZNEGO MODELU MATERIAŁOWEGO TŁOCZYSKA AMORTYZATORA SAMOCHODOWEGO

mgr inż. PRZEMYSŁAW SEBASTJAN

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono proces identyfikacji danych materiałowych tłoczyska amortyzatora samochodowego poddanego procesowi hartowania powierzchniowego. Wskutek obróbki cieplnej, własności materiałowe tego komponentu nie są jednakowe na jego przekroju, co stwarza problemy z odtworzeniem poprawnego zachowania całego amortyzatora w symulacji komputerowej. Przedstawiony proces identyfikacji oparty jest o metodykę *6σ planowanie eksperymentu* oraz optymalizację w oparciu o analizy MES metody ewolucyjne.



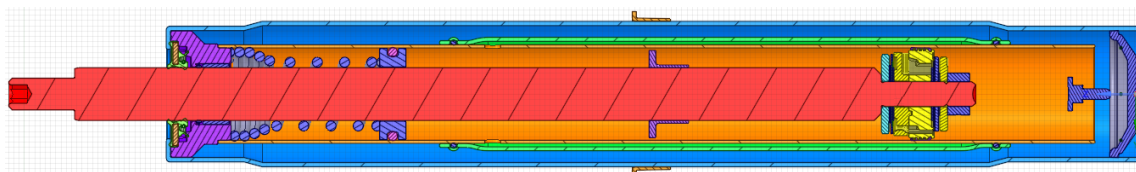
## PARAMETERS IDENTIFICATION OF AUTOMOTIVE SHOCK ABSORBER PISTON ROD HETEROGENEOUS MATERIAL MODEL

**Abstract.** Work presented in this paper concerns the process of identification of heterogeneous material properties of induction hardened piston rods, which are a part of automotive shock absorber. Considered calibration combines *6σ DOE* tools together with FEM-based evolutionary optimization techniques. Ultimate goal of the work is the creation of universal material model that replicates the physical behavior of piston rod for any cross-sectional hardening depth.

### 1. Wprowadzenie

Nieodłącznym elementem każdego amortyzatora samochodowego jest tłoczysko (rys. 1.), którego sztywność oraz wytrzymałość jest kwestią krytyczną z punktu widzenia bezpieczeństwa pojazdu. Obudowa amortyzatora mocowana w zwrotnicy porusza się zgodnie z ruchem koła, natomiast tłoczysko, wraz z zamontowanym na nim zaworze, połączone jest trwale z nadwoziem samochodu. Gdy pojazd jest w ruchu, wymuszone zostaje wzajemne przesunięcie obu elementów, tworzące siłę tłumienia, będącą główną funkcją jaką pełni amortyzator w układzie zawieszenia.

Jednak siła osiowa wynikająca z tłumienia nie jest jedyną siłą jaka działa na tłoczysko. Większość uszkodzeń tego komponentu wynika z działania momentów gnących i sił bocznych, które powodują jego zginanie. Dodatkowo, przy wygiętym tłoczysku i działającej sile osiowej powstaje mimośród, powodujące dalsze zwiększenie obciążenia gnącego w układzie.

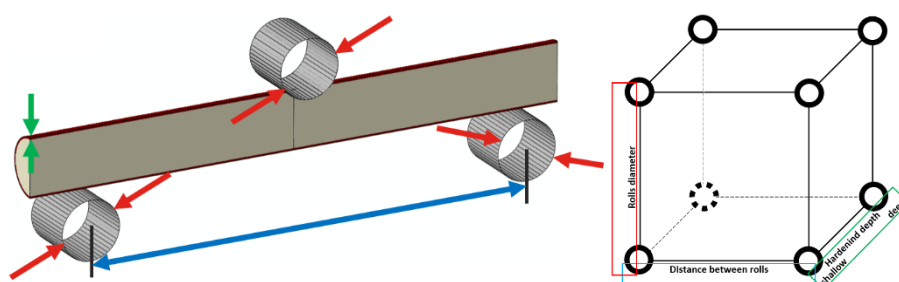


Rys. 1. Amortyzator samochodowy. Kolorem czerwonym zaznaczono tłoczysko  
Fig. 1. Shock absorber for passenger car. Piston rod is marked with red color

Istnieje kilka sposobów na zwiększenie wytrzymałości tłoczyska. Metodą rozpatrywaną w niniejszym artykule jest hartowanie indukcyjne zewnętrznej powierzchni tłoczyska, prowadzące do znacznej zmiany struktury materiału przy jego powierzchni. Problemem z jakim trzeba się zmierzyć jest wyznaczenie własności materiałowych zahartowanego materiału oraz prawidłowa identyfikacja głębokości, na jakiej własności mechaniczne owego materiału zostały zmienione. Narzędziem do rozwiązania tak postawionego problemu jest analiza wytrzymałościowa metodą elementów skończonych z użyciem inżynierii odwrotnej, zwana dalej identyfikacją materiałową.

## 2. Testy fizyczne gięcia tłoczysk

W celu uzyskania danych wejściowych do identyfikacji materiałowej, konieczne jest przeprowadzanie testów na reprezentatywnych sztukach produkcyjnych. Testy takie znane są jako trójpunktowa próba zginania. Oczywistym jest, że z każdym testem związane są dodatkowe wydatki i czasowe obciążenie pracowników, dlatego jednym z celów identyfikacji jest minimalizacja ilości komponentów zużytych (zniszczonych) na potrzeby testów. W tym celu wyznaczono zbiór cech konstrukcyjnych i testowych, które mają bezpośredni wpływ na wynik próby gięcia (rys. 2.). Aby otrzymane dane (po identyfikacji) były reprezentatywne, tj. użycie ich dla dowolnej postaci tłoczyska, z różną głębokością zahartowania oraz przy różnych rozstawach podpór podczas gięcia, testy przeprowadza się dla kilku scenariuszy, zgodnie z metodyką planowania eksperymentu wg planu kompletnego [1]. Każdy z trzech parametrów rozpatrywany był z dwoma skrajnymi wartościami, reprezentującymi ekstrema zmienności danego parametru w produkcji lub w teście.



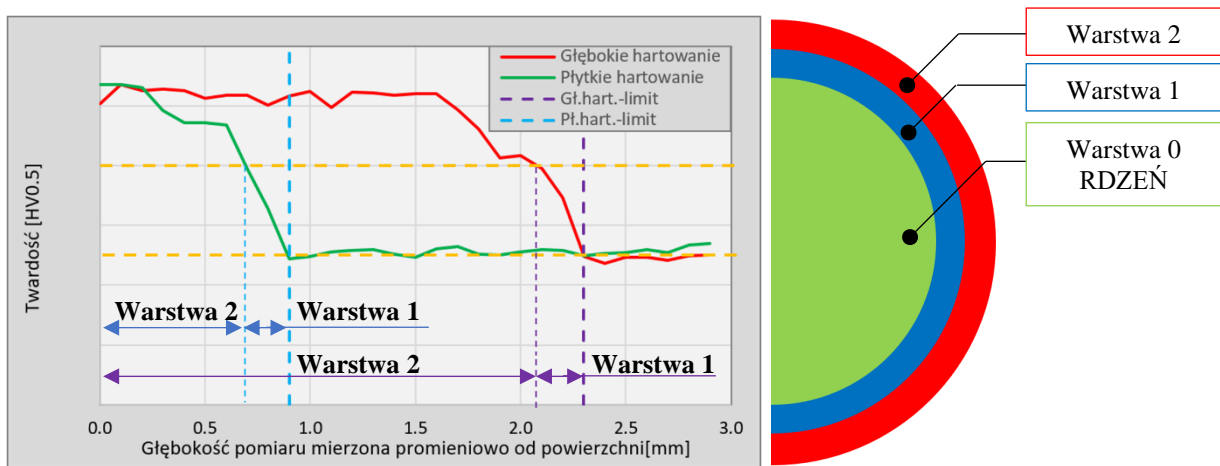
Rys. 2. Trójpunktowe zginanie tłoczyska: a) schemat testu, b) macierz parametrów DOE  
Fig. 2. Rod three-point bending test: a) test setup, b) DOE matrix of parameters

Dzięki przeprowadzonym testom można było wykazać, że parametr dotyczący średnicy podpór nie ma istotnego wpływu na wartość siły (momentu) uplastyczniającej tłoczysko czy też na przebieg krzywej siła-przemieszczenie. Jest to też o tyle istotne, iż proces identyfikacji można zawęzić do czterech, a nie ośmiu symulacji (pozostały dwa istotne parametry testowe: rozstaw podpór i głębokość zahartowania). Na potrzeby identyfikacji przygotowano cztery modele numeryczne odpowiadające testom. Aby móc prawidłowo określić udział warstwy zahartowanej na przekroju tłoczyska, posłużono się pomiarami mikrotwardości (rys. 3.a).

W rezultacie, model numeryczny został utworzony z dwiema warstwami materiału o nieznanymi właściwościami mechanicznymi (rys. 3.b). Zgodnie z rozkładem twardości założono, iż warstwa zewnętrzna cechuje się większą granicą plastyczności  $Re$  oraz wytrzymałością na rozciąganie  $Rm$  niż warstwa pod nią, tj:

$$Re_2 > Re_1 > Re_0, Rm_2 > Rm_1 > Rm_0 \quad (1)$$

$$Rm_i = Re_i * X_i, Re_2 = Re_1 * X_3 \quad (2)$$



Rys. 3. a) Rozkład mikrotwardości [HV0.5] na promieniu przekroju badanych tłoczysek, b) podział tłoczyśka na warstwy materiału

Fig. 3. a) Vickers micro hardness [HV0.5] distribution over rod cross-section (measured radially), b) rod cross-section divided into three material layers

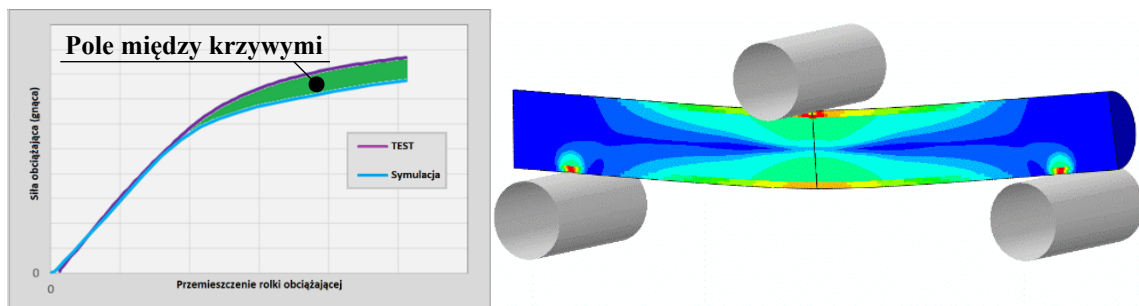
### 3. Proces identyfikacji danych materiałowych

W celu uzyskania wiernego odwzorowania krzywej siła-przemieszczenie z testu za pomocą symulacji numerycznej, posłużono się oprogramowaniem inżynierskim Isight, składającym się z wielu współpracujących modułów, jak: moduł Abaqus, moduł do porównywania danych Data Matching oraz moduł sterujący procesem optymalizacji.

Zadanie identyfikacji potraktowano jako zadanie optymalizacji z ograniczeniami. Jej celem jest minimalizacja pola między krzywą (krzywymi) siła-przemieszczenie z testów oraz z symulacji (Rys. 4.a). Ograniczono zakres zmienności parametrów  $Re_1$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  oraz  $X_3$ . Model obliczeniowy uproszczono do jednej ćwiartki z powodu symetrii warunków brzegowych.

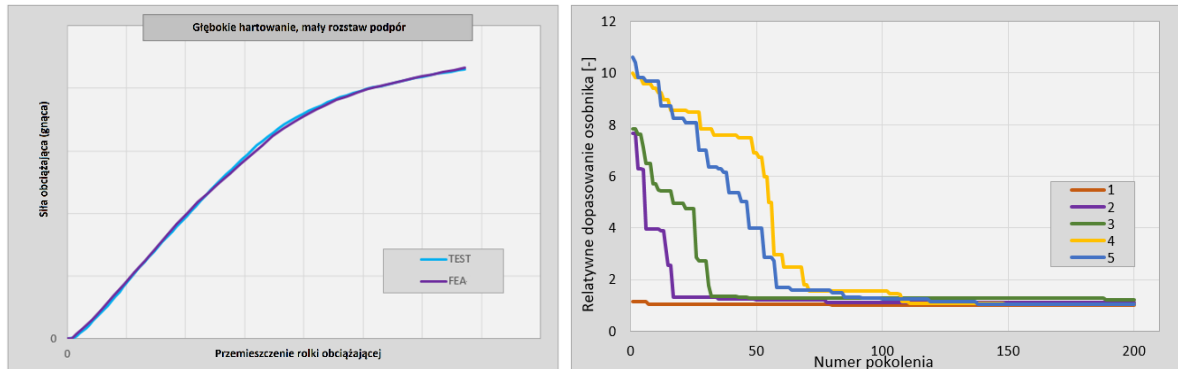
$$F(Re_1, X_1, X_2, X_3) \rightarrow \min \quad (4)$$

Do minimalizacji krzywej posłużono się strategią ewolucyjną  $(1+\lambda)$ , gdzie  $\lambda=5$ . Dzięki takiemu ustawieniu algorytmu optymalizacyjnego, możliwe było zrównoleglenie obliczeń na pięć niezależnych procesów, tj. z jednego rodzica powstaje na raz pięciu potomków, a najbardziej przystosowany z nich używany jest jako rodzic do stworzenia kolejnego pokolenia [2]. Jako, że optymalizacja przy użyciu strategii ewolucyjnej zależna jest od punktu startowego, proces optymalizacji przeprowadzono dla pięciu losowych zbiorów parametrów początkowych.



Rys. 4. Identyfikacja danych materiałowych: a) funkcja celu, b) schemat symulacji  
Fig. 4. Material data identification: a) objective function, b) simulation setup

Dane materiałowe dotyczące rdzenia pochodziły z osobnego testu materiału wsadowego, który można uznać za homogeniczny, w przeciwieństwie do pozostałej części tłoczyska. Proces identyfikacji został więc zawężony do dwóch podobszarów czy też stref zahartowania. Wynikowy poziom identyfikacji, tj. różnica między testem i finalną postacią symulacji, przedstawia rys. 5.a). Z kolei zbieżność algorytmu ewolucyjnego (1+5)-ES przedstawia rys. 5.b).



Rys. 5. Proces optymalizacji: a) krzywe siła-przesunięcie po procesie identyfikacji (jeden z czterech przypadków), b) zbieżność procesu optymalizacji  
 Fig. 5. Optimization process: a) load-deflection curves as a result of identification process (one out of four cases), b) convergence of evolutionary algorithm

#### 4. Podsumowanie

Identyfikacja materiałowa przy użyciu kombinacji czterech różnych testów (różne warunki brzegowe oraz głębokości hartowania) pozwoliła na stworzenie uniwersalnych modeli materiałowych, które umożliwiają ekstrapolację oraz interpolację wyników na dowolny poziom hartowania, jeżeli znany jest profil twardości części. Możliwość przypisania danych materiałowych w zależności od twardości materiału potwierdza tezy zawarte w literaturze naukowej [3]. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia projektowania amortyzatora, gdyż właściwy poziom zahartowania (z punktu widzenia wymagań czy założeń projektowych) może być określony dzięki relatywnie szybkiej symulacji, bez konieczności stworzenia kosztownych, prototypowych części.

Użycie strategii ewolucyjnych pozwoliło na zrównoleglenie obliczeń, i co za tym idzie, uzyskanie wyniku w akceptowalnym czasie. Sumarycznie, w całym procesie identyfikacji funkcję celu (obliczenia numeryczne) wywołano 4000 razy. Zbieżność zależy od punktu startowego, niemniej jednak w dwóch z analizowanych przypadków różnica między ostateczną wartością funkcji celu różna jest od rozwiązania optymalnego o 3.3% i 3.6%. W pozostałych dwóch przypadkach, różnica jest większa i wynosi odpowiednio 13% i 22%.

#### Literatura

1. Konkol J., Wprowadzenie do praktycznego planowania eksperymentu, StatSoft Polska, (2008)
2. Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań, PWN, Warszawa (2009)
3. Vantyne C., Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 17, s. 888-893 (2008)

## MODELOWANIE PROCESU KRIOKONSERWACJI TKANKI CHRZĘSTNEJ Z WYKORZYSTANIEM ARYTMETYKI INTERWAŁOWEJ

**mgr inż. ANNA SKORUPA**

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhayat, Prof. PŚ

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono model matematyczny przepływu ciepła w chrząstce stawowej podczas procesu kriokonserwacji z uwzględnieniem interwałowych parametrów termofizycznych. Podstawę modelu stanowi przedziałowe równanie Fouriera uzupełnione o odpowiednie warunki brzegowo-początkowe. Do kontroli temperatury zastosowano metodę „śledzenia krzywej likwidus” (LT). Do rozwiązania problemu zastosowano interwałową metodę różnic skończonych, stosując reguły skierowanej arytmetyki interwałowej.



## NUMERICAL MODELLING OF ARTICULAR CARTILAGE CRYOPRESERVATION USING INTERVAL ARITHMETIC

**Abstract.** In the paper, the numerical analysis of heat transfer proceeding in the axially symmetrical articular cartilage sample subjected to cryopreservation process is presented. The base of heat transfer model is given by the Fourier interval equation and supplemented by the boundary-initial conditions. The liquidus-tracking method was used to control the temperature. The problem discussed has been solved using the interval finite difference method with the rules of directed interval arithmetic. In the final part of the paper the numerical computations are shown.

### 1. Wprowadzenie

Kriokonserwacja jest procesem polegającym na przechowywaniu tkanek lub komórek w temperaturze poniżej zera. Aktywność biologiczna tkanek zostaje obniżona lub całkowicie zatrzymana w taki sposób, aby po ponownym przywróceniu temperatury fizjologicznej proces ten nie miał znaczącego wpływu na podstawowe funkcje, np. własności mechaniczne. Zjawiska termofizyczne zachodzące w komórkach lub tkankach podczas obniżania ich temperatury, regulowane są chemicznymi środkami pomocniczymi tzw. krioprotektantami (CPA). Proces kriokonserwacji składa się z czterech podstawowych etapów, a mianowicie: zaaplikowanie CPA, zamrażanie tkanki, ich odmrażanie oraz usunięcie CPA [1].

Obecnie stosuje się głównie następujące metody kriokonserwacji: poprzez chłodzenie z małą prędkością lub poprzez witrifikację. Pierwsza z wymienionych technik wykorzystuje niskie stężenia CPA, dzięki czemu tkanki nie są narażone na uszkodzenie w wyniku chemicznej toksyczności. Niestety, powolne zamrażanie może powodować powstawanie kryształów lodu, co powoduje odwadnianie i niszczenie tkanek. Z drugiej strony, witrifikacja wykorzystuje szybkie chłodzenie, gdzie przejście ze stanu ciekłego do stanu szklistego odbywa się bez formowania kryształów lodu. W przypadku witrifikacji problemem są negatywne dla tkanki skutki toksyczności oraz szoku osmotycznego, związane z wysokim stężeniem CPA [1].

Alternatywną technikę kriokonserwacji zaproponowali Pegg i inni w artykule [2]. Metoda „śledzenia krzywej likwidus” (*ang. Liquidus-tracking method*) polega na regulowaniu temperatury i stężenia CPA w komórce/tkance tak, aby stan próbki znajdował się na linii likwidus lub powyżej niej. Takie działanie pozwala uniknąć powstawania kryształów lodu oraz wprowadzania wysokiego stężenia krioprotektanta, szczególnie w zakresie temperatur powyżej zera [2, 3].

## 2. Model matematyczny

Pole temperatury dla stanu nieustalonego w jednorodnej i izotropowej próbce chrząstki stawowej w kształcie walca wyznaczono za pomocą interwałowego równania Fouriera (zadanie 2D, układ cylindryczny) [1, 3, 4]:

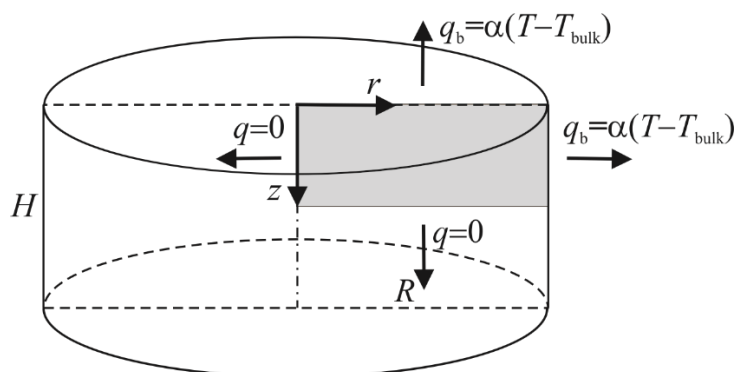
$$[c^-, c^+][\rho^-, \rho^+] \frac{\partial \bar{T}(r, z, t)}{\partial t} = [\lambda^-, \lambda^+] \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{T}(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \bar{T}(r, z, t)}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

gdzie  $[c^-, c^+]$  to interwałowe ciepło właściwe,  $[\rho^-, \rho^+]$  to interwałowa gęstość,  $[\lambda^-, \lambda^+]$  to interwałowy współczynnik przewodzenia ciepła, a  $\bar{T}(r, z, t)$  to interwałowa temperatura,  $t$  jest czasem, natomiast  $r$  oraz  $z$  oznaczają współrzędne cylindryczne.

Równanie (1) uzupełniono o odpowiednie warunki brzegowe II oraz III rodzaju [3], co zostało przedstawione na rys. 1 oraz warunek początkowy zdefiniowany jako:

$$t = 0: \quad T(r, z, 0) = T_0 \quad (2)$$

gdzie  $T_{\text{bulk}}$  jest temperaturą kąpieli w roztworze,  $T_0$  to temperatura początkowa, a  $\alpha$  to współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem.



Rys. 1. Schemat analizowanej próbki oraz przyjętych warunków brzegowych  
Fig. 1. Diagram of the analysed sample and the assumed boundary conditions

## 3. Interwałowa metoda różnic skończonych

Analizę numeryczną przeprowadzono za pomocą interwałowej wersji metody różnic skończonych, opisaną w [5], wykorzystując przy tym zasady skierowanej arytmetyki interwałowej [4].

Na początku, wprowadzono siatkę czasu ze stałym krokiem  $\Delta t$ :

$$t^0 < t^1 < \dots < t^{f-2} < t^{f-1} < t^f < \dots < t^F < \infty \quad (3)$$

Następnie analizowany obszar poddano dyskretyzacji, przy czym warto wspomnieć, że węzły brzegowe zostały umieszczone od brzegu w odległości  $0.5h$  lub  $0.5k$ , gdzie  $h$  i  $k$  stanowią skok siatki w kierunku osi  $r$  i  $z$  odpowiednio. Zabieg ten pozwala na lepszą aproksymację warunków brzegowych Neumanna i Robina [6].

Podstawiając ilorazy różnicowe do równania (1) oraz wykonując odpowiednie przekształcenia, otrzymano następujące interwałowe równanie:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{i,j}^f = \bar{T}_{i,j}^{f-1} + \frac{[\lambda^-, \lambda^+] \Delta t}{[c^-, c^+][\rho^-, \rho^+]} \cdot \left[ \frac{1}{h} \frac{1}{hr_0} \left[ (r_0 + 0.5h)(\bar{T}_{i+1,j}^{f-1} - \bar{T}_{i,j}^{f-1}) + (r_0 - 0.5h)(\bar{T}_{i-1,j}^{f-1} - \bar{T}_{i,j}^{f-1}) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{k^2} \left[ (\bar{T}_{i,j+1}^{f-1} - \bar{T}_{i,j}^{f-1}) + (\bar{T}_{i,j-1}^{f-1} - \bar{T}_{i,j}^{f-1}) \right] \right] \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie  $r_0$  to odległość węzła od początku osi  $r$ .

#### 4. Przykładowe obliczenia

Analizowano próbkę o promieniu  $R = 0.003$  m i wysokości  $H = 0.001$  m. Przyjęto następujące parametry badanej chrząstki stawowej (por. [4, 7]):  $[c^-, c^+] = [3271, 4389]$   $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $[\rho^-, \rho^+] = [947.245, 1047]$   $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $[\lambda^-, \lambda^+] = [0.57, 0.63]$   $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\alpha = 525$   $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  oraz  $T_0 = 22$   $^{\circ}\text{C}$ . Założono, że krok czasu wynosi  $\Delta t = 0,001$  s, krok siatki w kierunku osi  $r$  to  $h = 0.0001$  m, a w kierunku osi  $z$  to  $k = 0.00005$  m (zastosowano siatkę  $30 \times 10$  węzłów). Temperaturę kąpieli  $T_{\text{bulk}}$  regulowano zgodnie z protokołem metody śledzenia likwidusu przedstawionym w [2, 3].

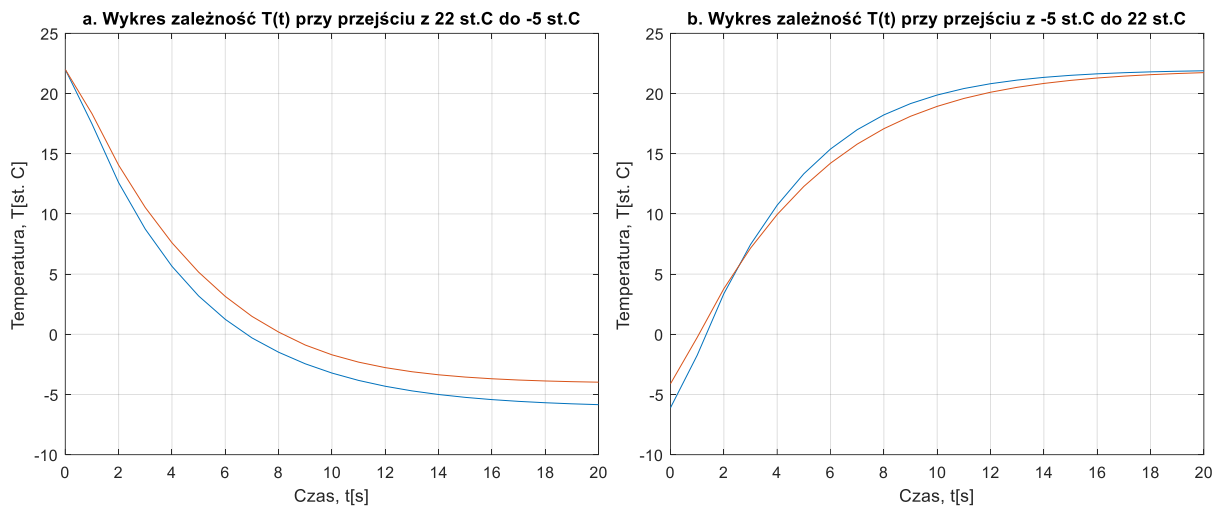
W tabeli 1 przygotowano zestawienie temperatur uzyskanych w przeprowadzonej symulacji z temperaturami zadanymi zgodnie z protokołem w artykule [3]. Przedstawione wyniki odnoszą się do punktu o współrzędnych  $r = 0.1$  mm i  $z = 0.45$  mm.

Natomiast na rys. 2 zamieszczono wykres zależności temperatury od czasu dla danego punktu a. w momencie przejścia z temperatury  $22$   $^{\circ}\text{C}$  do  $-5$   $^{\circ}\text{C}$  (z kroku 2 do kroku 3 w fazie chłodzenia) oraz b. w momencie przejścia z temperatury  $-5$   $^{\circ}\text{C}$  do  $22$   $^{\circ}\text{C}$  (z kroku 6 do kroku 7 w fazie ogrzewania).

Tabela 1. Temperatury otrzymane w symulacji  
Table 1. Temperatures obtained in the simulation

Faza	Krok	Czas t [min]	Temperatura kąpieli w roztworze	Otrzymana temperatura w postaci interwałów po danym kroku	
			$T_{\text{bulk}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T^-$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T^+$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Chłodzenie	1	10	22	22	22
	2	10	22	22	22
	3	30	-5	-6.1	-4.1
	4	30	-8.5	-10.4	-7
	5	30	-16	-19.5	-13.1
	6	30	-23	-28	-18.9
	7	30	-35	-43	-29
	8	30	-48.5	-59	-40
Ogrzewanie	1	30	-48.5	-59	-40
	2	30	-35	-43	-29
	3	30	-23	-28	-19
	4	30	-16	-20	-13
	5	30	-8.5	-10	-7
	6	30	-5	-6	-4
	7	45	22	22	22





Rys. 2. Przebieg temperatury w czasie przy przejściu a. z 22 °C do -5 °C i b. z -5 °C do 22 °C  
 Fig. 2. History of the temperature in time a. from 22 °C to -5 °C and b. from -5 °C to 22 °C

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono analizę numeryczną procesu kriokonserwacji przeprowadzoną z wykorzystaniem metody śledzenia krzywej likwidus dla tkanki chrzęstnej, wykorzystując interwałową metodę różnic skończonych. Porównując otrzymane wyniki symulacji numerycznej z wartościami zaprezentowanymi w [3] można stwierdzić, że uzyskane przedziały temperatur zawierają wartości temperatur zamieszczone w [3]. Oznacza to, że wykorzystywanie interwałowej metody różnic skończonych do modelowania kriokonserwacji tkanek jest zasadne i pozwala na uwzględnienie w modelu matematycznym nieprecyzyjnie określonych parametrów (np. wyznaczonych drogą eksperymentalną). Dodatkowo symulacja pokazuje, że równowagę termiczną w poszczególnych krokach protokołu uzyskano po ok. 20 s. Kolejnym etapem pracy będzie rozszerzenie przedstawionego modelu o zjawisko dyfuzji masy.

## Literatura

1. Xu F., Moon S., Zhang X., Shao L., Song Y. S., Demirci U., Multi-scale heat and mass transfer modelling of cell and tissue cryopreservation, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 368, nr 1912, s.561-583 (2010).
2. Pegg D. E., Wang L., Vaughan D., Cryopreservation of articular cartilage. Part 3: The liquidus-tracking method, *Int. Journal Heat Mass Transfer*, vol. 141, s. 719-730 (2019).
3. Yu X., Zhang S., Chen G., Modeling the addition/removal of dimethyl sulfoxide into/from articular cartilage treated with the liquidus-tracking method, *Int. Journal Heat Mass Transfer*, vol. 141, s. 719-730 (2019).
4. Mochnacki B., Piasecka-Belkhat A., Numerical modeling of skin tissue heating using the interval finite difference method, *Molecular & Cellular Biomechanics*, vol. 10, nr 3, s. 233–244 (2013).
5. Majchrzak E. Mochnacki B., *Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2004).
6. Mochnacki B., Suchy J., *Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów*, PWN, Warszawa (1993).
7. Behrou R., Foroughi H., Haghpanah F., Numerical study of temperature effects on the poro-viscoelastic behavior of articular cartilage, *Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 78, s. 214–223 (2018).

## MODELOWANIE PRZEPIYU CIEPŁA I CIECZY W KANALE O PRZEKROJU KOŁOWYM Z PRZESZKODĄ

**mgr inż. MIKOŁAJ STRYCYŃSKI**

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak



**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki analizy cieplno-przepływowej cieczy w kanale o przekroju kołowym z przeszkodą o stałej temperaturze. Zagadnienie osiowo-symetryczne przepływu opisano równaniami Naviera – Stokesa oraz ciągłości, natomiast rozkład temperatury równaniem Fouriera – Kirchhoffa. Równania te, uzupełnione warunkami brzegowo-początkowymi oraz rozwiązano stosując metodę różnic skończonych. Opracowano autorski program komputerowy i przeprowadzono obliczenia.

## MODELING OF HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN A CIRCULAR PROFILE CHANNEL WITH AN OBSTACLE

**Abstract.** The results of a fluid flow and heat conduction analysis in a circular profile channel with an obstacle at a constant temperature are presented. The axisymmetric problem of fluid flow is described by the Navier – Stokes equations and continuity equation, while the temperature distribution by the Fourier – Kirchhoff equation. These equations supplemented by appropriate boundary and initial conditions have been solved using the finite difference method. The authorial program has been developed and the computations have been done.

### 1. Wprowadzenie

Modelowanie zagadnienia przepływu cieczy i transportowanego z nią ciepła bazuje na równaniach Naviera – Stokesa, równaniach ciągłości i Fouriera – Kirchhoffa. W artykule przedstawiono model matematyczny przepływu cieczy w kanale o przekroju kołowym z przegrodą o stałej temperaturze. Zadanie rozwiązano stosując metodę różnic skończonych z wykorzystaniem siatki rozbieżnej (przesuniętej), w której wyróżnia się węzły związane z temperaturą i ciśnieniem oraz węzły związane ze składowymi prędkościami w kierunku promieniowym i osiowym (rys. 1). Metodę uzupełniono iteracyjną procedurą korekty ciśnienia, zapewniającą spełnienie z założoną dokładnością równania ciągłości [1]. Opracowano autorski program komputerowy do wyznaczania rozkładów temperatury, składowych prędkości i wartości ciśnienia. Przeprowadzono obliczenia dla różnych kroków czasu i na tej podstawie sformułowano wnioski.

### 2. Model matematyczny

Model matematyczny przepływu cieczy i ciepła w układzie cylindrycznym opisany jest układem następujących równań [2, 3]:

– składowej prędkości wzdłuż promienia walca



### 3. Metoda różnic skończonych

Sformułowane zadanie rozwiązano za pomocą algorytmu MRS opracowanego dla równań Naviera – Stokesa, ciągłości i Fouriera – Kirchhoffa. Wprowadzono siatkę różnicową rozbieżną (przesuniętą) o stałym kroku  $h$  w kierunku promieniowym i  $k$  wzdłuż osi walca [2]. Liczba węzłów w kierunku promieniowym wynosi  $m$ , natomiast wzdłuż osi cylindra jest równa  $n$ .

Stosując odpowiednie ilorazy różnicowe dla pochodnych występujących w równaniach (1) i (2), w pierwszym kroku obliczono wartości składowych prędkości nie uwzględniając w tych równaniach składników związanych z ciśnieniem i oznaczono je przez  $\bar{u}_{i,j}^{f+1}$  oraz  $\bar{v}_{i,j}^{f+1}$ .

Następnie, aproksymowano równanie (3) i otrzymano

$$\begin{aligned} & \frac{\bar{u}_{i-1,j}^{f+1} + \bar{u}_{i+1,j}^{f+1}}{2r_{i,j}} - \frac{\Delta t}{4r_{i,j}h\rho} (p_{i,j}^{f+1} - p_{i-2,j}^{f+1}) - \frac{\Delta t}{4r_{i,j}h\rho} (p_{i+2,j}^{f+1} - p_{i,j}^{f+1}) + \frac{\bar{u}_{i+1,j}^{f+1} - \bar{u}_{i-1,j}^{f+1}}{2h} + \\ & \frac{\bar{v}_{i,j+1}^{f+1} - \bar{v}_{i,j-1}^{f+1}}{2k} - \frac{\Delta t}{4\rho h^2} (p_{i-2,j}^{f+1} - 2p_{i,j}^{f+1} + p_{i+2,j}^{f+1}) - \frac{\Delta t}{4\rho k^2} (p_{i,j-2}^{f+1} - 2p_{i,j}^{f+1} + p_{i,j+2}^{f+1}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Z powyższego równania wyznacza się w sposób iteracyjny wartości ciśnienia w węzłach  $i=1, 3, \dots, m-1$ ;  $j=1, 3, \dots, n-1$ . Ostatecznie składowe prędkości obliczono odpowiednio dla  $i=2, 4, \dots, m-2$ ;  $j=1, 3, \dots, n-1$

$$u_{i,j}^{f+1} = \bar{u}_{i,j}^{f+1} - \frac{\Delta t}{2h\rho} (p_{i+1,j}^{f+1} - p_{i-1,j}^{f+1}) \quad (7)$$

oraz dla  $i=1, 3, \dots, m-1$ ;  $j=2, 4, \dots, n-2$

$$v_{i,j}^{f+1} = \bar{v}_{i,j}^{f+1} - \frac{\Delta t}{2k\rho} (p_{i,j+1}^{f+1} - p_{i,j-1}^{f+1}) \quad (8)$$

Wartości temperatury w węzłach wewnętrznych obliczono z równania

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{f+1} = & \frac{1}{4} (T_{i-2,j}^f + T_{i+2,j}^f + T_{i,j-2}^f + T_{i,j+2}^f) - \Delta t \frac{(uT)_{i+1,j}^f - (uT)_{i-1,j}^f}{2h} - \\ & \Delta t \frac{(vT)_{i,j+1}^f - (vT)_{i,j-1}^f}{2k} + a\Delta t \left( \frac{1}{r_{i,j}} \frac{T_{i+2,j}^f - T_{i-2,j}^f}{4h} + \frac{T_{i-2,j}^f - 2T_{i,j}^f + T_{i+2,j}^f}{4h^2} + \frac{T_{i,j-2}^f - 2T_{i,j}^f + T_{i,j+2}^f}{4k^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Należy podkreślić, że składowe prędkości prostopadłe do przeszkody są równe zero, a dla składowych prędkości stycznych do przeszkody założono zerowy gradient.

### 4. Wyniki obliczeń

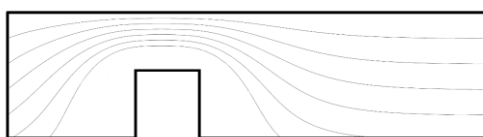
Obliczenia przeprowadzono dla kanału o długości  $Z = 0.4$  m i promieniu  $R = 0.1$  m. Przeszkoda znajdowała się w odległości 0.1 metra od wlotu kanału. Jej wysokość oraz szerokość wynosiły 0.06 m. Symulację przepływu przeprowadzono dla wody wpływającej do kanału z prędkością  $v_{in} = 0.01$  m/s. Przyjęto następujące parametry termofizyczne płynu:  $\rho = 998,3$  kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda = 0,6$  W/(mK),  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,  $c = 4190$  J/(kgK). Temperatura początkowa cieczy wynosiła  $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ , natomiast poboczniczy oraz przeszkody  $T_b = 60^\circ\text{C}$ . Siatka różnicowa składała się z 6804 węzłów.

Ze względu na dużą złożoność numeryczną badanego zagadnienia, starano się dobrać odpowiedni krok czasu, pozwalający na uzyskanie stosunkowo dokładnych wyników, przy jak najkrótszym czasie obliczeń. Symulację przeprowadzono dla różnych wartości  $\Delta t$  z przedziału 0.00001 s – 0.01 s. Całkowity czas obserwacji wynosił 4 sekundy. Wyniki analizy przedstawiono w formie izoterm (rys. 2) oraz rozkładu linii prądu (rys. 3).

Po wyznaczeniu temperatur, obliczono błąd bezwzględny w każdym węźle temperaturowym między rozwiązaniem dokładnym a pozostałymi wynikami. Za wartość dokładną umownie przyjęto wyniki dla kroku czasu 0.00001 s. Następnie sumę tych modułów podzielono przez liczbę węzłów, uzyskując w ten sposób średnie błędy bezwzględne temperatur, które wraz z czasami uzyskania stanu ustalonego zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Rozkład temperatury po czasie 4 sekund – krok czasu 0.00001 s  
Fig. 2. Temperature distribution after 4 seconds – time step 0.00001 s



Rys. 3. Linie prądu po czasie 4 sekund – krok czasu 0.0001 s  
Fig. 3. Streamlines after 4 seconds – time step 0.0001 s

Tab. 1 Błędy bezwzględne oraz czasy obliczeń  
Tab. 1 Absolute error and calculation times

Krok czasu [s]	0.01	0.001	0.0001	0.00001
Średni błąd bezwzględny [1]	Brak stabilności	1.037	0.0949	0
Czas obliczeń [h:m:s]	Brak stabilności	1:28:37	2:43:11	3:26:34

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono rezultaty sprzężonej analizy przepływu cieczy i ciepła w kanale o przekroju kołowym. Stabilne wyniki uzyskano dla  $\Delta t$  mniejszego od 0.01 s. Dobierając krok czasu należy mieć na uwadze jego wpływ na dokładność rozwiązań. Przy  $\Delta t = 0.001$  s, uzyskany błąd bezwzględny wyniósł 1.037, natomiast przy kroku mniejszym od 0.00001 s różnica między wynikami była znikoma.

Kluczowym czynnikiem wpływającym na czas trwania obliczeń był proces wyznaczania ciśnienia. Tzw. formuła korekty ciśnienia realizowana jest w sposób iteracyjny, co w znacznym stopniu wydłuża czas obliczeń.

## Literatura

1. Kazimierski Z., Podstawy mechaniki płynów i metod komputerowej symulacji przepływów, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź (2004)
2. Sankar.D, Lee U., FDM analysis for MHD flow of a non-Newtonian fluid for blood flow in stenosed arteries, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25, s. 2573 –258 (2011)
3. Kumar S., Chandra S., Heat Transfer and Fluid Flow Characteristic of Blood Flow in Multi–Stenosis Artery with Effect of Magnetic Field, Indian Journal of Biomechanics, s. 186 -190 (2009)

## ALGORYTM SYMULOWANEGO WYŻARZANIA W ZASTOSOWANIACH OPTYMALIZACYJNYCH

inż. GRZEGORZ SUCHOŃ

Mechanika i Budowa Maszyn, MB4, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Jerzy Mendakiewicz, Prof. PŚ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zasadę działania algorytmu symulowanego wyżarzania oraz przeprowadzono przy jego pomocy optymalizację wybranego problemu w postaci poszukiwania minimum globalnego funkcji dwóch zmiennych o wielu minimach lokalnych. Przeprowadzono również strojenie parametrów algorytmu oraz zaproponowano kilka usprawniających modyfikacji. Obliczenia wykonano w programie Matlab.



### SIMULATED ANNEALING ALGORITHM IN OPTIMIZATION APPLICATIONS

**Abstract.** The article discusses main principles of simulated annealing algorithm and shows the process of solving minimization problem of two-variable function with multiple local minimums. Also, required tuning of algorithm parameters was carried out and few improvements were proposed. The problem was solved using Matlab environment.

#### 1. Wprowadzenie

W przypadku funkcji o wielu ekstremach lokalnych, klasyczne metody gradientowe nie są skuteczne w znajdowaniu ekstremum globalnego. Znajdywane jest zazwyczaj ekstremum lokalne zależne od wyboru punktu startowego. W celu znalezienia ekstremum globalnego stosuje się inne metody takie jak szukanie przypadkowe, symulowane wyżarzanie, algorytmy genetyczne, metodę roju cząstek. Algorytm symulowanego wyżarzania jest algorytmem wyszukującym przybliżone rozwiązanie dla problemów NP-trudnych, gdzie przestrzeń możliwych rozwiązań jest tak duża, że sprawdzenie wszystkich rozwiązań jest niemożliwe. Wykorzystując algorytmy przybliżone można znaleźć rozwiązanie, które nie będzie najlepszym możliwym, ale będzie się różnić o akceptowalny błąd i zostanie znalezione w akceptowalnym czasie [1].

#### 2. Zasada działania

Pseudokod algorytmu symulowanego wyżarzania można przedstawić następująco:

1. Wyznaczenie rozwiązania początkowego  $s$ ,
2. Wyznaczenie temperatury początkowej  $T$ ,
3. Iteracyjny cykl obliczeń, aż do osiągnięcia wartości prawdy (true) przez warunek zatrzymania,

*for*  $i = 0$  to  $M$

wyznaczenie losowo sąsiedniego rozwiązania  $s' \in N(s)$

```

 $\delta = f(s') - f(s)$ 
if  $\delta < 0$  then  $s = s'$ 
else
wylosowanie  $x$  z zakresu  $(0, 1)$ 
if  $x < \exp(-\delta/kT)$  then  $s = s'$ 
 $T = \alpha(T)$ 

```

4. Sprawdzenie warunku zatrzymania, czy ma wartość prawdy (true),
5. Wydrukowanie (wyświetlenie) rozwiązania  $s$ .

W tym schemacie przyjęto następujące oznaczenia:

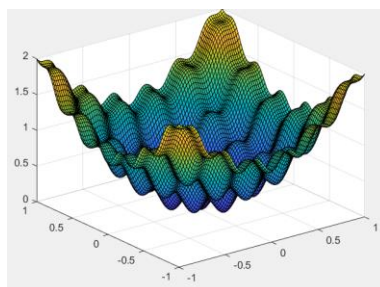
- $s$  – bieżące rozwiązanie,
- $N(s)$  – zbiór sąsiednich rozwiązań dla rozwiązania  $s$ ,
- $\delta$  – różnica kosztów rozwiązań: nowego i poprzedniego (różnica wartości funkcji dla rozwiązania nowego i poprzedniego),
- $f(s)$  – funkcja oceny rozwiązania (funkcja kosztu, wartość funkcji  $f$  dla rozwiązania  $s$ , wartość funkcji  $f$  w punkcie  $s$ ),
- $T$  – aktualna temperatura,
- $\alpha(T)$  – funkcja zmiany temperatury,
- $M$  – liczba iteracji obliczeniowych.

### 3. Optymalizowany problem

Na podstawie wytycznych przedstawionych w części teoretycznej pracy stworzono implementację algorytmu symulowanego wyżarzania w środowisku Matlab. Algorytm został napisany w taki sposób, że jest w stanie odszukać minimum globalne dowolnej funkcji dwóch zmiennych. Aby zapewnić poprawne działanie algorytmu, optymalizowana funkcja powinna być ciągła w zadanej dziedzinie. Domyślnym obszarem działania algorytmu jest obszar ograniczony współrzędnymi  $(-1 < x_1 < 1)$  i  $(-1 < x_2 < 1)$ , jednak warunki te można łatwo zmienić. Podobnie łatwo zmienić można liczbę zmiennych funkcji optymalizowanej, jednak dla większej liczby zmiennych utrudnione może być graficzne przedstawienie problemu w postaci wykresów.

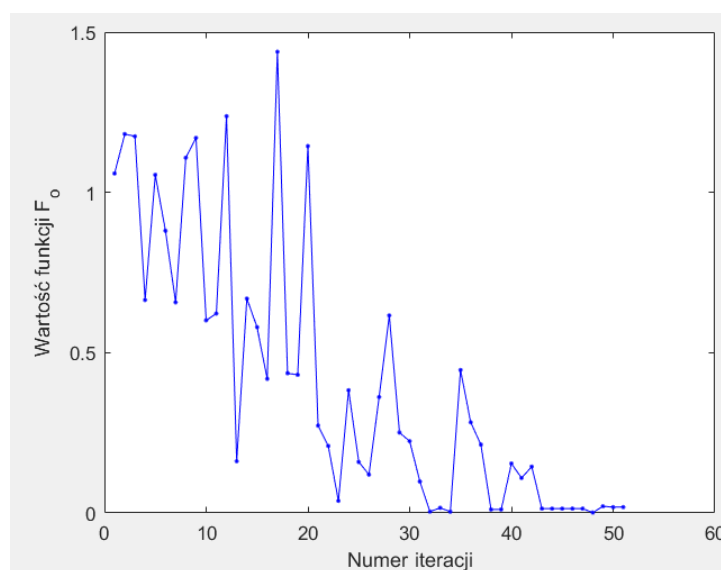
Funkcję dwóch zmiennych poddaną optymalizacji przedstawiono na rys. 1. Jej wzór ma następującą postać:

$$F(x_1, x_2) = 0.2 + x_1^2 + x_2^2 - 0.1 * \cos(6.0 * \pi * x_1) - 0.1 * \cos(6.0 * \pi * x_2) \quad (1)$$



Rys. 1. Funkcja optymalizowana  
Fig. 1. Optimized function

Przebieg optymalizacji przy pomocy tego algorytmu, w postaci wartości funkcji celu w poszczególnych iteracjach, został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Przebieg optymalizacji – wersja podstawowa  
Fig. 2. Optimization process – basic version

#### 4. Strojenie i modyfikacje

Procesowi dostrajania zostały poddane następujące parametry algorytmu:

- Temperatura początkowa – odpowiada za prawdopodobieństwo akceptacji gorszego rozwiązania na początku – wpływa na eksplorację obszaru poszukiwań,
- Temperatura końcowa – odpowiada za prawdopodobieństwo akceptacji gorszego rozwiązania na końcu – wpływa na eksploatację obszaru w pobliżu minimum,
- Liczba kroków algorytmu dla jednej wartości temperatury,
- Funkcja zmiany temperatury – odpowiada za liczbę głównych kroków temperaturowych,
- Funkcja doboru rozwiązania sąsiedniego – określa w jaki sposób i z jakiego obszaru losowane jest kolejne potencjalne rozwiązanie.

Mimo doboru odpowiednich parametrów, algorytm ten nie jest wystarczająco dokładny, dlatego został poddany kilku modyfikacjom:

- I. Dodano mechanizm zapamiętywania najlepszego rozwiązania – jest to zabezpieczenie przed zwróceniem rozwiązania gorszego niż jedno z rozwiązań pośrednich,
- II. We wzorze określającym prawdopodobieństwo akceptacji rozwiązania gorszego, zastąpiono różnicę wartości funkcji celu sąsiednich rozwiązań przez iloraz tej różnicy do średniej wartości różnicy:

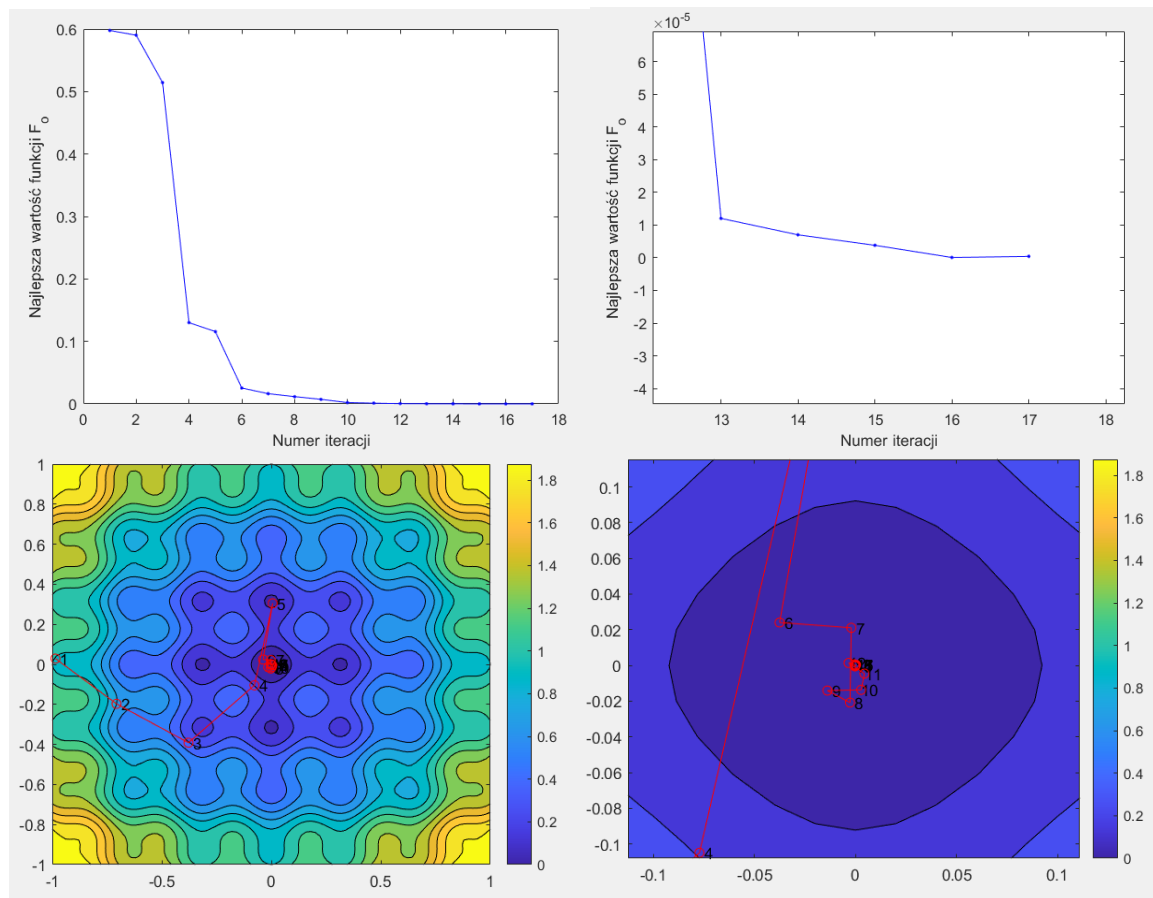
$$p = \exp(-\text{delta}/(\text{delta\_sr} * t)) \quad (2)$$

- III. Zamieniono stałą liczbę iteracji na pętlę z warunkiem zatrzymania po otrzymaniu rozwiązania lepszego o niewielką wartość,
- IV. Zmieniono funkcję doboru rozwiązania sąsiedniego, tak aby na początku algorytmu było ono losowane z dużego obszaru, a następnie wraz ze wzrostem temperatury, obszar ten zmniejszał się.



## 5. Podsumowanie

Przebieg optymalizacji po dokonaniu modyfikacji algorytmu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przebieg optymalizacji – wersja zmodyfikowana

Fig. 3. Optimization process – modified version

Porównanie uzyskanych wyników:

- Wersja podstawowa – wartość funkcji  $F(x_1, x_2) = 0.06663$  – liczba losowań: 2500
- Wersja zmodyfikowana – wartość funkcji  $F(x_1, x_2) = 2.4553 \cdot 10^{-6}$  – liczba losowań: 7623
- Rozwiązanie analityczne – wartość funkcji  $F(x_1, x_2) = 0$

## Literatura

1. Łukasik S., *Algorytm redukcji wymiaru i liczebności próby dla celów procedur eksploracyjnej analizy danych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2013.
2. Cegielski A., *Podstawy optymalizacji*, Zielona Góra, 2017
3. Jastriebow A., Wowra K., *Współczesne technologie informatyczne i ich zastosowanie w teorii i praktyce*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2014

## KONWOLUCYJNE SIECI NEURONOWE W ZAGADNIENIACH KLASYFIKACJI

inż. PAWEŁ ŚLIWA

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Witold Beluch, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Artykuł wprowadza w tematykę sztucznych sieci neuronowych zawierających w swojej architekturze warstwy dokonujące operacji splotu (konwolucji). Przybliżony został przebieg procesu przetwarzania danych w strukturach konwolucyjnych sieci neuronowych. Metody obliczeniowe oraz wybrane sposoby uczenia głębokich sieci neuronowych przetestowano na przykładzie klasyfikacji 2D.



## CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN CLASSIFICATION ISSUES

**Abstract.** The paper introduces into the subject of artificial neural networks containing in their architecture layers performing convolution operations. The procedure of data processing in the convolutional structures of neural networks has been set forth. Calculation methods and chosen ways of learning deep neural networks have been presented with example of 2D classification.

### 1. Wprowadzenie

Głębokie sieci neuronowe (ang. *deep neural networks*, DNN) są strukturami wykorzystywanymi do znajdowania zależności w dostarczonych zbiorach danych, by na ich podstawie minimalizować funkcję kosztu (ang. *loss function*). Proces szukania minimum globalnego funkcji kosztu w przypadku sztucznych sieci neuronowych odbywa się poprzez zmianę wag połączeń neuronalnych. Ze względu na wykorzystywanie w procesie aktualizacji wag gradientu funkcji kosztu względem danego połączenia uczenie sieci neuronowych zaliczane jest do gradientowych metod optymalizacji.

$$\mathbf{w} = \mathbf{w} - \eta \nabla J(\mathbf{W}) \quad (1)$$

$$J(\mathbf{W}) = \text{SSE} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (\mathbf{y}^{(i)} - \hat{\mathbf{y}}^{(i)})^2 \quad (2)$$

Zapis (wzór 1) korzysta z operatora nabra i jest zapisem macierzowym sposobu aktualizacji wag sieci, symbol „ $\mathbf{w}$ ” określa macierz wag całej sieci neuronowej. Zapis  $\nabla J(\mathbf{W})$  informuje o aktualizacji wybranej wagi w oparciu o jej udział w gradiencie funkcji kosztu. W literaturze funkcja kosztu zapisywana jest najczęściej jako suma kwadratów błędów (ang. *error sum of squares*, SSE). Notacja (wzór 2) przedstawia sposób wyznaczania wartości funkcji kosztu korzystając z wartości warstwy wyjściowej sieci neuronowej. Zapis  $\mathbf{y}^{(i)}$  określa wartość rzeczywistą zawartą w ciągu uczącym, natomiast  $\hat{\mathbf{y}}^{(i)}$  przewidywaną przez sieci.

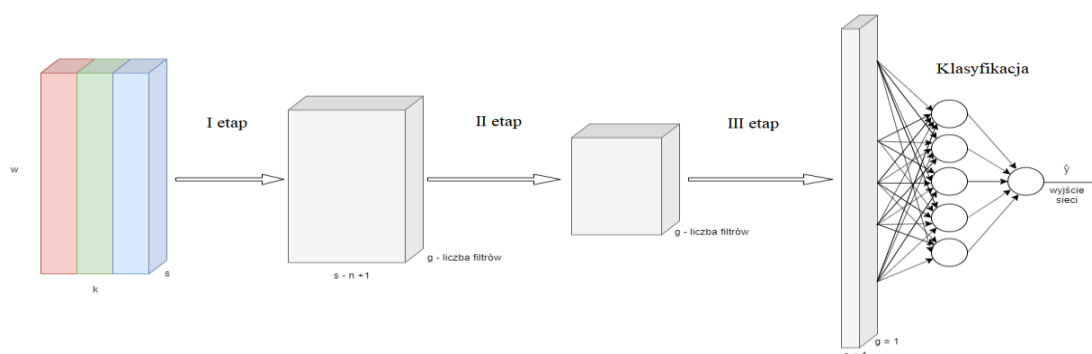
Sumowanie odbywa się dla wszystkich neuronów warstwy wyjściowej w jednym elemencie ciągu uczącego. W przypadku metody uczenia paczkami (ang. *mini-batch gradient descent*) bądź gradientu prostego (ang. *gradient descent*) wartość funkcji kosztu dodatkowo sumowana jest dla określonej liczby elementów. Znak „-” oznacza aktualizację ze zwrotem przeciwnym do wzrostu funkcji kosztu. Parametr  $\eta$  odpowiada za współczynnik uczenia, definiujący dynamikę treningu sieci [1].

## 2. Sieci konwolucyjne

Konwolucyjne sieci neuronowe, nazywane także splotowymi (ang. *convolutional neural networks*, CNNs) można określić jako głębokie, jednokierunkowe sieci neuronowe. Znajdują zastosowanie głównie w przetwarzaniu danych zawierających graficzną reprezentację cech. Architekturę sieci CNN od standardowej sieci DNN wyróżnia obecność warstw dokonujących ekstrakcji cech. Łącznie z warstwami w pełni połączonymi (ang. *fully connected*, FC) stosowanymi do oceny otrzymanego wektora cech pozwalają na efektywne rozwiązywanie wielu problemów technicznych z obszaru dziedzin uczenia maszynowego oraz wizji komputerowej.

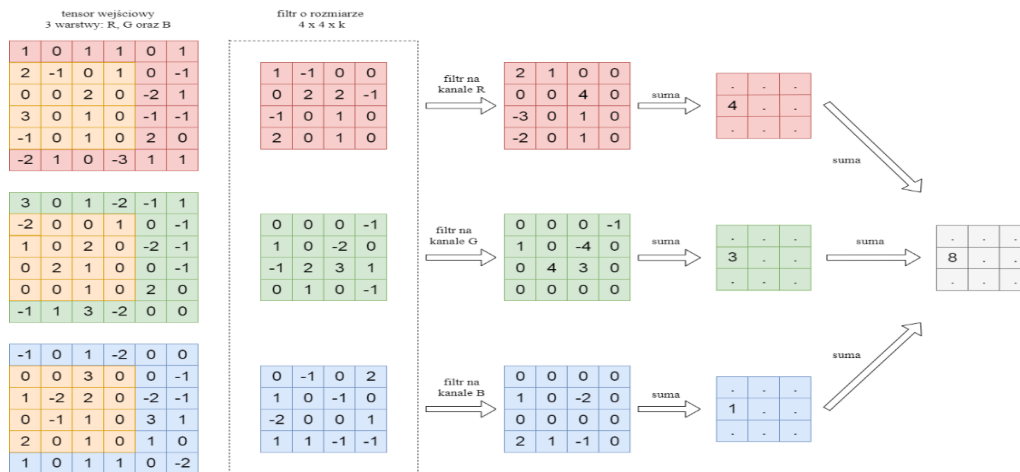
Architektura DNN zawiera w swoich strukturach wyłącznie warstwy w pełni połączone. Mimo, iż stanowią one skuteczne narzędzie służące klasyfikacji oraz predykcji, ich wykorzystanie w przypadku obiektów graficznych nie jest optymalnym rozwiązaniem problemu ekstrakcji cech. Warstwy FC dla podobnej liczby neuronów na skutek połączenia każdego neuronu warstwy kolejnej z całym wektorem warstwy poprzedniej zawierają znaczną liczbę wag. Alternatywną wersją są warstwy nie w pełni połączone, wyspecjalizowane w wyodrębnianiu cech z dostarczonych danych. Sieci CNN korzystają zarówno z warstw w pełni połączonych jak i nie w pełni połączonych, są zatem modyfikacją klasycznych sieci DNN o warstwy splotowe dodane na wejściu sieci. Ze względu na funkcjonalność, warstwy w sieci CNN można podzielić na [2]:

- konwolucyjne (ang. *convolutional layer*) – zawierają filtry odpowiedzialne za ekstrakcję cech,
- podpróbkowe (ang. *sub-sampling layers*) – zapewniają redukcję rozmiaru tensora cech,
- w pełni połączone (ang. *fully connected layer*) – odpowiedzialne za klasyfikację danych.



Rys. 1. Uproszczony schemat przetwarzania danych przez sieć CNN  
 Fig. 1. Simplified CNN data processing scheme

Wprowadzonym do sieci neuronowej elementem jest tensor danych, rozumiany jako zapisany w formie trójwymiarowej element określający wysokość, szerokość oraz głębokość elementu (rys. 1). Dla zdjęć 2D trzeci wymiar określa liczbę kanałów przeznaczonych na zapis barwy danego piksela. Rys. 1 przedstawia tensor obrazu 2D zapisany poprzez 3 kanały RGB. Tensor ten podlega następnie przekształceniom poprzez funkcję splotu w celu ekstrakcji cech.



Rys. 2. Operacja splotu przeprowadzona z wykorzystaniem filtra  
 Fig. 2. Convolution operation carried out using filter

Operacja splotu (rys. 2) dla sieci CNN polega na przemieszczaniu macierzy filtra każdego kanału, odpowiedzialnego za zapis barwy oraz mnożeniu elementów tensora położonych na danej pozycji przez odpowiadającą mu wartość maski filtra. Elementy otrzymanej macierzy są sumowane dla wszystkich kanałów, a otrzymane wyniki powtórnie sumowane otrzymując nową macierz, będącą macierzą cech, niezwiązaną bezpośrednio z kanałami RGB. Wymiary otrzymanej na skutek konwolucji wynikają z liczby niezależnych operacji splotu, jakie zadany filtr może wykonać. Konwolucja skutkuje zmniejszeniem wymiarów szerokości oraz wysokości otrzymanego tensora. Głębokość tensora wynikowego jest równa liczbie macierzy wynikowych otrzymanych na skutek procesu konwolucji tensora wejściowego, ich liczba odpowiada liczbie zastosowanych filtrów.

Kolejnym etapem przetwarzania jest zmniejszenie wymiarów tensora, za które odpowiedzialne są warstwy podpróbkowe. Wykorzystuje się tzw. *pooling*, polegający na zmniejszeniu wysokości oraz szerokości tensora (*pooling 2D*) poprzez wybranie maksymalnej, średniej bądź minimalnej wartości dla zadanej ramki, będącej macierzą o zadanych wymiarach mieszczącą się w tensorze wejściowym.

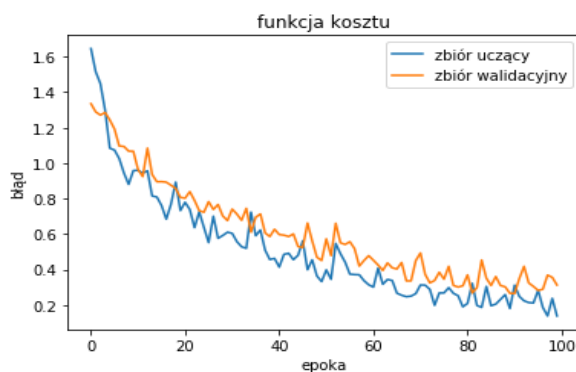
Po zakończeniu procesu ekstrakcji cech ostatnim etapem jest rzutowanie tensora na wektor. Jest to proces wymagany ze względu na operowanie przez neurony warstw w FC na wektorze cech. Neurony te w wyniku treningu sieci uczone są ważności cech w kierunku przynależności elementu do danej kategorii. Ostatnia warstwa korzystając ze zdefiniowanej funkcji (np. softmax, logit, tanh lub sigmoid) przedstawia wynik w postaci liczbowej. W przypadku problemu klasyfikacji zastosowanie znajduje najczęściej funkcja softmax określająca prawdopodobieństwo przynależności do danej kategorii. Każdy neuron wyjściowy odpowiada za określenie prawdopodobieństwa przynależności, a więc pewności klasyfikacji elementu do wybranej kategorii. Cechą charakterystyczną funkcji softmax jest sumowanie wartości wyjść neuronów warstwy wyjściowej zawsze do wartości „1”.

### 3. Wyniki badań dla problemu klasyfikacji

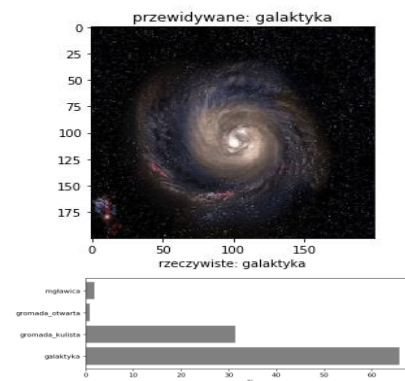
Celem pracy było wytrenowanie sieci neuronowej rozwiązującej problem z obszaru uczenia maszynowego oraz wizji komputerowej - klasyfikacji obiektu 2D. Sieć miała za zadanie rozwiązanie przynależności wprowadzonego zdjęcia do jednej z czterech kategorii: mgławica, galaktyka, gromada otwarta, gromada kulista.

Zdefiniowana sieć CNN zawierała 46 mln parametrów podlegających uczeniu, składając się z następujących po sobie: dwóch warstw konwolucyjnych, warstwy podpróbkowej, dwóch

warstw konwolucyjnych, warstwy podpróbkowej, dwóch warstw w pełni połączonych oraz warstwy wyjściowej. Liczba wykorzystywanych filtrów w warstwach konwolucyjnych to odpowiednio: 16, 32, 64 i 64. 124-elementowy zbiór zdjęć pobranych z Internetu podzielono losowo na zbiory: treningowy, walidacyjny oraz testowy, zawierające odpowiednio 93, 21 i 10 elementów. Wszystkie zdjęcia dopasowano do rozdzielczości 200x200 pikseli. Zbiór treningowy poddany został procesowi rozszerzania (ang. *augmentation*) w celu uzyskania lepszych wyników uczenia. Zastosowane w tym celu przekształcenia obrazów to m.in. losowy obrót i odbicie lustrzane. Do utworzenia sieci wykorzystano środowisko TensorFlow oraz bibliotekę Keras. Spośród dostępnych optymalizatorów procesu aktualizacji wag wybrano optymalizator Adam (ang. *adaptive learning rate optimization algorithm*), ze względu na wyższą skuteczność względem np. optymalizatora gradientowego korzystającego z metody momentum bądź *RMSprop* (ang. *root mean square prop*). Przyjęto współczynnik uczenia 0,001, liczbę epok 100 oraz zastosowano uczenie metodą mini-paczek stosując paczki 12-elementowe. W celu uzyskania lepszych wyników uogólniania zastosowano usuwanie losowych neuronów w trakcie treningu (ang. *dropout*).



Rys. 3. Przebieg treningu, funkcja kosztu  
Fig. 3. Chart of training, cost function



Rys. 4. Predykcja dla elementu ze zbioru testowego  
Fig. 4. Prediction for element from test set

Jednoczesny spadek funkcji kosztu dla zbioru walidacyjnego oraz testowego (rys. 3) wskazuje na prawidłowy przebieg treningu sieci. Ostatecznie osiągnięto dokładność predykcji, rozumianej jako poprawność dopasowania elementu do danej kategorii dla zbioru walidacyjnego, na poziomie 93%. Wartości wyznaczone przez neurony warstwy wyjściowej oznaczają pewność sieci co do przynależności elementu do danej kategorii.

Wyniki klasyfikacji elementów zbioru testowego przedstawiono dodatkowo w postaci słupków prawdopodobieństwa (rys. 4). Spośród 10 elementów należących do zbioru testowego 9 zostało sklasyfikowanych poprawnie.

## Literatura

1. Raschka S., Python machine learning. Packt Publishing Ltd, 2015., tłumaczenie Sawka K., wyd. Helion, Gliwice (2018)
2. Planche B., Andres E. Hands-On Computer Vision with TensorFlow 2. Packt Publishing Ltd, Birmingham (2019)

## GENERACJA PĘKNIĘĆ LOSOWYCH W TARCZACH

**MILENA TATAREK**

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr IV, 1 stopień  
Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński



**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano algorytm obliczeń i program komputerowy do generowania losowych pęknięć w tarczach. Opracowany program wyznacza punkty przecięcia pęknięć i ich liczbę. Na podstawie analizy komputerowej zbadano zjawisko przecinania się pęknięć i określono zależności liczby przecięć od długości pęknięć i liczby pęknięć w tarczy.

## GENERATION OF RANDOM CRACKS IN PLATES

**Abstract.** The article presents an algorithm and a computer code for generation of random cracks in plates. The computer code determines the intersection points of cracks and their number. Based on computer analysis, the phenomenon of intersection of cracks is examined and the dependence of the number of intersection points on the length of cracks and the number of cracks in the plate is determined.

### 1. Wstęp

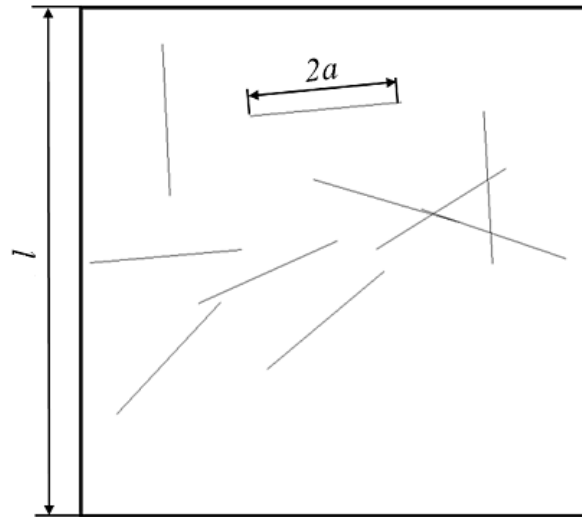
W klasycznych metodach obliczeniowych, przyjmuje się, że materiał konstrukcyjny stanowi continuum materialne nie posiadające żadnych wad. W rzeczywistości jest jednak inaczej. Mimo wzięcia pod uwagę współczynnika bezpieczeństwa uwzględniającego niedokładność obliczeń pojawia się problem z losowością własności materiału, w tym również z prawdopodobieństwem wystąpienia w nim wad. Mogą one powstać w trakcie wytwarzania materiału jak również w późniejszym jego eksploatacji. Powstałe nieciągłości materiału są w stanie doprowadzić do powstania pęknięć, które w późniejszym czasie powiększają się, jak również mogą się przeciąć. Jest to niebezpieczne zjawisko, które mocno obniża wytrzymałość materiału konstrukcyjnego [1][2]. Celem pracy jest opracowanie metody i programu komputerowego do generowania losowych pęknięć w tarczach oraz analiza zjawiska przecinania się wygenerowanych pęknięć.

### 2. Metoda i program komputerowy do losowego generowania pęknięć

Aby móc zbadać występowanie zjawiska przecinania się pęknięć opracowano program komputerowy w języku C++ z wykorzystaniem biblioteki SDL. To połączenie umożliwiło graficzne przedstawienie tarczy i losowe wytworzenie na niej odcinków imitujących pęknięcia. Program posiada możliwość wybrania liczby odcinków, ich długości, jak również liczby symulacji struktur. Program generuje losowo położenie środków odcinków i ich orientację. Wyznacza punkt przecięcia prostych przechodzących przez odcinki i sprawdza, czy punkt przecięcia należy do odcinków. Na koniec wyznacza sumę wszystkich przecięć, które wystąpiły w analizowanych strukturach.

### 3. Analiza zjawiska przecinania się pęknięć

Przyjęto, że analizowana tarcza ma kształt kwadratu o boku  $l$ . W pierwszym etapie zbadany został materiał posiadający  $N=20$  pęknięć o tej samej długości równej  $2a$ . Analizowaną tarczę przedstawiono na rys. 1. Rozpatrzono pięć różnych względnych długości pęknięć  $a/l=0.025, 0.050, 0.075, 0.100$  i  $0.125$ .



Rys. 1. Wymiary tarczy z losowymi pęknięciami  
Fig. 1. Dimensions of a plate with random cracks

W celu analizy zjawiska przecinania się pęknięć wygenerowano milion tarcz. Wyniki analizy zjawiska przedstawiono w tabeli 1.

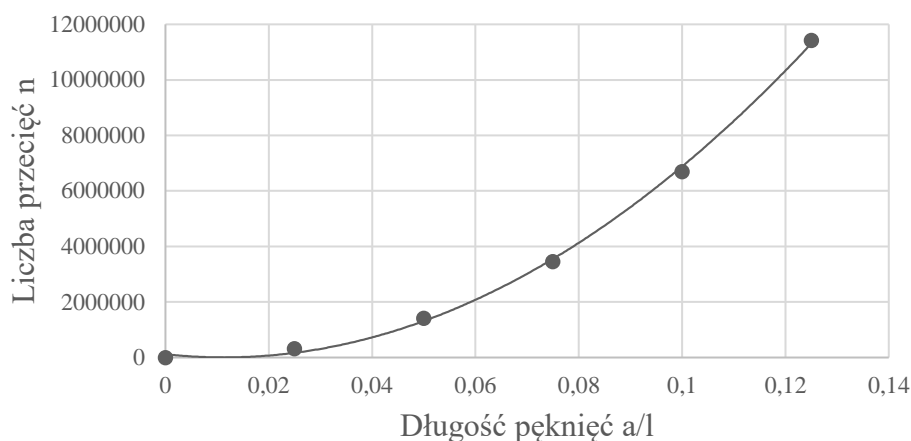
Tabela 1. Liczba przecięć pęknięć dla miliona symulacji struktur  
Table 1. Number of crack intersections for one million of generated structures

Długość pęknięć $a/l$	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125
Liczba przecięć $n$	326 244	1 417 690	3 461 510	6 699 120	11 427 700

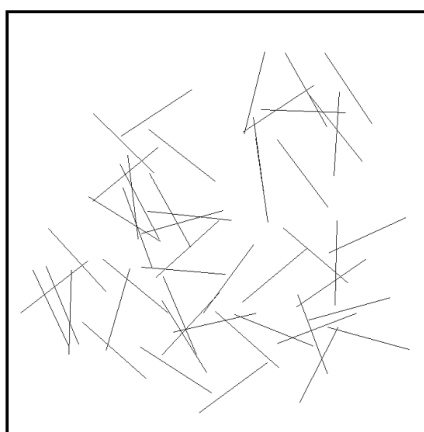
Posiadając te dane określono zależność liczby pęknięć od względnej długości pęknięcia  $a/l$ . Zależność tę przedstawiono na rys. 2. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono wielomian drugiego stopnia aproksymujący zależność:

$$n = 9.68 \cdot 10^8 \left(\frac{a}{l}\right)^2 - 3.52 \cdot 10^7 \frac{a}{l} + 655000 \quad (1)$$

Równanie (1) może służyć do obliczenia liczby przecięć dla większej długości pęknięć.



Rys. 2. Zależność liczby przecięć  $n$  od względnej długości pęknięć  $a/l$   
 Fig. 2. Number of crack intersections  $n$  vs relative crack lengths  $a/l$



Rys. 3. Wygenerowana struktura z losowo rozmieszczonymi pęknięciami  
 Fig. 3. Generated structure with randomly distributed cracks

Na rys. 3. przedstawiono przykładową strukturę zawierającą 50 przecinających się pęknięć o długości  $a/l = 0.2$ . Liczba przecięć w tej strukturze wynosi 48. Kolejnym etapem badań było określenie zależności między liczbą przecięć  $n$  a liczbą pęknięć  $N$ . Rozpatrzono tarcze zawierające  $N=25, 50, 100, 150$  i  $200$  pęknięć. W tym wypadku długość była stałą wartością i wynosiła  $a/l=0.005$ .

Tabela 2. Zależność liczby przecięć  $n$  od liczby pęknięć  $N$  w tarczy  
 Table 2. Number of intersections  $n$  vs number of cracks  $N$  in the plate

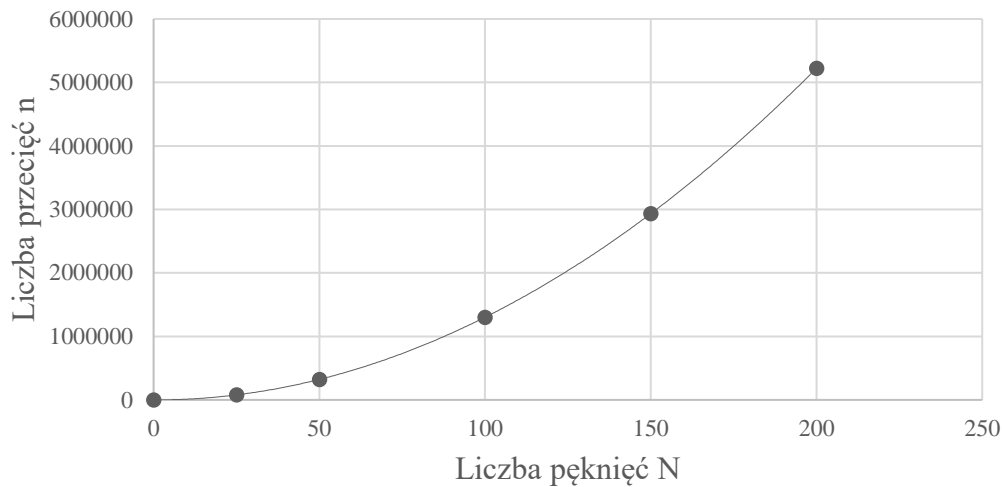
Liczba pęknięć $N$	25	50	100	150	200
Liczba przecięć $n$	78 571	321 248	1 301 230	2 936 360	5 222 410

Przy użyciu danych z tabeli 2 stworzono wykres pokazany na rys. 4 obrazujący wyniki badania. Mając te wyniki wyznaczono wielomian drugiego stopnia aproksymujący zależność:

$$n = 131 \cdot N^2 - 77.0 \cdot N - 982 \quad (2)$$



Na podstawie równania (2) można obliczyć liczbę przecięć przy innej liczbie pęknięć.



Rys. 4. Zależność liczby przecięć  $n$  od liczby pęknięć  $N$  w tarczy  
Fig. 4. Number of intersections  $n$  vs number of cracks  $N$  in the plate

#### 4. Podsumowanie

W tarczach zawierających dużą liczbę pęknięć zachodzi zjawisko przecinania się pęknięć. Liczba przecięć zależy od gęstości pęknięć, którą określa się na podstawie długości pęknięć i ich liczby w tarczy. Zależność liczby przecięć od wymienionych parametrów można przedstawić za pomocą wielomianu drugiego stopnia.

Opracowany program komputerowy służy do tworzenia modeli tarcz z losowymi przecinającymi się pęknięciami. Analiza komputerowa tarcz z pęknięciami umożliwia ocenę wytrzymałości materiału, sposobu wzrostu pęknięć i własności sprężystych materiału [3].

#### Literatura

1. Kowalewski Z. L., Szymczak T., Kraskowski J., Chojnacki A., Mechanika pęknięcia na tropach awarii konstrukcji i defektów materiałowych, w materiałach „XXIII Sympozjum Nieniszczące Badania Materiałów”, s. 39-74, Zakopane (2017).
2. Neimitz A., Mechanika pęknięcia, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (1998).
3. Fedeliński P. (Red.) Działkiewicz G., Fedeliński P., Poteralski A., Ptaszny J., Computer analysis and optimization of materials with complex properties and microstructures, Monografia, Nr 811, 134 strony, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2019).

# ANALIZA NUMERYCZNA ODDZIAŁYWANIA LASERA NA TKANKĘ BIOLOGICZNĄ PODCZAS TERAPII FOTODYNAMICZNEJ

inż. MARIA ZADOŃ

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Marek Jasiński, prof. PŚ

**Streszczenie.** Celem pracy była analiza numeryczna oddziaływania lasera na tkankę biologiczną podczas terapii fotodynamicznej. Rozważany model matematyczny składał się z równania przepływu bio ciepła w sformułowaniu Pennesa oraz równania dyfuzji optycznej. Obliczenia przeprowadzono za pomocą metody różnic skończonych dla przypadku jednowymiarowego, dla stanu ustalonego. Wyniki analizy przedstawiono w postaci wykresów oraz sformułowano wnioski.



## NUMERICAL ANALYSIS OF THE LASER IMPACT TO THE BIOLOGICAL TISSUE DURING PHOTODYNAMIC THERAPY

**Abstract.** The aim of the work is numerical analysis of the laser impact to the biological tissue during photodynamic therapy. A mathematical model under consideration was consisted of bioheat transfer equation in Pennes formulation and optical diffusion equation.. At the stage of numerical realization the finite difference method has been applied for a one-dimensional steady-state task. The results of the analysis as well as the conclusions are presented at the end of the paper

### 1. Wprowadzenie

Obecnie znane formy leczenia, takie jak radioterapia lub chemioterapia, polegają na zwalczaniu nowotworów poprzez ekspozycję leczonych segmentów ciała człowieka na promieniowanie jonizujące lub syntetyczne związki chemiczne. Terapie te nie działają miejscowo na chorą tkankę, co prowadzi do uszczerbku zdrowych komórek. W celu ograniczenia ingerencji w zdrową tkankę zaczęto rozwijać wiedzę na temat terapii fotodynamicznej. Ta małoinwazyjna metoda służy do leczenia chorób nowotworowych i skórnych zmian patologicznych. Swoje działanie opiera na trzech zależnych od siebie elementach: fotouczulacza, źródła światła oraz tlenu rozpuszczonego w tkankach [1].

W terapii fotodynamicznej wprowadza się światłoczułe związki do tkanki, które gromadzą się w obszarze zmienionym chorobowo. Następnie fotouczulacz zostaje wzbudzony promieniowaniem elektromagnetycznym o ustalonej długości fali. W efekcie następuje destrukcja komórek nowotworowych przez reaktywne formy tlenu, które powstają w wyniku reakcji fotochemicznej. Chora tkanka niszczone jest na drodze apoptozy lub nekrozy [1].

Terapię fotodynamiczną stosuje się w wielu dziedzinach medycyny, np. w stomatologii, dermatologii, laryngologii, ortopedii, okulistyce, ginekologii, pulmonologii, gastroenterologii, urologii, neurochirurgii [1].

Najważniejszym składnikiem terapii jest fotouczulacz, który reaguje na światło. Taki fotosensybilizator powinien mieć stały skład chemiczny, selektywnie gromadzić się w tkance,

reagować w tkance tylko pod wpływem zadziałania promieniowania, powodować minimalne skutki uboczne przy podwyższonej reaktywności oraz umożliwiać jego łatwe wydalanie. Fotouczulacz wprowadza się dożylnie, domięśniowo lub w postaci maści na powierzchni skóry. Tak podane nanocząstki zostają wchłonięte przez wszystkie komórki. W komórkach zdrowych pozostają do kilkunastu godzin, natomiast w komórkach chorych utrzymują się nawet kilka dni [1].

W terapii fotodynamicznej jako źródło światła używa się lasery, lampy halogenowe, ksenonowe lub LED. Aby uzyskać dużą gęstość mocy promieniowania światło powinno być monochromatyczne, koherentne i skupione. Światło emitowane przez laser powinno pokryć się z widmem absorpcji fotosensybilizatora [1, 2].

Stopień oddziaływania wiązki lasera wynika z dawki promieniowania, czasu ekspozycji, rodzaju lasera, gęstości energii, rodzaju tkanki i długości fali. Efektem współdziałania wiązki promieniowania i tkanki jest wystąpienie takich zjawisk jak rozpraszanie, odbicie, załamanie, absorpcja i transmisja [1, 2].

Terapia fotodynamiczna jest skuteczna i na ogół dobrze tolerowana. Niestety często może występować u pacjentów ból, pieczenie, a nawet światłowstręt. Niekiedy oddziaływanie lasera może spowodować uszkodzenie termiczne tkanki. Aby zapobiec powstawaniu efektów związanych z działaniem podwyższonej temperatury należy odpowiednio dobrać moc i inne parametry lasera [1,2].

## 2. Model matematyczny

W celu określenia oddziaływania lasera na tkankę biologiczną wykorzystano modelowanie matematyczne. Metoda ta pozwala na zdobywanie informacji na temat rozkładu temperatury w tkance o określonej grubości, zmiany składowej rozproszonej i nierozproszonej natężenia promieniowania, zmiany składnika związanego z oddziaływaniem lasera w tkance.

Modelem, który opisuje przepływ ciepła w tkance jest równanie Pennesa. Dla ustalonego pola temperatury ma ono postać [2]:

$$\lambda \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + Q_{perf}(x) + Q_{met} + Q_{las}(x) = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $x$  – współrzędna [m],  $\lambda$  – współczynnik przewodności cieplnej [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $Q_{perf}$ ,  $Q_{met}$  i  $Q_{las}$  – źródła wewnętrzne związane z perfuzją krwi i metabolizmem oraz z oddziaływaniem lasera [ $\text{Wm}^{-3}$ ].

Składnik związany z perfuzją wyznacza się za pomocą wzoru [2]:

$$Q_{perf} = w c_b [T_b - T(x)] \quad (2)$$

gdzie:  $w$  – współczynnik perfuzji krwi [ $\text{s}^{-1}$ ],  $c_b$  – objętościowe ciepło właściwe krwi [ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ],  $T_b$  – temperatura krwi [ $^{\circ}\text{C}$ ].

W przypadku równania Pennesa konieczne jest uzupełnienie modelu warunkami brzegowymi. Dla lewego brzegu użyto warunku brzegowego trzeciego rodzaju, ponieważ następuje wymiana ciepła z otoczeniem. Natomiast dla prawego brzegu wykorzystano warunek brzegowy drugiego rodzaju, gdyż znany jest strumień ciepła  $q$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ] równy zero.

Parametrem związanym z dystrybucją światła w tkance jest natężenia promieniowania  $\phi$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ], które jest sumą składowej nierozproszonej  $\phi_c$  i rozproszonej natężenia

promieniowania  $\phi_d$  [ $\text{Wm}^{-2}$ ]. Uwzględnienie tego parametru następuje poprzez składnik źródłowy  $Q_{las}$ , odpowiedzialny za kumulację ciepła wynikającą z dostarczonej do tkanki energii wiązki lasera. W bieżącej pracy został on przyjęty w postaci wzoru [2]:

$$Q_{las} = \mu_a(\phi_c + \phi_d) \quad (3)$$

w którym  $\mu_a$  [ $\text{m}^{-1}$ ] oznacza współczynnik absorpcji.

Składową nierozproszoną wyznacza się zgodnie z prawem Beera-Lamberta [2]:

$$\phi_c = \phi_0 \exp(-\mu_t x) \quad (4)$$

gdzie:  $\phi_0$  – natężenie promieniowania na powierzchni tkanki [ $\text{Wm}^{-2}$ ],  $\mu_t$  – współczynnik tłumienia [ $\text{m}^{-1}$ ].

W większości przypadków w tkankach przeważa rozpraszanie. W celu określenia wartości składowej rozproszonej należy skorzystać z równania dyfuzji optycznej (RDO) [2]:

$$x \in \Omega : D \frac{d^2 \phi_d(x)}{dx^2} - \mu_a \phi_d(x) + \mu'_s \phi_c(x) = 0 \quad (5)$$

gdzie:  $D$  – współczynnik dyfuzji [m],  $\mu'_s$  – efektywny współczynnik rozpraszania [ $\text{m}^{-1}$ ].

Warunki brzegowe dla równania dyfuzji optycznej dla lewego i prawego brzegu mają postać [2]:

$$x \in \Gamma : -D \frac{d\phi_d(x)}{dx} n = \frac{1}{2} \phi_d(x) \quad (6)$$

Parametry tkanki zawierającej nanocząstki odpowiadające podstawowym parametrom optycznym tkanki, czyli współczynnikom absorpcji  $\mu_a$  i rozpraszania  $\mu_s$ , można wyznaczyć za pomocą zależności [3]:

$$\mu_{a,np} = \mu_a + 0.75 f_v \frac{Q_a}{a} \quad \mu_{s,np} = \mu_s + 0.75 f_v \frac{Q_s}{a} \quad (7)$$

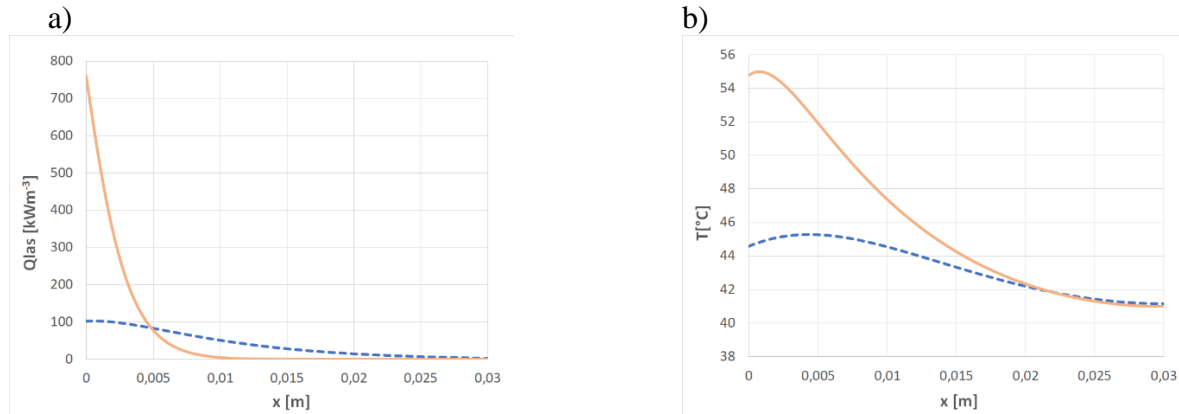
gdzie:  $\mu_{a,np}$  i  $\mu_{s,np}$  – współczynniki absorpcji i rozpraszania dla tkanki z nanocząstkami [ $\text{m}^{-1}$ ],  $f_v$  – udział objętościowy nanocząstek w tkance,  $Q_a$  i  $Q_s$  – współczynniki efektywności absorpcji i rozpraszania,  $a$  – promień nanocząstki [m].

### 3. Przykłady obliczeń

Do rozwiązania równania Pennesa oraz równania dyfuzji optycznej wykorzystano metodę różnic skończonych. Za pomocą modeli matematycznych przeprowadzono analizę rozkładu składowej rozproszonej i nierozproszonej natężenia promieniowania w tkance, rozkładu temperatur w nagrzewanej tkance oraz wewnętrznych źródeł ciepła związanych z oddziaływaniem lasera. Celem analizy było zbadanie działania różnych natężeń promieniowania lasera na tkankę oraz wpływ nanocząstek stosowanych podczas terapii fotodynamicznej. Analizę przeprowadzono dla przypadku 1D, dla stanu ustalonego. Obliczenia wykonano dla grubości tkanki równej 3 cm. Przyjęto następujące parametry termofizyczne tkanki:  $\lambda = 0,75$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $w = 0,00125$  [ $\text{s}^{-1}$ ],  $Q_{met} = 245$  [ $\text{Wm}^{-3}$ ],  $\alpha = 10$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],

$c_b = 3996200 \text{ [Jm}^{-3}\text{K}^{-1}]$ ,  $T_o = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Założono, że początkowa temperatura tkanki wynosi  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dodatkowo dla parametrów optycznych związanych z nanocząstkami przyjęto:  $\mu_a = 30 \text{ [m}^{-1}]$ ,  $\mu_s = 200 \text{ [m}^{-1}]$ ,  $\mu_{a,np} = 323,55 \text{ [m}^{-1}]$ ,  $\mu_{s,np} = 254,15 \text{ [m}^{-1}]$ . Pozostałe parametry tkanki z nanocząstkami to:  $f_v = 10^{-6}$ ,  $Q_a = 7,828$ ,  $Q_s = 1,444$ ,  $a = 20 \text{ [mm]}$  [3].

Na podstawie obliczeń wyznaczono składnik źródłowy związany z oddziaływaniem lasera  $Q_{las}$  oraz rozkład temperatury w tkance. Na rys. 1. Przedstawiono wyznaczone rozkłady dla tych wartości, przy czym linia przerywana odnosi się do przypadku tkanki bez nanocząstek, natomiast linia ciągła do przypadku tkanki z nanocząsteczkami.



Rys. 1. Dystrybucja źródeł wewnętrznych  $Q_{las}$  (a) oraz temperatury (b) dla tkanki bez i z nanocząstkami, dla  $\phi_0 = 2000 \text{ [Wm}^{-2}]$

Fig. 1. Distributions of laser heat sources  $Q_{las}$  (a) and temperature (b) in tissue without and with nanoparticles, for  $\phi_0 = 2000 \text{ [Wm}^{-2}]$

#### 4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników analizy numerycznej stwierdzono, że wyższą temperaturę osiągnięto w zewnętrznych warstwach tkanki niż w warstwach głębszych, co wynika z bezpośredniego kontaktu tkanki z źródłem promieniowania.

Duży wpływ na tkankę ma właściwy dobór natężenia promieniowania lasera. Im większe natężenie promieniowania działa na powierzchnię tkanki, tym większa maksymalna temperatura uzyskana jest w tkance. Również wartość składnika związanego z zewnętrznym oddziaływaniem lasera zależy od natężenia promieniowania lasera. Im większe natężenie, tym większa wartość składnika  $Q_{las}$ .

#### Literatura

1. Radomska K.: Fotodynamiczna terapia antynowotworowa – nowe możliwości w leczeniu chorób nowotworowych, Elikser, 1, 3, s. 37-41 (2016).
2. Jasiński M: Modelowanie matematyczne procesu uszkodzenia tkanki wywołanego oddziaływaniem zewnętrznych źródeł ciepła, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2016).
3. Dombrowsky L.A., Timchenko V., Jackson M.: Indirect heating strategy of laser induced hyperthermia: An advanced thermal model, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 17-18, s. 4688-4700 (2012).

# WPLYW ROZMIESZCZENIA PUNKTÓW MOCOWAŃ W OBSZARZE KOMPONENTU SPAWANEGO NA ODKSZTAŁCENIA CIEPLNE

**mgr inż. TOMASZ ZADOROŻNY**

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień, Alstom Konstal S.A., Chorzów  
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mirosław Szczepanik, Prof. PŚ

**Streszczenie.** Symulacje numeryczne procesu spawania pozwalają na wykrycie wielu potencjalnych problemów, co może bezpośrednio przekładać się na minimalizację odkształceń cieplnych oraz ograniczenie kosztownych napraw. W artykule przedstawiono wpływ rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego na odkształcenia termiczne. Dla zadanej geometrii łączonych elementów wyznaczono deformacje z zastosowaniem symulacji procesu metodą elementów skończonych. Przeanalizowano różne konfiguracje rozmieszczenia punktów bazowych.



## INFLUENCE OF CONSTRAINTS POINTS LOCATION ON THERMAL DEFORMATIONS AFTER WELDING PROCESS

**Abstract.** Many potential risk and issues during welding process can be discovered by numerical simulation, this can reduce costs by minimizing deformations and necessary repairs. The article will present influence of constraints points locations during welding process on thermal deformations. For the given geometry and type of weld the thermal deformation have been simulated by means of numerical simulation base on Finite Element Method. The five different cases of constraints points locations on welded construction have been analyzed.

### 1. Wprowadzenie

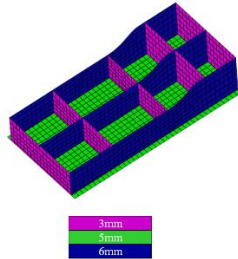
Metoda łączenia elementów poprzez spawanie jest szeroko stosowana szczególnie w sektorze przemysłu ciężkiego. Przebieg oraz wielkość deformacji powstających podczas procesu spawania jest trudny do określenia na podstawie doświadczenia, dlatego przy mało seryjnych konstrukcjach uzyskanie zadowalających wyników często bywa niemożliwe. Zdeformowane komponenty wymagają napraw, które są czasochłonne oraz mogą spowodować uszkodzenia materiału generując znaczne straty finansowe. Zastosowanie zaawansowanych metod symulacji numerycznych pozwala dostosować punkty zamocowania poszczególnych części tak aby zminimalizować ryzyko wystąpienia deformacji. Do rozwiązania zdefiniowanego wyżej problemu wykorzystano jeden z komercyjnych programów metody elementów skończonych (MES [1]) HyperWorks.

### 2. Opis analizowanej konstrukcji

Badana konstrukcja spawana składa się z blach aluminiowych o różnej grubości. Na rysunku 1 przedstawiono jej geometrię. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe własności materiałowe.

Tabela 1. Własności materiałowe  
Table 1. Material properties

Moduł Younga [MPa]	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Moduł Poissona	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Wsp. rozszerzalności cieplnej [10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
7·10 <sup>4</sup>	2,7	0,3	215	23,1



Rys. 1. Rozkład grubości blach w badanej konstrukcji  
Fig. 1. Thickness of sheets in the tested structure

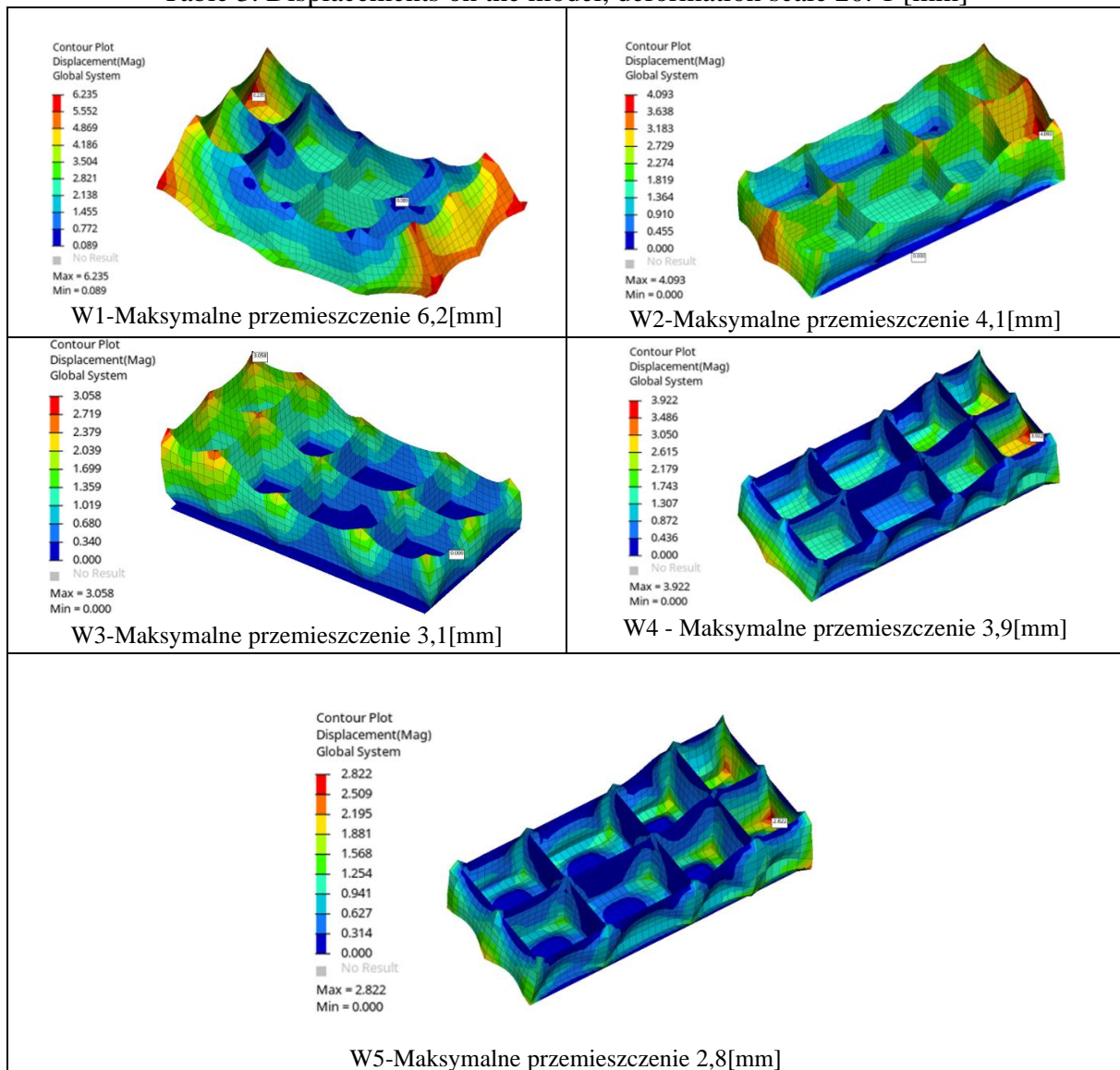
Tabela 2. Warunki brzegowe podparcia  
Table 2. Boundary conditions

<p>W1-Brak utwierdzenia</p>	<p>W2-Utwierdzona krawędź dolnej płyty</p>
<p>W3-Utwierdzona dolna płyta</p>	<p>W4-Utwierdzona krawędź dolnej płyty oraz żebra na górnej krawędzi</p>
<p>W5 - Dolna płyta została utwierdzona na krawędzi oraz lokalnie w każdej z przegród, dodatkowo żebra zostały utwierdzone na górnej krawędzi</p>	

### 3. Model numeryczny oraz warunki brzegowe

Model numeryczny został utworzony z elementów powłokowych, zawiera 2064 elementy i 2078 węzły. W artykule porównano 5 różnych sposobów zamocowania spawanych elementów składowych konstrukcji. W tabeli 2 przedstawiono szczegóły dotyczące sposobu utwierdzenia dla każdego z rozpatrywanych przypadków. Przyjęta do obliczeń wartość temperatury podczas spawania wynosi 1230°C, co odpowiada zmierzonej wartości rzeczywistej podczas testów spawalniczych. Temperatura została przyłożona do każdego połączenia blach na całej długości (warunek brzegowy pierwszego rodzaju - Dirichleta) [2]. Temperaturę otoczenia równą 20°C przyjęto w pozostałych węzłach.

Tabela 3. Rozkład przemieszczeń na modelu, skala deformacji 20:1 [mm]  
 Table 3. Displacements on the model, deformation scale 20: 1 [mm]





#### **4. Wyniki**

W tabeli 3 przedstawiono rozkład przemieszeń na modelu zdeformowanym, skala deformacji wynosi 1:20. Największą wartość przemieszczenia (co jest równoznaczne z największymi deformacjami w obszarze konstrukcji) uzyskano dla przypadku, w którym nie zastosowano utwierdzenia konstrukcji (W1). Wraz ze zmianą sposobu zamocowania poszczególnych elementów składowych spawanego komponentu, wartości przemieszczeń ulegały stopniowemu spadkowi. Najmniejszą wartość wynoszącą 2,8mm uzyskano dla przypadku obliczeniowego W5, w którym stwierdzono redukcję przemieszczeń o niemal 55% względem przypadku W1. Takie zachowanie jest charakterystyczną odpowiedzią dla tego typu konstrukcji.

#### **5. Wnioski**

Na podstawie przeprowadzonych analiz można zauważyć, iż odpowiednie bazowanie komponentu spawanego odgrywa kluczową rolę w minimalizacji odkształceń cieplnych. Wymagania jakościowe dotyczące połączeń spawanych nie pozwalają na znaczącą zmianę parametrów spawania, które to przekładają się na ciepło wprowadzone do konstrukcji. Najbardziej efektywną metodą minimalizacji odkształceń termicznych jest zastosowanie optymalnego rozmieszczenia punktów mocowań. Analizowana w niniejszym artykule konstrukcja jest stosunkowo niewielka, jej wymiary wynoszą 800x450x250mm. Konstrukcje spawane w przemyśle ciężkim bardzo często są dużo większych gabarytów, przez co ich odkształcenia termiczne są znacznie większe. Stanowi to bardzo poważny problem, który pociąga za sobą ogromne koszty. Obliczenia numeryczne pozwalają z dużą dokładnością symulować powstałe odkształcenia. Wprowadzenie tego typu symulacji do procesu projektowego w przypadku konstrukcji mało seryjnych pozwala już przy pierwszym montażu uniknąć wielu problemów, gdzie często bez dodatkowych obliczeń nadmierne odkształcenia stanowiłyby duży problem usuwany w długotrwałym procesie rzeczywistych testów.

#### **Literatura**

1. Zienkiewicz O.C., The Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals, ELSEVIER, (2013).
2. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, WNT, Warszawa (2007).

## BADANIE WYDAJNOŚCI CIEPLNEJ SYSTEMU SOLARNEGO

**inż. MATEUSZ ŻAK**

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: dr inż. Jolanta Dziatkiewicz

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę wydajności cieplnej systemu solarnego. W trakcie badania sprawdzano wpływ nasłonecznienia na wartość otrzymanej energii cieplnej oraz szybkości zwrotu kosztów pomienionych na inwestycje w odnawialne źródła energii. W artykule zamieszczono informacje o obecnej sytuacji niekonwencjonalnych źródeł energii w Polsce. Zaprezentowano także opis funkcjonowania systemu solarnego oraz wyniki badań uzupełnione odpowiednimi wnioskami.



## EFFICIENCY TESTS OF THE SOLAR SYSTEM HEAT

**Abstract.** This article presents an analysis of thermal efficiency of solar system. During the test, was checked value of heat received following the effect different time of sunlight and time reimbursement of costs incurred for investment in renewable energy sources. The article contains information about the current situation of unconventional energy sources in Poland. It presents also the description of the solar system operation, and the results of the research, which were complemented with appropriate conclusions.

### 1. Wprowadzenie

Głównymi surowcami wykorzystywanymi do wytwarzania energii są paliwa kopalniane: węgiel brunatny oraz kamienny, gaz ziemny, ropa naftowa. Wykorzystywanie tych źródeł jest przyczyną nieodwracalnych zmian środowiskowych. Ograniczona ilość zasobów naturalnych oraz negatywne skutki ich wykorzystania powodują ciągły wzrost cen wytwarzania energii elektrycznej. Wpływa to pozytywnie na rozwój niekonwencjonalnych źródeł energii.

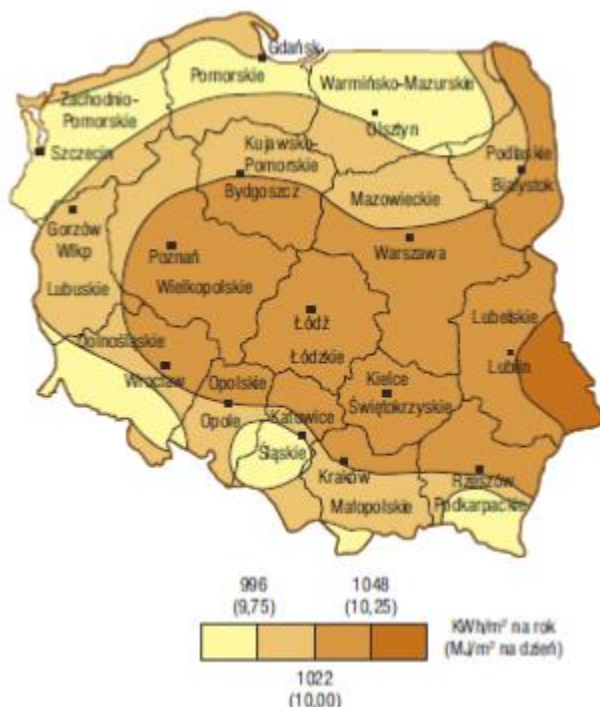
### 2. Charakterystyka źródeł energii

Polski system energetyczny przechodzi w ostatnich latach transformację związaną ze zmniejszeniem udziału energii konwencjonalnej opartej na paliwach kopalnianych na rzecz odnawialnych źródeł energii. Zmiany dotyczą również istniejących już instalacji poprzez wprowadzanie systemów inteligentnego opomiarowania a także optymalizacji procesów technologicznych.

Bilans energii elektrycznej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym wg stanu na 31 grudnia 2017 r. jest następujący:

- a) produkcja energii netto: 157,1 TWh,
  - ze źródeł nieodnawialnych: 133,1 TWh,
  - ze źródeł odnawialnych: 23,9 TWh,

Można zauważyć, że energia pochodząca z odnawialnych źródeł energii stanowi 15% całego bilansu energetycznego w Polsce. Wartość ta rośnie z każdym rokiem natomiast nadal jest stosunkowo niska. Rysunek 1 przedstawia rejonizację obszaru Polski pod względem możliwości wykorzystania energii słonecznej.



Rys. 1. Rejonizacja obszaru Polski pod względem możliwości wykorzystania energii słonecznej [4]

Fig. 1. Regionalization of the territory of Poland in terms of the possibility of using solar energy [4]

Rynek odnawialnych źródeł energii w Polsce z roku na rok się powiększa natomiast nadal stanowi to mały procent energii jaka jest produkowana. W ostatnich latach zmiany klimatyczne oraz kampanie społeczne sprawiły duży wzrost ich popularności. Coraz częściej można spotkać instalacje przydomowe. Polacy inwestują w małe domowe elektrownie w celu ograniczenia kosztów energii elektrycznej. Koszty utworzenia takiej instalacji są stosunkowo wysokie natomiast jeżeli zostaną rozłożone na kilkanaście lat to po takim okresie energia jest dostarczana za darmo.

Najbardziej popularnym i powszechnie używanym odnawialnym źródłem ciepła w Polsce jest biomasa. Pozyskiwanie energii z tego rodzaju surowca stanowi ponad 70 %. Obecnie moc zainstalowana w elektrowniach na biomasę i biogaz wynosi w Polsce ponad 300 MW co odpowiada standardowej elektrowni. Jest to niewielka ilość pozyskiwanej energii w całym bilansie energetycznym.

### 3. Systemy ogrzewania solarnego

Najważniejszą rolę w systemach solarnych odgrywają promienie słoneczne. W panelach solarnych następuje konwersja energii promieniowania słonecznego na energię cieplną.

Padające promienie ogrzewają umieszczony w kolektorze absorber, który pochłania promieniowanie słoneczne a następnie przekazuje ciepło do nośnika, którym jest niezamarzający roztwór glikolu propylenowego krążący w instalacji na skutek pracy pompy obiegowej w zespole sterowniczo-pompowy.

System solarny uzupełnia instalację grzewczą. Zastosowanie takiej instalacji pozwala na redukcję kosztów ogrzewania oraz ograniczenie emisji gazów cieplarnianych natomiast to przekłada się na ochronę środowiska naturalnego.

Ciągły rozwój technologii sprawia, że dostępne są różne rozwiązania a także materiały. Na rynku oferowane są kolektory o różnej konstrukcji oraz jakości użytego absorbera. Nie warto inwestować w najtańsze produkty, ponieważ sprawność pochłaniania promieniowania słonecznego może spaść już po kilku latach. W takim razie inwestycja może stać się nieopłacalna.

Wyznaczenie opłacalność tej inwestycji zależy bowiem od takich parametrów jak:

- zużycie wody ciepłej,
- koszt zestawu kolektorów,
- sposób zaprojektowania i sprawność instalacji ciepłej wody,
- rodzaj nośnika energii, którym ta woda jest podgrzewana,
- średnie nasłonecznienie w roku terenu, na którym są one montowane.

### 4. Wydajność cieplna

Ocena wydajności cieplnej ogrzewania solarnego została przeprowadzona na bazie trzech lokalizacji o różnym rocznym nasłonecznieniu. Nasłonecznienie wahało się od 1000 do 4400 godzin na rok. Instalacja solarna miała za zadanie obniżyć koszt ogrzewania domu jednorodzinnego, którego podstawowym źródłem jest energia elektryczna.

Podstawą badania wydajności było wyliczenie mocy cieplnej dla badanego obiektu. Na sumę ciepła składało się zapotrzebowanie na centralne ogrzewanie oraz ciepłą wodę użytkową. Przedstawia to wzór (1)

$$Q_{cat} = \Phi_{rok} + Q_{W,Nd} \quad (1)$$

$$Q_{cat} = 19316 + 3011 = 22327 \text{ kWh}$$

gdzie:

$Q_{W,Nd}$  - zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową

$\Phi_{rok}$  - zapotrzebowanie na centralne ogrzewanie

Na podstawie wyliczonej wartości sprawdzano jakie są generowane oszczędności dzięki instalacji solarnej. Następnie sprawdzono szybkość zwrotu kosztów oraz opłacalność inwestycji.

## 5. Przedstawienie otrzymanych wyników, ich analiza i wnioski

Liczba godzin słonecznych znacząco wpływa na oszczędności oraz szybkość zwrotu kosztów inwestycji. Zastosowanie instalacji solarnej dla Kairu pokazało ciekawą zależność, ponieważ pomimo bardzo dużej liczby godzin słonecznych, koszty zaoszczędzone wypadły gorzej niż w miastach w Europie. Powodem takiej sytuacji jest 3 krotnie niższa cena energii elektrycznej.

Tab. 1. Tabela kosztów  
Tab. 1. Table of cost

Lokalizacja	Kosz energii elektrycznej	Ilość zaoszczędzonej energii	Oszczędności
Tampere	0.5 zł/kWh	6901 kWh	3450 zł
Katowice	0.5 zł/kWh	8971 kWh	4485 zł
Kair	0.15 zł/kWh	22083 kWh	3312 zł

Tabela 1 pokazuje rzeczywiste roczne obniżenie kosztów dostarczania ciepła. Zastosowanie instalacji solarnej w Egipcie pozwoli obniżyć koszty rocznego ogrzewania o ponad 90%. Obecnie jest to powszechnie stosowane rozwiązanie z powodu dużego wahania temperatury w ciągu doby. W takich warunkach instalacje solarne spisują się doskonale, ponieważ odbierają ciepło słoneczne w ciągu dnia a następnie oddają całe nagromadzone w nocy.

## 6. Wnioski

Zastosowanie ogrzewania solarnego w gospodarstwie domowym ma znaczący wpływ na obniżenie kosztów centralnego ogrzewania oraz ogrzewania ciepłej wody. Zainwestowane środki zwracają się już po kilku latach a następnie obserwuje się już sam zysk dla użytkownika. W zależności od miejsca instalacji, sposobu montowania paneli oraz rodzaju instalacji ten czas się różni. Mimo to zauważono duży zysk dla budżetu oraz niezaprzeczalnie ogromny zysk dla środowiska naturalnego.

## Literatura

1. Gajowski J., Nowakowski R. (2019) Współpraca konwencjonalnych źródeł węglowych i wielkoskalowego OZE
2. Brodzińska Z., Kramarz M., Słowomirski M.: Majówka nowoczesnej gospodarki, wyd. Adam Marszałek, Toruń 2013
3. Czekański D.: Słoneczne systemy grzewcze. Wiadomości Elektrotechniczne. 2002
4. <https://zielonestrefy.pl/zasoby-promieniowania-slonecznego-w-polsce/>