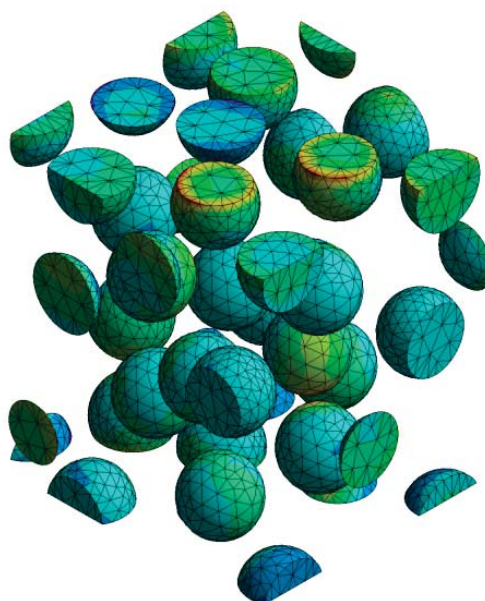
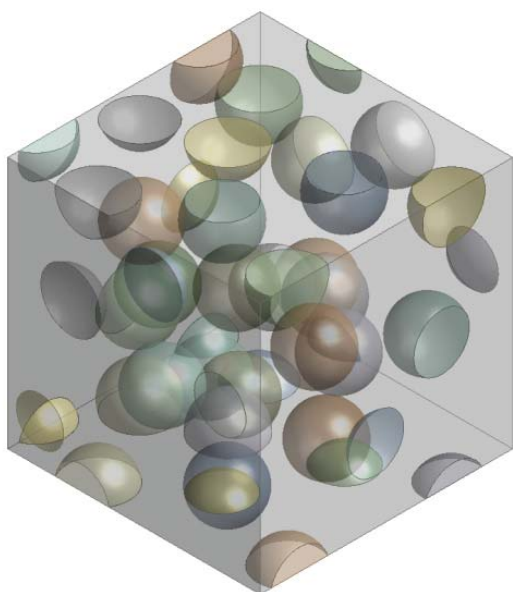




**KATEDRA MECHANIKI
I INŻYNIERII OBLICZENIOWEJ**
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Studencka Konferencja Naukowa

**METODY
KOMPUTEROWE
2022**



Gliwice 2022

Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Studencka Konferencja Naukowa
„METODY KOMPUTEROWE – 2022”

Gliwice, czerwiec 2022 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

Komitety Naukowe:

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 Dziatkiewicz, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Marek Jasiński, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Grzegorz Kokot, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Wacław 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 Szczepaniak, Prof. PŚ

Komitety Organizacyjne:

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński
Dr hab. inż. Adam Długosz, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Grzegorz Dziatkiewicz, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ
Dr inż. Waldemar Mucha
Dr inż. Witold Ogierman
Mgr inż. Natalia Molęda
Mgr inż. Olaf Popczyk
Mgr inż. Anna Skorupa
Mgr inż. Mikołaj Stryczyński
Mgr inż. Barbara Ciszynska
Inż. Katarzyna Tomiczek
Mgr inż. Maria Zadoń

Komitet Redakcyjny:

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński
Dr hab. inż. Grzegorz Dziatkiewicz, Prof. PŚ
Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Wydanie zeszytów naukowych zostało sfinansowane przez IBS Poland Sp. z o. o. w Gliwicach.
Rysunek na okładce wykonał inż. Jakub Marczak, Autor artykułu na stronie 89.

ISBN 978-83-951185-3-1

Artykuły opublikowano na podstawie oryginałów dostarczonych przez Autorów.
Druk i oprawę wykonano w Wydawnictwie Politechniki Śląskiej.
Nakład 100 egz. Druk ukończono w czerwcu 2022 r.

Wstęp

Zeszyt naukowy zawiera 48 artykułów prezentowanych na szesnastej Studenckiej Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe”, odbywającej się 2 czerwca 2022 roku w Centrum Edukacyjno-Kongresowym 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,
- mechanika materiałów,
- termodynamika,
- aerodynamika,
- biomechanika,
- hydromechanika,
- automatyka,
- robotyka,
- sterowanie,
- 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 IBS Poland 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, czerwiec 2022 r.

Studenckie Koło Naukowe „Metod Komputerowych”
Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
www.polsl.pl/rmt4

Zarząd Koła w roku akademickim 2021/2022:

Przewodnicząca: mgr inż. Barbara Cisyńska, Inżynieria Mechaniczna
Wiceprzewodnicząca: inż. Katarzyna Tomiczek, Automatyka i Robotyka
Sekretarz: mgr inż. Maria Zadoń, Inżynieria Mechaniczna

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński
Opiekunowie ds. organizacji: dr hab. inż. Grzegorz Dziatkiewicz, 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.



Zebranie organizacyjne Koła i wręczenie dyplomów uczestnikom kursu „Ansys Workbench: Podstawy symulacji mechanicznych” – Gliwice, 23.03.2022 r.



Rozpoczęcie kursu „MATLAB w zastosowaniach inżynierskich” – Gliwice, 31.03.2022 r.

Transform ideas into reality

14 LAT NA RYNKU

Jedyny Platynowy Partner Dassault Systemes w Polsce

DORADZTWO I OPTYMALIZACJA

w obszarze Zarządzania Cyklem Życia Produktu

WDROŻENIA

3DExperience / CAD / CAM / CAE / PLM

SZKOLENIA I WSPARCIE

w pracach projektowo-konstrukcyjnych

PLATINUM
PARTNER

DS DASSAULT
SYSTEMES



Spis treści

BOECKA-ŻUR DOMINIKA

Program sterowania modelem autonomicznego ciągnika siodłowego 1

BRONCEL ŁUKASZ, PRADELA CEZARY, MACIĄŻKA JAKUB, POGRZEBA WIKTOR, PRZELAZŁY ARKADIUSZ, OSTAREK PATRYK

Analiza porównawcza wybranych źródeł energii 5

CISZYŃSKA BARBARA

Automatyczna dyskretyzacja wnętrza obszaru w szybkiej wielobiegunowej
metodzie elementów brzegowych 9

DOULAN JAKUB

Projekt i konstrukcja układu chłodzenia do elektrycznego samochodu konkursowego 13

FRĄCZEK ŁUKASZ

Autonomiczny robot mobilny dla potrzeb dostarczania produktów
do stref objętych kwarantanną 17

GAJDZIK MARCIN

Zastosowanie metody programowanych punktów testowych z możliwością
wstrzykiwania informacji do pełnej diagnostyki elektronicznych modułów sterujących
w pojazdach samochodowych 21

GNACY-GAJDZIK ANNA

Zastosowanie modelu pojazdu elektrycznego do testów układów wbudowanych 25

GÓRNY MICHAŁ

Mini automatyczna linia do napełniania butelek 29

GURGUL JAKUB

Platforma testowa do rozwoju algorytmów autonomicznego sterowania 33

HACHUŁA KAROL

Wybrane symulacje numeryczne kompozytów o wewnętrznej strukturze kratowej 37

HOSZKIEWICZ ŁUKASZ

Optymalizacja układu belkowo-prętowego za pomocą sztucznego
systemu immunologicznego 41

JĘDRZEJOWSKI MAKSYMILIAN

Modelowanie zamrażania nowotworu skóry z wykorzystaniem równania
z dwoma czasami opóźnień 45

KIEPURA HUBERT

Analiza wariantowa wpływu powłoki na stopień nagrzania drzwi wejściowych 49

KIERSNOWSKI WOJCIECH	
Projekt protezy kończyny dolnej dla dziecka pozostającego w fazie wzrostu.....	53
KLICH DAWID	
Optymalizacja kratownicy za pomocą sztucznego systemu immunologicznego.....	57
KOBIELSKI MICHAŁ, LORANC KRYSTIAN	
Zdalne stanowisko laboratoryjne do rozwoju systemów detekcji i izolacji cyberataków	61
KOKOT WOJCIECH	
Wybrane analizy przepływu płynów z użyciem oprogramowania OpenFOAM	65
KOSIOR MATEUSZ	
Mapa wiatru do adaptacyjnego planowania ścieżki bezzałogowego statku powietrznego.....	69
KRAFCZYK WITOLD	
System sterowania grupą wirtualnych mikrobusów podążających w trybie platooning.....	73
KUBIAK JOANNA	
Analiza termiczna turbosprężarki samochodowego silnika spalinowego.....	77
KULCZYK PATRYK	
Model zdalnie sterowanego samochodu z funkcjami ADAS.....	81
MAKOWSKI PAWEŁ	
Model zastawki aortalnej i symulacja numeryczna procesu zaciskania.....	85
MARCZAK JAKUB	
Analiza stanu naprężenia na poziomie mikrostruktury kompozytu wzmacnianego cząsteczkami.....	89
MICHAŁSKI DANIEL, ŚWIETLIK MICHAŁ, BERZOWSKI MATEUSZ, CICHY BARTŁOMIEJ, BIJAŃSKI SZYMON	
Studium zastosowania budowlanych materiałów termooszczędnych.....	93
NIEMCZYK DAGMARA	
Modele pożarowe stosowane w symulacjach numerycznych oddziaływania ognia.....	97
NITKA WOJCIECH	
Zastosowanie metody FACT w projektowaniu mechanizmów podatnych.....	101
NITKA WOJCIECH, BRĘCZEWSKI JAKUB, STAWCZYK PATRYK	
Badanie wpływu temperatury na jakość wytworów wykonanych w technologii FDM	105
PASZKA PAWEŁ	
Modelowanie i analiza wytrzymałościowa ortezy kończyny dolnej.....	109
PIEKARSKI GRZEGORZ	
Model bieżni odchudzającej dla małych psów.....	113

PIETYRA MATEUSZ	
Optymalizacja aerodynamiczna przedniego skrzydła bolidu wyścigowego	117
PISZCZEK PATRYK	
Modelowanie sztucznej hipertermii z wykorzystaniem równania z dwoma czasami opóźnień	121
POLNIK PAWEŁ	
Dydaktyczny robot eksploracyjny z systemem autonomicznego omijania przeszkód	125
POPIEL RAFAŁ	
Statystyczna ocena jakości operacji dokręcania połączeń gwintowych wielowrzecionowymi wkrętarkami elektrycznymi	129
PROFASKA PAWEŁ	
Analiza skuteczności warstwy ochronnej procesora	133
REKUS PIOTR	
Projekt i analiza wytrzymałościowa rakiety tenisowej	137
SEBASTJAN PRZEMYSŁAW	
Uczenie sieci neuronowych na bazie wyników analiz MES	141
SOBOTA MICHAŁ	
Modelowanie procesu skrawania stopu tytanu za pomocą metody SPG	145
SZYMONIAK PRZEMYSŁAW	
Zastosowanie wybranych algorytmów niedeterministycznych w rozwiązywaniu zadań optymalizacji	149
TOMAN RAFAŁ	
Narzędzie do wspomagania napraw siłowników hydraulicznych	153
TOMASZEWSKA ANNA	
Analiza stanu wytężenia kości żuchwy z ubytkiem oraz po uzupełnieniu implantologicznym w różnych warunkach żucia	157
TOMICZEK KATARZYNA	
Homogenizacja numeryczna materiałów hybrydowych z fazą auksetyczną	161
WĄDEK MICHAŁ	
Dobór laminatu do stosowania w częściowej zabudowie otworu w poszyciu kadłuba jachtu	165
WILCZEK DAWID	
Generator modeli geometrycznych siłowników hydraulicznych	169
WOLNY MAREK	
Analiza efektywności powłok ochronnych narzędzia pod wpływem szoku termicznego	173

ZADOŃ MARIA

Zastosowanie metody strzałów w modelowaniu dystrybucji tlenu..... 177

ZAŁĘSKI ARKADIUSZ

Uprozczone modelowanie łożysk kulowych z podparciem czteropunktowym..... 181

ZENOWICZ KAMIL, ZENOWICZ PAULINA

Analiza podłużnej stateczności statycznej statku powietrznego
w zależności od położenia środka ciężkości 185

ZENOWICZ PAULINA, ZENOWICZ KAMIL

Wstępna analiza stateczności statycznej lotu bezzałogowego statku powietrznego
o nietypowej konfiguracji..... 189

PROGRAM STEROWANIA MODELEM AUTONOMICZNEGO CIĄGNIKA SIODŁOWEGO

inż. DOMINIKA BORECKA-ŻUR,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AB5, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Sebastian Rzydzik

Streszczenie. Celem prac było opracowanie algorytmu sterowania oraz zaimplementowanie go w sterowniku modelu ciągnika siodłowego. Zakres prac obejmował również projekt dedykowanej aplikacji mobilnej, w skład której wchodzi m.in. interfejs graficzny umożliwiający sterowanie modelem pojazdu. W ramach zasadniczych prac utworzono dwa osobne tryby sterowania: manualny i autonomiczny. Ostatecznie, opracowany kod programu sterownika został sprawdzony zarówno na poziomie testów nisko- i wysokopoziomowych, z użyciem planu testów.



CONTROL SOFTWARE FOR AN AUTONOMOUS TRUCK MODEL

Abstract. The aim of the work was to develop a control algorithm and implement it in the controller of a tractor unit model. The scope of work also included the project of a dedicated mobile application, which includes, among others, a graphic interface to control the vehicle model. As part of the main work, two separate control modes were developed: manual and autonomous. Ultimately, the developed driver program code was validated at both the low-level and high-level testing levels using a test plan.

1. Wprowadzenie

W celu wykonania prac wykorzystano model zdalnie sterowanej ciężarówki Volvo FH12 Globetrotter 420 producenta Tamiya wykonany w skali 1:14. Model jest wyposażony w wielofunkcyjny zestaw sterujący MFC-03, który umożliwia używanie funkcji dźwiękowych i świetlnych. Posiada on zintegrowany regulator obrotów silnika i jest kompatybilny z 4-kanalową aparaturą sterującą. Oryginalnie, do sterowania robotem wykorzystuje się pilot sterowania RC. Aby było możliwe zdalne sterowanie modelem, w układzie zastosowano dodatkową platformę Arduino Mega 2560 [1]. Do układu został dołączony sterownik PWM PCA9685 oraz moduł Bluetooth. Model został wyposażony w 9 czujników optycznych: osiem czujników o zasięgu 10 – 80 cm oraz jeden w zakresie działania 2 – 12 cm.

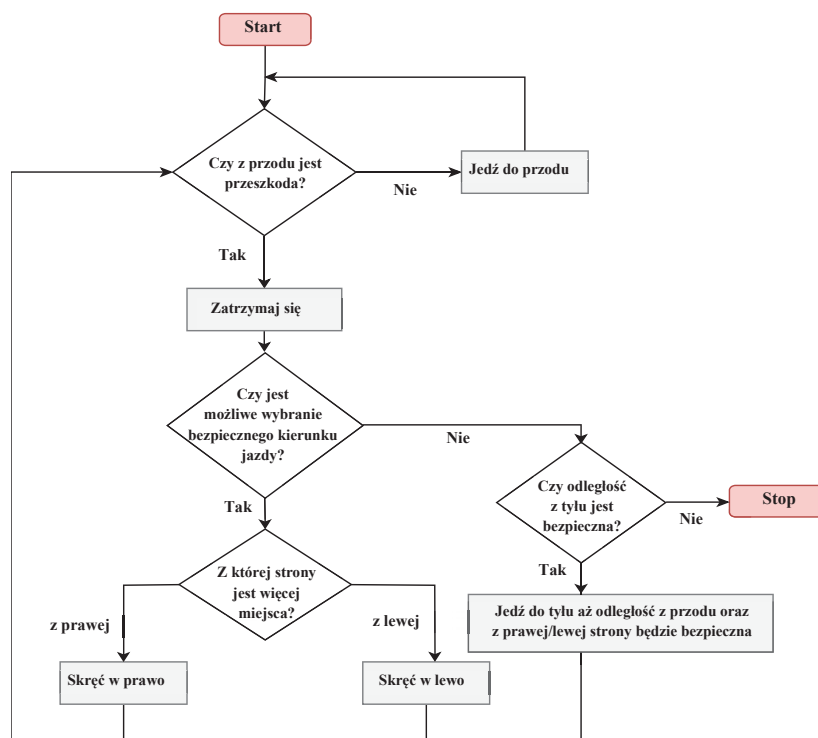
2. Projekt algorytmu sterowania z podziałem na tryb manualny i autonomiczny

W ramach pracy dokonano analizy znanych algorytmów sterowania [3][4] oraz przedstawiono opracowania dwóch algorytmów: dla trybu manualnego oraz dla trybu autonomicznego. W celu przeprowadzenia prac wchodzących w zakres projektu, założono, że środowisko, w którym poruszać będzie się pojazd jest nieznane a znajdujące się w nim przeszkody są statyczne. Model powinien jeździć bezkolizyjnie.

Algorytm działania trybu manualnego opiera się na odczytywaniu wartości wysyłanych przez użytkownika aplikacji mobilnej. Na podstawie otrzymanych danych, pojazd zachowuje się w określony sposób. Założono, że pojazd powinien realizować następujące zadania:

- 1) jazda do przodu i do tyłu z możliwością ustawienia prędkości,
- 2) skręt w lewo oraz w prawo,
- 3) natychmiastowe zatrzymanie się,
- 4) zmiana biegów,
- 5) włączanie i wyłączanie świateł.

W przypadku wybrania przez użytkownika trybu autonomicznego, rozpoczyna się działanie algorytmu przedstawionego na Rys. 1. Przyjęto, że bezpieczna odległość wynosi ok. 30 cm. Na początku pojazd jedzie do przodu. Gdy na drodze pojawi się przeszkoda, pojazd powinien zatrzymać się i odczytać wartości z czujników umieszczonych z prawej oraz z lewej strony modelu. Na podstawie odczytów, pojazd powinien zdecydować, w którą stronę skręcić by trasa była bezkolizyjna. Ważnym elementem trybu autonomicznego jest możliwość awaryjnego zatrzymania pojazdu przez użytkownika. Zatrzymanie powinno nastąpić także w przypadku zerwania połączenia Bluetooth ze sterownikiem.



Rys. 1. Algorytm działania trybu autonomicznego
Fig. 1. Autonomous mode operation algorithm

3. Implementacja algorytmu

Za pomocą środowiska Arduino IDE zaimplementowano opisany w poprzednim rozdziale algorytm. W oparciu o algorytm trybu manualnego, konkretne wartości wysyłane przez użytkownika powodują wywołanie konkretnych funkcji. Na przykład, żeby możliwa była zmiana prędkości (w procentach prędkości maksymalnej), wartość PWM dla kanału drugiego jest obliczana według wzorów zarówno dla jazdy do przodu jak i do tyłu (Rys. 2).

```

if (bt_data >= 40 and bt_data <= 52 and var == 1) {
    forward = (195 + (((100 - (bt_data + 4)) - 35)*4.5)); // Move forward equation
    ch2 = forward;
}

```

Rys. 2. Algorytm zmiany prędkości przy jeździe do przodu

Fig. 2. Speed change algorithm when driving forward

W funkcji głównej trybu autonomicznego sprawdzana jest odległość od przeszkody z przodu pojazdu. Jeśli odległość jest bezpieczna, pojazd powinien jechać do przodu, aż do momentu napotkania przeszkody. Gdy na swojej drodze napotka przeszkodę, powinien zatrzymać się oraz za pomocą funkcji *Find_Direction()* zdecydować, w którą stronę należy jechać. Kiedy użytkownik aplikacji naciśnie przycisk *STOP* następuje awaryjne zatrzymanie pojazdu.

```

if (Read_S7 < 300 and Read_S8 < 300) {
    do {
        Forward_Auto();
    }while (Read_S7 >= 300 and Read_S8 >= 300);

    if ( Read_S7 >= 300 and Read_S8 >= 300)
    {
        Stop_Auto();
        Find_Direction();
    }
} else if (Read_S7 >= 300 and Read_S8 >= 300) {
    Stop_Auto();
    Find_Direction();
}
}

void Find_Direction() {
    Read_S1 = analogRead(Sensor_1);
    Read_S2 = analogRead(Sensor_2);
    Read_S3 = analogRead(Sensor_3);
    Read_S4 = analogRead(Sensor_4);
    Read_S5 = analogRead(Sensor_5);
    Read_S6 = analogRead(Sensor_6);
    Read_S7 = analogRead(Sensor_7);
    Read_S8 = analogRead(Sensor_8);
    Read_S9 = analogRead(Sensor_9);

    P = Read_S9 + Read_S4;
    L = Read_S6 + Read_S5;
    if (P <= L) {
        Turn_Right();
    } else {
        Turn_Left();
    }
}

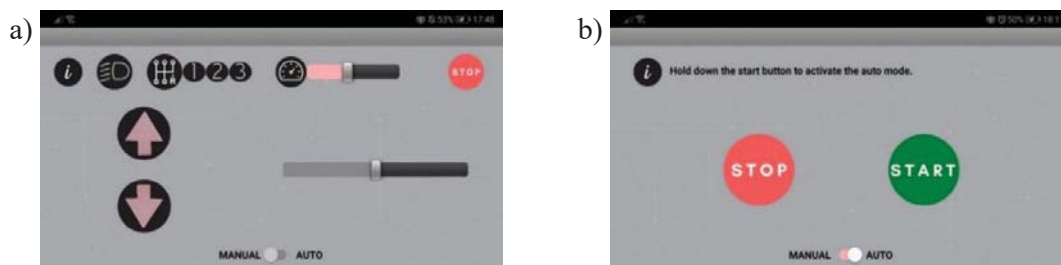
```

Rys. 3. Funkcja główna oraz funkcja Find_Direction() – tryb autonomiczny

Fig. 3. Main function and Find_Direction() function – autonomous mode

4. Projekt aplikacji mobilnej

W celu umożliwienia zdalnego sterowania modelem, należało opracować aplikację mobilną. Wykorzystano środowisko *MIT App Inventor* [2]. Utworzono trzy ekrany odpowiedzialne za: tryb manualny, tryb autonomiczny oraz informacje dotyczące aplikacji. Naciśnięcie konkretnych przycisków powoduje przejście pomiędzy ekranami. Poniżej przedstawiono interfejs graficzny aplikacji z poziomu urządzenia mobilnego (Rys. 4). Aplikacja jest zaprojektowana responsywnie.

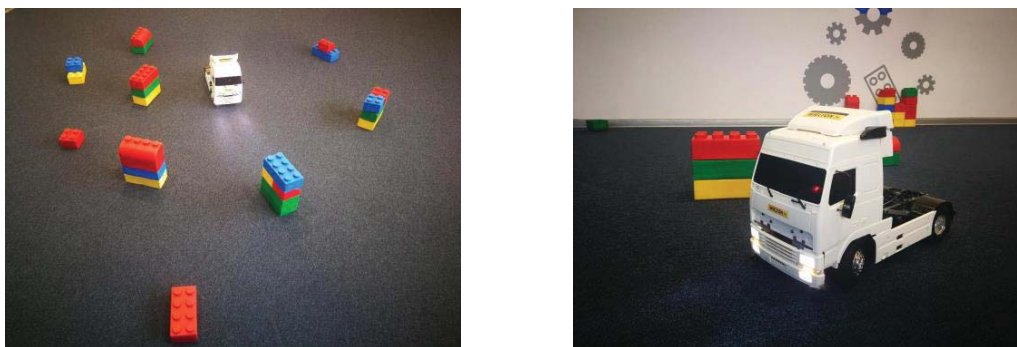


Rys. 4. Interfejs graficzny: a) tryb manualny, b) tryb autonomiczny

Fig. 4. Graphical user interface: a) manual mode, b) autonomous mode

5. Testy weryfikacyjne

Testowanie opracowanego programu sterującego odbywało się w odpowiednio przygotowanym środowisku. Testy podzielono na dwie części. Pierwsza z nich dotyczyła badania zachowania pojazdu w trybie manualnym, druga dotyczyła oceny realizacji algorytmu trybu autonomicznego. W ramach części pierwszej sprawdzano w jaki sposób pojazd reaguje na wysyłane przez aplikację mobilną polecenia. Pojazd umieszczono w środowisku umożliwiającym swobodne poruszanie się. Sprawdzano zachowanie pojazdu, jak jazda do przodu oraz do tyłu, skręcanie kół i zmiana biegów. Wszystkie czynności podejmowane były pięciokrotnie celem sprawdzenia powtarzalności zachowania. Za każdym razem pojazd reagował w ten sam sposób, więc uznano rezultat testów trybu manualnego za zgodny z oczekiwanym. Dla przeprowadzenia testów trybu autonomicznego przygotowano środowisko składające się z nieruchomych przeszkód (Rys. 5). Następnie umieszczono pojazd w otoczeniu oraz za pomocą aplikacji włączono tryb autonomiczny. Przez 5 minut obserwowano zachowanie pojazdu. Badanie pokazało, że pojazd prawidłowo ocenia kierunek bezpiecznej jazdy oraz w sposób prawidłowy ocenia, czy odległość z tyłu pojazdu jest bezpieczna. W przypadku, gdy określenie bezpiecznej odległości nie jest możliwe, pojazd zatrzymywał się i sygnalizował koniec pracy.



Rys. 5. Model ciągnika siodłowego w środowisku testowym

Fig. 5. Tractor unit model in the test environment

6. Wnioski

Opracowany algorytm trybu manualnego jest rozwiązaniem wystarczającym do sterowania robotem mobilnym. Metoda działania trybu autonomicznego może być wstępem do bardziej rozbudowanego algorytmu sterowania modelem ciągnika siodłowego. Darmowe środowisko *MIT App Inventor* w pełni spełnia potrzebę opracowania prostej aplikacji mobilnej. Aplikacja mobilna jest estetyczna i intuicyjna, a interfejs graficzny adekwatny do podejmowanych funkcji.

Literatura

1. Hughes J. M., *Arduino: A Technical Reference. A Handbook for Technicians, Engineers, and Makers*, O'Reilly Media, (2016).
2. Jayakumar M., *Arduino and Android using MIT App Inventor 2.0*, CreateSpace, (2016).
3. Skrzypczyk K., *Heurystyczna metoda poszukiwania bezkolizyjnej ścieżki robota mobilnego*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, (2001).
4. Zhang Han-ye, Lin Wei-ming, Chen, Ai-xia, *Path Planning for the Mobile Robot: A Review*. Symmetry. 10. 450. 10.3390/sym10100450 (2018).

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

**ŁUKASZ BRONCEL, CEZARY PRADELA, JAKUB MACIĄŻKA,
WIKTOR POGRZEBA, ARKADIUSZ PRZELAZŁY, PATRYK OSTAREK,**

Mechanika i Budowa Maszyn, Automatyka i Robotyka, semestr V, 1 stopień

Opiekuni naukowci: Dr inż. Anna Korczak, Dr inż. Jolanta Działkiewicz, Dr inż. Grażyna Kałuża

Streszczenie. Celem pracy jest przeanalizowanie zaopatrzenia w energię ciepłą budynku mieszkalnego pod kątem ilości spalonego nośnika energii. Analiza opiera się zastosowaniu dwóch różnych systemów dostarczenia energii. Pierwszy z nich wykorzystuje do tego tylko paliwo konwencjonalne tj. węgiel kamienny. Drugi system dostarcza energię, wykorzystując do tego źródło odnawialne - pellet. Na podstawie obliczonego zapotrzebowania energetycznego budynku dokonano porównania wybranych koncepcji i zostały wysunięte wnioski końcowe.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SELECTED ENERGY SOURCES

Abstract. The aim of the work is to analyze the thermal energy supply of a residential building in terms of the amount of burnt energy carrier. The analysis is based on the use of two different energy supply systems. The first of them uses only conventional fuel, i.e. hard coal. The second system supplies energy using a renewable source - pellets. Based on the calculated energy demand of the building, selected concepts were compared and final conclusions were drawn.

1. Wprowadzenie

Obiekt badań wykorzystany do analizy to dom jednorodzinny zgodny z projektem firmy Archon pt. „Dom w Jasienicach”, zlokalizowany w Gliwicach. Główne ocieplenie budynku składa się ze styropianu o grubości 15 cm w przypadku ścian, wełny mineralnej o grubości 30 cm w przypadku dachu oraz styropianu o grubości 15 cm w przypadku podłogi. Określeniem jakości ocieplenia obiektu jest współczynnik straty mocy cieplnej, który przenika przez wszystkie przegrody zewnętrzne. Wyraża on ilość energii przepływającej przez powierzchnie przegrody w ciągu jednej sekundy przy różnicy temperatur 1 K po obu stronach przegrody. Z punktu widzenia obliczania zapotrzebowania energii potrzebnej do ogrzewania budynku, ważna jest także znajomość współczynnika wentylacyjnej straty ciepła. Określa on ilość energii traconej przez dany otwór wentylacyjny budynku. Najważniejsze dane oraz założenia dotyczące obiektu przedstawiono w Tabeli 1.

Biorąc pod uwagę możliwości dostępnych nośników energii, zostały wybrane dwie następujące koncepcje:

- Kocioł dwufunkcyjny zasilany węglem kamiennym (ekogroszek) z automatycznym podajnikiem paliwa o współczynniku sprawności pieca $\eta = 1,12$.
- Kocioł dwufunkcyjny zasilany pelulem z automatycznym podajnikiem paliwa o współczynniku sprawności pieca $\eta = 1,1$.

Oba rodzaje pieców są bardzo podobne, jednak występują pewne różnice w technologii pieca. Pellet w kotle w czasie, gdy nie trzeba podgrzewać budynku lub wody, czyli w tak zwanym czasie postoju pieca, zostaje wygaszony. Gdy temperatura spadnie i trzeba

doprowadzić do jej wzrostu, pellet w palenisku na nowo jest zapalany poprzez elektryczną zapalarkę. Natomiast węgiel trudno się rozpala, dlatego lepiej jest cały czas podtrzymywać żar niż wygasić piec. Jest to główna różnica pomiędzy piecem na węgiel i piecem na pellet. Cenowo lepiej sytuuje się węgiel, ponieważ sam piec jest tańszy, nie jest to duża różnica lecz odczuwalna, dodatkowo cena wytworzenia 1MJ z ekogroszku też jest mniejsza niż z pelletu. Biorąc pod uwagę ergonomię oraz czystość obsługi, lepszy jest piec na pellet. Z węgla powstaje znacznie więcej popiołu, sadzy oraz innych produktów ubocznych. Wpływa to na rzadsze czyszczenie wymiennika ciepła w piecu oraz wyrzucanie popiołu, dodatkowo pellet mniej pyli i przyjemnie pachnie, a te wszystkie czynniki wpływają pozytywnie na komfort użytkowania. Piec na pellet jest lepszy również pod względem ekologicznym. Mniej istotną różnicą między piecami jest system podajnikowy, który jest dostosowany pod wymiary paliwa.

Tabela 1. Dane wejściowe dotyczące badanego obiektu
Table 1. Input data for the tested object

<i>Typ obiektu</i>	<i>Budynek jednorodzinny</i>
Powierzchnia użytkowa, ogrzewana	170 m ²
Kubatura	844 m ³
Lokalizacja	Gliwice, 50°17'51.0"N 18°35'56.1"E
Liczba mieszkańców	5 osób
Współczynnik straty mocy cieplnej przez przenikanie przez wszystkie przegrody zewnętrzne	120,33 W/K
Współczynnik projektowej wentylacyjnej straty ciepła	110 W/K

2. Metoda obliczeń

Zbadano budynek pod względem zapotrzebowania na energię cieplną wytwarzaną przez źródło ciepła [2]. Wykorzystano do tego równanie opisujące projektowe straty ciepła przez przenikanie

$$\Phi_{T,j} = H_{t,r} \cdot (\theta_{int.i} - \theta_e) \quad [W] \quad (1)$$

gdzie:

$H_{t,r}$ – współczynnik straty mocy cieplnej przez przenikanie przez wszystkie przegrody zewnętrzne, $\frac{W}{K}$;

$\theta_{int.i}$ – projektowa temperatura wewnętrzna przestrzeni ogrzewanej, °C;

θ_e – projektowa temperatura zewnętrzna, °C;

oraz równania opisujące projektową wentylacyjną stratę ciepła w przypadku wentylacji naturalnej

$$\Phi_{V,i} = H_{v,i} \cdot (\theta_{int.i} - \theta_e) \quad [W] \quad (2)$$

gdzie $H_{v,i}$ jest współczynnikiem projektowej wentylacyjnej straty ciepła, $\frac{W}{K}$. Dodatkowo w przypadku ogrzewania wody użytkowej do całkowitego zapotrzebowania na energię cieplną należy również uwzględnić moc potrzebną do jej ogrzania. Metoda M4A opisuje ilość energii potrzebnej do ogrzania wody użytkowej

$$Q_{CWU} = V_{CW,i} \cdot L_i \cdot c_W \cdot \rho_W \cdot (\theta_W - \theta_o) / 1000 \cdot 86400 \quad [W] \quad (3)$$

Wszystkie oznaczenia występujące w zależności (3) opisano w Tabeli 2.

Podsumowując wymienione zależności (1) – (3), skonstruowano równanie opisujące całkowite projektowe zapotrzebowanie na ciepło danego budynku

$$\phi_{\text{całkowite}} = (\phi_{t,j} + \phi_{v,j} + Q_{CWU}) \frac{1}{1000} \quad [kW] \quad (4)$$

Zapotrzebowanie na ciepło określa ilość energii potrzebnej do wytworzenia w danej chwili (moc). Dlatego równanie opisujące miesięczne zapotrzebowanie energetyczne budynku opisuje następująca zależność

$$\phi_{\text{miesięczne}} = \phi_{\text{całkowite}} \cdot 24 \cdot d_m \quad [kWh] \quad (5)$$

gdzie d_m jest liczbą dni w danym miesiącu.

Tabela 2. Dane do wzoru (3)
Table 2. Data for equation (3)

Oznaczenie	Wartość	Jednostka	Opis
L	5	-	Liczba osób
c_w	4,19	kJ/(kg · K)	Ciepło właściwe wody
r_w	1000	kg/m ³	Gęstość wody
θ_w	55	°C	Temperatura wody na wypływie z zaworu czerpального
θ_o	20	°C	Temperatura wody na odpływie z zaworu czerpального
V_{cw}	35	dm ³ /doba	Jednostkowe zużycie ciepłej wody o temperaturze 55°C

Miesięczne zapotrzebowanie na paliwo stałe opisuje zależność

$$z = \left(\frac{\phi_{\text{miesięczne}}}{Q} \right) \cdot \eta \quad [kg] \quad (6)$$

gdzie Q jest energią z jednego kilograma zależną od wartości opałowej paliwa (dla węgla – 7,645kWh, dla pelletu 5,073kWh), natomiast η współczynnikiem sprawności pieca.

Roczne zapotrzebowanie na ciepło badanego obiektu opisuje wyrażenie

$$\phi_{\text{roczne}} = \Sigma \phi_{\text{miesięczne}} \quad [kWh] \quad (7)$$

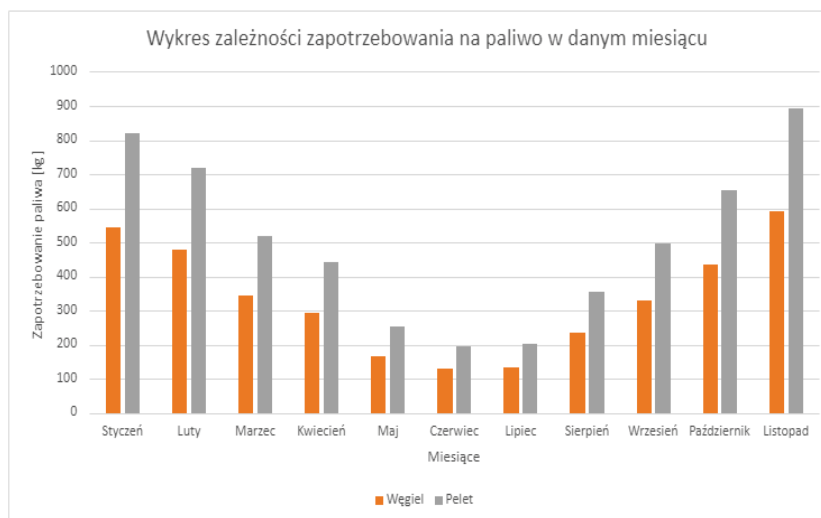
Natomiast roczne zapotrzebowanie na paliwo stałe opisuje zależność

$$z = \left(\frac{\phi_{\text{roczne}}}{Q} \right) \cdot \eta \quad [kg] \quad (8)$$

3. Wyniki analizy

Do obliczeń projektowej straty ciepła przez przenikanie oraz projektowej straty ciepła na cele wentylacji przyjęto następujące dane [1]: $H_{t,r} = 120,33 \text{ W/K}$, $H_{v,i} = 110 \text{ W/K}$, $\theta_{int,i} = 22 \text{ °C}$, $\theta_e = -20 \text{ °C}$ (III strefa klimatyczna).

Korzystając z równań (1) – (2), obliczono współczynniki strat ciepła, które wyniosły kolejno $\phi_{t,j} = 5053,86$ W oraz $\phi_{v,j} = 4998$ W. Obliczono również zapotrzebowanie na cele podgrzania ciepłej wody użytkowej, korzystając z równań (3) – (4), które wyniosło $Q_{cwu} = 342,34$ W. Korzystając z archiwalnych danych z najbliższej stacji meteorologicznej umiejscowionej w Katowicach, dokonano filtracji na średnie temperatury w poszczególnych miesiącach. Na mocy równania (5) obliczono średnie miesięczne zapotrzebowanie energetyczne dla poszczególnych miesięcy, a następnie korzystając z równania (6), wyliczono średnie miesięczne zapotrzebowanie na paliwo poszczególnych koncepcji. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1. Korzystając z zależności (7) wyznaczono roczne zapotrzebowanie na ciepło badanego obiektu, które wynosi $\phi_{roczne} = 32634,8$ kWh. Ostatecznie obliczono roczne zużycie dla poszczególnych koncepcji na mocy równania (8). Dla węgla wartość ta wyniosła 4780 kg/rok, a dla pelletu 7080 kg/rok.



Rys.1. Wykres zależności zapotrzebowania na paliwo w danym miesiącu

Fig. 1. Diagram of dependence of fuel demand in a given month

4. Podsumowanie

Zapotrzebowanie na paliwo zależne jest od temperatury powietrza. Im mniejsza temperatura tym zapotrzebowanie energetyczne jest większe. Spalanie pelletu jest stosunkowo większe niż spalanie węgla, wynika to z własności materiału. Aby uzyskać te same warunki roczne dla badanego obiektu, potrzeba wykorzystać o 48% więcej odnawialnego nośnika energii niż konwencjonalnego.

Literatura

1. Nantka M.: Nantka Ogrzewnictwo i Ciepłownictwo. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010.
2. PN-EN 12831. Nowa metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.

AUTOMATYCZNA DYSKRETYZACJA WNĘTRZA OBSZARU W SZYBKIEJ WIELOBIEGUNOWEJ METODZIE ELEMENTÓW BRZEGOWYCH

mgr inż. BARBARA CISZYŃSKA,

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień

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

Streszczenie. W pracy została zaprezentowana metoda automatycznego generowania punktów wewnętrznych w połączeniu z SWMEB stosująca elementy brzegowe wyższego rzędu. Wygenerowane punkty mogą być użyte do obliczenia wielkości wewnątrz obszaru bądź utworzenia komórek wewnętrznych mogących posłużyć do obliczenia potencjałów objętościowych.



AUTOMATIC DOMAIN DISCRETIZATION IN THE FAST MULTIPOLE BOUNDARY ELEMENT METHOD

Abstract. This paper presents developed method for automatic generation of internal points in conjunction with FMBEM using higher order elements. The generated points can be used to calculate the internal quantities or to create internal cells that can be used to calculate volume potentials.

1. Wstęp

Jedną z popularnych i rozwijanych metod numerycznych jest metoda elementów brzegowych (MEB), która może posłużyć do rozwiązywania wielu zagadnień w dziedzinie mechaniki. Zapoznanie się z podręcznikami opisującymi MEB [1, 2, 5], prowadzi do wniosku, iż jej zalety mogą sprawić, że metoda może stać się konkurencyjna dla powszechnie stosowanej metody elementów skończonych (MES). Jednak wśród głównych wad metody należy wymienić występowanie pełnych i niesymetrycznych macierzy układu równań, których wielkość zależy od liczby stopni swobody układu. Z tego powodu złożoność konwencjonalnej wersji MEB jest kwadratowa lub wyższego rzędu. Efektywny zakres jej stosowania jest ograniczony do układów, których liczba stopni swobody nie przekracza kilku tysięcy.

Wśród wielu metod, które mogą posłużyć do redukcji złożoności obliczeniowej MEB, należy wyróżnić szybką metodę wielobiegunową (SMW). Zastosowanie SMW w połączeniu z MEB ma duże znaczenie w przypadku rozpatrywania zagadnień, dla których konieczne jest uwzględnienie potencjałów objętościowych występujących w brzegowym równaniu całkowym. Wśród takich zagadnień można wyróżnić: analizę układów obciążonych siłami objętościowymi, materiałów gradientowych, zagadnień nieliniowych, czy też zagadnienia termosprężystości. Metoda całkowania po obszarze z zastosowaniem metody wielobiegunowej została porównana z innymi metodami, takimi jak: metoda rozwiązań szczególnych, metoda podwójnej zasady wzajemności, metoda całkowania bezpośredniego po zdyskretyzowanym obszarze. Wykazano, że może być ona efektywniejsza pod względem czasu obliczeń i dokładności od pozostałych metod [3]. Zastosowanie SWMEB sprawia, że złożoność przeprowadzanych operacji obliczania wpływu jest typu $O(N)$ lub $O(N \log N)$, gdzie N to liczba

stopni swobody analizowanego układu. Istnieją prace, w których zastosowano SWMEB z wykorzystaniem elementów stałych lub liniowych do analizy płaskich i przestrzennych układów odkształcalnych [4], również przy występowaniu składników objętościowych [9, 10]. Stosowanie elementów wyższego rzędu, na przykład izoparametrycznych o kwadratowych funkcjach kształtu, posiada szereg zalet. Jest to przede wszystkim redukcja wielkości analizowanego układu równań, ze względu na fakt, iż do dyskretyzacji brzegu potrzebna jest mniejsza liczba elementów. W pracy [7] zostało przedstawione zastosowanie SWMEB do analizy płaskich układów liniowosprężystych z zastosowaniem elementów brzegowych wyższego rzędu. Praca [8] opisuje zastosowanie SWMEB w analizie układów płaskich obciążonych siłami objętościowymi, również z zastosowaniem tego typu elementów. Monografia [6] zawiera opis opracowanej SWMEB w wersji kolokacyjnej z zastosowaniem ośmiowęzłowych elementów brzegowych o kwadratowych funkcjach kształtu do analizy przestrzennych układów liniowosprężystych obciążonych siłami powierzchniowymi. Brak jest natomiast prac dotyczących SWMEB wykorzystującej elementy brzegowe wyższego rzędu do analizy przestrzennych układów odkształcalnych, w których występują składniki objętościowe, co może stanowić użyteczny obszar badań dotyczący dalszego rozwoju zaprezentowanej metody.

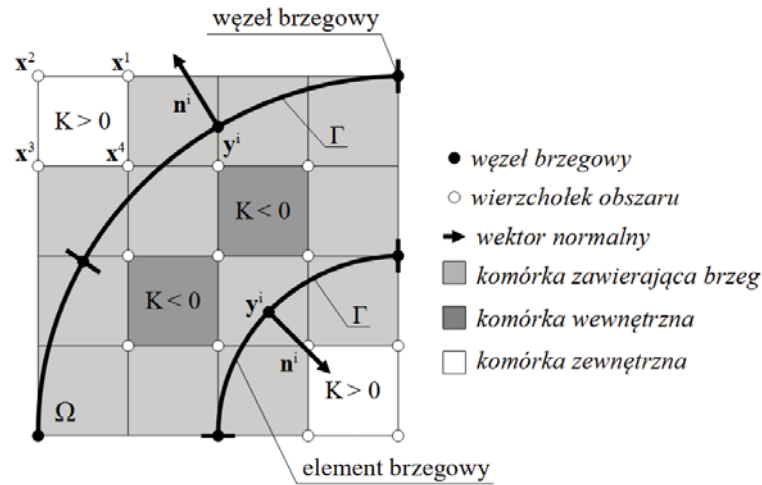
2. Dyskretyzacja wnętrza obszaru w SWMEB

SWMEB opiera się na procesie grupowania elementów i węzłów brzegowych oraz obszarów wewnętrznych w komórki, które tworzą strukturę hierarchiczną, zapisywaną w postaci drzewa. Węzły drzewa znajdujące się poziom wyżej od węzła aktualnego nazywamy jego następnikami, natomiast poziom niżej – poprzednikami. W pracy została przedstawiona metoda grupowania dla zagadnień przestrzennych z uwzględnieniem wnętrza analizowanego modelu. Drzewo składa się z węzłów, które odpowiadają tworzonemu komórkom, każdy z węzłów w przypadku zagadnień trójwymiarowych może posiadać maksymalnie osiem następników. W ten sposób powstaje drzewo zwane ósemkowym. Komórki wewnętrzne, analogicznie do komórek zawierających brzeg analizowanego układu przyjmują postać sześciątów, które są zdefiniowane poprzez ich wierzchołki i punkty środkowe. Tworzenie komórek wewnętrznych, które nie zawierają węzłów brzegowych, odbywa się poprzez porównanie położenia wszystkich ich wierzchołków względem najbliższych węzłów brzegu i ich wektorów normalnych zgodnie z wyrażeniem [9]:

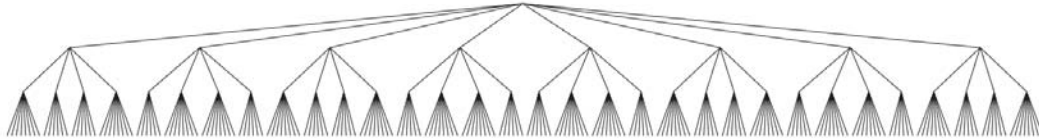
$$K = \frac{1}{mP} \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^m \frac{(\mathbf{x}^j - \mathbf{y}^i) \cdot \mathbf{n}^i}{|\mathbf{x}^j - \mathbf{y}^i|}, \quad (1)$$

gdzie: K – współczynnik decydujący o położeniu komórki ($K > 0$ oznacza, że komórka znajduje się poza analizowanym układem, w innym przypadku znajduje się wewnątrz), $\mathbf{x}^j$ – wierzchołek komórki, $\mathbf{y}^i$ – węzeł brzegowy, $\mathbf{n}^i$ – wektor normalny węzła brzegowego skierowany do zewnątrz brzegu, m – liczba wierzchołków komórki, P – liczba węzłów brzegowych poprzednika.

Jeżeli jakaś komórka zostaje zadeklarowana jako wewnętrzna, wszyscy jej następnicy są również tego typu komórkami. Komórki, które zostają zadeklarowane jako zewnętrzne nie są uwzględniane w strukturze drzewa. Uproszczony proces tworzenia komórek wewnętrznych został przedstawiony na rysunku 1. W celu zwiększenia jego czytelności został przedstawiony fragment modelu płaskiego, analogiczne podejście jest stosowane w przypadku układów przestrzennych. Przykładowe drzewo utworzone na drodze tworzenia komórek zawierających brzeg i wewnętrznych zostało przedstawione na rysunku 2.

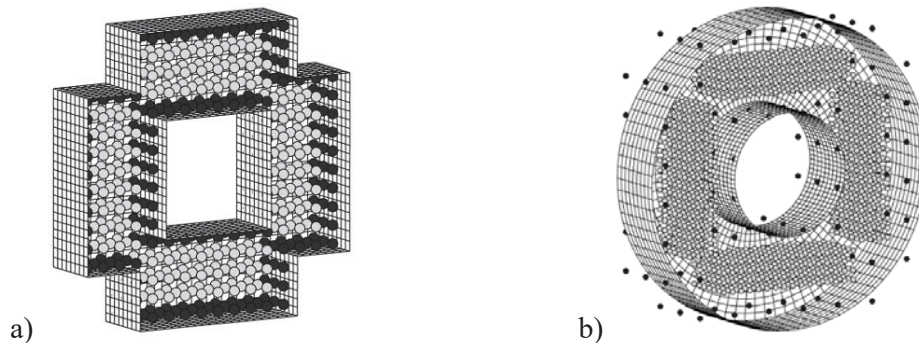


Rys. 1. Proces tworzenia komórek wewnętrznych
Fig. 1. Internal cells formation process



Rys. 2. Drzewo składające się z węzłów zawierających brzeg i wewnętrznych
Fig. 2. A tree consisting of nodes containing boundary and internal nodes

W celu weryfikacji poprawności działania opracowanej metody zostały przygotowane geometrie zawierające np. otwory lub też wycięcia. Dwie z nich zostały przedstawione na rysunkach poniżej (Rys. 3a i 3b). Komórki wewnętrzne są tworzone ze względu na warunek zadeklarowanej liczby poziomów drzewa. Istnieje również dodatkowa możliwość zadeklarowania przez użytkownika wielkości tworzonego sześciątów wewnątrz obszaru i ich zagęszczenie (Rys. 3b). W celu zwiększenia czytelności zostały przedstawione jedynie punkty centralne utworzonych komórek, gdzie jasny kolor oznacza komórki zawierające brzeg, natomiast ciemny komórki wewnętrzne.



Rys. 3. Przekroje w płaszczyźnie symetrii zdyskretyzowanych modeli:
a) równomierna dyskretyzacja, b) zwiększenie liczby komórek wewnętrznych
Fig. 3. Cross sections in the plane of symmetry of discretized models:
a) uniform discretization, b) increased number of internal cells

3. Wnioski

Należy stwierdzić, że opracowana metoda pozwala w efektywny sposób generować komórki wewnętrzne dla utworzonego modelu, również w przypadku bardziej skomplikowanych geometrii. Jest to jedna z metod, która uzasadnia, iż proces dyskretyzacji wnętrza analizowanego modelu przestaje być znaczącą wadą (proces odbywa się w sposób automatyczny) przy zastosowaniu metody całkowania po obszarze z zastosowaniem metody wielobiegunowej. Zastosowane podejście pozwala na generowanie punktów wewnętrznych służących do obliczania w nich wielkości przemieszczeń, odkształceń i naprężeń, bądź na generowanie komórek wewnętrznych, które mogą posłużyć do obliczania całek objętościowych. Opracowana metoda może posłużyć do przygotowania efektywnej metody obliczania tych całek dla wybranych układów odkształcalnych i połączenia jej z SWMEB, która wykorzystuje elementy brzegowe wyższego rzędu. Dalsze badania pozwoliłyby na rozwój SWMEB i analizę wielu zagadnień z dziedziny mechaniki o znaczeniu praktycznym.

Literatura

1. Beer G., Smith I., Duenser C., The boundary element method with programming for engineers and scientists, Springer – Verlag, Wien – New York (2008).
2. Burczyński T., Metoda elementów brzegowych w mechanice, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa (1995).
3. Ingber M. S., Mammoli A. A., Brown M. J., A comparison of domain integral evaluation techniques for boundary element methods, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 52, s. 417 – 432 (2001).
4. Liu Y., Fast Multipole Boundary Element Method: Theory and Applications in Engineering, Cambridge University Press, Cambridge (2009).
5. Majchrzak E., Metoda elementów brzegowych w przepływie ciepła, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2001).
6. Ptaszny J., Analiza przestrzennych układów liniowosprężystych za pomocą szybkiej wielobiegunowej metody elementów brzegowych, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2019).
7. Ptaszny J., Fedeliński P., Stress analysis of linear elastic structures by the fast multipole boundary element method, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, Vol. 16, No. 3 – 4, s. 223 – 240 (2009).
8. Ptaszny J., Fedeliński P., Szybka wielobiegunowa metoda elementów brzegowych w analizie układów obciążonych siłami objętościowymi, Modelowanie Inżynierskie, Vol. 4, No. 35, s. 107 – 114 (2008).
9. Wang Q., Zhou W., Cheng Y., Ma G., Chang X., Fast multipole cell-based domain integration method for treatment of volume potentials in 3D elasticity problems, Engineering Computations, Vol. 34, No. 6, s. 1849 – 1873 (2017).
10. Zhou W., Wang Q., Cheng Y., Ma G., A fast multipole method accelerated adaptive background cell based domain integration method for evaluation of domain integrals in 3D boundary element method, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 67, s. 1 -12 (2016).

PROJEKT I KONSTRUKCJA UKŁADU CHŁODZENIA DO ELEKTRYCZNEGO SAMOCHODU KONKURSOWEGO

inż. JAKUB DOULAN,

Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Paweł Chrzanowski

Streszczenie. Artykuł prezentuje wynik projektu układu chłodzenia do elektrycznego samochodu konkursowego przeznaczonego do udziału w międzynarodowych zawodach Formula Student. Projekt realizowany był w ramach studenckiego koła naukowego PolSI Racing na potrzeby nowego bolidu elektrycznego SW-03e. Zakres projektu obejmował opracowanie schematycznego ułożenia komponentów układu chłodzenia, dobrania gabarytów wymiennika ciepła za pomocą obliczeń inżynierskich w programie MS Excel oraz wykonanie modelu 3D w środowisku CAD.



COOLING SYSTEM PROJECT FOR ELECTRIC COMPETITION CAR

Abstract. This article presents the result of the Formula Student competition car cooling system project. The work was carried out under PolSI Racing science club as a part of the newly build SW-03e electric competition car project. The scope of the project included creating a diagram of the cooling system parts arrangement, choosing the dimensions of the heat exchanger through the aid of calculations in MS Excel and the design of the cooling system in 3D CAD software.

1. Wprowadzenie

Formuła Student to międzynarodowe zawody dla studentów uczelni technicznych, w których współzawodniczą w punktowanych konkurencjach statycznych oraz dynamicznych prezentując możliwości swoich bolidów. Zespół SKN PolSI Racing od lat projektuje bolidy klasy Formuła Student i rywalizuje w zawodach. Samochód spalinowy SW-02 Quarado z 2018 roku widoczny na rysunku 1, to poprzednik aktualnie budowanego bolidu elektrycznego SW-03e.



Rys. 1. Bolid PolSI Racing SW-02 Quarado [1]

Fig. 1. PolSI Racing SW-02 Quarado Formula Student car

2. Obszar prac

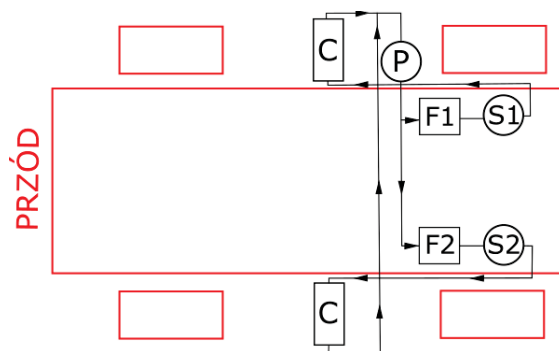
Praca dotyczyła projektu układu chłodzenia elektrycznego bolidu SW-03e. Pojazd ten cechuje znacznie wyższa wydajność cieplna, około 90 – 95% [2], niż w przypadku pojazdu o napędzie spalinowym, zazwyczaj 20 – 38% [3], jednak ze względu na dużą rozwijaną moc oraz zmienny charakter obciążenia układu napędowego występującego podczas jazdy konkursowej nie można odrzucić zastosowania układu chłodzenia. Układ ma za zadanie schłodzenie płynu chłodniczego odbierającego wytworzone ciepło z układu napędowego składającego się z dwóch falowników BAMOCAR PG-D3-700-100 i dwóch silników elektrycznych Emrax 188.

3. Założenia projektowe

Projekt rozpoczęto od określenia założeń, które zostały dostosowane do regulaminu Formula Student Germany [4]. Po pierwsze medium roboczym pośredniczącym w transporcie energii cieplnej z układu napędowego musi być woda destylowana. Po drugie, należało zastosować typowy dla samochodów osobowych wymiennik woda-powietrze z rdzeniem typu **plate and fin** ze względu na ich dobrą dostępność i dobre własności w porównaniu do masy własnej. Wymiennik został zaprojektowany jako element aluminiowy spawany ponieważ będzie on produkowany jednostkowo. Warto, aby wymiennik ciepła był umieszczony w miejscu, w którym będzie miał dostęp do jak najlepszego przepływu powietrza. Jednocześnie trzeba mieć na uwadze maksymalne obniżenie środka ciężkości bolidu i zcentralizowanie w płaszczyźnie równoległej do jazdy.

4. Projekt układu chłodzenia

W oparciu o konsultacje z członkami SKN PolSI Racing ustalono pozycje kluczowych elementów projektowanego układu, co przedstawione zostało na rysunku 2. Wspólnie postanowiono zastosować dwa małe wymienniki ciepła symetrycznie po bokach bolidu. Tak uzyskano najkorzystniejszą pozycję ze względu na środek ciężkości bolidu przy jednoczesnym dostępie do strumienia powietrza. Zdecydowano, że do obsługi układu posłuży jedna elektryczna pompa wody - Pierburg CWA150.



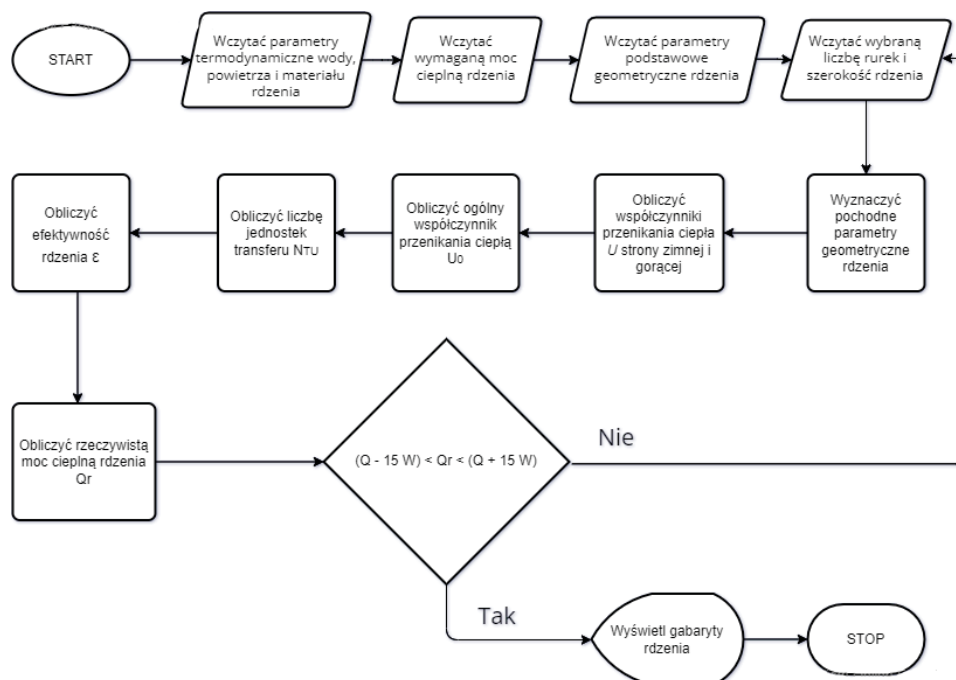
Rys. 2. Rozmieszczenie kluczowych elementów układu chłodzenia bolidu SW-03e.

C – chłodnica, P – pompa chłodziwa, F – Falownik, S – Silnik

Fig. 2. Placement of key parts of the SW-03e cooling system. C – heat exchanger, P – water pump, F – Inverter, S – Engine

Kolejnym etapem projektu było dobranie gabarytów wymienników ciepła. Proces obliczeń jest procesem iteracyjnym, co sprawia, że idealnie sprawdzają się tu metody komputerowe. W tym celu utworzono arkusz obliczeniowy w programie MS Excel, za pomocą którego możliwe jest dobranie gabarytów wymiennika na podstawie danych wejściowych takich jak temperatury wejściowe mediów, wymagana moc cieplna przenoszona przez wymiennik, parametry termodynamiczne mediów czy ograniczenia konstrukcyjne rdzenia. W obliczeniach wykorzystano zmodyfikowany na potrzeby projektu algorytm ϵ -NTU: Effectiveness – Number of Transfer Units zaproponowany przez W.M. Kays i A.L. London [5]. W celu uproszczenia obliczeń założono, że układ składa się z jednego silnika, falownika oraz jednego wymiennika. Optymalne gabaryty uzyskano z pomocą narzędzia Solver wbudowanego do programu MS Excel.

Przyjęto, że temperatura wody na wejściu do wymiennika wynosi $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, czyli $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ poniżej temperatury krytycznej zadanej przez producenta silnika [2]. Temperaturę wejściową powietrza ustalono na $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – to przybliżona temperatura oczekiwana w letni dzień. Jako cel dla Solver'a wyznaczono znalezienie wymiennika, który przeniesie moc cieplną o wartości zbliżonej do 1170 W . Wartość ta podyktowana jest stratami cieplnymi układu, gdy średnia prędkość bolidu wynosi ok. 86 km/h , co ustalono na podstawie danych zebranych podczas testów bolidu SW-02. Ograniczenia konstrukcyjne wymiennika, takie jak rozmiary kanałków oraz lamelek dobrano na podstawie rdzenia dostępnego u potencjalnego producenta. Schemat blokowy algorytmu obliczeń przedstawiono na rysunku 3.

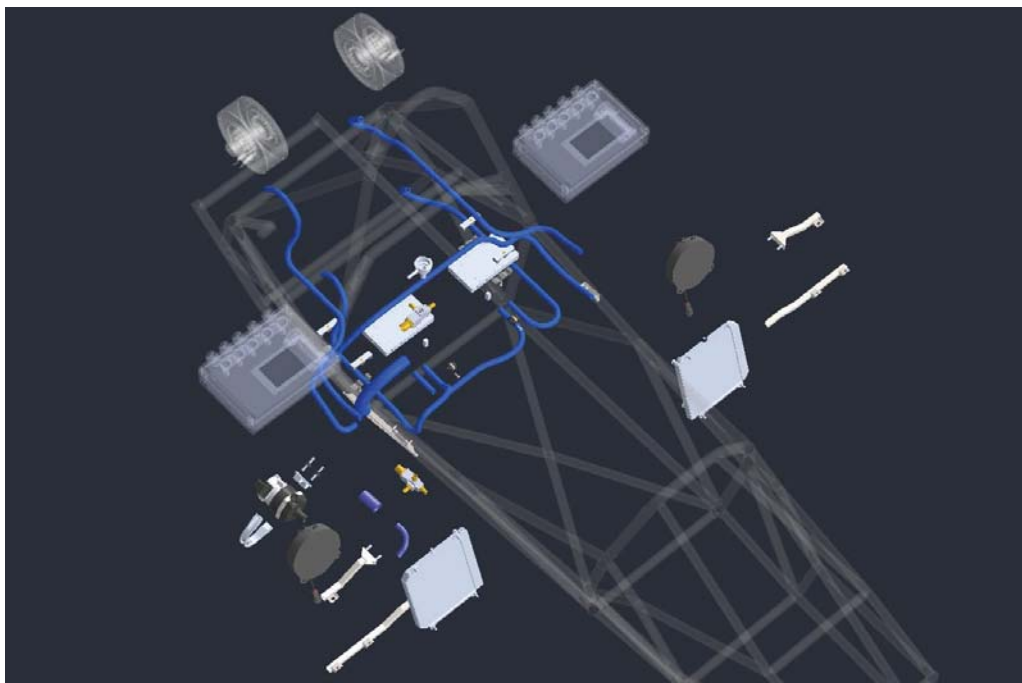


Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu obliczeń gabarytów wymiennika

Fig. 3. Flowchart of heat exchanger size calculation algorithm

W efekcie otrzymano wymiennik ciepła o gabarytach: szerokość – 150 mm , wysokość – 200 mm , głębokość – 16 mm . Z pomocą otrzymanych wyników zaprojektowano wymiennik, który zostanie zamontowany w bolidzie SW-03e w ilości 2 szt. Element ten zaprojektowano w środowisku Dassault Systems Solidworks 2020.

Ostatnim zadaniem było rozmieszczenie wszystkich kluczowych elementów w ramie nośnej bolidu oraz odpowiednie połączenie ich przewodami wodnymi. Efektem prac jest widoczny na rysunku 4 model CAD reprezentujący układ chłodzenia bolidu SW-03e.



Rys. 4. Rozstrzelony widok złożenia układu chłodzenia bolidu SW-03e
 Fig. 4. Exploded view of the SW-03e cooling system

5. Podsumowanie

Dzięki wykorzystaniu narzędzi dostępnych w oprogramowaniu Microsoft Excel możliwe było szybkie i skuteczne ustalenie optymalnych gabarytów wymienników ciepła. Zastosowane środowisko CAD pozwoliło na dokładne zamodelowanie projektowanego układu chłodzenia i sprawne utworzenie dokumentacji rysunkowej. To z kolei umożliwiło przekazanie informacji dotyczących konstrukcji odpowiedniemu zakładowi zajmującemu się produkcją wymienników ciepła i ostateczne wyprodukowanie zaprojektowanych części. Zaproponowany układ chłodzenia zostanie przetestowany w bolidzie SW-03e w nadchodzącym sezonie 2022.

Literatura

1. Strona SKN PolSI Racing: <https://racing.polisl.pl/wp-content/uploads/2019/07/nnnnn.png>, dostęp 03.04.2022;
2. Instrukcja silników elektrycznych firmy Emrax: https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf, dostęp 03.04.2022;
3. https://www.greencarreports.com/news/1091436_toyota-gasoline-engine-achieves-thermal-efficiency-of-38-percent, dostęp: 03.04.22
4. Regulamin Formula Student Germany na rok 2022: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf, dostęp: 03.04.22;
5. W. M. Kays, A. L. London: Compact Heat Exchangers Third Edition, Krieger Publishing Company, Malabar Florida 1984;

AUTONOMICZNY ROBOT MOBILNY DLA POTRZEB DOSTARCZANIA PRODUKTÓW DO STREF OBJĘTYCH KWARANTANNĄ

mgr inż. ŁUKASZ FRĄCZEK,

Automatyka i Robotyka, AB5, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Sebastian Rzydzik

Streszczenie. Celem zaprezentowanej pracy było utworzenie projektu robota mobilnego dostarczającego produkty pierwszej potrzeby do stref objętych kwarantanną. Prace projektowe obejmowały utworzenie modelu robota na podstawie istniejącej platformy jezdnej, utworzenie symulacji, napisanie oprogramowania sterującego oraz testy weryfikacyjne działania utworzonego systemu.



AUTONOMOUS MOBILE ROBOT FOR THE DELIVERY OF PRODUCTS IN THE QUARANTINE ZONES

Abstract. The aim of the presented work was to create a mobile robot that delivers basic necessities to quarantined zones. Design work included creating a robot model based on the existing mobile platform, creating a simulation, writing control software, and verifying the operation of the created system.

1. Wprowadzenie

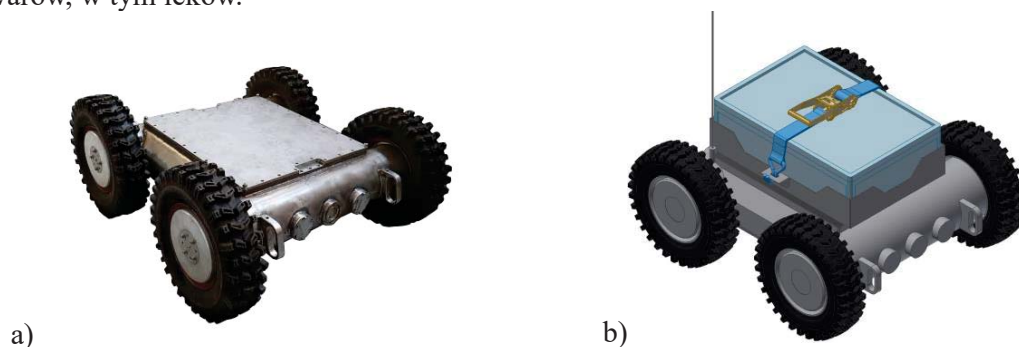
Jednym z wielu problemów, z którymi należy się zmierzyć podczas pandemii jest konieczność odbycia kwarantanny przez ludzi zainfekowanych koronawirusem lub innymi wysoce zakaźnymi chorobami. Żeby kwarantanna była odpowiednio skuteczna, należy minimalizować kontakty międzyludzkie. Idealnym rozwiązaniem jest natychmiastowa, całkowita izolacja. W rzeczywistych warunkach takie rozwiązanie jest trudne do zrealizowania, głównie przez konieczność dostarczania artykułów pierwszej potrzeby dla ludzi objętych kwarantanną. Do rozwiązywania przedstawionego problemu pomocna może okazać się nowoczesna robotyka, a dokładniej, zastosowanie bezzałogowych, zdalnie sterowanych pojazdów mobilnych wyposażonych w co najmniej półautonomiczne systemy sterowania.

2. Modele robota i jego otoczenia

Żeby przygotować model robota, a w późniejszym etapie go zweryfikować, konieczne jest określenie założeń dotyczących jego funkcjonowania. Do najważniejszych przyjętych założeń można zaliczyć: konieczność pracy robota w środowisku zewnętrznym, zastosowanie sensorów umożliwiających lokalizację i ustalenie położenia przestrzennego oraz możliwość ustalenia trasy w celu samodzielnej podróży robota między wyznaczonymi punktami w terenie.

Projekt robota został wykonany na podstawie istniejącej platformy jezdnej MSR2, którą przedstawiono na Rys. 1a. Dzięki obudowie ze stali nierdzewnej oraz napędowi złożonemu z czterech niezależnie napędzanych kół jezdnych platforma cechuje się doskonałą odpornością na niesprzyjające warunki środowiskowe, które robot napotka podczas jego użytkowania.

Finalnie utworzony został model CAD platformy jezdnej (Rys. 1b), w którym wprowadzono modyfikację polegającą na dodaniu specjalnego pojemnika modułowego do przewozu towarów, w tym leków.



Rys. 1. a) Platforma jezdna MSR2, b) Model CAD platformy jezdnej
Fig. 1. a) Mobile platform MSR2, b) Mobile platform CAD model

Przeprowadzenie poprawnej symulacji robota wymaga odpowiedniego środowiska symulacyjnego. W celu wyboru odpowiedniego środowiska symulacyjnego, należało porównać ze sobą najpopularniejsze symulatory. Na podstawie dostępnych źródeł [1, 2] uznano, że optymalnym symulatorem do przeprowadzenia testów będzie oprogramowanie Webots. Główną zaletą wybranego oprogramowania była możliwość wygenerowania terenu na podstawie wycinku mapy zaimportowanej z serwisu OpenStreetMap (Rys. 2), co umożliwiło przeprowadzenie symulacji testów terenowych związanych z układem sterowania i autonomicznej pracy robota. Na wybór wpłynęła również wysoka wydajność oraz kompatybilność symulatora z systemem Windows, w którym tworzone oprogramowanie.

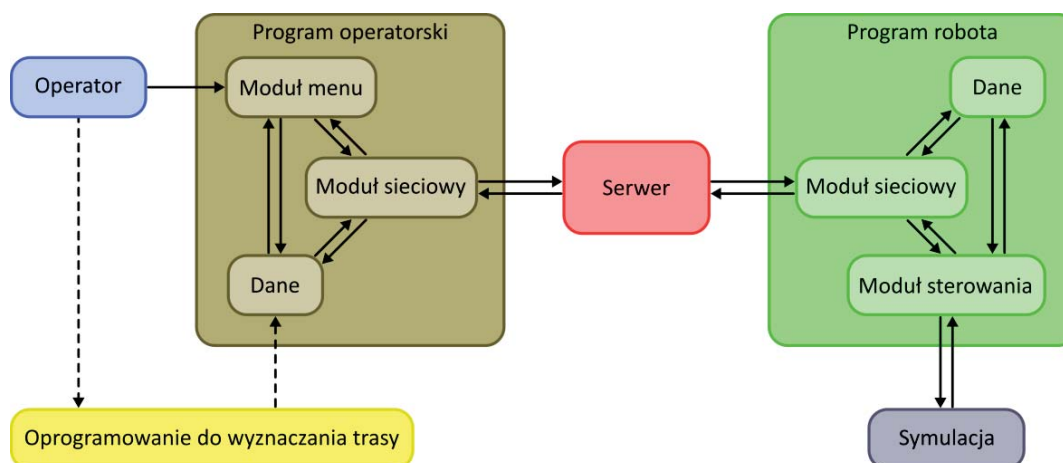


Rys. 2. a) Wycinek mapy z serwisu OpenStreetMap, b) Wygenerowane środowisko
Fig. 2. a) A section of the map from OpenStreetMap website, b) Generated terrain

3. Oprogramowanie sterujące

Oprogramowanie sterujące, które jest krytycznym elementem tworzonej platformy mobilnej, umożliwia sterowanie napędami, pozyskiwanie danych z otoczenia oraz wykonywanie innych funkcji dla potrzeb realizowania misji.

Przed przystąpieniem do utworzenia oprogramowania, ustalono, że oprogramowanie sterujące zostanie podzielone na osobne programy dla operatora, robota oraz server będący pośrednikiem pomiędzy operatorem oraz robotem. Schemat obrazujący działanie utworzonego oprogramowania przedstawiono na Rys. 3. Do wyznaczania kolejnych punktów, pomiędzy którymi będzie poruszał się robot, zostało zastosowane ogólnodostępne oprogramowanie RouteConverter, posiadające interfejs graficzny.



Rys. 3. Diagram działania utworzonego oprogramowania
Fig. 3. Functional diagram of the developed software

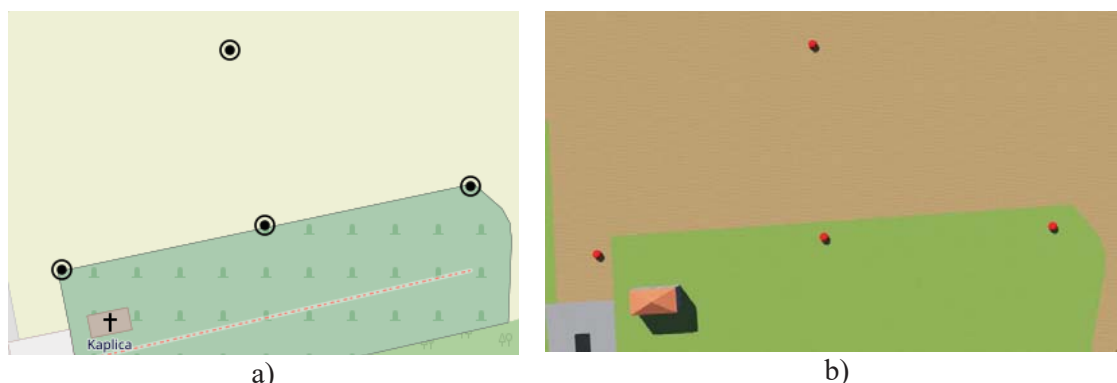
Utworzone oprogramowanie umożliwia samodzielną pracę robota, nawet w przypadku utraty połączenia z nim. Architektura serwerowa (utworzona na podstawie framework'a sieciowego Dawida Barr'a) pozwala również na równoległą pracę wielu robotów w tym samym czasie. Przedstawione cechy pozwalają na skalowanie utworzonego systemu, gdzie możliwe jest nadzorowanie całej floty robotów przez jednego operatora.

Robot może być sterowany w trybie ręcznym oraz automatycznym, który posiada kilka wariantów pracy. W ręcznym trybie sterowania operator po nawiązaniu połączenia z robotem może bezpośrednio nim sterować. Tryb automatyczny wymaga dodatkowo wyboru jednego z wariantów pracy autonomicznej: postój z obserwacją otoczenia, jazda do celu, jazda tam i z powrotem oraz jazda w pętli. W każdym z wymienionych przypadków robot porusza się wzdłuż przesłanej wcześniej listy punktów zgodnie z wybranym trybem pracy.

4. Weryfikacja działania systemu

W celu sprawdzenia poprawności funkcjonowania utworzonego oprogramowania oraz symulacji konieczne było sformułowanie scenariuszy testowych oraz przeprowadzenie testów. Ze względu na znaczny poziom rozbudowania oprogramowania konieczna była szczegółowa weryfikacja utworzonych komponentów, które obejmowały m. in.: wymianę danych pomiędzy operatorem, robotem i serwerem; wczytywanie, zapisywanie i przesyłanie listy koordynatów oraz poprawność działania poszczególnych trybów sterowania.

Podczas przeprowadzania testów jednym z największych wyzwań okazało się utworzenie oprogramowania umożliwiającego przetworzenie listy koordynatów w standardzie WGS84 (systemu do określenia pozycji przestrzennej na kuli ziemskiej) w taki sposób, aby otrzymać użyteczne dane nadające się do sterowania robotem. W celu odpowiedniej reprezentacji punktów terenowych w symulowanym środowisku konieczna okazała się również konwersja koordynatów do układu odwzorowania UTM, z którego korzysta oprogramowanie symulacyjne. Ostatecznie osiągnięty rezultat odwzorowywania punktów wyznaczonych na mapie w środowisku symulacyjnym przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. a) Punkty wyznaczone na mapie, b) Reprezentacja punktów w symulacji
Fig. 4. a) Points marked on the map, b) Representation of points in a simulation

5. Podsumowanie

Opracowany model robota bazuje na istniejącej platformie jezdnej MRS2. Jest to dobry wybór gwarantujący solidną podstawę projektu. Podwozie platformy jest odporne na warunki, w których robot ma docelowo pracować oraz zapewnia sensowną ilość przestrzeni ładunkowej.

Kolejnym etapem projektu było utworzenie symulacji umożliwiającej przetestowanie funkcjonalności robota. Po przeprowadzeniu analizy dostępnych symulatorów zdecydowano się na wybór oprogramowania Webots. Jednym z kluczowych czynników była możliwość wygenerowania sceny symulacyjnej, która wystarczająco dobrze przybliżała rzeczywiste środowisko terenowe.

Bardzo ważną częścią projektu było utworzenie oprogramowania. Zdecydowano się utworzyć kompleksowe rozwiązanie obejmujące serwer, aplikację operatora oraz program sterujący pracą robota. Utworzenie opisywanego oprogramowania było wymagającym zadaniem ze względu na wykorzystanie rozbudowanej infrastruktury sieciowej oraz integrację środowiska symulatora Webots z niezależnie działającym oprogramowaniem robota oraz operatora.

Ostatecznie należy również zaznaczyć, że utworzone rozwiązanie zostało szczegółowo przetestowane, a w trakcie trwania testów nie wykryto żadnych nieścisłości związanych z działaniem symulacji oraz oprogramowania w ramach założeń określonych na początku projektu.

Literatura

1. A. Ayala, F. Cruz, D. Campos, R. Rubio, B. Fernandes, R. Dazeley: A comparison of humanoid robot simulators: A quantitative approach (2020).
2. J. Collins, S. Chand, A. Vanderkop, G. Howard: A review of physics simulators for robotic applications, IEEE Access (2021)

ZASTOSOWANIE METODY PROGRAMOWYCH PUNKTÓW TESTOWYCH Z MOŻLIWOŚCIĄ WSTRZYKIWANIA INFORMACJI DO PEŁNEJ DIAGNOSTYKI ELEKTRONICZNYCH MODUŁÓW STERUJĄCYCH W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH

mgr inż. MARCIN GAJDZIK,

Inżynieria Mechaniczna, semestr VI, 3 stopień

DIP Draexlmaier Engineering Polska Sp. z o. o.

Katedra PKM, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Anna Timofiejczuk, Prof. PŚ

Opiekun ze strony przedsiębiorcy: Dr inż. Wojciech Sebzda

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy możliwości wykonania pełnej diagnostyki elektronicznego modułu sterującego (ECU – Electronic Control Unit) pojazdu samochodowego podczas jego pracy. Dodatkowo założono, że aby uzyskać zdefiniowane warunki testowe konieczne będzie wstrzykiwanie informacji oraz ich podmiana w przechwytywanych ramach CAN. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano mechanizm zatraskiwania kluczowych informacji z punktu widzenia diagnostyki, odczytu wartości zmiennych oraz możliwości ich podglądu, przy jednoczesnym zachowaniu oryginalnych cykli czasowych oraz niezwiększaniu stopnia zajętości magistrali danych.



APPLICATION OF THE SOFTWARE TEST POINT METHOD WITH INJECTABLE INFORMATION FOR FULL DIAGNOSTICS OF AUTOMOTIVE ELECTRONIC CONTROL MODULES

Abstract. The aim of this study was to analyse the possibility of performing a full diagnostics of a , thelectronic control module (ECU) during its operation. In addition, it was assumed that to obtain the defined test conditions, it would be necessary to inject information and replace it in the captured CAN frames. In the conducted tests, the mechanism of snapping the key information from the point of view of diagnostics, reading the values of variables and the possibility to view them while maintaining the original time cycles and not increasing the occupancy of the data bus was used.

1. Wprowadzenie

Produkowanie obecnie pojazdy samochodowe to skomplikowane układy mechatroniczne, składające się standardowo z dziesiątek, a w przypadku lepiej wyposażonych wersji, nawet ponad stu modułów wzajemnie ze sobą współpracujących, takich jak np. moduł kontroli poduszki powietrznej, asystent zmiany pasa ruchu czy też ABS. Wymieniają one za pomocą magistral niezbędne informacje z punktu widzenia procesu sterowania pojazdem, zachowując bardzo rygorystyczne wymogi czasowe. Każdy moduł znajdujący się w pojeździe ma zdefiniowany tzw. poziom bezpieczeństwa, określający, w jakim stopniu jego działanie może wpłynąć na prawidłową pracę całego pojazdu. Definiuje je norma ISO26262 [1], zgodnie z którą środki bezpieczeństwa, realizowane są w różnych technologiach i na różnych etapach

procesu rozwoju. Wyróżnia się następujące poziomy ASIL: A, B, C oraz D. ASIL D reprezentuje najwyższy stopień zagrożenia, natomiast ASIL A najniższy. Dodatkowo istnieje poziom zwany QM (Quality Management), który oznacza, że w danym module nie występują zagrożenia związane z bezpieczeństwem funkcjonalnym. Na etapie tworzenia produktu moduły poddawane są odpowiednim testom, wynikającym z przypisanego poziomu ASIL.

Moduły występujące w pojazdach samochodowych poddaje się różnym procedurom sprawdzającym ich działanie. Należą do nich testowanie oraz diagnostyka. Testowanie polega na sprawdzaniu poprawności działania modułu, przede wszystkim podczas jego uruchamiania. Celem zastosowania diagnostyki jest określenie stanu działania modułu podczas jego eksploatacji. Procedury diagnostyczne stosuje się w przypadku produktów, które przeszły proces walidacji i weryfikacji oraz zostały dopuszczone do użytku. W przypadku diagnostyki, należy wziąć pod uwagę to, że anomalie będące przedmiotem diagnozy pojawiają się tylko losowo i głównie podczas regularnego użytkowania pojazdu. W wielu przypadkach, znacznym ułatwieniem, podczas prowadzenia diagnostyki jest zastosowanie dodatkowych urządzeń umożliwiających podgląd aktualnego stanu pojazdu. Urządzenia takie może również pozwalać na podmianę wartości sygnałów na te, określone w trakcie diagnostyki.

W procesie testowania wyróżnia się technikę testową zwaną *Processor in the loop* (PIL)[2]. Jej ważną cechą jest to, że pozwala na debugowanie zarówno sterownika, jak i części testowanego systemu. Badania przedstawione w artykule oparte są na modelu stanowiącym w pewnym sensie alternatywę do techniki testowej PIL z tą różnicą, że sygnały wejściowe nie są symulowane, tylko przetwarzane są ich rzeczywiste bieżące wartości z uwzględnieniem możliwości ich podmiany.

Problemem w tym przypadku może być zachowanie warunków działania układu diagnozowanego. W prezentowanych badaniach, zaproponowano mechanizm minimalizujący ryzyko zmiany rzeczywistych warunków działania układu podczas testów diagnostycznych. Rozwiązanie to polega na wykorzystaniu pamięci współdzielonej do komunikacji z modułem diagnostycznym. Dzięki temu, nie zwiększa się obciążenie magistrali dodatkowymi informacjami diagnostycznymi, jak również w minimalnym stopniu wpływa to na cykliczność wykonywania programu, czyli odczyt i zapis danych w pamięci jest bardzo szybkim procesem.

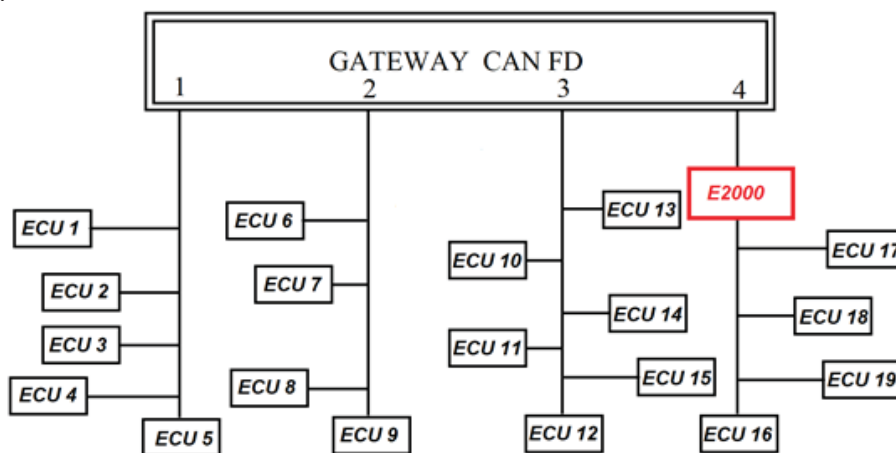
2. Stanowisko testowe stosowane w badaniach

Badaniom diagnostycznym został poddany rzeczywisty pojazd elektryczny, dlatego też konieczne było spełnienie bardzo rygorystycznych wymogów czasowych przetwarzania podmienianej informacji oraz odczytu stanu parametrów, aby uniknąć wprowadzenia badanego obiektu w stan błędu. Po pierwsze, wymagana jest wysoka wydajność dedykowanego sprzętu. Podczas badań oszacowano, że podczas manipulacji wartościami przesyłanych sygnałów, czas pomiędzy ostatnim bajtem odebranej ramki oryginalnej, a ostatnim bajtem ramki zmodyfikowanej, powinien być mniejszy niż jedna milisekunda. Wynika to z architektury nowoczesnych ECU (Electronic Control Unit), których systemy operacyjne w zakresie harmonogramów, działają z rozdzielczością 1 milisekundy.

Wysoka wydajność jest wymagana w związku z koniecznością modyfikacji sygnałów zawartych w ramce CAN oraz przeliczania sumy kontrolnej niezbędnej w mechanizmie End To End Protection (E2E). Podczas testów diagnostycznych wykorzystano urządzenie MicroDAQ E2000, które spełnia wymienione wyżej wymagania. Jest ono wyposażone w dwukanałową komunikację CAN FD z obsługą wielordzeniowego potoku przetwarzania. Ponadto oferuje interfejs Wi-Fi i Ethernet, który został wykorzystany do przesyłania dwukierunkowej transmisji sygnałów diagnostycznych. Dzięki takiemu rozwiązaniu w żaden sposób nie została zakłócona ani zmieniona oryginalna komunikacja pomiędzy modułami na magistrali CAN. Dodatkowo proces odczytu wartości „zatrzaśniętych parametrów” również

wykorzystywał bezpośredni dostęp do współdzielonej pamięci, czyli najszybsze z możliwych rozwiązań.

Urządzenie MicroDAQ E2000 zostało podłączone szeregowo do magistrali nr 4, odpowiedzialnej za system hamowania oraz sterowania maglownicą w sposób pokazany na Rys. 1.



Rys.1. Schemat badanego układu
Fig. 1. Diagram of the system under test

3. Implementacja mechanizmu odczytu i wstrzykiwania wartości diagnostycznych

Przedmiotem eksperymentu było zbadanie możliwości odczytu dowolnej informacji zawartej w ramach CAN o określonych identyfikatorach oraz podmiana wartości żądanego sygnału w momencie, kiedy wymagała tego procedura diagnostyczna. Z uwagi na to, że w bieżącej ramce przesyłana jest jedynie informacja o aktualnym stanie sygnału, w niektórych przypadkach konieczne było zatrzymywanie wartości sygnałów w pamięci modułu, aby wykorzystać je w żądanym momencie. Funkcjonalność ta możliwa była dzięki zastosowaniu tzw. programowych punktów testowych. Dodatkowo zbadana została doświadczalnie maksymalna liczba ramek, które mogą być podmieniane w czasie rzeczywistym, aby wstrzykiwanie sygnałów nie zostało zauważone przez system pojazdu. Sprawdzono ile ramek o różnych identyfikatorach może zostać wysterowanych, aby nadal utrzymać zależności czasowe na badanej magistrali CAN bez wprowadzania pojazdu w stan błędu.

4. Wyniki badań

Przeprowadzone zostały 2 etapy badań, w których sesja diagnostyczna trwała 2 minuty, każda sesja została powtórzona 5 razy. Ramki poddane badaniu były ramkami CANFD o długości 48 lub 64 bajtów oraz wykorzystywały mechanizm End To End Protection.

Etap pierwszy obejmował bieżący odczyt parametrów w ramce zawierającej informację o aktualnym ciśnieniu w układzie hamulcowym. Dane diagnostyczne odebrane z urządzenia były bezpośrednio przetwarzane i rzutowane na wykres, dzięki czemu istniała możliwość obserwacji i analizy sygnałów praktycznie w czasie rzeczywistym. Jako kanał transmisyjny pomiędzy modulem badawczym, a komputerem zastosowano interfejs Ethernet, dzięki czemu możliwa była obserwacja oryginalnych zależności czasowych, na które nie miał wpływu dodatkowy zbiór informacji diagnostycznych. Przeprowadzono testy dla 1, 2, 5, 10, 15, 20 oraz 50 ramek.

W etapie drugim zadawane były wartości przepływu dla pompy hamulcowej (podmiana wartości sterujących sygnałem wraz z przeliczeniem sumy kontrolnej dla całej ramki) i jednocześnie odczytywane parametry o aktualnym ciśnieniu w układzie hamulcowym. Dodatkowo podmieniane zostały ramki o kolejnych identyfikatorach, zawierające przechwycone wcześniej wartości sygnałów. Przeprowadzono testy dla 1, 2, 5, 10, 15, 20 oraz 50 ramek.

W drugim etapie przeprowadzonego eksperymentu otrzymano następujące rezultaty:

Tabela 1. Wyniki skuteczności wstrzykiwania sygnałów

Table 1. Signal injection efficiency results

Liczba podmienianych ramek	Rezultat pozytywny (pojazd nie wykrył błędu)
1	100 %
2	100 %
5	100 %
10	100 %
15	100 %
20	100 %
50	80 %

Z wyników przedstawionych w Tabeli 1 wynika, że urządzenie diagnostyczne potrafi skutecznie i niezawodnie wstrzykiwać informacje. Dopiero przy liczbie 50 ramek, których wartości były podmieniane doszło do sytuacji, w której pojazd wykrył błąd. W etapie pierwszym urządzenie działało prawidłowo nawet przy podmianie sygnałów z 50 ramek.

5. Podsumowanie

Implementacja mechanizmów odczytu wartości w czasie rzeczywistym oraz możliwość wstrzykiwania wartości sygnałów diagnostycznych pozwoliła na odtworzenia dowolnego scenariusza testowego. W rozwiązaniu tym największe znaczenia miał fakt, że sygnały wejściowe nie były symulowane tak jak ma to miejsce podczas procesu testowania, lecz diagnostyce poddane zostały aktualne rzeczywiste wartości. Wykorzystanie urządzenia MicroDAQ E2000 pozwoliło na bezproblemowe przesyłanie do docelowej aplikacji diagnostycznej wszystkich ramek w czasie rzeczywistym. Zastosowanie programowych punktów testowych, które pozwoliły na zatrzymywanie wartości dało możliwość odczytu zbuforowanych wartości sygnałów.

Literatura

1. Road vehicles, Functional Safety, ISO 26262:2018
2. A. Gnacy-Gajdzik i P. Przyszałka, „Ewolucja testowania systemów wbudowanych w motoryzację wraz z wprowadzeniem normy ISO 21448:2019 Pojazdy drogowe - Bezpieczeństwo zamierzonej funkcjonalności”, Utrzymanie Ruchu, nr 2, ss. 7–16, 2021.
3. BOSCH, CAN With Flexible Data-Rate Specification (2012)
<https://scholar.google.com/scholar?q=BOSCH%2C%20CAN%20With%20Flexible%20Data-Rate%20Specification%20%282012%29> Dostęp: 11 kwietnia 2022.

ZASTOSOWANIE MODELU POJAZDU ELEKTRYCZNEGO DO TESTÓW UKŁADÓW WBUDOWANYCH

mgr inż. ANNA GNACY-GAJDZIK,

Inżynieria Mechaniczna, semestr IV, 3 stopień

DIP Draexlmaier Engineering Polska Sp. z o. o.

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Piotr Przysałka, Prof. PŚ

Opiekun ze strony przedsiębiorcy: Dr inż. Wojciech Sebzda

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było zaimplementowanie symulacyjnego modelu pojazdu elektrycznego na stanowisku przeznaczonym do testowania układów wbudowanych w środowisku Hardware – In – the Loop. Zaproponowane stanowisko badawcze zostanie wykorzystane w dalszych pracach nad metodyką tworzenia automatycznych przypadków testowych umożliwiającą weryfikację poprawności wyników z zastosowaniem algorytmów rozszerzonej inteligencji.



IMPLEMENTATION OF THE ELECTRIC VEHICLE MODEL FOR TESTING EMBEDDED SYSTEMS

Abstract. The aim of this study was to implement a simulation model of an electric vehicle on a test bench designed for testing embedded systems in the Hardware - In - the Loop environment. The presented test bench will be used in further work on the methodology of developing automatic test cases allowing verification of the reliability of results with the use of augmented intelligence algorithms.

1. Wprowadzenie

Ciągle rozbudowywanie pojazdów o nowe funkcjonalności ma ogromny wpływ na rosnącą złożoność oprogramowania wbudowanego odpowiedzialnego za ich realizację [1]. Systemy wbudowane w pojeździe są połączone ze sobą magistralą danych, tworząc złożone sieci zaawansowanych rozwiązań mechatronicznych. Systemy wbudowane powinny nie tylko spełniać wymagania funkcjonalne i wydajnościowe, niezawodnie współdziałać z innymi komponentami pracującymi w czasie rzeczywistym, ale także spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące bezpieczeństwa funkcjonalnego i niezawodności [2]. Od inżynierów systemów wbudowanych wymaga się, aby pracowali zgodnie z procesami zdefiniowanymi przez najnowsze normy AUTOSAR i ISO26262, jak również bardziej tradycyjne, takie jak AEC, OBD-II i MISRA [5]. Pomaga to tworzyć wysokiej jakości, odporny na błędy, spójny kod. Ważnym elementem tworzenia oprogramowania wbudowanego jest testowanie, które zdefiniowane jest na wszystkich poziomach prawej strony V-modelu procesu inżynierii systemów [6]. Testy SWE.6 zdefiniowane przez normę ISO 26262 służą weryfikacji wymogów bezpieczeństwa oprogramowania. Istotą tej fazy testów jest wykazanie, że oprogramowanie wbudowane stosowane w pojazdach samochodowych spełnia wymagania bezpieczeństwa

Inspiracją do tej pracy był defekt oprogramowania wbudowanego zidentyfikowany dopiero w testach prowadzonych w środowisku Vehicle In the Loop. Objawiał się on oscylacjami sygnałów informujących o maksymalnej mocy ładowania i rozładowywania pojawiającymi się podczas manewrowania pedałem gazu. Odkryty defekt został zakwalifikowany jako groźący poważną awarią oznaczającą niedostępność systemu oraz nagłe zatrzymanie samochodu, czyli zachowania, które mogą wpływać na bezpieczeństwo ludzi. Wykrycie tego typu defektu na niższym poziomie testów oznaczałoby niższy koszt jego naprawy, więc wprowadzenie zmian w środowisku Hardware In the Loop na pewno wpłynie na optymalizację całego procesu.

Do badań wykorzystano sparametryzowany model symulacyjny udostępniony na zasadach open-source [7]. Model umożliwia symulację układu napędowego, układu akumulatora, układu sił działających na pojazd w czasie jazdy, ich wpływu na wielkości wyjściowe akumulatora wysokonapięciowego (m.in. prąd, napięcie, temperatura baterii) oraz układu rekuperacji.

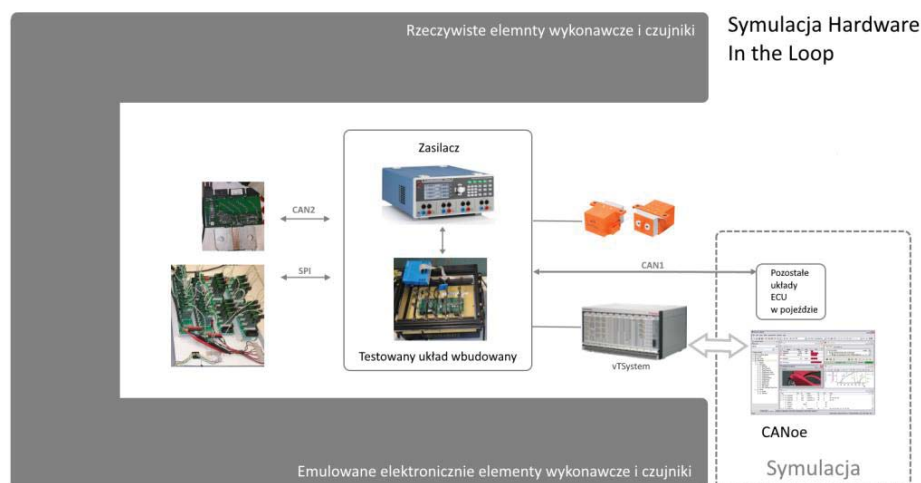


26

zastosowano sygnał zarejestrowany na magistrali CAN rzeczywistego pojazdu elektrycznego (prędkość odniesienia) podczas 10 minutowej jazdy po mieście. Dodano elementy konieczne do integracji modelu z oprogramowaniem symulacyjnym CANoe firmy Vektor Informatik.

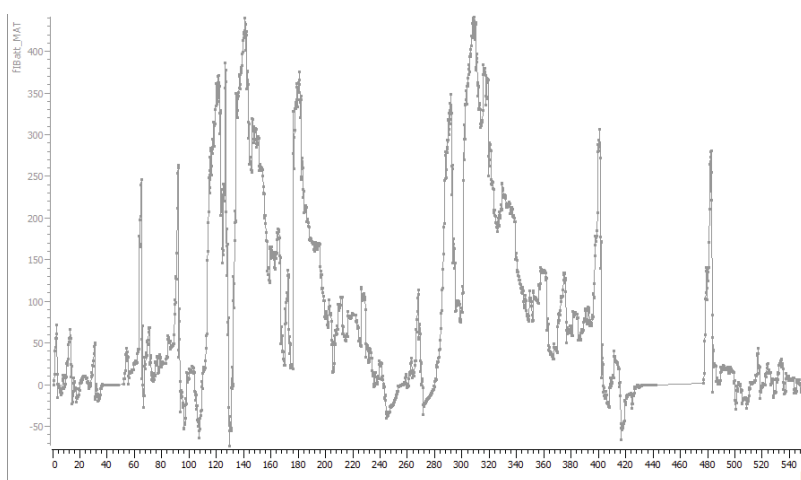
3. Zaproponowane stanowisko testowe

Na Rys. 2 przedstawiono stanowisko testowe oparte na koncepcji Hardware In the Loop.



Rys. 2. Stanowisko testowe – symulacja Hardware In the Loop
Fig. 2. Test Bench - Hardware In the Loop Simulation

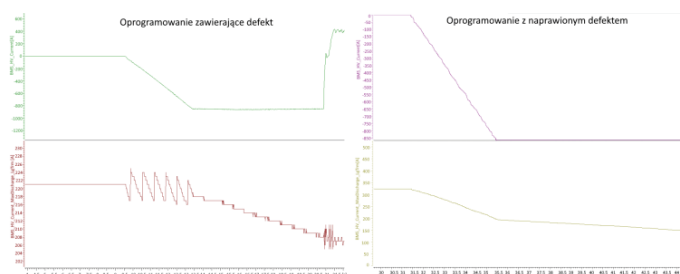
Omawiany wcześniej model pojazdu został zintegrowany z oprogramowaniem CANoe firmy Vektor Informatik. Zaprojektowano panel sterujący, umożliwiający w prosty sposób przełączenie symulacji z wersji uproszczonej do wersji zawierającej model oraz obserwację aktualnych wartości sygnałów. Na Rys. 3 pokazano jeden z sygnałów uzyskanych z modelu – natężenie prądu baterii wysokonapięciowej.



Rys. 3. Natężenie prądu baterii wysokonapięciowej pochodzące z modelu pojazdu
Fig. 3. High-voltage battery current from the vehicle model

4. Weryfikacja poprawności działania stanowiska na podstawie defektu zgłoszonego przez klienta

Aby zweryfikować poprawność zaproponowanego modelu oraz jego przydatność na stanowisku testowym czterokrotnie wykonano przypadek testowy zaprojektowany do weryfikacji zmian w oprogramowaniu po naprawieniu defektu. Testy przeprowadzono na oprogramowaniu zawierającym defekt – z modelem (Rys.4) i bez, oraz na oprogramowaniu poprawionym – z modelem (Rys.4) i bez. Testy wykonane z oprogramowaniem zawierającym defekt wykonane w środowisku bez modelu uzyskały wynik pozytywny, natomiast z modelem wynik negatywny. Zastosowanie modelu pojazdu przyczyniło się więc do wykrycia niedopuszczalnych oscylacji, co oznacza, że wynik pozytywny uzyskany po naprawieniu błędu jest wiarygodny.



Rys. 4 Porównanie wyników testu z zastosowaniem modelu pojazdu

Fig. 4 Comparison of test results with the vehicle model

5. Podsumowanie

Zastosowanie modelu pojazdu poprawia jakość procesu testowania, ale równocześnie go wydłuża i zwiększa koszty. Wynika to z konieczności zaprojektowania, utrzymywania modelu, ale przede wszystkim zwiększenia kosztów projektowania przypadków testowych i ich utrzymywania. Indukowanie błędów systemu pochodzących z sygnałów wyjściowych modelu wyklucza jego użycie – to skrypt testowy modyfikuje je w czasie w ściśle określony sposób. Celowe wydaje się zdefiniowanie zakresu testowanych funkcji systemu wbudowanego, dla których zastosowanie modelu może wpływać na wiarygodność wyników testów. Zostanie to uwzględnione w dalszych badaniach i proponowanej metodyce tworzenia automatycznych przypadków testowych.

Literatura

1. Bień A., Rzeszutko J., Szymański T., Systemy wbudowane do celów pomiarowo-kontrolnych w motoryzacji. Proces projektowania i wstępnej diagnostyki, *Pomiary Automatyka Kontrola*, R. 60 nr 8, s. 655--659 (2014).
2. Gnacy-Gajdzik A., Przyszałka P., Ewolucja testowania systemów wbudowanych w motoryzacji wraz z wprowadzeniem normy ISO 21448:2019 Pojazdy drogowe - Bezpieczeństwo zamierzonej funkcjonalności, *Utrzymanie Ruchu*, nr 2, ss. 7–16 (2021).
3. Harris I., Chapter 22 - Embedded Software for Automotive Applications, Newnes, Pages 767-816 (2013).
4. Road vehicles, Functional Safety, ISO 26262:2018.
5. Ito I., Battery Electric Vehicle Model in Simscape, The MathWorks, Inc. (2021). <https://github.com/mathworks/Simscape-Battery-Electric-Vehicle-Model>. Accessed 20 Feb. 2022.

MINI AUTOMATYCZNA LINIA DO NAPEŁNIANIA BUTELEK

inż. MICHAŁ GÓRNY,

Mechanika i Budowa Maszyn, SMB – Dualne PK, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Adam Cholewa

Streszczenie. Celem pracy było zaprojektowanie w środowisku CAD mini automatycznej linii do napełniania butelek oraz wykonanie jej układu sterowania wraz z oprogramowaniem. Projekt został zrealizowany w środowisku komputerowym Solid Edge. Do wykonania układu sterowania została użyta platforma Arduino Mega.



MINI AUTOMATIC BOTTLE FILING LINE

Abstract. The aim of the work was to design in CAD environment a mini automatic bottle filling line and to design its control system including software. The project was realised in the Solid Edge computer environment. The Arduino Mega platform was used to create the control system.

1. Wprowadzenie

W przemyśle spożywczym do napełniania butelek stosowane są automatyczne linie, których zadaniem jest przyspieszenie procesu ich napełniania, przy zachowaniu wymaganej sterylności. Standardowo stosowane w przemyśle linie do napełniania charakteryzują się głównie dużą wydajnością oraz prostotą działania. Wadami takich rozwiązań są spore gabaryty oraz koszt wytworzenia takiej linii przez co ich stosowanie jest uzasadnione tylko w przypadku produkcji masowej. Opracowany prototyp minilini automatycznej linii jest próbą odejścia od rozwiązań standardowo stosowanych w przemyśle.

Główną cechą linii są bardzo małe gabaryty, co pozwala na zastosowanie maszyny w małych pomieszczeniach, w których dużo łatwiej jest zapewnić czystość oraz sterylność. Linia sprawdzi się dobrze w przypadku produkcji małoseryjnej.

Przed przystąpieniem do procesu projektowania, został wykonany przegląd rozwiązań stosowanych standardowo w przemyśle.

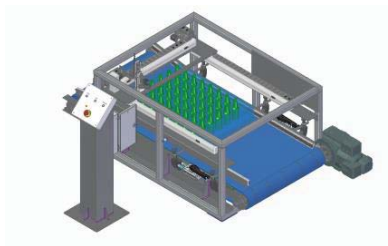
2. Proces projektowania

Głównymi założeniami jakie podjęto w procesie projektowo-konstrukcyjnym były:

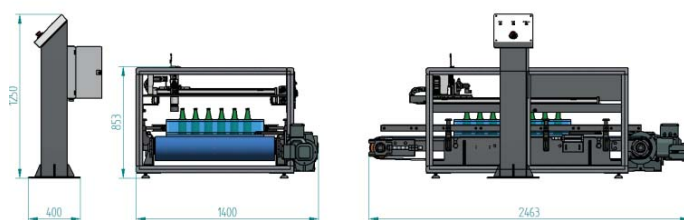
- uzyskanie możliwie jak najmniejszych wymiarów, przy zachowaniu wymaganej funkcjonalności linii do napełniania butelek,
- użycie przenośnika taśmowego napędzanego silnikiem elektrycznym,
- poruszanie się głowicy napełniającej w trzech osiach układu kartezjańskiego,

- napełnianie butelek wodą,
- ułatwienie procesu paletyzacji i składowania gotowych produktów,
- spełnienie przez opracowywane rozwiązanie norm oraz wytycznych wymaganych w przemyśle spożywczym.

Model 3D mini automatycznej linii do napełniania butelek został opracowany w systemie CAX Solid Edge [1]. Linia przedstawiona na rysunku Rys. 1. składa się z głównej ramy wykonanej z profili ze stali nierdzewnej [4],[6], przenośnika taśmowego zamontowanego do ramy, głównego zespołu napełniającego oraz panelu operatorskiego. Wymiary maszyny przedstawione zostały na rysunku Rys. 2.

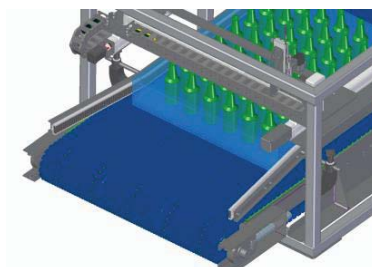


Rys. 1. Widok izometryczny mini automatycznej linii do napełniania butelek
Fig. 1. The isometric view of mini automatic line to filling bottles



Rys. 2. Główne wymiary mini automatycznej linii do napełniania butelek
Fig. 2. Main dimensions of mini automatic line to filling bottles

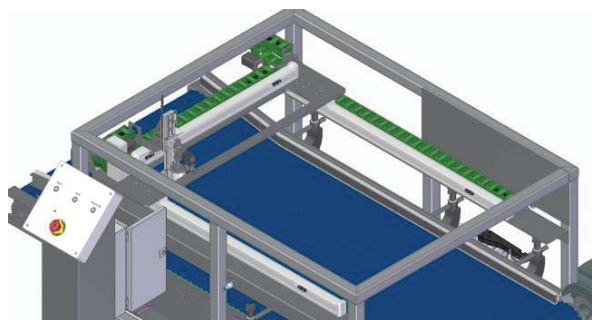
Dla celów prezentacyjnych, do przenośnika został dodany uszczegółowiony model taśmy modularnej. Model taśmy składa się z wielu połączonych ze sobą ogniów, złożenie zostało opracowane wykorzystując wbudowaną w programie operację szyku. Szczegółowy model taśmy przedstawiony jest na rysunku Rys. 3. Korzystając z operacji szyku, można także łatwo symulować ruch takiej taśmy.



Rys. 3. Wysoko szczegółowy model taśmy modularnej
Fig. 3. Highly detailed model of modular belt

Do napędzania taśmociągu został zastosowany motoreduktor. Napęd został dobrany na podstawie przeprowadzonych obliczeń analitycznych [5]. Ze względu na możliwość prostszego sterowania napędem stosując wyłącznie platformę Arduino oraz styczniki został wybrany silnik o zasilaniu jednofazowym 230V. W przypadku silników zasilanych prądem trójfazowym konieczne byłoby zastosowanie przemiennika częstotliwości. Zastosowanie zasilania jednofazowego znacząco upraszcza układ sterowania silnikiem.

Główny moduł napędzający porusza się w trzech osiach. Rozwiązanie to jest powszechnie stosowane w drukarkach 3D. Do realizacji ruchu w osi X oraz osi Y zastosowane zostały moduły liniowe napędzane silnikami krokowymi. Do realizacji ruchu w osi Z, zastosowany został siłownik dwutłokowy z wbudowanym prowadzeniem. Cały zespół napędzający jest przedstawiony na rysunku Rys. 4.



Rys. 4. Główny moduł napędzający butelki.
Fig. 4. Main filling bottle module

W projekcie uwzględnione zostało także prowadzenie przewodów. Do prawidłowego prowadzenia przewodów elektrycznych oraz pneumatycznych zastosowane zostały prowadniki kablowe widoczne jako elementy w kolorze zielonym na rysunku Rys.4. W przypadku ruchomych elementów, do których potrzebne jest zasilanie, bardzo ważne jest aby przewody zasilające nie uległy zniszczeniu. Przewody mogą ulec uszkodzeniu na skutek zbyt dużego promienia gięcia [4][3]. Zastosowane prowadniki zapewniając odpowiedni promień gięcia dla przewodów elektrycznych oraz pneumatycznych.

3. Układ sterowania

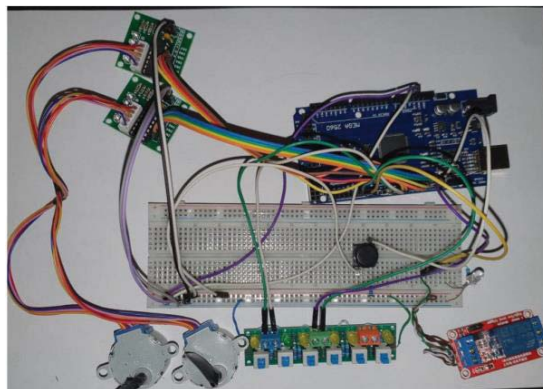
Do sterowania pracą mini automatycznej linii została zastosowana platforma Arduino Mega [2]. Główną zaletą tego mikrokontrolera jak stosunkowo niska cena, szeroko dostępne komponenty współpracujące z tym sterownikiem oraz łatwość programowania. Aby obsłużyć wszystkie czujniki oraz elementy wykonawcze mini automatycznej linii, został wybrany wariant Mega, który posiada większą liczbę wejść oraz wyjść.

Do napędu modułów liniowych osi X oraz Y zostały zastosowane silniki Nema 17 wraz ze sterownikami. Silniki krokowe pozwalają na dokładne pozycjonowanie. Napędy osi posiadają czujniki krańcowe, które wykorzystywane są do bazowania modułu napędzającego przed każdym cyklem. Dodatkowe sprzężenie silnika krokowego z enkoderem, zapewni dokładniejsze pozycjonowanie głowicy.

W przypadku zasilania cewek elektrozaworów pneumatycznych o napięciu zasilania 12V oraz sterowania pracą silnika 230V został użyty moduł z przekaźnikami.

Napięcie pracy mikrokontrolera Arduino wynosi 5V, w przypadku niektórych czujników zastosowanych w linii, których napięcie nominalne wynosi 12V, konieczne jest zastosowanie układów konwertujących napięcie.

W celu opracowania kodu sterującego mini automatyczną linią, został zbudowany uproszczony układ sterowania linią pokazany na rysunku Rys.5. Składa się on z mikrokontrolera Arduino, dwóch silników krokowych w osiach X oraz osi Y, przekaźnika sterującego cewką elektrozaworu siłownika osi Z oraz panelu kontrolnego.



Rys. 5. Uproszczony układ sterowania linią
Fig. 5. Simplified line control system

4. Podsumowanie

Celem projektu było opracowanie mini automatycznej linii do napełniania butelek. Aby konstrukcja spełniła wymagania stawiane przez przemysł spożywczy, wszystkie elementy zostały dobrane w oparciu o normę PN-EN-ISO 22000:2006. Przedstawiony model linii został opracowany w środowisku CAD, w programie Solid Edge 2020.

Napędy zostały dobrane w oparciu o obliczenia oraz karty katalogowe producentów. W celu uzyskania wymaganej dokładności pozycjonowania, wybrane zostały silniki krokowe.

Literatura

1. Solid Edge - strona oprogramowania, <https://solidedge.siemens.com/pl/> (ostatni dostęp 10.04.2022)
2. Arduino Mega 2560 Rev3, <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560> (ostatni dostęp 10.04.2022)
3. Olszewski M., Podstawy mechatroniki. Podręcznik technik mechatronik, WSiP, 2018.
4. Łabanowski W., Użytkowanie maszyn. Minimalne wymagania dotyczące bhp. Lista kontrolna z komentarzem. Materiał pomocniczy dla pracodawców, Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa, 2014.
5. Gładysiewicz L., Przenośniki taśmowe: teoria i obliczenia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
6. Jagiełło T., Operator Maszyn i Urządzeń Przemysłu Spożywczego. Stosowanie materiałów konstrukcyjnych w przemyśle spożywczym, Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2007.

PLATFORMA TESTOWA DO ROZWOJU ALGORYTMÓW AUTONOMICZNEGO STEROWANIA

JAKUB GURGUL,

Informatyka, Wydział Matematyki Stosowanej, semestr IV, I stopień
Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Piotr Przysałka, Prof. PŚ

Streszczenie. Niniejszy artykuł opisuje przystosowanie robota eksploracyjnego Phoenix I do funkcji platformy testowo-rozwojowej algorytmów sztucznej inteligencji, a w szczególności tych umożliwiających autonomiczną lub półautonomiczną pracę robota. Jako przykład takiego algorytmu pokazano utrzymanie obiektu w centrum obrazu rejestrowanego przez kamerę stereoskopową umieszczoną na korpusie robota. W artykule przedstawiono wyniki testów weryfikacyjnych w warunkach laboratoryjnych.



TEST PLATFORM FOR THE DEVELOPMENT OF AUTONOMY ALGORITHMS

Abstract. This article describes the adaptation of the Phoenix I exploration robot to the functions of the test and development platform for artificial intelligence algorithms, in particular those enabling autonomous or semi-autonomous robot operation. As an example of such an algorithm was shown keeping the object in the center of the image recorded by a stereoscopic camera placed on the robot. The article presents the results of verification tests in laboratory conditions.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój sztucznej inteligencji [1], który możemy zaobserwować w ostatnich latach wpłynął bardzo mocno na przemysł robotyczny [2, 3]. Roboty mogą wykorzystać obraz z kamer oraz odczyty z całej gamy czujników do podejmowania samodzielnych decyzji na podstawie zaimplementowanych wzorców zachowań. Aby podążyć w kierunku rozwoju sztucznej inteligencji w ramach Studenckiego Koła Naukowego Zastosowania Metod Sztucznej Inteligencji „AI-METH” zdecydowano się zmodyfikować gąsienicową konstrukcję Phoenix I, tak aby mogła służyć do nauki, rozwoju oraz testów algorytmów sztucznej inteligencji.

2. Założenia projektowe

Przed podjęciem prac, określono wymagania jakie powinna spełniać platforma, aby efektywnie wypełniać swoją rolę rozwojową oraz testową. Zostały one wyznaczone na podstawie analizy poprzednich konstrukcji tworzonych w Kole oraz analizy innych autonomicznych platform takich jak robot Jetbot [4], stworzony przez firmę Nvidia do nauki algorytmów sztucznej inteligencji.

Platforma powinna umożliwiać łatwe skalowanie, zarówno fizyczne jak i funkcjonalne.

Spełnienie tego punktu jest bardzo ważne, ponieważ dzięki niemu można w jednym czasie testować wiele programów oraz urządzeń pozwalających na zbieranie danych z otoczenia. Kolejnym ważnym aspektem jest odpowiednie zaplanowanie części funkcjonalnej tak aby umożliwić łatwą i szybką komunikację z elementami fizycznymi. Z tym celem związany jest odpowiedni dobór komponentów robota, w tym główny komputer pokładowy. Powinien on się cechować dużą mocą obliczeniową przy zachowaniu małych rozmiarów i małej mocy pobieranej z układu elektrycznego.

3. Opis części fizycznej platformy

Główną częścią jest podwozie gąsienicowe, każda z osi jest napędzana osobnym silnikiem prądu stałego, który sterowany jest przez komputer pokładowy z wykorzystaniem układu mocy. Jednostką obliczeniową jest Nvidia Jetson Xavier NX, jest to bardzo wydajny układ, który jest głównie używany do przeprowadzania obliczeń równoległych z użyciem GPU w platformach mobilnych. Obraz jest uzyskiwany z zewnętrznej kamery stereoskopowej ZED 2, połączonej z komputerem pokładowym za pomocą interfejsu USB. Komunikacja do zarządzania platformą w aktualnej wersji jest przeprowadzana z wykorzystaniem protokołu internetowego Ethernet. Podgląd obrazu z kamery jest przeprowadzany z wykorzystaniem platformy Herelink, która jest wykorzystywana w zastosowaniach modelarskich i umożliwia transmisję obrazu oraz sygnałów sterujących na odległość do 12 km.

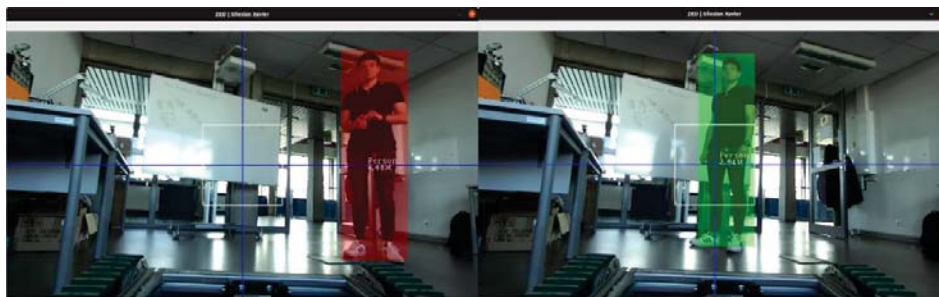
4. Opis części logicznej platformy

Głównym językiem programowania użytym do kontroli jest Python w wersji 3.8. Jest to bardzo popularna platforma używana w zastosowaniach sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego. W tworzeniu oprogramowania zastosowano podejście obiektowe. Utworzona klasa została zaprojektowana w taki sposób, aby być jak najbardziej oddzieloną od systemu ROS (ang. *Robotic Operating System*), który w razie potrzeby może być dodawany do zarządzania systemem. Pozyskanie obrazu z kamery oraz odnajdywanie obiektów są wykonywane z pomocą *ZED SDK*, narzędzia, które jest dostarczane przez producenta kamery. Przeprowadza ona obliczenia z wykorzystaniem sieci neuronowych oraz udostępnia wynik obliczeń z wykorzystaniem biblioteki *pyzed*. Obróbka obrazu prowadzona jest z wykorzystaniem biblioteki *OpenCV* [5] w wersji przystosowanej do pracy z językiem Python. Kontrola silników odbywa się za pośrednictwem układu Arduino oraz *PyFirmata*, czyli interfejsu pozwalającego językowi Python na komunikację z wykorzystaniem protokołu Firmata.

5. Przykładowy algorytm

Aby sprawdzić działanie platformy i spełnienie założeń, postanowiono wdrożyć stosunkowo prosty algorytm podążania za obiektem. Za wykrywanie obiektów odpowiedzialna jest wytrenowana sieć neuronowa działająca na kamerze ZED [6], a całość obliczeń matematycznych jest przeprowadzana na głównym komputerze pokładowym. Po wykryciu obiektu w polu roboczym kamery jego pozycja zostaje zwrócona za pośrednictwem SDK do programu. Położenie jest dostarczane w postaci tablicy z współrzędnymi wierzchołków równoległoboku, który jest opisany na rozpoznanym obiekcie. Z tak uzyskanych współrzędnych wyliczana jest pozycja środka figury korzystając z odcinków, które wyznaczają przekątne równoległoboku. Następnie sprawdzane jest jak przedstawia się zależność współrzędnej x środka obiektu do współrzędnej x środka obszaru roboczego. Na podstawie tej

własności możliwe jest sprawdzenie, w którą stronę powinien poruszyć się robot, aby zachować obiekt w centrum. W trakcie testów okazało się, że takie idealne pokrycie środków jest niemożliwe. W związku z tym zdecydowano się na utworzenie strefy tolerancji wokół punktu centralnego. Został on dobrany tak aby zajmować 15% wysokości zdjęcia.



Rys. 1. Interfejs detekcji
Fig. 1. Detection interface

Podgląd widoku z kamer (Rys. 1) pokazuje rozpoznane obiekty zaznaczając je z wykorzystaniem ROI (ang. *Region of Interest*). Dodatkowo z wykorzystaniem czujników umieszczonych w kamerze, możemy wyświetlić informację o odległości obiektu od platformy.

6. Testy i optymalizacja

Pierwszym wspomnianym już wnioskiem było wprowadzenie obszaru tolerancji do punktu centralnego zdjęcia. Kolejnym ważniejszym elementem było zwiększenie szybkości reakcji podwozia oraz liczby klatek na sekundę wyświetlanych w podglądzie z kamer. Aby polepszyć te dwa parametry, podzielono program na trzy części:

1. Pierwsza, główna część – odpowiedzialna za utworzenie obiektów robota i kamery, wywołanie ich funkcji, nadzorowanie procesów oraz obsługę wyjątków;
2. Druga, część wizji – odpowiada za wszelkie akcje związane z przechwytywaniem obrazu z kamer, obliczaniem punktów środkowych oraz nanoszeniem ROI na podgląd;
3. Trzecia, część zarządzania elementami fizycznymi – odpowiedzialna za wykonanie instrukcji przesłanych przez główną funkcję, która pozyskała je z procesu obsługi wizji.

Dzięki takiemu podziałowi możliwe było kontrolowanie czasu wykonywanych działań. Zdecydowano się na przetestowanie dwóch rozwiązań pozwalających na zrównoleglenie obliczeń. Pierwszym z nich jest wykorzystanie osobnych podprocesów do przeprowadzania działań. Przy tym sposobie występuje konieczność utworzenia dodatkowych programów oraz stworzenia kopii danych. Umożliwi nam to biblioteka *subprocess* [7] uruchomiona w trybie asynchronicznym. Drugim rozwiązaniem jest rozbiecie obliczeń na wątki i prowadzenie na nich działań w trybie równoległym. Umożliwi to biblioteka *threading* [8], zarządzająca dodatkowymi wątkami utworzonymi w obrębie głównego programu. Wykonano 5 serii pomiarów. Mierzony był średni czas uzyskania 100 klatek oraz czas, który był potrzebny od momentu przechwycenia obrazu do momentu wygenerowania sygnału ruchu do silników. Jako dane porównawcze przedstawiono średnią liczbę klatek na sekundę uzyskaną podczas wykorzystywania tylko algorytmu do rozpoznawania obiektu (dostarczonego wraz z oprogramowaniem kamery) oraz pierwszej wersji programu bez podziału na części.

Tabela 1. Tabela wyników pomiaru
Table 1. Measurement result table

	Średnia liczba klatek na sekundę [fps]	Średni czas reakcji podwozia [ms]
Tylko wykrywanie	20	-
Pierwsza wersja algorytmu	9	8,4
Wykorzystanie <i>subprocess</i>	14	7,9
Wykorzystanie <i>threading</i>	15	7,5

7. Wnioski

Platforma spełniła swoje zadanie i pozwoliła na wdrożenie pierwszego algorytmu sztucznej inteligencji. Jej struktura fizyczna i funkcjonalna pozwala na regularne aktualizacje systemu zgodnie z bieżącymi potrzebami, oraz pracę nad kilkoma projektami równocześnie. Wybrany komputer pokładowy spełnił swoje zadanie, pozwalając przez to na szybką interpretację obrazu oraz komunikację z fizycznymi elementami platformy.

Wdrożony algorytm również spełnił oczekiwania. Zastosowane biblioteki oraz proste operacje matematyczne pozwoliły na poruszanie platformą w taki sposób, aby kompensowała ona przemieszczanie się śledzonego obiektu po okręgu. Testy pozwoliły na stabilne śledzenie człowieka w odległości 20 metrów, jest to dystans, który jest w zupełności wystarczający do naszych celów, ale w razie potrzeby może zostać zwiększony kosztem pewności rozpoznania obiektu. Optymalizacja algorytmu sterowania również przebiegła pomyślnie, udało się poprawić wyniki względem pierwszej wersji, obydwa sprawdzone parametry uległy poprawie. Algorytm może teraz z powodzeniem zostać wykorzystany w większym projekcie. Dodatkowo ze względu na swoją ogólną logiczną strukturę po odpowiednim zmienieniu klasy kontrolującej część fizyczną może zostać przeniesiony na inną platformę.

Literatura

1. Stuart J. Russell, Peter Norvig, *Artificial Intelligence, A Modern Approach*, 4th Edition, Boston, Pearson (2020).
2. Czupryniak Rafał, Szykarczyk Piotr, Trojnecki Maciej. (2008). *Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (2). Nowe kierunki w robotyce mobilnej*. Pomiar Automatyka Robotyka. 10-13.
3. Trojnecki Maciej, Szykarczyk Piotr. (2008). *Tendencje rozwoju mobilnych robotów lądowych (3). Autonomia robotów mobilnych stan obecny i perspektywy rozwoju*. Pomiar Automatyka Robotyka. 5-9.
4. Platforma Jetbot do nauki sztucznej inteligencji na platformach robotycznych <https://jetbot.org/master/> (dostęp 11.04.2022)
5. Dokumentacja biblioteki OpenCV <https://docs.opencv.org/4.x/> (dostęp 11.04.2022)
6. Dokumentacja modułu detekcji obiektów, działającego na kamerze ZED 2: <https://www.stereolabs.com/docs/object-detection/> (dostęp 11.04.2022)
7. Dokumentacja biblioteki Subprocesses <https://docs.python.org/3.8/library/subprocess.html> (dostęp 11.04.2022)
8. Dokumentacja biblioteki threading <https://docs.python.org/3.8/library/threading.html> (dostęp 11.04.2022)

WYBRANE SYMULACJE NUMERYCZNE KOMPOZYTÓW O WEWNĘTRZNEJ STRUKTURZE KRATOWEJ

KAROL HACHUŁA,

Technikum nr 4 imienia Hanny i Kazimierza Wejchertów w Zespole Szkół nr 5 w Tychach,
Technik Mechanik, Obróbka Metali CNC, semestr VI
Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Wacław Kuś, Prof. PŚ

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest analizie numerycznej materiałów ze wzmocnieniami strukturami kratowymi. Modele elementów ze strukturą kratową zostały zaprojektowane za pomocą oprogramowania CAD, Autodesk Fusion 360. Następnie były analizowane z użyciem Metody Elementów Skończonych (MES) w oprogramowaniu Hexagon (MSC) Apex. Wyniki symulacji numerycznych modeli zostały porównane ze sobą dla różnych konfiguracji struktury kratowej.



SELECTED NUMERICAL SIMULATIONS OF LATTICE COMPOSITES

Abstract. The article is devoted to the numerical analysis of composites reinforced with lattice structures. The elements models were designed using the CAD software, Autodesk Fusion 360. They were then analyzed using the Finite Element Method (FEM) in Hexagon (MSC) Apex software. The results of numerical simulations of the models were compared with each other for different configurations of the lattice structure.

1. Wprowadzenie

Struktura kratowa [2,3,4] jest rodzajem materiału komórkowego o charakterze otwartej porowatości, składa się z komórek elementarnych wzajemnie powiązanych między sobą, które mogą być ułożone w sposób stochastyczny lub niestochastyczny. Struktury kratowe niestochastyczne są tworzone w sposób cyklicznego powtarzania komórki elementarnej w zakresie wypełnianej przez nie przestrzeni, wzdłuż głównych osi. Geometrię komórki elementarnej można podzielić na cztery główne grupy:

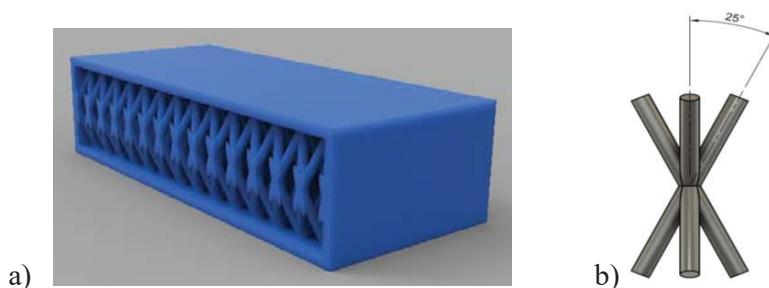
- oparte na rozpórkach,
- potrójnie okresowe powierzchnie minimalne
- zoptymalizowane pod kątem topologii
- inspirowane naturą i zaprojektowane na zamówienie.

Dzięki strukturom kratowym uzyskujemy zbliżoną sztywność do elementu, który jest w pełni wypełniony materiałem oraz jednocześnie zmniejszając jego wagę. Struktury kratowe znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym oraz kosmicznym gdzie bardzo duże znaczenie ma waga i wytrzymałość elementów.

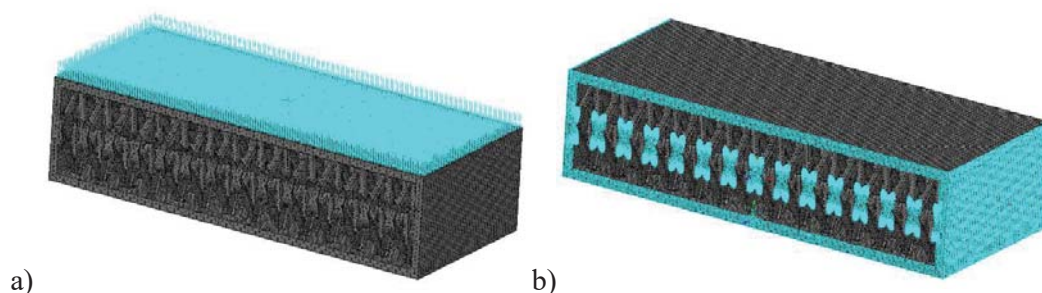
W artykule przedstawiono analizy elementu ze wzmocnieniem strukturami kratowymi. Przeprowadzono analizy MES z użyciem oprogramowania Apex [1] w celu wyznaczenia maksymalnych przemieszczeń wypadkowych i naprężeń redukowanych.

2. Analizowany element wzmocniony strukturą kratową

Analizowano element prostokątny przedstawiony na Rys. 1a o wymiarach 200x84x50 mm. Górna i dolna warstwa miały stałą grubość 4 mm a średnica prętów wynosiła 3,80 mm. W poszczególnych analizach korzystano ze wzmocnienia strukturą kratową o innym kącie pochylenia prętów. Liczba elementów wzmacniających zależała od kąta pochylenia zdefiniowanego jak na Rys. 1b. Element obciążono ciśnieniem 0.2 MPa na górnej warstwie (Rys. 2a) oraz utwierdzono sztywno na krótszych ścianach, dodatkowo zadano warunek symetrii na lewej dłuższej ścianie (Rys. 2b). Element został wykonany z materiału PLA o module Younga 3500 MPa oraz współczynnika Poissona 0.3. Do dyskretyzacji wykorzystano elementy trójwymiarowe, czworościenne z kwadratowymi funkcjami kształtu. W poszczególnych analizach liczba stopni swobody wahała się od 0.5 do 3.0 mln.



Rys. 1. a) Geometria analizowanego elementu (wariant z kratownicą z kątem 25°),
b) sposób określenia kąta w kratownicy (przykładowy element 25°)
Fig. 1. a) Geometry of the analysed element (variant with a truss with an angle of 25°),
b) the method of determining the angle in the truss (example element 25°)



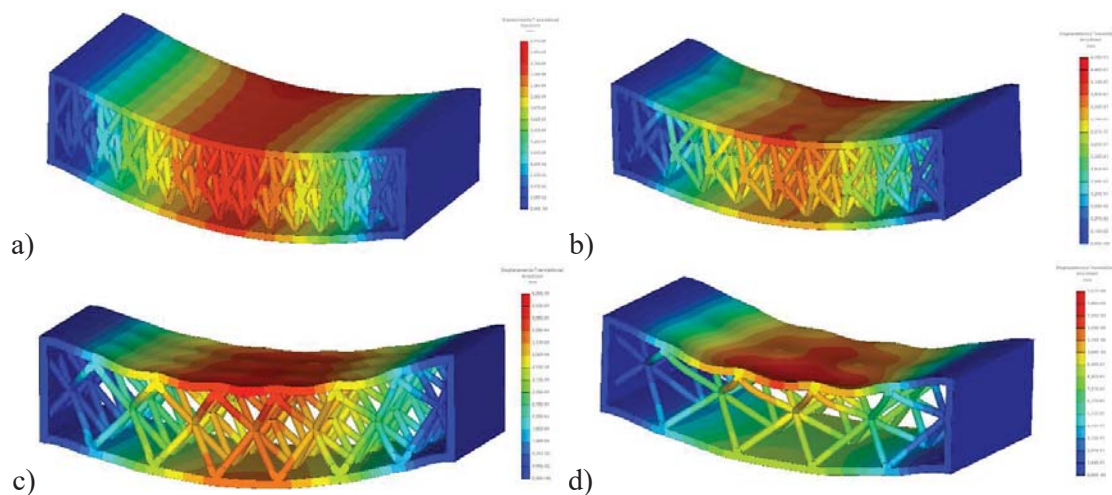
Rys. 2. Warunki brzegowe: a) ciśnienie na górnej ścianie elementu, b) podpory, utwierdzenie na krótszych ścianach oraz warunek symetrii na lewej, bocznej ścianie elementu
Fig. 2. Boundary conditions: a) pressure on the upper side of the element, b) supports, clamped shorter walls and symmetry condition on the left side of the element

3. Wyniki analiz numerycznych

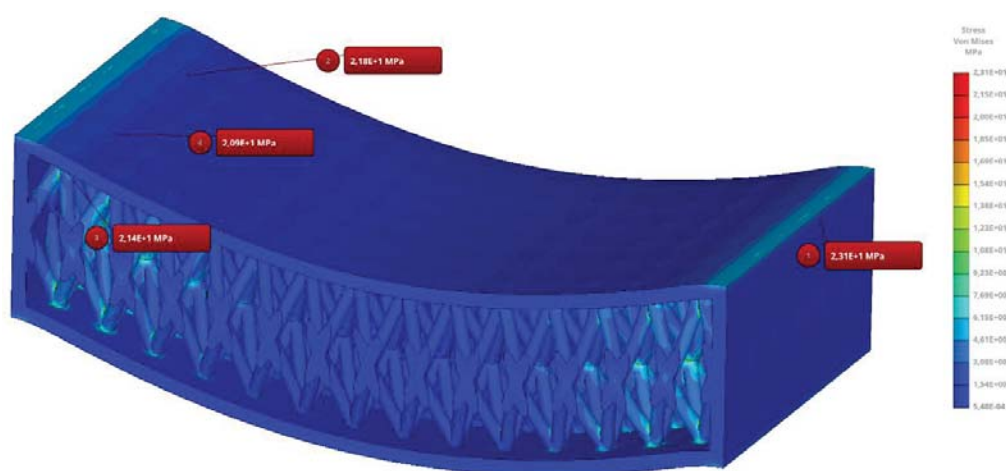
Porównano maksymalne przemieszczenia w elemencie dla czterech struktur wzmacniających. Wypadkowe przemieszczenia dla różnych wartości kątów prętów wzmocnienia przedstawiono na Rys. 3. Przykładowy rozkład naprężeń zredukowanych zgodnie z hipotezą Hubera przedstawiono na Rys. 4. Tabela 1 zawiera informacje o maksymalnym przemieszczeniu wypadkowym oraz objętości poszczególnych struktur.

Tabela 1. Maksymalne przemieszczenia oraz objętość badanych elementów
Table 1. Maximum displacement and volume of elements

	25°	35°	45°	55°
Maksymalne przemieszczenie [mm]	0,31	0,48	0,70	1,57
Objętość [mm ³]	$3,06 \cdot 10^5$	$2,38 \cdot 10^5$	$2,10 \cdot 10^5$	$1,91 \cdot 10^5$



Rys. 3. Przemieszczenia wypadkowe dla struktur o kącie: a) 25°, b) 35°, c) 45°, d) 55°
Fig. 3. Resultant displacements for structures with an angle of: a) 25°, b) 35°, c) 45°, d) 55°



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych Hubera dla elementu ze strukturą o kącie 25°
Fig. 4. Map of Huber equivalent stress distribution for an element with angle of 25 °

Maksymalne przemieszczenia wypadkowe są mocno uzależnione od wewnętrznej struktury kratowej. Zwiększenie kąta prowadzi do zmniejszenia liczby elementów prętowych należy jednak zauważyć, że zmniejszenie objętości elementu prowadzi do znacznego wzrostu maksymalnych przemieszczeń, czyli zmniejszenia sztywności. Spiętrzenia naprężeń występują w elementach kratowych w miejscu łączenia kilku prętów oraz prętów z warstwami będącymi ścianami konstrukcji.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono porównanie czterech wariantów wzmocnienia kratowego elementu. Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że w celu doboru odpowiedniej struktury w docelowej konstrukcji należałoby wziąć pod uwagę zarówno zmniejszenie objętości, masy ale przede wszystkim zmniejszającą się sztywność. Zastosowanie oprogramowania CAD pozwalającego na budowę modeli parametrycznych w znaczny sposób skraca się czas konieczny do uzyskania wariantów konstrukcji z różnymi wzmacniającymi elementami kratowymi. Typowe oprogramowanie CAD, ze względu na ograniczenia modułów związanych z analizą MES, może wymagać eksportu danych do programów MES, szczególnie w przypadku konstrukcji o złożonej budowie wewnętrznej.

Literatura

1. Strona oprogramowania MES Hexagon (MSC) Apex, <https://www.mscsoftware.com/product/msc-apex> (dostęp 1.04.2022).
2. Belcher T., Lattice structure thermal characterization, w materiałach “Thermal & fluids analysis workshop TFAWS 2019”, NASA Langley Research Center, Ampton, s.1-20 (2019).
3. Mostafa, K. G., Momesso G. A., Li X., Nobes D. S., Qureshi A. J., Dual graded lattice structures: generation framework and mechanical properties characterization, *Polymers*, Vol. 13, 1528, s.1-26 (2021).
4. Pan C., Han Y., Lu J., Design and optimization of lattice structures: a review, *Appl. Sci.*, Vol. 10, 6374, s. 1-8 (2020).

OPTIMALIZACJA UKŁADU BELKOWO-PRĘTOWEGO ZA POMOCĄ SZTUCZNEGO SYSTEMU IMMUNOLOGICZNEGO

inż. ŁUKASZ HOSZKIEWICZ,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, semestr I, II stopień

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



Streszczenie. Niniejszy artykuł dotyczy problemu optymalizacji układu belkowo-prętowego przy zastosowaniu sztucznego systemu immunologicznego. Kryterium optymalizacji dotyczyło minimalizacji przemieszczenia jednego z punktów wyżej wymienionego układu. Program do analizy wytrzymałościowej napisany został w języku C++.

OPTIMIZATION OF THE BEAM-ROD SYSTEM WITH AN ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM

Abstract. Optimization of the beam-rod system using an artificial immune system is presented in this article. The optimization criterion concerned the minimization of the displacement of one of the points of the system. The strength analysis program was written in the C ++ language.

1. Wprowadzenie

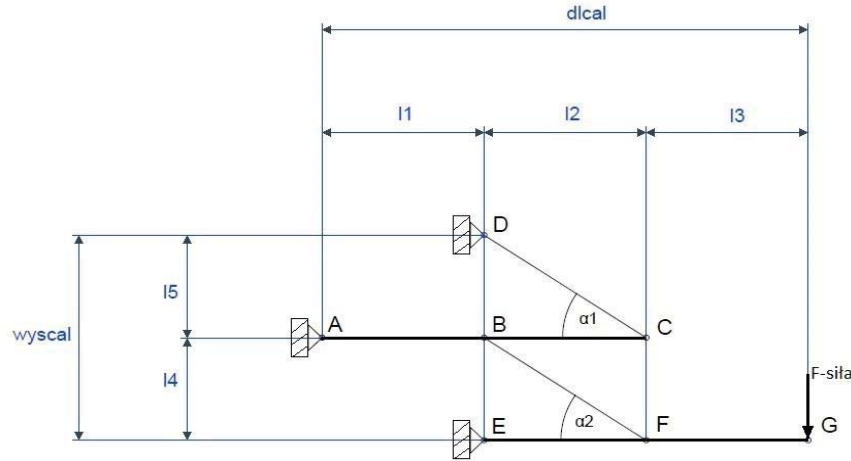
Celem pracy była optymalizacja układu belkowo-prętowego za pomocą sztucznego systemu immunologicznego (SSI). Zagadnienie to wymagało wykonania takich kroków jak obliczenia analityczne, napisanie programu w języku C++[3], napisanie procedury wymiany danych z sztucznym systemem immunologicznym, przeprowadzenie optymalizacji i zwizualizowanie wyników. Systemy sztucznej inteligencji, które odgrywają coraz większą rolę w procesach optymalizacji dla odpowiednio dobranych parametrów, potrafią z dużym prawdopodobieństwem w sposób algorytmiczny uzyskać rozwiązania optymalne, bez konieczności analizy wszystkich możliwych wariantów wynikowych [1]. Etapy działania SSI użytego w tej pracy można podzielić na sześć głównych kroków [2]: generacja komórek pamięciowych, proliferacja komórek pamięci oraz hipermutacja, obliczenia wartości funkcji celu, selekcja, mechanizm zatłoczenia i warunek zatrzymania. W jednym z plików wykorzystywanych podczas optymalizacji mamy możliwość ustawienia następujących parametrów działania sztucznego systemu immunologicznego: liczba komórek pamięci, liczba klonów, liczba zmiennych projektowych, ograniczenia min-max, minimalny dystans w tłoku, zasięg mutacji, liczba testów, warunek zatrzymania, liczba iteracji, oczekiwana wartość funkcji i maksymalna liczba wywołania funkcji celu. Dobór tych parametrów pozwala dostosować działanie do danego przypadku i zwiększa efektywność wykonywanych zadań.

Optymalizacja może dotyczyć nie tylko wskazanego w tej pracy układu wraz ze wskazanym kryterium, ale również belek, kratownic, wałów, układów termodynamicznych czy innych zagadnień z tej dziedziny, jak i przypadków związanych z innymi gałęziami nauki [2].

Program do analizy wytrzymałościowej wraz z procedurą wymiany danych z SSI został napisany w programie DEV-C++, w języku programowania C++. Optymalizacja została przeprowadzona dla kryterium minimalizacji przemieszczenia jednego z punktów układu belkowo-prętowego, co przedstawione będzie w dalszej części artykułu.

2. Obliczenia

W pierwszym kroku dla układu belkowo-prętowego przedstawionego na rys. 1 przeprowadzono obliczenia analityczne według toku postępowania zgodnego z wiedzą zdobytą z wytrzymałości materiałów.



Rys. 1. Rozpatrywany układ belkowo-prętowy
Fig. 1. The considered beam-rod system

Do procesu optymalizacji wybrane zostały parametry, które były zmiennymi projektowymi: wymiary $wyscal$, $d1cal$, $l1$, $l2$, $l4$, pole powierzchni prętów A , moduł Younga E i siła F . Długości $l3$ i $l5$ obliczane były na podstawie zależności: $l1 + l2 + l3 = const$ oraz $l4 + l5 = const$. Kąty $\alpha1$ oraz $\alpha2$ obliczane są na podstawie sinusów i cosinusów wielkości opisanych na rys. 1. W późniejszym etapie na każdą ze zmiennych zostały nałożone ograniczenia.

Poniżej przedstawiono wzory, które posłużyły do obliczenia analitycznego żądanych wartości zmiennych potrzebnych następnie do przeprowadzenia optymalizacji za pomocą SSI.

$$U_c = \frac{\Delta l_1}{\sin \alpha_1} = \frac{\frac{F \cdot (l_2 + l_3) \cdot l_1}{l_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (l_1 + l_2)} \sqrt{(wyscal - l_4)^2 + l_2^2}}{E \cdot A \cdot \sin \alpha_1} \quad (1)$$

$$U_b = U_c \cdot \frac{l_1}{(l_1 + l_2)} \quad (2)$$

$$U_f = U_b + \frac{\Delta l_2}{\sin \alpha_2} = U_b + \frac{\frac{F \cdot (l_2 + l_3) \cdot \sqrt{l_4^2 + l_2^2}}{\sin \alpha_2 \cdot l_2}}{E \cdot A \cdot \sin \alpha_2} \quad (3)$$

$$U_g = U_f \cdot \frac{(l_2 + l_3)}{l_2} \quad (4)$$

Wzory te posłużyły do napisania programu w języku C++, który w połączeniu z SSI wykorzystany został do przeprowadzenia optymalizacji.

W SSI zostały ustawione takie parametry jak m.in. liczba komórek pamięci, liczba klonów, liczba zmiennych, ograniczenia na zmienne (min, max), zasięg mutacji Gaussa, współczynnik zatłoczenia.

3. Wyniki optymalizacji przemieszczenia punktu G

Optymalizacja została wykonana dla minimalizacji przemieszczenia punktu G. Funkcja celu miała następującą postać:

$$J = \min (Ug) \quad (5)$$

Przyjęte zostały następujące ograniczenia na wartości zmiennych:

$$\begin{aligned} 3000 &\leq wyscal \leq 5000 \text{ mm}, \\ 7000 &\leq dlcal \leq 9000 \text{ mm}, \\ 100 &\leq l1 \leq 3000 \text{ mm}, \\ 100 &\leq l2 \leq 3000 \text{ mm}, \\ 100 &\leq l4 \leq 2000 \text{ mm}, \\ 12 &\leq A \leq 30 \text{ mm}^2, \\ 500 &\leq F \leq 1000 \text{ N}, \\ 205000 &\leq E \leq 210000 \text{ MPa}. \end{aligned}$$

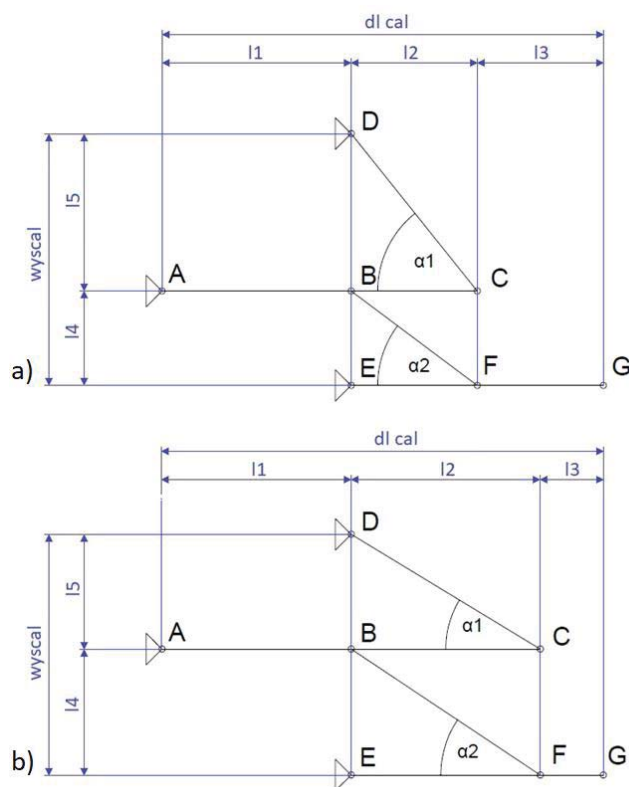
Podczas optymalizacji parametry SSI zostały ustawione na podstawie pozycji literaturowej [2]: liczba komórek: 5, liczba klonów:5, prawdopodobieństwo mutacji Gaussa: 0.5 oraz współczynnik zatłoczenia: 0.5. Optymalizacja została wykonana czterokrotnie, za każdym razem dając jednakowe wyniki końcowe.

Początkowo zostały ustawione wartości służące jako odniesienie dla wartości wynikowych optymalizacji i wynosiły następująco: $wyscal = 4000$, $dlcal = 7000$, $l1 = 3000$, $l2 = 2000$, $l4 = 1500$, pole powierzchni $A = 25$, moduł Younga $E = 207500$ i siła $F = 750$.

Po wykonanej optymalizacji wartości dla układu odniesienia oraz układu zoptymalizowanego zostały zestawione w tabeli 1 oraz na rysunku 2.

Tabela 1 Wartości zmiennych projektowych i innych parametrów przed i po optymalizacji
Table 1. Design variables values and other parameters before and after optimization

	$Wyscal$ [mm]	$Dlcal$ [mm]	$l1$ [mm]	$l2$ [mm]	$l3$ [mm]	$l4$ [mm]	$l5$ [mm]	A [mm ²]	F [N]	E [MPa]	Ug [MPa]
Wartości odniesienia	4000	9000	3000	3000	3000	2000	2000	12	1000	205000	23,817
Wartości zoptymalizowane	5000	7000	3000	3000	1000	2000	3000	30	500	210000	1,9526



Rys. 2. Układ belkowo-prętowy: a) przed optymalizacją, b) po optymalizacji
 Fig. 2. Beam-rod system: a) before optimization, b) after optimization

4. Wnioski

Sztuczny system immunologiczny zastosowany do zagadnień konstrukcyjnych pozwolił znaleźć optymalne wartości w krótkim czasie. Zastosowanie optymalizacji za pomocą SSI jest możliwe dla dowolnego programu umożliwiającego obliczenie wartości funkcji celu pod warunkiem odpowiedniej komunikacji między programami oraz odpowiedniej wymiany danych. Dla rozważanego zadania inżynierskiego system ten okazał się trafnym zastosowaniem i poradził sobie on z postawionym mu zadaniem.

Program *solver.exe* stworzony w języku C++ na potrzeby zadania jest prostym plikiem, który dzięki braku graficznej wizualizacji, a jedynie wykonującym się w tle sprawia, że cały proces optymalizacji z użyciem programu SSI posiada krótki czas operacji. Rozwiązanie otrzymane przez SSI nie jest jedynym możliwym i jest uzależnione m.in. od zmiennych projektowych i ich zakresów zmienności.

Literatura

1. Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., Optymalizacja, Wybrane metody z przykładami zastosowań PWN, Warszawa (2009).
2. Poterański A.: Optymalizacja immunologiczna układów mechanicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2015).
3. Strona internetowa poruszająca tematy programowania, <https://codecool.com/pl/wiedza/czym-charakteryzuje-sie-jezyk-c-codecool/> (dostęp 12.11.2021)

MODELOWANIE ZAMRAŻANIA NOWOTWORU SKÓRY Z WYKORZYSTANIEM RÓWNANIA Z DWOMA CZASAMI OPÓŹNIEŃ

inż. MAKSYMILIAN JĘDRZEJOWSKI,

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

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Streszczenie. Celem pracy jest modelowanie zamrażania guzów nowotworowych skóry. Rozpatrywano osiowo-symetryczny obszar tkanki. Na powierzchni skóry przyłożono cylindryczną kriosondę. Model matematyczny bazuje na równaniu z dwoma czasami opóźnień (DPL, ang. dual-phase lag equation), w którym opóźnienie związane ze strumieniem ciepła nazywa się czasem relaksacji, a opóźnienie związane z gradientem temperatury to czas termalizacji. W obliczeniach wykorzystano schemat niejawną metody różnic skończonych. Zaprezentowano wyniki uzyskane dla przykładowego zabiegu kriochirurgicznego.



MODELING OF SKIN CANCER FREEZING USING THE DUAL-PHASE LAG EQUATION

Abstract. The aim of the study is to model the freezing of skin neoplastic tumors. The axially symmetrical domain of tissue is considered. On the skin surface the cylindrical cryoprobe is applied. The mathematical model is based on a dual-phase lag equation (DPL) in which the heat flux lag is called the relaxation time and the temperature gradient lag is the thermalization time. The implicit scheme of the finite difference method is used in the calculations. The results obtained for an exemplary cryosurgical procedure are presented.

1. Wprowadzenie

Kriochirurgia guzów nowotworowych polega na zamrożeniu guza do temperatury, w której wystąpi martwica komórek (-20°C). Część badań pokazuje, że w celu zniszczenia wszystkich komórek nowotworowych może być wymagana niższa temperatura (-40°C) [1]. W przypadku kriochirurgii nowotworów skórnych (a także innych zmian skóry) kriosondę walcową przykładają się bezpośrednio do powierzchni skóry. Przez kriosondę przepływa ciecz kriogeniczna (np. ciekły azot), która powoduje obniżenie temperatury i zamrożenie tkanki. Następnie ogrzewa się sondę do temperatury pokojowej, aby móc ją bezpiecznie usunąć. Proces schładzania i rozmrażania powtarza się kilkakrotnie. Zabieg ten może być modelowany z wykorzystaniem równania Pennesa lub równania z dwoma czasami opóźnień.

2. Model matematyczny i metoda rozwiązania

Równanie opisujące zamrażanie tkanki biologicznej ma następującą postać [2]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_q \frac{\partial}{\partial t} \left[c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \right] = \nabla [\lambda(T) \nabla T] + \tau_T \nabla \left[\lambda(T) \nabla \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] + Q(T) + \tau_q \frac{\partial Q(T)}{\partial t} + Q_z(T) + \tau_q \frac{\partial Q_z(T)}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie T oznacza temperaturę, $\lambda(T)$ to współczynnik przewodzenia ciepła tkanki biologicznej, $c(T)$ to objętościowe ciepło właściwe, τ_q oznacza czas relaksacji, τ_T to czas termalizacji, t to czas, Q jest funkcją źródła związaną z metabolizmem, a Q_Z to funkcja źródła związana z procesem zamrażania tkanki.

Po wprowadzeniu zależności Q oraz Q_Z i pewnych przekształceniach otrzymuje się:

$$\begin{aligned} & \left[C(T) + \tau_q \{ w(T)c_b - v(T)c_b(T_a - T) - P_{met}(T) \} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_q C(T) \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \\ & = \nabla(\lambda(T)\nabla T) + \tau_T \nabla \left[\lambda(T) \nabla \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] + w(T)c_b(T_a - T) + Q_{met}(T) \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie $C(T)$ oznacza zastępczą pojemność cieplną (efektywne objętościowe ciepło właściwe), $w(T)$ to prędkość perfuzji krwi, $v(T)$ oznacza pochodną prędkości perfuzji krwi, c_b to ciepło właściwe krwi, T_a to temperatura krwi w aorcie, $Q_{met}(T)$ to składnik metaboliczny, a $P_{met}(T)$ to pochodna składnika metabolicznego względem temperatury.

W tym artykule przyjęto układ współrzędnych cylindrycznych i do rozwiązania równania (2) wykorzystano metodę różnic skończonych (schemat niejawnny). W takim przypadku równanie różnicowe ma postać:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{i,j}^{f-1} + \tau_q \{ w_{i,j}^{f-1} c_b - v_{i,j}^{f-1} c_b (T_a - T_{i,j}^{f-1}) - P_{met,i,j}^{f-1} \}}{(\Delta t)^2} \Delta t + C_{i,j}^{f-1} \tau_q \right. \\ & \quad \left. + w_{i,j}^{f-1} c_b + 4 \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{h^2 \Delta t} \right] T_{i,j}^f \\ & = \left[\frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{h^2 \Delta t} - \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{2hr_{i,j} \Delta t} \right] T_{i,j-1}^f + \left[\frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{h^2 \Delta t} + \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{2hr_{i,j} \Delta t} \right] T_{i,j+1}^f \\ & \quad + \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} (\Delta t + \tau_T)}{h^2 \Delta t} (T_{i-1,j}^f + T_{i+1,j}^f) - \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} \tau_T}{h^2 \Delta t} (T_{i,j-1}^{f-1} + T_{i,j+1}^{f-1} + T_{i-1,j}^{f-1} + T_{i+1,j}^{f-1} - 4T_{i,j}^{f-1}) \\ & \quad + \left[\frac{C_{i,j}^{f-1} + \tau_q \{ w_{i,j}^{f-1} c_b - v_{i,j}^{f-1} c_b (T_a - T_{i,j}^{f-1}) - P_{met,i,j}^{f-1} \}}{(\Delta t)^2} \Delta t + 2C_{i,j}^{f-1} \tau_q \right] T_{i,j}^{f-1} \\ & \quad - \frac{\lambda_{i,j}^{f-1} \tau_T}{2hr_{i,j} \Delta t} (T_{i,j+1}^{f-1} - T_{i,j-1}^{f-1}) - \frac{C_{i,j}^{f-1} \tau_q}{(\Delta t)^2} T_{i,j}^{f-2} + w_{i,j}^{f-1} c_b T_a + Q_{met,i,j}^{f-1} \end{aligned} \quad (3)$$

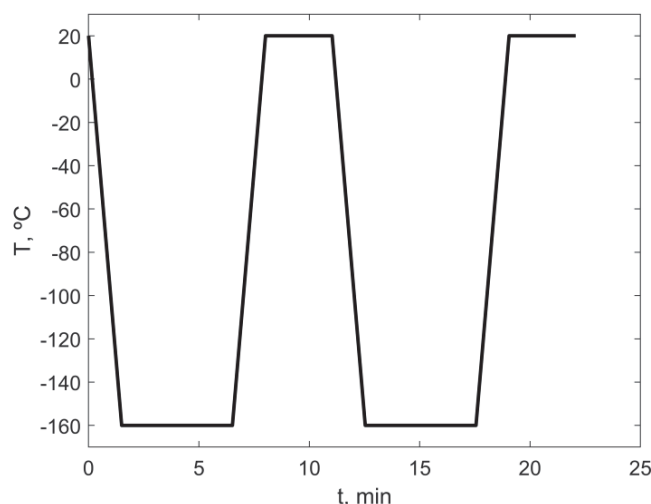
gdzie Δt oznacza krok czasu, h to krok siatki (przyjęto siatkę kwadratową), a $r_{i,j}$ to odległość rozpatrywanego punktu od osi walca.

Powyższe równanie uzupełniono odpowiednimi warunkami brzegowymi i początkowymi.

3. Przykłady obliczeń

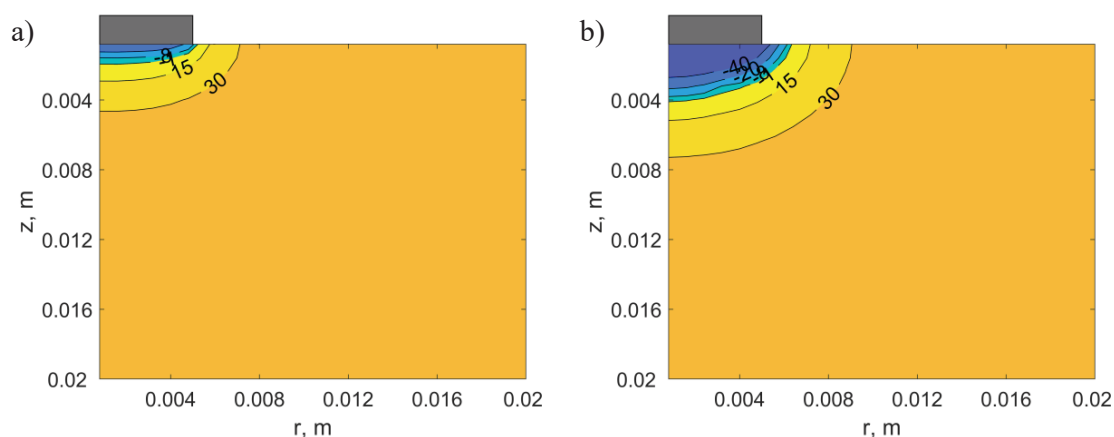
Do powierzchni skóry przyłożono kriosondę walcową. Analizowany fragment tkanki ma wymiary $R = 0,02$ m, $Z = 0,02$ m. Współczynnik przewodzenia tkanki biologicznej wynosi: w stanie naturalnym $\lambda_N = 0,52$ W/mK, w stanie przejściowym $\lambda_P = 1,26$ W/mK, a w stanie zamrożonym $\lambda_F = 2$ W/mK. Objętościowe ciepło właściwe jest równe $c_N = 3,6 \cdot 10^6$ J/m³K w stanie naturalnym, $c_P = 2,78 \cdot 10^6$ J/m³K w stanie przejściowym i $c_F = 1,93 \cdot 10^6$ J/m³K w stanie zamrożonym. Bazowa prędkość perfuzji krwi wynosi $w_0 = 0,5$ kg/m³s. Ciepło właściwe krwi jest równe $c_b = 3770$ J/kgK. Bazowy składnik metaboliczny jest równy $Q_{met0} = 245$ W/m³. Temperatura krwi w aorcie to $T_a = 37$ °C, a temperatura początkowa tkanki wynosi $T_p = 37$ °C. Temperatura początku zamrażania wynosi -1 °C, a temperatura końca zamrażania -8 °C.

Temperatura kriosondy została zadana zgodnie z modelem dostępnym w literaturze [3], tj. przeprowadza się dwa cykle chłodzenia składające się z 5 min zamrażania i 3 min rozmrażania. Do zamrażania wykorzystuje się ciekły azot, a kriosonda osiąga temperaturę $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Przyjęto temperaturę pokojową ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) jako temperaturę początkową sondy, a prędkość chłodzenia i ogrzewania jako 2 K/s . Funkcję temperatury sondy w czasie przedstawiono na rys. 1. Średnica sondy wynosi $0,01\text{ m}$.



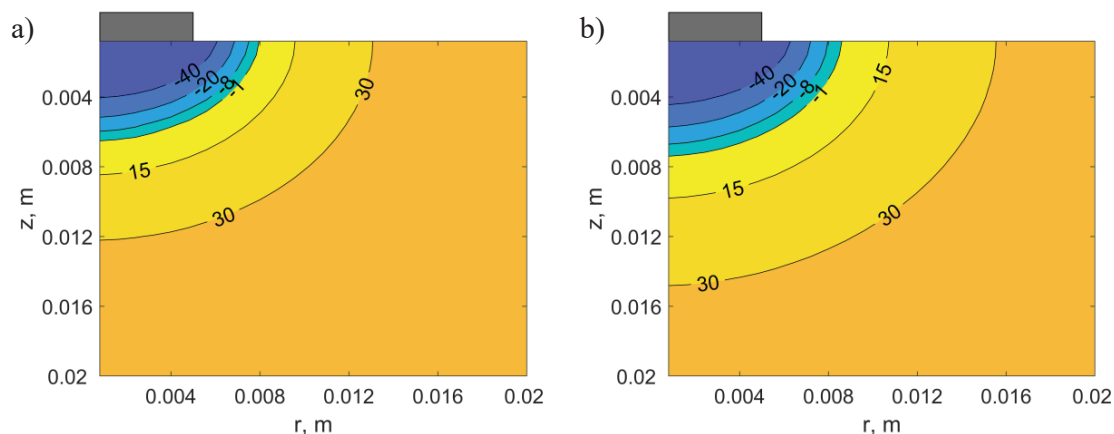
Rys. 1. Temperatura kriosondy
Fig. 1. Cryoprobe temperature

W przeprowadzonych symulacjach przyjęto liczbę węzłów wewnętrznych 25×25 , krok czasu $\Delta t = 1\text{ s}$, a krok siatki kwadratowej $h = 0,0008\text{ m}$. Czas relaksacji przyjęto jako $\tau_q = 3\text{ s}$, a czas termalizacji $\tau_T = 0,1\text{ s}$ [2, 4]. Na rys. 2. przedstawiono rozkład temperatur po czasie 45 s i 90 s. Objętość zamrożonej tkanki wynosi odpowiednio $0,050\text{ cm}^3$ i $0,20\text{ cm}^3$.



Rys. 2. Rozkład temperatur po a) 45 s, b) 90 s
Fig. 2. Temperature distribution after a) 45 s, b) 90 s

Na rys. 3. przedstawiono rozkład temperatur po czasie 240 s i 390 s, czyli czasie odpowiednio połowy i końca pierwszego zamrażania. Objętość zamrożonej tkanki wynosi odpowiednio $0,51\text{ cm}^3$ i $0,63\text{ cm}^3$. Maksymalną objętość obszaru zamrożonego równą $0,83\text{ cm}^3$ uzyskano po drugim zamrażaniu. W tabeli 1. pokazano objętość zamrożonego obszaru i obszaru martwej tkanki w zależności od czasu trwania zabiegu.



Rys. 3. Rozkład temperatur po a) 240 s, b) 390 s
Fig. 3. Temperature distribution after a) 240 s, b) 390 s

Tabela 1. Porównanie rozmiaru zamrożonego obszaru
Table 1. Comparison of the size of the frozen domain

Obszar poniżej temperatury	Objętość obszaru po czasie, cm ³				
	45 s	90 s	240 s	390 s	pod koniec zabiegu
-8 °C	0,050	0,20	0,51	0,63	0,83
-20 °C	0,034	0,16	0,34	0,42	0,54
-40 °C	—	0,10	0,21	0,23	0,30

4. Podsumowanie

Modelowanie zamrażania tkanek z wykorzystaniem równania z dwoma czasami opóźnień może służyć jako pomoc w planowaniu zabiegów kriochirurgicznych. Obszar zamrożonej tkanki jest znacznie większy od obszaru, w którym wystąpi martwica komórek. Należy to wziąć pod uwagę podczas przeprowadzania zabiegu, aby nie uszkodzić zdrowej tkanki lub narządów. Drugie zamrażanie powoduje wzrost objętości zamrożonego i martwego obszaru o ok. 30%.

Literatura

1. Baust J. G., Gage A. A., Johansen T. B., Baust J. M., Mechanisms of cryoablation: clinical consequences on malignant tumors, Cryobiology, Vol. 68(1), s. 1-11 (2014).
2. Mochnacki B., Majchrzak E., Numerical model of thermal interactions between cylindrical cryoprobe and biological tissue using the dual-phase lag equation, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 108, s. 1-10 (2017).
3. Tanaka S., Cryosurgery for Malignant Melanoma w "Basics of Cryosurgery", Ed. Korpan N.N., Wiedeń, s. 289-293 (2001).
4. Singh S., Kumar S., Numerical study on triple layer skin tissue freezing using dual phase lag bio-heat model, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 86, s.12-20 (2014).

ANALIZA WARIANTOWA WPLYWU POWŁOKI NA STOPIEŃ NAGRZANIA DRZWI WEJŚCIOWYCH

inż. HUBERT KIEPURA,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Jolanta Dziatkiewicz

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę nagrzewania się drzwi wejściowych pod wpływem promieni słonecznych z nałożonymi wybranymi powłokami ochronnymi. Artykuł rozpoczyna się opisem światła słonecznego oraz tego w jaki sposób powierzchnie nagrzewają się pod jego wpływem. Następnie opisane zostały właściwości drzwi i powłok takie jak wskaźniki TSR i HBW. W dalszej części artykułu przedstawiono model matematyczny oraz metodę różnic skończonych, która pozwoliła na wykonanie obliczeń. Wyniki obliczeń dla każdej powłoki zostały porównane i uzupełnione wnioskami.

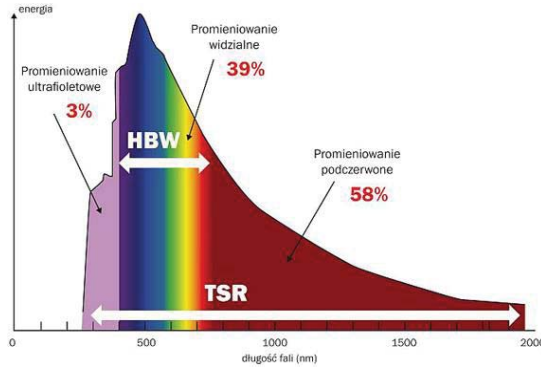


VARIANT ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE COATING ON THE DEGREE OF HEATING OF THE FRONT DOOR

Abstract. The article presents an analysis of the heating of the entrance door under the influence of sunlight with selected protective coatings. The article begins with a description of sunlight and how surfaces heat up under its influence. Next, the properties of doors and coatings, such as TSR and HBW, were described. The next part of the article presents the mathematical model and the finite difference method, which allowed for the performance of calculations. The calculation results for each coating were compared and supplemented with conclusions.

1. Wprowadzenie

Powierzchnie na Ziemi nagrzewają się pod wpływem promieniowania słonecznego. Takie zjawisko ma miejsce dzięki temu, że światło jako fala niosąca ze sobą energię, trafia w obiekty i częściowo się od nich odbija, a częściowo jest absorbowana. Jeśli część fali zostaje wchłonięta, energia którą posiadała również zostaje zaabsorbowana i zamieniona na energię ciepłą. Światło słoneczne jest światłem białym, co oznacza, że w jego wiązce są zawarte fale o różnych długościach. Cechy powierzchni, które mają największy wpływ na pochłanianie energii słonecznej to wskaźniki TSR i HBW. Wskaźnik HBW pozwala na stwierdzenie ile % światła widzialnego jest odbijane przez powierzchnię. Wskaźnik TSR bierze pod uwagę odbijalność całości światła słonecznego, co pozwala ciemnym powierzchniom z wysokim TSR nagrzewać się dużo wolniej niż standardowym ciemnym powierzchniom, lub powierzchniom jasnym.



Rys. 1. Porównanie współczynnika HBW i TSR [1]

Rys. 1. Comparison of ratios: HBW i TSR [1]

2. Model matematyczny oraz metoda obliczeń

W poniższej pracy rozpatrywano przepływ ciepła w stanie nieustalonym. W przypadku stanu nieustalonego dla obszarów 1D (jednowymiarowych – jeden z wymiarów L jest o konkretnej długości, natomiast pozostałe są od niego znacznie mniejsze) przepływ ciepła opisany jest przez równanie Fouriera jako funkcja $T = T(x, t)$ zależna od położenia x oraz czasu t

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + \frac{Q(x, t)}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

gdzie: $T(x, t)$ – temperatura w danym punkcie geometrycznym w określonej chwili czasu [K], λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)], c – ciepło właściwe danego materiału [J/(kg·K)], ρ – gęstość danego materiału [kg/m³], $Q(x, t)$ – zewnętrzne źródło ciepła (wydajność wewnętrzna źródeł ciepła) [W/m³].

Pole temperatur dla nieustalonego przepływu ciepła w obszarze 1D wyznaczono wykorzystując metodę różnic skończonych (MRS). W pierwszej kolejności wykonano dyskretyzację czasu o krok $\Delta t = t^f - t^{f-1} = \text{const.}$ (f – krótka chwila) [1]:

$$0 = t^0 < t^1 < \dots < t^{f-1} < t^f < \dots < t^F. \quad (2)$$

W podobny sposób utworzono siatkę geometryczną, która składa się z n węzłów (brzegowych x_0 i x_n oraz wewnętrznych) oddalonych od siebie o stały krok $h = x_i - x_{i-1} = \text{const.}$ (gdzie $i = 1, \dots, n$) [1]:

$$0 = x_0 < x_1 < \dots < x_{i-1} < x_i < \dots < x_n = L. \quad (3)$$

W następnych etapach zastosowano aproksymację ilorazu różnicowego pierwszego i drugiego rzędu. Uwzględniając odpowiednie warunki brzegowe i początkowe, równanie (1) przyjmuje następującą postać [1]:

$$T_i^f = \frac{a\Delta t}{h^2} T_{i-1}^{f-1} + \left(1 - 2\frac{a\Delta t}{h^2}\right) T_i^{f-1} + \frac{a\Delta t}{h^2} T_{i+1}^{f-1} + \frac{Q_i^{f-1} \Delta t}{c\rho}. \quad (4)$$

Na podstawie przedstawionego wzoru (4) możliwa jest aproksymacja pola temperatur w danym węźle w danej chwili czasu t^f .

Dodatkowo dla przeprowadzonej analizy przepływu ciepła za pomocą schematu jawnego metody różnic skończonych konieczne jest uwzględnienie warunku stabilności, który definiuje maksymalną wartość dla kroku czasu Δt [1]:

$$\left(1 - 2 \frac{a \Delta t}{h^2}\right) \geq 0 \Rightarrow \Delta t \leq \frac{h^2}{2a}. \quad (5)$$

3. Sformułowanie zadań

Celem obliczeń jest sprawdzenie, dla jakich materiałów powłoki i drzwi, temperatura drzwi po stronie, która nie jest nagrzewana promieniami słonecznymi zmienia się w najmniejszym stopniu. W metodzie różnic skończonych przyjęto następujące dane: grubość rdzenia drzwi – 0,0748 m, grubość nałożonej powłoki – 0,0002 m, liczba węzłów siatki – 325, czas obserwacji – 3600 s, temperatura otoczenia – 20 °C, temperatura początkowa – 20 °C. Po obu stronach drzwi zadano warunek brzegowy trzeciego rodzaju. W celu obliczenia wartości funkcji źródła, czyli mocy z jaką słońce nagrzewa drzwi, należy skorzystać z wzoru:

$$Q = \frac{100 - T_{sr}}{100} \cdot E_s \quad (6)$$

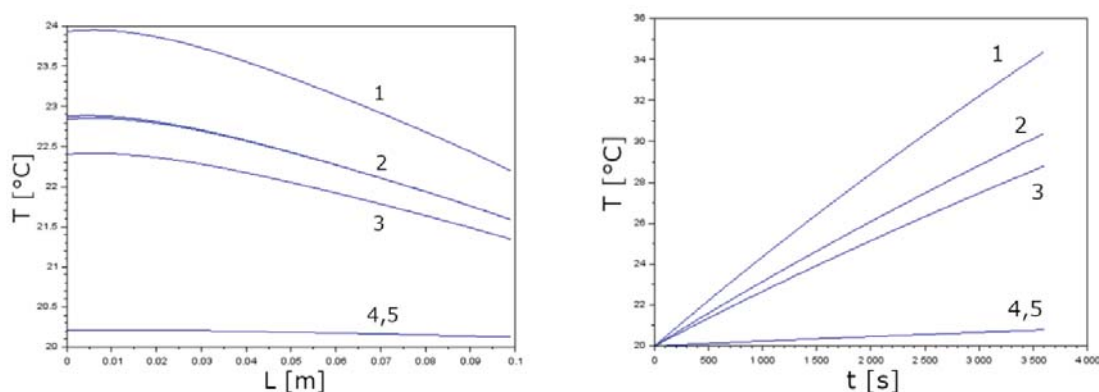
gdzie: Q [W/m³] – funkcja źródła, E_s [W/m³] – moc dostarczana na 1 m³ Ziemi, T_{sr} [%] – wskaźnik TSR

W tabeli nr 1 przedstawiono obliczone wartości funkcji źródła dla poszczególnych powłok dla wartości $E_s = 700$ [W/m³]. Dodatkowo przedstawiono własności fizyczne materiałów wykorzystywanych do obliczeń.

Tabela 1. Własności fizyczne materiałów użytych do obliczeń. [2][3]
Table 1. Thermophysical parameters [2] [3]

Materiał	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]	Gęstość [kg/m ³]	Ciepło właściwe [J/(kg·K)]	Wskaźnik TSR [%]	Funkcja źródła [W/m ³]
Farba ciemna	0,20	1600	3060	10	630
Farba jasna	0,20	1600	3060	35	455
Farba z cool pigmentami	0,20	1600	3060	45	385
Farba z mikrokulkami	1,05	2100	770	95	35
Farba z mikrosferami	1,05	2000	770	95	35
Drewno sosnowe	0,80	500	2510		

Na rysunku 2 zaprezentowano wykresy przebiegu temperatury na grubości drzwi po czasie 15 minut. Przedstawiono również zmianę temperatury w czasie po stronie, która nie jest nagrzewana promieniami słonecznymi dla różnych powłok.



Rys. 2. Przebieg temperatury na grubości drzwi (po lewej) oraz w czasie (po prawej). 1 – farba ciemna, 2 – farba jasna, 3 – farba ciemna z cool pigmentami, 4 – farba z mikrokulkami szklanymi, 5 – farba z mikrosferami szklanymi

Fig. 1. Temperature course over the thickness of the door (left) and in time (right). 1 - dark paint, 2 - light paint, 3 - dark paint with cool pigments, 4 - paint with glass microballs, 5 - paint with glass microspheres

4. Wnioski

Analiza stopnia nagrzania drzwi wejściowych z nałożonymi różnymi powłokami, pozwoliła na stwierdzenie, że właściwości fizyczne powłoki, takie jak współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość i ciepło właściwe nie mają znaczącego wpływu na osiągane temperatury. Największy wpływ na zmniejszenie stopnia nagrzania powłoki ma jej wskaźnik TSR. W przyjętym modelu strumień światła cały czas nagrzewa powierzchnię z tą samą mocą, co sprawia, że temperatury osiągane w drodze obliczeń nie pokrywają się z rzeczywistymi pomiarami, ale są dobrym wyznacznikiem procentowych różnic pomiędzy poszczególnymi powłokami.

Literatura

1. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2004).
2. http://kurtz.zut.edu.pl/fileadmin/BE/Tablice_materialowe.pdf
3. https://uploads-ssl.webflow.com/5ee25faf443526bc0db894a5/5f50c5c4b57c089273d216ba_technical-specification-for-sodalime-glass.pdf

PROJEKT PROTEZY KOŃCZYNY DOLNEJ DLA DZIECKA POZOSTAJĄCEGO W FAZIE WZROSTU

inż. WOJCIECH KIERSNOWSKI,

Mechanika i Budowa Maszyn - studia dualne, PK, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Małgorzata John – Banach

Streszczenie. Praca prezentuje koncepcję rozwiązania konstrukcyjnego protezy kończyny dolnej dla jedenastoletniego chłopca pozostającego w ciągłej fazie wzrostu. Zaproponowano model bazujący na wymiennych modułach oraz elementach umożliwiających adaptację względem postępujących zmian rozwojowych. W toku pracy przeprowadzono analizę biomechaniki chodu, której wyniki były pomocne w określeniu wymaganej ruchomości projektowanych elementów. Końcowy model protezy został poddany statycznej analizie wytrzymałościowej.



LOWER LIMB PROSTHESIS DESIGN FOR A CHILD IN A CONTINUOUS GROWTH PHASE

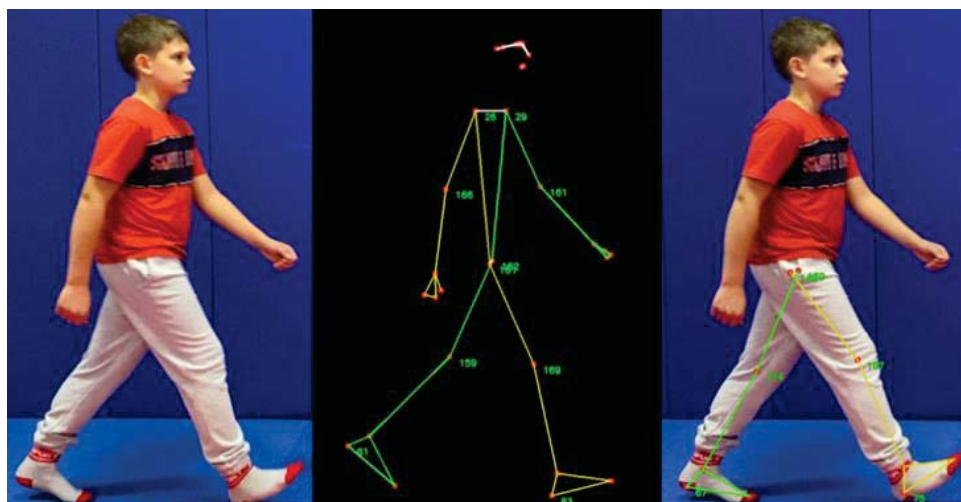
Abstract. This paper presents a design of lower limb prosthesis for an eleven-year-old boy in a continuous growth phase. Therefore, proposed solution contains socket adapters which allow for trouble-free replacement of selected prosthesis modules, due to age – related body length changes. Moreover, the design is based on some parts with adjustment range allowing for an adaptive length change relative to a child's growth. A biomechanical analysis of the child's gait was also carried out. The obtained results were helpful in determining the range of motion of the designed prosthesis. To verify the correctness of the design, a FEM analysis was performed.

1. Wprowadzenie

Podstawą dla rozważań dotyczących dziecięcego protezowania ortopedycznego jest nikły zakres dostępnych rozwiązań dedykowanych najmłodszym użytkownikom. Specyfika zmian w budowie ciała dzieci warunkuje wykorzystanie rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na wymianę wybranych modułów protezy wraz ze wzrostem dziecka. Dodatkowo wprowadzone zostały elementy protezy, których budowa pozwala na adaptację względem zmian rozwojowych. Celem implementacji takich rozwiązań jest ograniczenie potrzeby wymiany niektórych elementów, co rzutuje na dłuższy okres eksploatacji, a więc pozytywnie wpływa na aspekt ekonomiczny projektu z perspektywy użytkownika. W skład projektowanej protezy modularnej wchodzi: stopa protezowa, kolano protezowe, lej protezowy oraz adaptery łączące. Taki układ protezy definiowany jest przez poziom amputacji, który zgodnie z założeniem obejmuje poziom uda z zachowaniem kikuta stanowiącego 30-60% długości kości udowej [5]. Dla określenia wymaganych zakresów ruchu w projektowanych stawach protezowych prace koncepcyjne rozpoczęto od przeprowadzenia analizy chodu chłopca będącego przykładem badawczym.

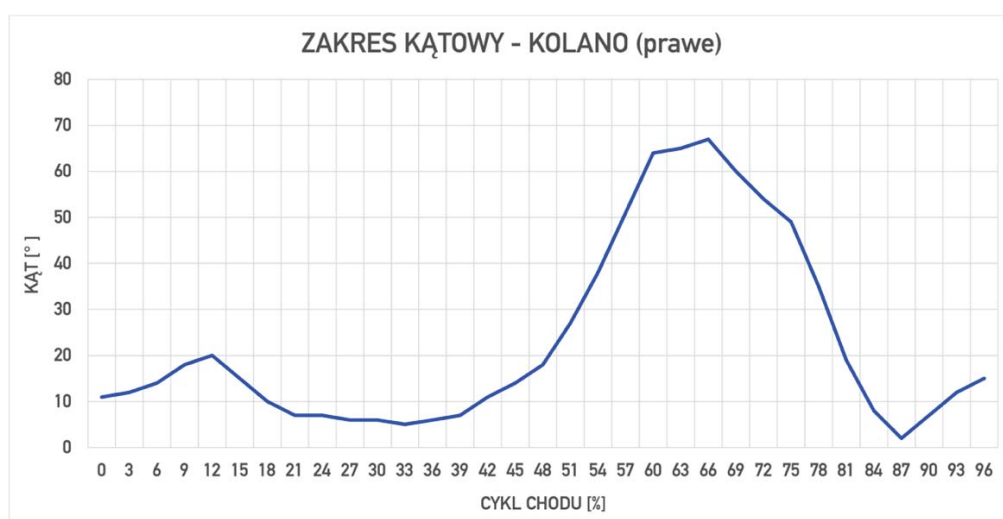
2. Analiza biomechaniki chodu

Z uwagi na fakt, iż wśród dzieci proces kostnienia nie jest jeszcze ukończony, a ich wzrost, w tym długość kończyn ulega ciągłej zmianie [1,6] specyfika chodu wymaga osobnej oceny. Analizie został poddany jedenastoletni, pełnosprawny chłopiec, będący przykładem badawczym. Badanie zostało wykonane przy pomocy algorytmu numerycznego, którego autorem jest firma *Skillforce* Sp. z o.o. Analizie poddano wcześniej zarejestrowany materiał video, a efektem implementacji algorytmu są otrzymane wykresy kątów w stawach: skokowym, kolanowym i biodrowym. Wyznaczone tym samym kąty ugięcia jasno precyzują, do jakiej ruchomości protezy należy dążyć, aby zapewnić jej dostateczną funkcjonalność. Na potrzeby tego opracowania zamieszczono jedynie wykres dla stawu kolanowego. Etapy pracy programu oraz uzyskane wyniki przedstawione zostały na poniższych rys. 1 – 2:



Rys. 1. Etapy analizy chodu: a – zarejestrowany obraz, b – model fenomenologiczny, c – widok łączony

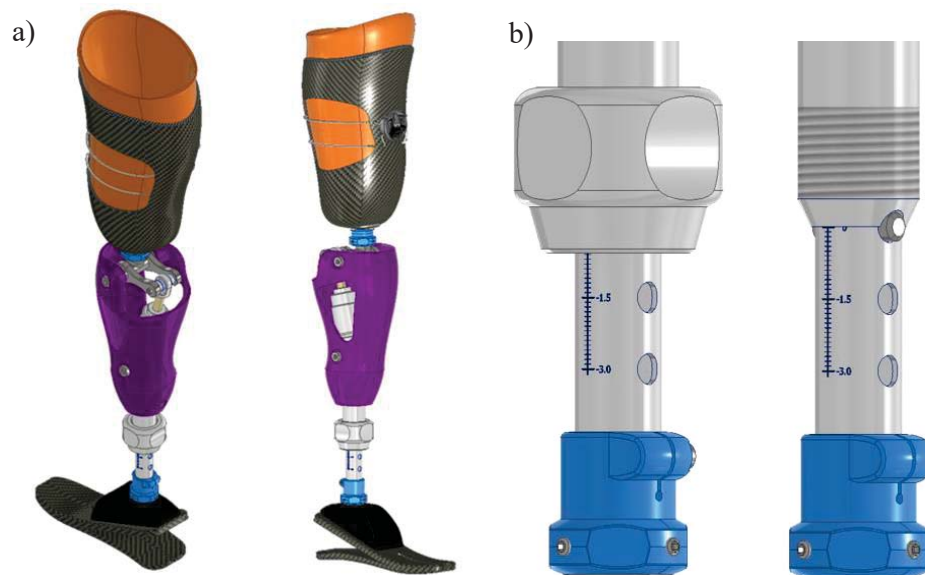
Fig. 1. Gait analysis stages: a – raw footage, b – sticks, c – combined view



Rys. 2. Zakresy kątowe dla stawu kolanowego
Fig. 2. Angular motion range for right knee joint

3. Model protezy

Przestrzenny model protezy uwzględniający poczynione założenia, wyniki analiz oraz proponowane rozwiązania został wykonany w oprogramowaniu CAD Autodesk Inventor. Wybrane widoki modelu przedstawiono na poniższych rys. 3a – 3b:



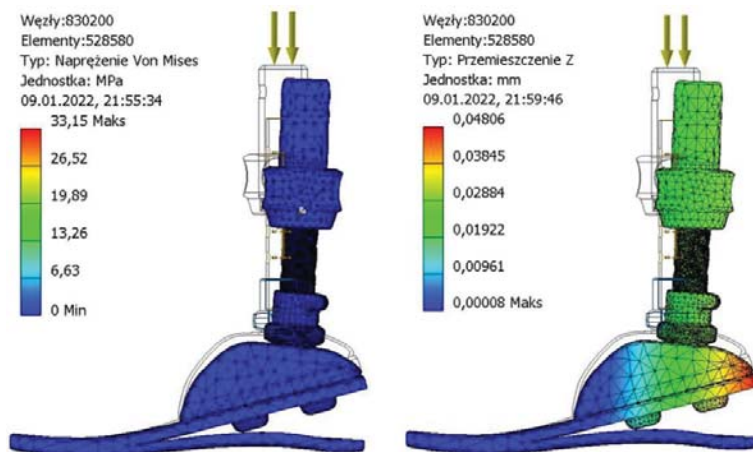
Rys. 3. a) Model CAD protezy – widok ogólny, b) segment teleskopowy
Fig. 3. a) CAD model of leg prosthesis – overall view, b) telescopic module

Model protezy widoczny na rys.3a składa się ze stopy protezowej ze zintegrowanym stawem skokowym, segmentu teleskopowego, kolana protezowego z modulem pneumatycznym oraz leja protezowego. Budowa leja oparta jest o hybrydową konstrukcję wykorzystującą skorupę z kompozytu węglowego oraz wewnętrzną wkładkę z silikonu (ang. *liner*), która ma bezpośredni kontakt z ciałem pacjenta. Dla umożliwienia regulacji obwodu, na skorupie umieszczono system linek BOA[®], powszechnie stosowany w rozwiązaniach ortopedycznych. Regulacja długości protezy realizowana jest poprzez element łączący znajdujący się w miejscu kości piszczelowej. Przyjmuje on postać segmentu teleskopowego o pięciu poziomach regulacji, w którego skład wchodzi: rura węższa z nawierconymi pięcioma otworami (co 15 milimetrów), rura szersza z gwintem zewnętrznym, trzpień ustalający oraz nakrętka z „koszykiem”, w którym od wewnątrz opiera się trzpień. Regulacja długości odbywa się poprzez przełożenie trzpienia przez wybrany otwór i dokręceniu nakrętki tak aby trzpień oparł się o jej wewnętrzną część. Implementacja takiego rozwiązania jest efektem niszy rynkowej, gdzie jedyne elementy zapewniające regulację długości przyjmują postać obejm zaciskowych, nakładając tym samym restrykcyjny limit wagi, wynoszący jedynie 45 kg [4].

4. Analiza wytrzymałościowa

W celu weryfikacji modelu protezy przeprowadzono statyczną analizę wytrzymałościową opartą o wykorzystanie metody elementów skończonych (MES). Model został obciążony siłą odpowiadającą największej możliwej masie dziecka, która zgodnie z przewidywaniami wynosi 73 kg [6]. Mając na względzie specyfikę chodu, w szczególności składową pionową reakcji podłoża, która w oparciu o wyniki badań biomechaniki chodu dzieci [2] wynosi 105% masy

ciała, za wartość maksymalną przyjęto obciążenie równe 77,7 kg. Na drodze analizy realnych warunków, w których pracuje proteza, wartość siły zdefiniowano jako równomierny naciski na wybraną powierzchnię. Obciążenie to w warunkach eksploatacji traktowane jest więc jako ciśnienie. Rozkład naprężeń redukowanych oraz przemieszczeń dla maksymalnego obciążenia przedstawiony jest na poniższym rys. 4:



Rys. 4. Wyniki analizy MES: a) Rozkład naprężeń redukowanych, b) rozkład przemieszczeń w osi pionowej

Fig. 4. FEM analysis results: a) vonMises stresses distribution, b) distribution of displacements in the vertical axis

5. Wnioski i perspektywa rozwoju

1. Zgodnie z celem projektu wymiana poszczególnych elementów protezy jest możliwa dzięki konstrukcji, w której poszczególne moduły są ze sobą połączone systemem adapterów.
2. Zakres regulacji segmentu teleskopowego pozwala na wydłużenie lub skrócenie protezy o 3 centymetry względem położenia bazowego. Pełny zakres regulacji wynosi zatem 6 cm, co przy odpowiednich założeniach pozwoli na dwuletni okres eksploatacji [1,6].
3. Należy zaznaczyć, że omawiana koncepcja protezy kończyny dolnej jest w dużej mierze zagadnieniem teoretycznym, w którym główną ideą było zwrócenie uwagi na aspekt ciągłego rozwoju fizycznego dziecka, tym samym problemów i wymagań konstrukcyjnych przez niego generowanych. Projekt nie jest wolny od wad, jednak jego rozwijanie może przynieść efekt w postaci pełnoprawnego wyrobu medycznego.

Literatura

1. Fredriks A. M.: Nationwide age references for sitting height, leg length, and sitting height ratio, and diagnostic value for disproportionate growth disorders. UMC, Holandia 2005.
2. Praca zbiorowa / pod red. Tejszarskiej D., Jureczko P.: Analiza Biomechaniczna chodu dzieci z zastosowaniem systemu BTS SMART. KMS, Politechnika Śląska, Gliwice 2009.
3. Burczyński T.: Metoda elementów brzegowych w mechanice. Wspomaganie komputerowe CAD-CAM, WNT, Warszawa, 1995.
4. <https://www.ossur.com/en-us/adapters/height-adjustable-pylon>, dostęp: 20.04.2022
5. <https://www.ottobock.com/pl-pl/przed-amputacja-nogi>, dostęp: 20.04.2022
6. <http://siatkicentylowe.edziecko.pl>, dostęp: 18.04.2022.

OPTYMALIZACJA KRATOWNICY ZA POMOCĄ SZTUCZNEGO SYSTEMU IMMUNOLOGICZNEGO

inż. DAWID KLICH,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AC7, semestr I, 2 stopień

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

Streszczenie. Artykuł dotyczy optymalizacji kratownicy przy użyciu Sztucznego Systemu Immunologicznego. Dla przedstawionej w artykule kratownicy przeprowadzono obliczenia analityczne metodą Castigliana, a następnie napisano program komputerowy w języku programowania C++. Oczekiwany rezultatem optymalizacji było otrzymanie kratownicy dla minimalnej wartości funkcji celu (uzależnionej od przemieszczenia jednego z węzłów kratownicy) przy ustalonym uprzednio zakresie parametrów decyzyjnych.



TRUSS OPTIMIZATION BY MEANS OF ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM

Abstract. The article is devoted to the optimization of the truss using the Artificial Immune System. The analytical calculations by the Castigliano method were performed for truss presented in this article. Then a computer program in the C ++ programming language was written. The expected result of the optimization was to obtain a truss for the minimum value of the fitness function (depending on the displacement of one of the truss points) with a predetermined range of decision parameters.

1. Wprowadzenie

Celem optymalizacji jest znalezienie najlepszego rozwiązania dla danego problemu według przyjętego kryterium optymalizacji, opisanego funkcją celu, które spełnia wszystkie nałożone ograniczenia [1]. W niniejszym artykule poszukiwana była optymalna postać kratownicy, dla której przemieszczenie jednego z węzłów wynosiło założoną arbitralnie wartość. Proces przygotowania i przeprowadzenia optymalizacji został podzielony na kilka etapów takich jak:

- a) obliczenia analityczne założonego układu mechanicznego (kratownicy) z zachowaniem ustalonych zmiennych decyzyjnych,
- b) napisanie programu komputerowego w języku programowania C++ wykorzystującego przeprowadzone wcześniej obliczenia,
- c) przeprowadzenie optymalizacji z wykorzystaniem Sztucznego Systemu Immunologicznego dla założonej funkcji celu.

2. Sztuczny System Immunologiczny (SSI)

Zagadnienia optymalizacji układów mechanicznych należą do zadań trudnych i czasochłonnych obliczeniowo. Wynika to zarówno z potrzeby poszukiwania optimum globalnego rozwiązywanego zadania jak i konieczności wielokrotnego rozwiązywania złożonych fizycznie i geometrycznie zadań bezpośrednich w postaci zagadnień brzegowych lub

brzegowo-początkowych. Istnieje wiele bio-inspirowanych metod optymalizacji, m.in. takich jak algorytmy ewolucyjne, algorytmy rojowe czy sztuczne systemy immunologiczne. Sztuczne Systemy Immunologiczne (SSI) zastosowane w niniejszej pracy wykorzystują kilka elementów znanych z naturalnego systemu immunologicznego takie jak: mechanizmy selekcji klonalnej lub mechanizmy selekcji pozytywnej i negatywnej. W niniejszym artykule wykorzystany został mechanizm selekcji klonalnej bazujący na naturalnym mechanizmie selekcji klonalnej.

W pierwszym etapie działania SSI tworzona jest grupa komórek pamięci. Każda z komórek pamięci jest jednym z możliwych rozwiązań, które na podstawie jego parametrów sterujących decydują o otrzymanym rozwiązaniu (np. postaci konstrukcji). Kolejnym etapem SSI jest proliferacja, tzn. namnażanie komórek pamięci, co wiąże się z tym, że dla każdej komórki pamięci tworzona jest pewna liczba jego klonów. Podczas stosowania operatora klonowania namnażane są komórki z wysokim stopniem dopasowania. W niniejszym artykule zastosowano podejście, gdzie dla najlepszej komórki pamięci generowana jest założona wartość klonów, natomiast dla każdej kolejnej komórki pamięci tylko połowa założonej wartości klonów. Kolejnym elementem tego algorytmu jest mechanizm hipermutacji. Podstawowym zadaniem tego operatora jest dbanie o powstanie nowych, zróżnicowanych komórek. Działanie hipermutacji polega na wprowadzaniu losowych modyfikacji rozpatrywanego osobnika. W niniejszym algorytmie zastosowano probabilistyczny sposób modyfikacji losowo wybranego osobnika (mutacja z rozkładem Gaussa). Kolejny etap to wybór rozwiązań do następnej iteracji (selekcja). Podstawowym zadaniem selekcji jest zastąpienie mało efektywnych komórek pamięci bardziej efektywnymi klonami, o ile takie istnieją. Ostatni etap sztucznego systemu immunologicznego to zastosowanie mechanizmu zatłoczenia. Jest to etap, mający na celu utrzymanie zróżnicowania populacji komórek pamięci. Warunek zatrzymania może być sformułowany jako maksymalna liczba iteracji, oczekiwana wartość funkcji celu, bądź też jako minimalna oczekiwana poprawa funkcji celu na przestrzeni kilku iteracji (zastosowany w tym artykule) [1].

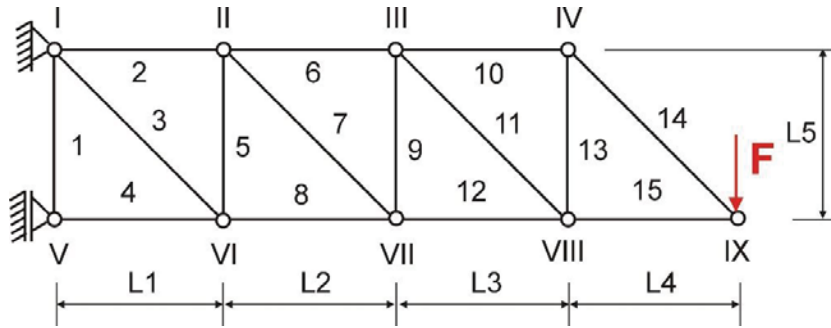
W niniejszym algorytmie zastosowano następujące parametry SSI: liczba komórek pamięciowych oraz ich klonów określających liczebność rozwiązań w każdej iteracji, prawdopodobieństwo mutacji Gaussa określające szanse na modyfikację komórek pamięciowych wraz z rozkładem Gaussa oraz współczynnik zatłoczenia określający wielkość obszaru poszukiwania podobnych rozwiązań, tak aby utrzymać zróżnicowanie rozwiązań [1].

3. Obliczenia analityczne – ugięcie kratownicy

W artykule wykorzystano zagadnienia dotyczące obliczeń wytrzymałościowych wykorzystując twierdzenie Castigliana. Analizowany przykład to płaska kratownica złożona z 15 prętów. Kratownica ulega odkształceniu w wyniku działania siły F przyłożonej w węźle IX (rys. 1). Ugięcie kratownicy jest liczone z wykorzystaniem twierdzenia Castigliana jako przemieszczenie odpowiadające sile F . Kratownica podparta jest w dwóch węzłach: I i V. Pole przekroju poprzecznego wszystkich prętów kratownicy ma taką samą wartość i wynosi A . Do wykonania obliczeń analitycznych zastosowano dane przedstawione w Tabeli 1.

Tabela 1. Parametry wykorzystane podczas obliczeń analitycznych
Table 1. Parameters used during analytical calculations

$L1$ [mm]	$L2$ [mm]	$L3$ [mm]	$L4$ [mm]	$L5$ [mm]	E [MPa]	A [mm ²]	F [N]	U_{IX} [mm]
1000	1000	1000	1000	1000	210000	900	1000	0,308538



Rys. 1. Wizualizacja badanego układu
Fig. 1. Visualization of the tested system

Obliczenia rozpoczęto od sprawdzenia statycznej wyznaczalności układu. W przedstawionym przykładzie układ jest statycznie wyznaczalny. Wykonanie obliczeń analitycznych dla przykładu optymalizacji kratownicy odbyło się przy zastosowaniu metody równoważenia węzłów, z uwzględnieniem działania siły F w każdym równaniu [3]. Zachowanie siły F w równaniach jest niezbędne do obliczenia pochodnych po tej sile dla każdego pręta, aby w ostatnim etapie możliwe było zastosowanie twierdzenia Castigliana w celu policzenia ugięcia kratownicy w węźle nr IX według wzoru (1):

$$U_{IX} = \frac{1}{EA} * \sum_{i=1}^{15} \int_0^{L_i} \left(N_i * \frac{\partial N_i}{\partial F} dx_i \right) \quad (1)$$

gdzie: N_i – siły wewnętrzne (normalne) w poszczególnych prętach.

Po obliczeniu wszystkich wartości sił wewnętrznych oraz ich pochodnych po sile F dla każdego pręta i zastosowaniu twierdzenia Castigliano ugięcie wynosi:

$$U_{IX} = 0.31 \text{ [mm]} \quad (2)$$

4. Optymalizacja kratownicy

Optymalizacji kratownicy przeprowadzona została dla funkcji celu:

$$J = \min (|U_{IX} - 0,2|) \quad (3)$$

Zmiennymi decyzyjnymi wybranymi w procesie optymalizacji były parametry $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ i $L5$ oraz pole przekroju poprzecznego wszystkich prętów kratownicy A (Tabela 2). Dla funkcji celu (3) poszukiwana była taka postać kratownicy, dla której przemieszczenie pionowe węzła IX wynosiło 0,2 mm. Wartość siły F to 1000 N, a moduł Younga E to 210 GPa.

Tabela 2. Zakres zmiennych decyzyjnych podczas optymalizacji
Table 2. Range of decision variables in optimization

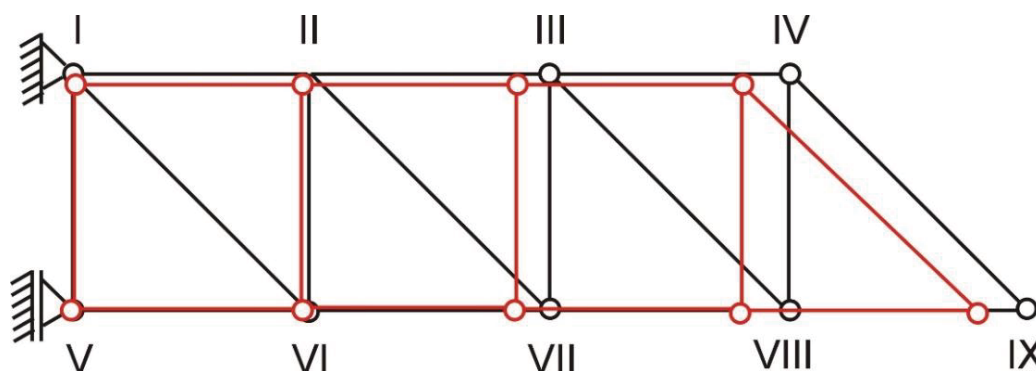
$L1$ [mm]	$L2$ [mm]	$L3$ [mm]	$L4$ [mm]	$L5$ [mm]	A [mm ²]
800-1000	800-1000	800-1000	800-1000	800-1000	900-1600

Optymalizacja przeprowadzona została dla następujących parametrów SSI: liczba komórek pamięciowych: 5 liczba klonów: 5, prawdopodobieństwo mutacji Gaussa: 0,5 oraz współczynnik zatłoczenia: 0,5. W procesie optymalizacji uzyskano postać kratownicy o zmiennych opisanych w tabeli 3 wraz z informacją o funkcji celu, dla których przemieszczenie węzła IX wynosiło 0,2 mm z dokładnością do jednego miejsca po przecinku (funkcja celu bliska zero).

Tabela 3. Parametry wariantu optymalnego
Table 3. Parameters of the optimal variant

Zmienne decyzyjne	$L1$ [mm]	$L2$ [mm]	$L3$ [mm]	$L4$ [mm]	$L5$ [mm]	A [mm ²]	J [mm]
Wartość parametru	962,5	917,4	935,0	908,6	988,4	1306,8	0,000027

Rysunek 2 przedstawia porównanie postaci kratownicy przed i po optymalizacji.



Rys. 2. Kratownica: a) przed optymalizacją – kolor czarny, b) po optymalizacji – kolor czerwony

Fig. 2. Truss: a) before optimization – black colour, b) after optimization – red colour

5. Wnioski

Sztuczny system immunologiczny zastosowany podczas optymalizacji pozwolił na znalezienie kratownicy spełniającej założone wymagania konstrukcyjne. SSI pozwala na przyspieszenie procesu wyboru odpowiedniego rozwiązania – nie ma konieczności analizy wszystkich możliwych wariantów. Wykorzystanie obliczeń analitycznych do wyznaczenia przemieszczenia założonego węzła kratownicy nie wymagało stosowania metod numerycznych takich jak metoda elementów skończonych (MES) - nie jest konieczne korzystanie z komercyjnego oprogramowania.

Literatura

1. Poteralski A., Optymalizacja immunologiczna układów mechanicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2015).
2. Prata S., Język C++. Szkoła programowania, Wydawnictwo HELION, Gliwice (2012).
3. Zielnica J., Wytrzymałość materiałów, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (1996).

ZDALNE STANOWISKO LABORATORYJNE DO ROZWOJU SYSTEMÓW DETEKCJI I IZOLACJI CYBERATAKÓW

inż. MICHAŁ KOBIELSKI,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AB5, semestr I, 2 stopień

inż. KRYSTIAN LORANC,

Automatyka i Robotyka, Robotyka, semestr I, 2 stopień

Opiekunowie naukowci: Dr hab. inż. Piotr Przyszałka, Prof. PŚ, Dr inż. Wawrzyniec Panfil

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest zdalne stanowisko laboratoryjne dedykowane do badań i rozwoju systemów detekcji i izolacji cyberataków z wykorzystaniem metod komputerowych. W pracy przedstawiono główne elementy z jakich składa się stanowisko oraz omówiono jego najważniejsze funkcjonalności. Omówiono również testy weryfikacyjne.



REMOTE LABORATORY STAND TO DEVELOP CYBERATTACK DETECTION AND ISOLATION SYSTEMS

Abstract. The main subject of the article is remote laboratory stand dedicated to develop cyberattack detection and isolation systems with using computer methods. In this paper, there were described main parts, the laboratory stand consists of and there was also mentioned the functionality of laboratory stand. There were also marked out the verification tests.



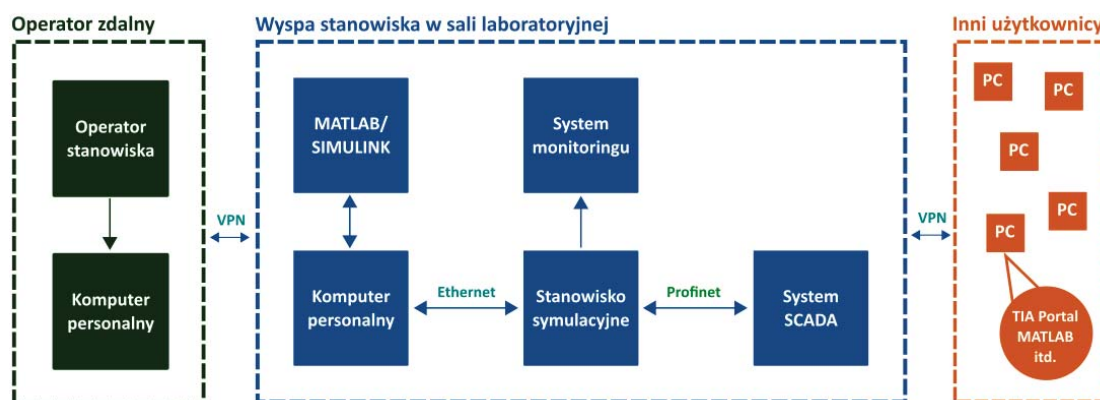
1. Wprowadzenie

Czasami w przypadku prowadzenia badań laboratoryjnych lub pracy dydaktycznej pojawiają się trudności z dostępem do aparatury laboratoryjnej, co niesie za sobą konieczność zapewnienia zdalnego przesyłania danych pomiarowych, jak i również zdalnego sterowania stanowiskiem. Wśród czynników utrudniających dostęp mogą być przykładowo szkodliwe dla zdrowia człowieka warunki na dnie oceanu [7], na szczycie Mount Everest [4], czy też w miejscu objętym kwarantanną [5]. Wraz z szybkim rozwojem Internetu od 1990 zdalne stanowiska laboratoryjne zyskują na popularności i coraz częściej zaczynają się pojawiać na uczelniach. Wśród zalet zdalnego laboratorium można wymienić zwiększenie liczby przeprowadzanych doświadczeń, redukcję kosztów, jak i znaczne ułatwienie dostępu dla studentów [8]. Przykładami uczelni, które zdecydowały się na utworzenie takich stanowisk są The Open University, gdzie utworzono zdalne stanowisko do analizy spektrometrycznej [10], Uniwersytet w Sydney, gdzie opracowano zdalnie sterowane przeprowadzania eksperymentów dotyczących badania wytrzymałości belek na zginanie [3], Uniwersytet w Hadze, gdzie zostało utworzone zdalne stanowisko do praktycznej nauki układów sterowania [2], czy Instytut Stevens'a, gdzie utworzono zdalne laboratorium do analizy ruchu różnych układów mechanicznych [9]. Wraz z wybuchem pandemii Covid-19 pojawiła się potrzeba utworzenia zdalnego stanowiska laboratoryjnego, które umożliwi ciągłą realizację badań przemysłowych i prac rozwojowych oraz prowadzenie zajęć dydaktycznych dotyczących zagadnień cyberbezpieczeństwa przy ograniczonym dostępie do budynków uczelni [6].

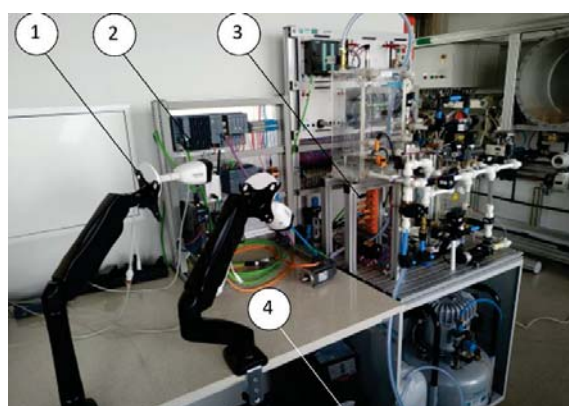
W artykule opisano nową wersję stanowiska laboratoryjnego przedstawionego w pracy [1]. Przedstawione wyniki prac projektowych uzyskano dzięki dofinansowaniu w ramach III konkursu dla projektów realizowanych przez SKN działające na Politechnice Śląskiej, Inicjatywa Doskonałości - Uczelnia Badawcza.

2. Zdalne stanowisko laboratoryjne

Zdalne stanowisko laboratoryjne można podzielić na 3 części (rys. 1). Pierwsza część znajduje się z operatorem i jego komputerem personalnym w dowolnym miejscu na ziemi z dostępem do Internetu, natomiast w sali laboratoryjnej (rys. 2) znajduje się stanowisko symulacyjne (3) wraz z systemem SCADA wygenerowanym na komputerze przemysłowym Siemens ET200 SP (2), systemem monitoringu (1) oraz komputerem personalnym (4). Dostęp do sieci w sali uzyskiwany jest poprzez usługę VPN. Poza operatorem dostęp do stanowiska mogą mieć również inni użytkownicy z całego świata, jeżeli tylko będą mieli dostęp do Internetu oraz dostaną odpowiedni dostęp do połączenia VPN.



Rys. 1. Uproszczony schemat stanowiska laboratoryjnego
Fig. 1. Simplified scheme of laboratory stand



Rys. 2. Zdalne stanowisko laboratoryjne do rozwoju systemów detekcji i izolacji cyberataków
Fig. 2. Remote laboratory stand to develop cyberattack detection and isolation systems

Opracowane stanowisko pozwala na pracę badawczą w zakresie zbierania i analizowania danych w celu opracowywania i implementacji systemów diagnostycznych. Pozwalają na to

środowiska takie jak MATLAB, Simulink, Anaconda, lub też inne oprogramowanie wykorzystujące biblioteki w zakresie uczenia maszynowego. Agregację danych ułatwia fakt, że podczas projektu stanowisko zyskało możliwość pracowania w trybie w pełni zautomatyzowanym.

Poza powyższą funkcjonalnością, stanowisko laboratoryjne umożliwia operatorowi zdalną symulację jednego z pięciu scenariuszy, podczas których każdy z procesów automatycznej regulacji może zostać zdalnie uruchomiony przez operatora za pośrednictwem utworzonej wizualizacji. Pierwszy ze scenariuszy zakłada stan pełnej zdadności stanowiska i jest stanem bazowym dla których wszystkie procesy przebiegają w sposób poprawny. Dla kolejnych 3 scenariuszy, przeprowadzana jest zdalna symulacja cyberataku na stanowisko, natomiast ostatni ze scenariuszy zakłada zdalną symulację wycieku medium roboczego ze zbiornika. Scenariusze cyberataków przeprowadzane są poprzez zdalną modyfikację zmiennych w zachodzących na stanowisku procesach. Symulacja uszkodzenia zbiornika odbywa się z wykorzystaniem układu do zdalnego opróżnienia stanowiska z medium roboczego. Skutek symulacji scenariusza można zaobserwować zarówno na wizualizacji SCADA, jak i poprzez system monitoringu zainstalowany przy stanowisku, a dzięki funkcjonalności pracy zdalnej operator ma również możliwość udostępniania ich podglądu szerszemu gronu odbiorców z całego świata za pośrednictwem telekonferencji.

3. Testy weryfikacyjne

W celu weryfikacji poprawności działania stanowiska przeprowadzono testy jednostkowe trybu manualnego i automatycznego oraz testy zasadnicze dla obu tych trybów.

Testy jednostkowe zakładały kolejno zdalne uruchamianie wszystkich stanów automatycznej regulacji aby sprawdzić czy komunikacja między zdalnym panelem operatorskim a stanowiskiem zachodzi poprawnie. Wykazały one poprawność działania zdalnego panelu operatorskiego dla stanowiska.

Testy zasadnicze natomiast zakładały, że zostanie również sprawdzona skuteczność w odniesieniu do zaplanowanych scenariuszy przeprowadzenia oraz detekcji zdalnych cyberataków i uszkodzeń na stanowisko laboratoryjne.

Tabela 3. Testy zasadnicze dla trybu ręcznego
Table 1. Fundamental tests for manual mode

Tryb ręczny				
	Test1	Test2	Test3	Test4
Wartość zadana poziomowi cieczy w zbiorniku B102 [mm]	0	100	0	0
W. mierzona poziomowi cieczy w zbiorniku B102 [mm]	80	22	22	0
W. zadana ciśnienia cieczy w zbiorniku B103 [mBar]	200	0	0	0
W. mierzona ciśnienia cieczy w zbiorniku B103 [mBar]	164-224	0	0	0
W. zadana przepływu cieczy w układzie [l/min]	0	0	2	0
W. mierzona przepływu cieczy w układzie [l/min]	0,4	0,4-20	0,4-2,1	0
Stan zadany otwarcia elektrozaworu NC V101 [0/1]	0	1	0	1
Stan zmierzony otwarcia elektrozaworu NC V101 [0/1]	0	1	0	1
...(pozostałe elektrozawory)				
Stan zadany otwarcia elektrozaworu NC V112 [0/1]	0	0	0	1
Stan zmierzony otwarcia elektrozaworu NC V112 [0/1]	0	0	0	0
Czy został wygenerowany sygnał diagnostyczny [0/1]	1	1	0	0
Czy miał miejsce cyberatak? [0/1]	1	1	0	1

Wyniki testów zasadniczych dla trybu manualnego zostały zestawione w tabeli 1. Zostały tam przedstawione wartości zadane dla stanów automatycznej regulacji oraz wartości mierzone. Analizowane było, czy w przypadku symulacji cyberataku, wartość mierzona odbiega od wartości zadanej oraz, czy wysyłany jest sygnał diagnostyczny. Wyniki te pokazały, że tylko scenariusz analizowany w teście 4 nie był przygotowany na ewentualne modyfikacje i pomimo skutecznie przeprowadzonego cyberataku sygnał diagnostyczny nie został wygenerowany.

Poza powyższymi testami miały również miejsce testy stanowiska podczas wydarzeń. W pierwszej kolejności stanowisko zaprezentowano zdalnie na Giełdzie Pracodawcy, Przedsiębiorczości i Technologii, gdzie przedstawiano automatyczny tryb pracy oraz symulację zdalnego cyberataku polegającego na niestabilnej regulacji ciśnienia w zbiorniku. Następnie stanowisko prezentowano stacjonarnie na Szczycie Cyfrowym ONZ – IGF 2021, gdzie prezentowano nową funkcjonalność trybu automatycznego.

4. Podsumowanie

Podsumowując, utworzone stanowisko laboratoryjne pozwala na pracę zarówno badawczą, jak i dydaktyczną w zakresie zbierania analizy danych. Osiągnięta funkcjonalność pozwala na prowadzenie badań z dowolnego miejsca na ziemi z dostępem do Internetu oraz na prezentowanie ich zdalnie szerszemu gronu odbiorców. Testy weryfikacyjne potwierdziły skuteczność działania stanowiska dla wszystkich wcześniejszych scenariuszy, poza jednym który nie uwzględniał modyfikacji budowy stanowiska.

Literatura

1. Hańderek W., Kobielski M., Polnik P., A concept of ICS cybersecurity benchmark problem, Studencka Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe – 2020”, Gliwice, s. 33-36, (2020).
2. Kaderali F. et al., Studying electrical engineering in the virtual university, International Journal of Engineering Education, Vol. 17, nr. 2, s. 119-130, (2001).
3. Lowe D. et al. Reflecting professional reality in remote laboratory experiences, Proc. International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, (2008).
4. Matthews T. et al., Going to extremes: installing the world's highest weather stations on Mount Everest, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 101, nr. 11, s. 1870-1890, (2020).
5. Meir N. V. et al., The experimental platform in Chernobyl: an international research polygon in the exclusion zone for soil and groundwater contamination, Radioactive Particles in the Environment, Springer, s. 197-208, (2009).
6. Mohammed A. K. et al., Remote controlled laboratory experiments for engineering education in the post-covid-19 era: Concept and example, 2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference, s. 629-634, (2020).
7. Momma H., Deep ocean technology at jamstec, Marine Technology Society Journal, Vol. 33, nr. 4, s. 49-64, (1999).
8. Nedić Z. et al., The history of developments of remote experiments, University of South Australia Adelaide, Australia, (2011).
9. Nickerson J. V. et al., A model for evaluating the effectiveness of remote engineering labs and simulations in education, Computers & Education, Vol. 49, s. 708-725, (2007)
10. Scanlon E. et al., Remote experiments, reversioning and re-thinking science learning, Computers & Education, Vol. 43, s. 153-163, (2004).

WYBRANE ANALIZY PRZEPŁYWU PŁYNÓW Z UŻYCIEM OPROGRAMOWANIA OPENFOAM

inż. WOJCIECH KOKOT,

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

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Wacław Kuś, Prof. PŚ

Streszczenie. Artykuł przedstawia opis zastosowania oprogramowania OpenFOAM do analizy przepływu płynów. W pracy przedstawiono opis struktury plików programu oraz sposób doboru poszczególnych parametrów związanych z analizą. Na przykładzie omówiony jest sposób opisu geometrii modelu zaimportowanego z komercyjnego programu CFD. Zaprezentowana została również metoda opisywania warunków brzegowych wraz z przetwarzaniem końcowym wyników za pomocą programu ParaView.



SELECTED FLUID FLOW ANALYSIS USING OPENFOAM SOFTWARE

Abstract. The article describes a use of OpenFOAM software for fluid flow analysis. The work describes the structure of the program files and explains the selection of individual parameters of the analysis settings. An example presents a method of describing a geometrical form of a model imported from a commercial CFD program. The method of describing the boundary conditions with the post-processing of results using the ParaView program was also presented.

1. Wprowadzenie

Obliczeniowa mechanika płynów, nazywana w skrócie CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) to dział mechaniki płynów, który wykorzystuje metody numeryczne do badania przepływów cieczy, wymiany ciepła oraz zjawisk z nimi związanych, takich jak np. reakcje chemiczne. Symulacje CFD są bardzo wszechstronne o czym świadczy ich szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłowych oraz poza nimi.

Celem rozwoju narzędzi CFD jest zapewnienie im możliwości podobnych do innych narzędzi CAE (ang. *Computer Aided Engineering*) takich jak narzędzia do analiz naprężeń.

Pomimo posiadania wielu zalet systemy CFD nie mogą być używane bez posiadania wiedzy z zakresu mechaniki płynów i mimo rosnącej mocy obliczeniowej komputerów nie pozwalają na prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym. Analizy z wykorzystaniem symulacji komputerowych wymagają dużej ilości czasu zarówno na przygotowanie oraz przeprowadzenie obliczeń.

OpenFOAM to bezpłatne oprogramowanie CFD o otwartym kodzie źródłowym. Posiada szeroki zakres zastosowań takich jak analizy z zakresu przepływów cieczy, akustyki, mechaniki ciała okształcalnego i elektromagnetyzm. Użytkownicy tego oprogramowania stosują je do rozwiązywania problemów inżynierii zarówno komercyjnie jak i w środowisku akademickim [1]. Popularność programu zarówno wśród środowiska naukowego jak również zastosowań przemysłowych wynika przede wszystkim z otwartej formy tego oprogramowania oraz dużych możliwości obliczeniowych pokrywających większość problemów mechaniki płynów.

OpenFOAM jest systemem typu opensource, a więc dostępnego bezpłatnie dla każdego na prawach licencji typu freeware. Dodatkowo system ten skupia dużą społeczność użytkowników, która pracuje nad jego rozwojem, dokumentowaniem i weryfikowaniem dokładności obliczeniowej.

2. Procedura pracy z oprogramowaniem CFD

Wykonanie symulacji numerycznej większości problemów z zakresu mechaniki płynów wymaga przygotowania odpowiedniego modelu numerycznego. Typowa procedura przygotowania modelu numerycznego składa się z trzech głównych elementów:

1. Wstępne przetwarzanie danych (ang. *pre-processing*), które obejmuje działania związane z definicją modelu, dyskretyzacją obszaru, definicją własności cieczy oraz analizy zjawisk fizycznych i chemicznych.

2. Numeryczne rozwiązanie problemu (ang. *solving*) - większość programów komputerowych do obliczeń zagadnień mechaniki płynów wykorzystuje przede wszystkim metodę objętości skończonych. W metodzie tej obszar analizowany dzielony jest na objętości kontrolne obejmujące węzły obliczeniowe (zazwyczaj położone w środku elementu), w których uśredniane są poszukiwane wielkości.

3. Przetwarzanie końcowe wyników (ang. *post-processing*) - przetwarzanie końcowe polega na wizualizacji wyników i obserwacji zachowań modelu. Do elementów charakterystycznego przetwarzania końcowego należą wybory odpowiednich perspektyw i płaszczyzn do wizualizacji oraz tworzenie wykresów obrazujących własności oraz przebieg zmiennych podczas symulacji.

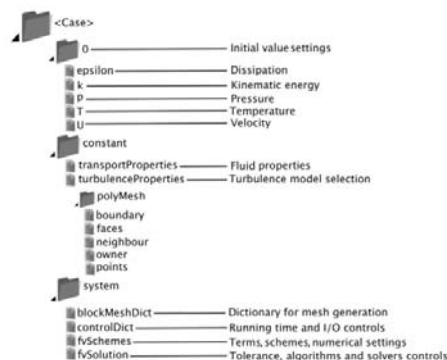
3. Przygotowanie zadania w oprogramowaniu OpenFOAM

W celu rozwiązania prostych przykładów analiz (instalowanych wraz z oprogramowaniem) za pomocą programu OpenFOAM należy wykonać następujące kroki:

1. należy wybrać solver OpenFOAM, który odpowiada interesującemu nas typowi analizy,
2. wybór istniejącego przykładu spośród gotowych zadań OpenFOAM znajdujących się w folderze *tutorials*,
3. zmiana parametrów symulacji dotyczących czasu rozpoczęcia, kroku czasowego oraz podobnych wartości w pliku *controlDict*. Ustawienia dotyczące własności cieczy znajdują się w folderze *constant*,
4. przygotowanie siatki elementów objętościowych za pomocą aplikacji *blockMesh* lub *snappyHexMesh* lub zaimportowanie gotowej siatki przygotowanej w innym oprogramowaniu,
5. modyfikacja warunków brzegowych w pliku *constant/polymesh/boundary*,
6. modyfikacja warunków brzegowych i warunków początkowych w folderze *0* pierwszej iteracji,
7. rozpoczęcie symulacji,
8. przetwarzanie wyników z wykorzystaniem np. programu ParaView.

4. Analiza przepływu icoFoam

Analizy w programie OpenFOAM posiadają podstawową strukturę plików. Wyróżnia się trzy główne katalogi: *0*, *constant*, *system*. Szczegółowe drzewo folderów zostało przedstawione na rysunku 1.



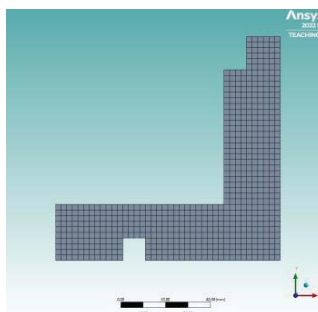
Rys. 1. Drzewo struktury plików dla typowej analizy w programie OpenFOAM [3]

Fig. 1. File structure for analysis in OpenFOAM

W OpenFOAM występuje wiele typów algorytmów obliczeniowych [4]. Jednym z nich jest algorytm icoFoam, który pozwala na analizę przepływu laminarnego cieczy newtonowskich. W celu przeprowadzenia prostej symulacji należy na podstawie dostępnych przykładowych zadań utworzyć nowy katalog z własnym projektem z zachowaniem niezbędnej struktury plików. Przykładowe rozwiązania dostępne są w katalogu *tutorials* i są uporządkowane w folderach zgodnie z rodzajami solverów programu OpenFOAM.

Na potrzebę tego projektu w celu utworzenia modelu oraz utworzenia siatki zastosowano oprogramowanie Ansys Workbench. Wewnątrz modułu Ansys Fluent utworzony został model wraz z siatką przedstawiony na rysunku 2. Po wygenerowaniu siatki, została ona wyeksportowana do formatu Fluent (.msh). W trakcie tworzenia modelu ważne jest odpowiednie oznaczenie wlotu, wylotu oraz ścian modelu. W przypadku tej analizy zakłada się analizę płaską, dwuwymiarową. Modelowi nadano jednostkową grubość i dodatkowo odznaczono ściany w płaszczyźnie, w której rozważane są obliczenia. Siatka po wyeksportowaniu do folderu projektu została przekształcona do formatu odpowiadającego programowi OpenFOAM za pomocą komendy *FluentMeshToFoam*.

W przeprowadzanej symulacji zakłada się, że dwuwymiarowy płaski obszar „kolanka” ma wlot cieczy po lewej stronie i zwężony wylot po stronie prawej u góry.

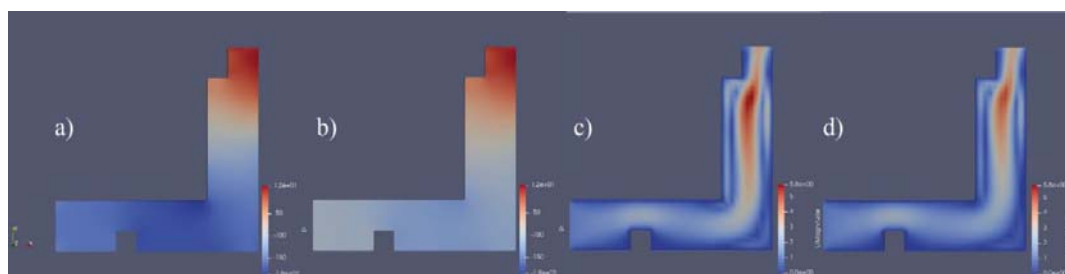


Rys. 2. Model wraz z siatką utworzone w programie Ansys Workbench

Fig. 2. Model with a mesh created in Ansys Workbench

Po utworzeniu siatki w programie OpenFOAM konieczna jest edycja plików zawierających informacje o warunkach brzegowych. Należy edytować plik *boundary* opisujący postać geometryczną modelu oraz pliki *p* i *U*, które odpowiadają za początkowe wartości ciśnienia oraz prędkości cieczy [5]. W pliku *controlDict* można edytować ustawienia systemowe analizy. Wartość, która zazwyczaj odpowiada krokowi czasowemu w przypadku analizy w stanie ustalonym musi być jednostkowa. Wszystkie ustawienia dotyczące czasu w takim przypadku interpretowane są jako ustawienia liczby iteracji podczas symulacji [6].

W procesie przetwarzania końcowego uzyskano mapy rozkładu prędkości oraz ciśnienia w przekroju modelu, które można obserwować na rysunku 3. Wyświetlenie wyników analizy programu OpenFOAM wymaga wygenerowania pliku wyjściowego. Za pomocą komendy *touch* można uzyskać plik o rozszerzeniu *.foam*, który z łatwością jest otwierany w środowisku programu ParaView.



Rys. 3. Mapa rozkładu prędkości przepływu cieczy a) w pierwszej, b) dziesiątej sekundzie symulacji i ciśnienia c) w pierwszej i d) dziesiątej sekundzie wewnątrz przekroju modelu

Fig. 3. Results of fluid velocity in a) first, b) tenth second and results of fluid pressure in c) first and d) tenth second inside cross-section of a model

5. Podsumowanie

W celu przeprowadzenia poprawnej symulacji CFD w programie OpenFOAM niezbędna jest znajomość struktury plików. Dodatkowo należy zapoznać się z rodzajami solverów występujących w programie i należy wybrać odpowiedni do rozwiązywanego problemu.

Przygotowanie modelu do symulacji jest ułatwione dzięki możliwości zaimportowania geometrii wcześniej przygotowanych w innych programach. Ze względu na konieczność wprowadzania poprawek w plikach tekstowych opisujących początkowe warunki brzegowe prowadzenie symulacji wykorzystujących skomplikowane geometrie może okazać się czasochłonne.

Literatura

- [1] Tu J., Yeoh GH., Liu C.: Computational Fluid Dynamics. A Practical Approach. Third Edition. Elsevier (2018).
- [2] Versteeg H.K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method. Second Edition, Pearson (2007).
- [3] OpenFOAM Basic Training https://www.cfd.at/tutorials?fbclid=IwAR1Tr3AP6C3Pq4-A0wCJmAdJ0w_Fe7aHfxYD424qSMHTGA3_zWbz_e-pVIA (dostęp 4.01.2022).
- [4] <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v9-standard-solvers/> (dostęp 4.01.2022).
- [5] <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v9-boundaries/> (dostęp 4.01.2022).
- [6] <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v9-controlDict/> (dostęp 4.01.2022).

MAPA WIATRU DO ADAPTACYJNEGO PLANOWANIA ŚCIEŻKI BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO

mgr inż. MATEUSZ KOSIOR,

Inżynieria Mechaniczna, IV rok, 3 stopień

Opiekunowie naukowci: Dr hab. inż. Piotr Przysałka, Prof. PŚ,

Dr inż. Wawrzyniec Panfil

Streszczenie. Optymalizacja ścieżki przelotu BSP klasy HALE musi uwzględnić wpływ wiatru. Jednak złożone modele pogody uniemożliwiają platformom wbudowanym szybkie wyznaczenie prędkości wiatru. Artykuł nawiązuje do tego problemu opisując koncepcję czterowymiarowej mapy wiatru. Mapa ta przechowuje wstępnie wyznaczone estymaty wiatru w wielowymiarowej tablicy przeglądowej. Mapę zaimplementowano w środowisku MATLAB, a następnie pomyślnie zweryfikowano poprzez porównanie z danymi z internetowych serwisów pogodowych.



WIND FORECAST MAP FOR ADAPTIVE PATH PLANNING WITH AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract. Optimizing the flight path of a HALE UAV requires modeling wind influence. However, complex weather models implemented on embedded platforms cannot compute wind velocity on the fly. The paper addresses this issue by providing a concept of a 4D wind forecast map. The map stores precomputed wind estimates in a multidimensional lookup table, which provides a compact and efficient model used for path optimization. The map was implemented in MATLAB and successfully verified against data acquired from public weather servers.

1. Introduction

Performing measurements with a meteorological Unmanned Aerial Vehicle (UAV), such as a High-Altitude Long Endurance (HALE) aircraft, requires careful path planning and minimizing expended energy. To achieve that, an adaptive path planning algorithm was proposed [1]. However, to optimize the flight path of the UAV, it is necessary to model wind influence. Thus, in addition to the model of the UAV itself, quality environment models are required to predict wind speed and direction. Many complex atmospheric models exist, but running them exceeds the capabilities of many currently available embedded platforms. It is especially important in dynamic path planning, where low computation time is crucial. Hence, building a precomputed wind map becomes a necessity. Wind maps are already widely used in meteorology [2,3]. This paper tries to use a similar tool in path planning and optimization.

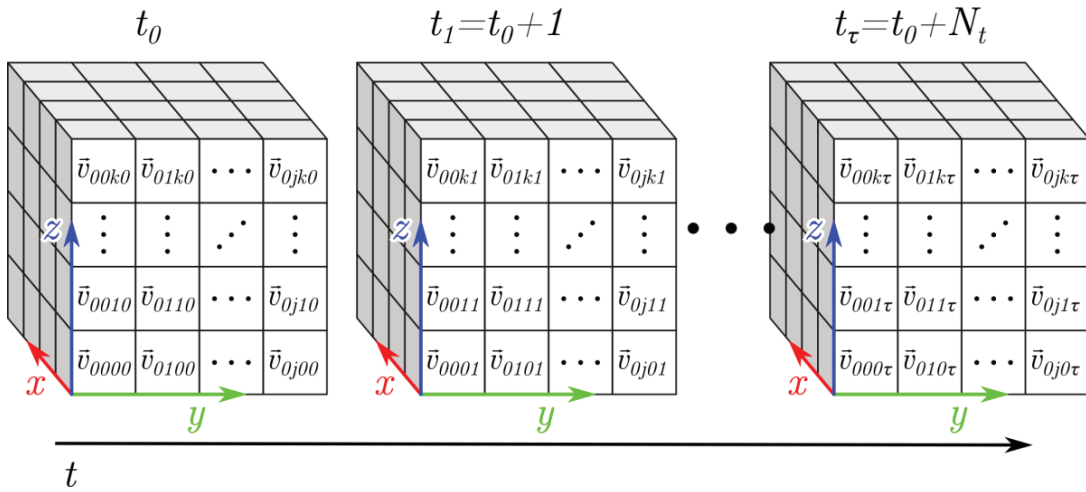
2. Wind forecast map

In addition to the constraints of the vehicle itself, path planning requires a model of the scene. In case of a HALE UAV, estimating wind conditions is crucial for an energy-optimal flight. Significant altitude changes and flight longevity demand a model spanning over different altitudes and valid for several hours after takeoff. Hence, the model must be dynamic.

To improve computation performance, a precomputed wind forecast map is provided instead of calculating wind speed and direction each iteration. Wind conditions change in terms of space and time. To capture these changes, a three-dimensional spatial map must be expanded with a time dimension. Thus, the proposed wind forecast map becomes a 4D map of wind speed and direction. The concept of such a map is illustrated in Fig. 1. A discrete wind forecast map M_w^D is given by equation

$$M_w^D = \{\vec{v}_{ijk\tau}\} \quad \begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, N_x \\ j &= 1, 2, \dots, N_y \\ k &= 1, 2, \dots, N_z \\ \tau &= 1, 2, \dots, N_t \end{aligned} \quad (1)$$

where N_i, N_j, N_k, N_t are the numbers of cells along the map's x, y, z, t axes, respectively. Here, the axis t denotes discretized time since the earliest forecast stored in M_w^D . Variable $\vec{v}_{ijk\tau}$ represents the wind velocity vector at i -th sample along x axis, at j -th sample along y axis, at k -th sample along z axis and at τ -th sample along t axis.



Rys. 1. Struktura danych wewnątrz dyskretnej mapy wiatru
Fig. 1. Structure of data inside a discrete wind forecast map

The map is built before the mission, based on wind data sampled in space and time. This data can be acquired for example by directly computing weather models or querying web providers for already precomputed data. A wind forecast map serves then as a lookup table, which contains gridded data. Hence, it can be rapidly accessed during the mission. This saves computation time during the mission in exchange of time spent to compute the whole map before the mission actually begins and space required to store the precomputed data.

An alternative representation might be preferred if continuity of the map is necessary. A limited number of samples can be transformed into continuous 4D space-time using various interpolation methods. Hence, a continuous wind forecast map in a general form is

$$M_w^C = f(x, y, z, t, M_w^D) \quad (2)$$

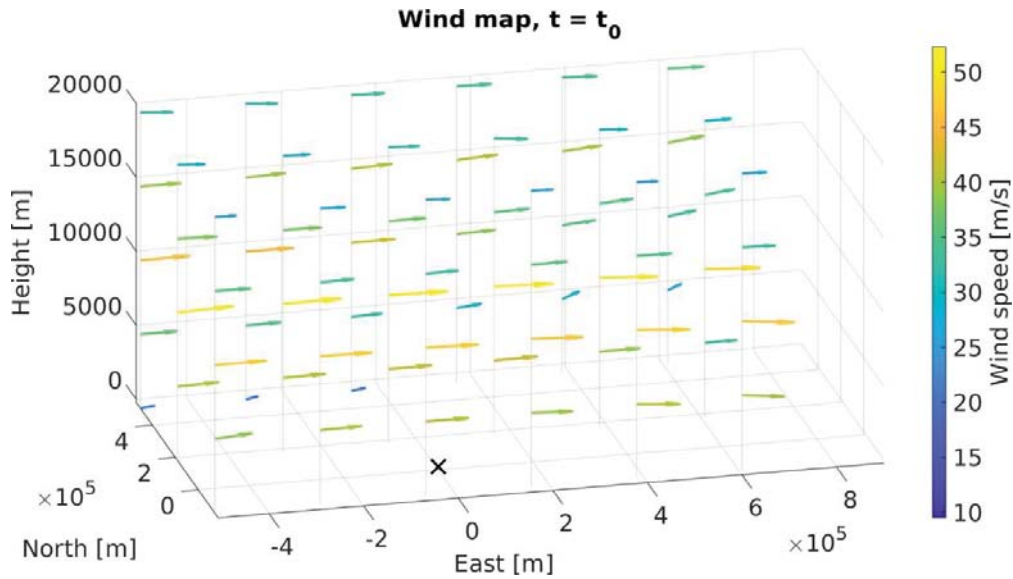
where $f(\cdot)$ is a generic interpolation function along all 4 dimensions. This function bases on the samples available at discrete points stored internally as a discrete map M_w^D of gridded wind velocity vectors. On demand, M_w^C performs the interpolation of gridded samples neighboring

a given 4D point to provide an approximated but continuous result. In its simplest form, M_w^C uses linear interpolation to provide C0 continuity in each dimension. However, more intricate interpolation methods can also be employed to generate C1- or C2-continuous results at the cost of increased computation effort.

3. Preliminary results

The concept of the 4D wind forecast map was implemented in MATLAB R2021b. The map was implemented as a custom class containing a 4D lookup table, as well as methods returning interpolated and non-interpolated wind vectors given position and time. In this study wind is stored as two-dimensional vectors with their vertical components discarded. Values between gridded samples are interpolated using 4D linear interpolation.

An example discrete wind forecast map illustrating static wind velocity distribution above Poland is shown in Fig. 2. The map displays data acquired from a web server. Wind is illustrated as a colored vector field. The color and length of vectors correspond to the wind speed at given sampling points. The cross marks the local origin, i.e., the point with spatial coordinates of (0, 0, 0). Vertical lines mark the vectors placed at the same latitude and longitude, but at different altitudes. Some values are missing due to the sampling points being placed inside terrain. The map stores them as invalid values instead of removing them to retain regular gridded structure.



Rys. 2. Wizualizacja przykładowej mapy wiatrów nad Polską
Fig. 2. Visualization of a sample wind forecast map for Poland

Next, the concept was verified in a series of comparison tests. The measurements returned by the wind forecast map were compared with data acquired manually from websites providing wind forecasts at different altitudes. Table 1 compares the results with data from two providers using different weather models: GFS (Ventusky.com) and ECMFW (Windy.com) [4].

The measurements were taken at several different points described by latitude, longitude and altitude above ground level (AGL) and time offset. Reference timestamp, where time offset is zero, was 17-03-2022 12:00 (UTC+1). The measurements 1 to 5 overlapped the wind map's sampling points, while the rest employed linear interpolation. The measured variables were the horizontal components of wind speed v in m/s and its direction φ in degrees. Direction of 0°

means northerly wind (from north to south) and 90° is easterly wind (from east to west). The average relative error for wind speed was 22.09% for GFS and 16.63% for ECMFW. The average relative error for wind direction was 5.82% for GFS and 29.39%° for ECMFW. Note that sometimes the reference models also return different results, e.g., speeds in the 9th row.

Tabela 1. Porównanie wartości prędkości [m/s] oraz kierunku [°] wiatru
Table 1. Comparison of wind speeds [m/s] and directions [°]

#	Latitude	Longitude	Altitude AGL	Time	Wind map		GFS		ECMFW	
					v	φ	v	φ	v	φ
	[°]	[°]	[m]	[h]	[m/s]	[°]	[m/s]	[°]	[m/s]	[°]
1	50.2945	18.6714	2000	0	4.79	89.19	5	100	5	90
2	50.1022	18.5463	4200	+7	8.09	28.22	6	28	7	30
3	49.7716	19.2207	5500	+4	16.31	16.52	17	17	17	5
4	78.9235	11.9099	12000	+4	37.27	277.83	36	228	37	233
5	78.2232	15.6267	5500	+10	27.58	246.31	23	238	18	232
6	50.2945	18.6714	9000	+10	25.05	346.12	25	348	26	343
7	49.7228	19.2089	9000	+10	28.75	325.08	31	350	31	344
8	78.8147	12.8169	4200	+16	40.69	265.68	22	222	32	258
9	78.2669	15.6308	1500	+25	12.04	253.83	20	237	9	232

4. Conclusions

The paper proposed a 4D wind map developed as a part of an environment model used by path planning algorithms of a meteorological HALE UAV. The map provides a compact model for predicting dynamic wind conditions. To grant continuity and further increase its fidelity, the wind forecast map concept adopted computationally efficient interpolation methods. Based on the difference of predictions returned by the reference models, the accuracy of the map itself is acceptable for flight planning and rough simulation. The error for queried vs interpolated measurements is comparable. The efficiency of the map will be addressed in further research.

Acknowledgments

This work is carried out in the framework of the project: “Long-endurance UAV for collecting air quality data with high spatial and temporal resolutions” that is implemented under Programme “Applied Research” under Norwegian Financial Mechanisms 2014 – 2021. Data for the wind maps was provided by Meteomatics Weather API (<https://www.meteomatics.com>).

Literature

1. Optimal Design of a UAV Based Atmospheric Pollution Profiling System, technical report, Norwegian Research Centre (NORCE) (2020).
2. Lakshmanan N. et al., Basic wind speed map of India with long-term hourly wind data. Current science, Vol. 95, No. 7, pp. 911-922 (2009).
3. Yim S. H. L. et al., Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 112.D5 (2007), <https://doi.org/10.1029/2006JD007752>.
4. Kerns B. W., Chen, S. S., ECMWF and GFS model forecast verification during DYNAMO: Multiscale variability in MJO initiation over the equatorial Indian Ocean. J. Geophys. Res. Atmos., 119, pp. 3736-3755 (2007), <https://doi.org/10.1002/2013JD020833>.

SYSTEM STEROWANIA GRUPĄ WIRTUALNYCH MIKROBUSÓW PODĄŻAJĄCYCH W TRYBIE PLATOONING

inż. WITOLD KRAFCZYK,

Automatyka i Robotyka, AB5, semestr III, II stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Wawrzyniec Panfil

Streszczenie. W artykule poruszony jest temat sterowania grupą autonomicznych pojazdów poruszających się w kolumnie w trybie platooning. Opracowywany system powstaje w ramach pracy magisterskiej. Przedstawiono koncepcję systemu sterowania poszczególnymi pojazdami. Ponadto, opisano scenariusze, w których system będzie testowany, łącznie z metodyką i miarami oceny przeprowadzonych testów.



CONTROL SYSTEM OF A FOLLOWING MICROBUSES GROUP IN THE PLATOONING MODE

Abstract. The article deals with the topic of controlling a group of autonomous vehicles moving as a column in the platooning mode. The vehicle's control system is under development and is created as a part of the master's thesis. Specifically, the concept of the control system for individual vehicles will be presented. In addition, in this paper will be described the scenarios in which it will be tested, including the methodology and evaluation measure of the tests performed.

1. Wprowadzenie

W ramach współpracy z firmą Blees sp. z o.o. w projekcie „Autonomiczny mikrobus o napędzie elektrycznym przystosowany do poruszania się w trybie platooningu wraz z inteligentnym systemem informacji pasażerskiej” powstaje w symulatorze Carla wirtualny model projektowanego pojazdu oraz środowisko do testów autonomicznej jazdy, w tym grupy pojazdów w trybie platooningu (Rys. 1). Działający w czasie rzeczywistym Symulator Carla wykorzystuje do obliczeń fizycznych silnik graficzny Unreal Engine 4. Odzwzorowane w nim pojazdy posiadają zgodne z rzeczywistością parametry fizyczne takie jak masa, moment bezwładności oraz momenty napędowe kół. Wykorzystywany jest również model Ackermana do uzyskania odpowiednich kątów kół pojazdu podczas skręcania. Zdalne sterowanie pojazdem odbywa się za pośrednictwem rzeczywistej kierownicy, pedałów oraz skrzyni biegów, podłączonych do komputera. Jest to idealne narzędzie do testowania jazdy w trybie platooningu. Tryb ten polega na jeździe kolumny pojazdów jeden za drugim w niewielkiej odległości, czemu towarzyszy wzajemna wymiana informacji pomiędzy pojazdami pochodzących z czujników tych pojazdów. Korzyści jakie płyną z takiego rodzaju trybu jazdy [1] to:

1. Rozwiązanie problemu opłacalności dotarcia w mniej uczęszczane rejony
2. Zmniejszenie zużycia energii pojazdów.
3. Zwiększenie płynności ruchu ulicznego.
4. Skalowalność plutonów - możliwość zmiany liczebności w zależności od potrzeb.

Wymienione powyżej powody podkreślają opłacalność zastosowania takiego rodzaju systemu w transporcie publicznym.



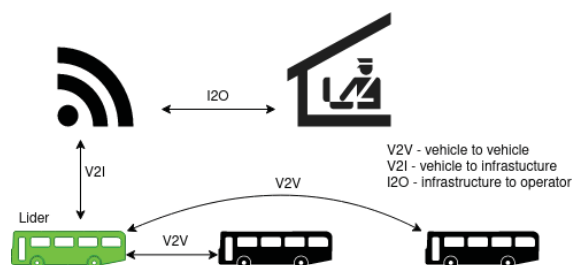
Rys. 1. Model pojazdu (udostępniony przez Blees) i ich grupy w symulatorze Carla
Fig. 1. Vehicle (shared by Blees) and platoon models in Carla simulator

2. Koncepcja systemu

Z trzech rozważanych metod komunikacji między pojazdami a Centrum Zdalnego Sterowania Pojazdami (Rys. 2) po przeprowadzonej analizie wielokryterialnej [2] biorącej pod uwagę m.in. szybkość działania systemu awaryjnego zatrzymywania, stabilność czy skomplikowanie systemu, uznano, że najlepszą metodą będzie umiejscowienie algorytmu podejmowania decyzji i sterowania pojazdami autonomicznymi w pierwszym pojeździe - liderze, który zgodnie z założeniami projektowymi [2] i obowiązującym polskim prawem (konieczność zaimplementowanej opcji natychmiastowego przejęcia kontroli zdalnej nad autonomicznym pojazdem) [3], będzie sterowany zdalnie przez operatora. Tak jak pokazano na rysunku poniżej (Rys. 3), lider wysyła informacje sterujące pozostałymi pojazdami oraz dane telemetryczne do Centrum Zdalnego Sterowania Pojazdami.



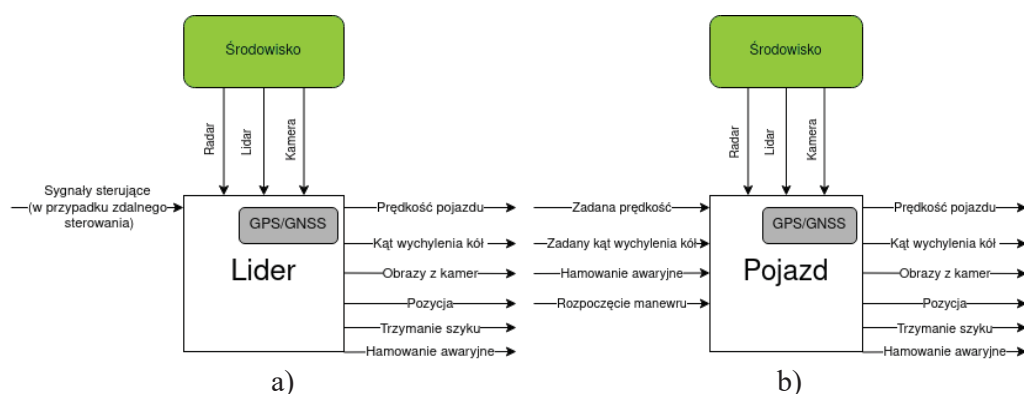
Rys. 2. Sterowanie pojazdem w Centrum Zdalnego Sterowania Pojazdami
Fig. 2. Vehicle control in Vehicle's Remote Control Center



Rys. 3. Wybrany rodzaj komunikacji
Fig. 3. Chosen kind of communication

3. Model pojazdu

Opracowane zostały modele pojazdów - po jednym dla lidera (Rys. 4a) i pozostałych pojazdów (Rys. 4b). Wszystkie zbierają informacje o ich otoczeniu za pomocą czujników typu lidar, radar oraz kamer RGB. W celu zapewnienia jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa dodano osobną wiadomość o wysokim priorytecie informującą o konieczności awaryjnego hamowania kolumną pojazdów po nagłym wtargnięciu niepożądanych obiektów przed któryś z pojazdów. Oprócz tego, pojazdy wysyłają informację o swojej pozycji odczytanej z czujników GPS/GNSS, informacje telemetryczne oraz obraz z kamer i dane na temat prawidłowego trzymania sztyku przez pojazd, które ułatwiają systemowi korektę prędkości pojazdów w celu zachowania odpowiedniej i bezpiecznej odległości między nimi.



Rys. 4. (a) Model lidera, (b) Model pojazdu autonomicznego
Fig. 4. (a) Model of a Leader (b) Model of autonomous vehicle

4. Badania weryfikacyjne

W celu weryfikacji poprawności działania systemu sprawdzono opóźnienia występujące pomiędzy czasem wysłania sygnału z kierownicy (Rys. 2), a reakcją symulatora. Wyniki pokazały, że całość wyników mieści się poniżej 250 ms - średnim czasem reakcji człowieka (Tabela 1).

L.p	Manewr	Opóź. [ms]
1	1	0,5200
	2	0,4170
	3	0,8860
	4	25,4558
	5	1,0110
	6	0,3921
	7	0,3511
	8	0,7590
	9	0,6719
	10	7,4429
	11	9,2451

Tabela. 1. Opóźnienie w odbiorze sygnału
Table. 1. Signal received difference

Następnie została przetestowana pierwsza wersja oprogramowania umożliwiająca testowanie jazdy pojazdami w trybie platooning. Badane były średnie odchylenia pojazdów podążających za liderem oraz odległości między nimi w czasie jazdy. Wyniki odchylenia

poprzecznego pojazdów 2 i 3 od trasy pojazdu 1 (Tabela. 2) mieściły się w przyjętym zakresie 1,5m przez 99% czasu trwania testów, a pojazdy zachowywały od siebie prawidłową odległość w zakresie 1m-15m.

Tabela. 2. Wyniki odchylenia trasy pojazdów od lidera
Table. 2. Results of vehicle's path difference from leader

Ścieżka	1 2	1 3	2 2	2 3	3 2	3 3
Max	1.384	1.51	1.5	1.723	1.268	1.517
Min	0.038	0.009	0.153	0.094	0.126	0.295
Średnia	0.575	0.439	0.67	0.7	0.434	0.434
Sprawność	100	99.95	100	91.8	100	99.97

5. Podsumowanie

Dotychczas w ramach pracy magisterskiej zostało przygotowane środowisko symulacyjne oraz model mikrobusu. Zaimplementowane zostały podstawowe funkcje sterujące w ROS2, dzięki czemu oprócz sterowania pojazdem istnieje możliwość odczytywania sygnałów z czujników lidar, radar, GNSS oraz obrazu z kamer. W kolejnych krokach będzie rozwijane oprogramowanie polegające na implementacji funkcjonalności związanych z platooningiem, tj. przekazywanie danych i informacji pomiędzy pojazdami, algorytmami do utrzymywania odległości między pojazdami, podążania za poprzedzającym pojazdem i utrzymywania się w pasie ruchu. Przeprowadzone zostaną testy weryfikujące jakość oprogramowania, poprzez realizację przez pluton kilku scenariuszy takich jak: zatrzymanie awaryjne, jazda w przód z hamowaniem, skręt kolumny na skrzyżowaniu czy wjazd i wyjazd z zatoczki autobusowej. Podczas ich wykonywania mierzone będą następujące wartości: średnia i chwilowa odległość do pojazdu poprzedzającego, średnie prędkości pojazdów w zadanym oknie czasowym oraz odchylenie od ścieżki pojazdu poprzedzającego, poprzez których zmierzenie będzie możliwe określenie, czy zaproponowany algorytm umożliwia bezpieczny przejazd grupy pojazdów.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki uzyskano w ramach pracy przejściowej i pracy dyplomowej magisterskiej realizowanych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej oraz w ramach projektu pt. „Autonomiczny mikrobus o napędzie elektrycznym przystosowany do poruszania się w trybie platooningu wraz z inteligentnym systemem informacji pasażerskiej” - umowa o dofinansowanie nr UDA-RPSL.01.02.00-24-0498/19-00 finansowane przez RPO WSL. Projekt realizowany jest w konsorcjum Blees sp. z o.o., Politechnika Śląska.

Literatura

1. Quadri, Christian, Mancuso, Vincenzo, Marsan, Marco A., Rossi, Gian P., “Edge-based platoon control”, In *Computer Communications*, 181,2022, 17-31,ISSN 0140-3664.<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.021>.
2. W. Krafczyk, „Koncepcja systemu sterowania grupą pojazdów podążających w trybie platooning”, Praca przejściowa, Politechnika Śląska, Gliwice, 2022
3. Art. 65k. ustawy z dnia 5 kwietnia 2022 r. o pojazdach autonomicznych. Prawo o ruchu drogowym.

ANALIZA TERMICZNA TURBOSPREŻARKI SAMOCHODOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

inż. JOANNA KUBIAK,
Automatyka i Robotyka, ZAB2, semestr VII, 1 stopień
Opiekun naukowy: Dr inż. Anna Korczak



Streszczenie. Celem pracy była analiza rozkładu temperatur w turbosprężarce w zależności od jej budowy. Analiza termiczna przeprowadzona została w środowisku ANSYS. Otrzymane wyniki zostały dodatkowo porównane z temperaturami rzeczywistej turbosprężarki, które uzyskano dzięki pomiarom kamerą termowizyjną typu FLIR.

THERMAL ANALYSIS OF A TURBOCHARGER OF AN AUTOMOTIVE COMBUSTION ENGINE

Abstract. The purpose of the work was to analyze the temperature distribution in the turbocharger, depending on its structure. Thermal analysis was carried out in the ANSYS environment. The obtained results were additionally compared with the temperatures of the actual turbocharger, which were obtained by measurements with a FLIR thermal imaging camera.

1. Wprowadzenie

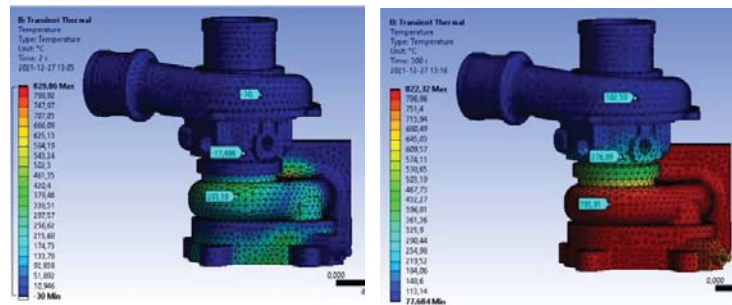
Tematem artykułu jest analiza termiczna turbosprężarki samochodowego silnika spalinowego, w której została przeprowadzona szczegółowa analiza wpływu kanałów chłodzących w korpusie turbosprężarki na temperaturę powietrza w muszli ssącej (na wyjściu z układu) z uwzględnieniem zmiennych zakresów temperatury pracy turbiny. Badania przeprowadzono na podstawie modelu 3D wykonanego w oparciu o turbosprężarkę firmy IHI VL39.

2. Analiza termiczna

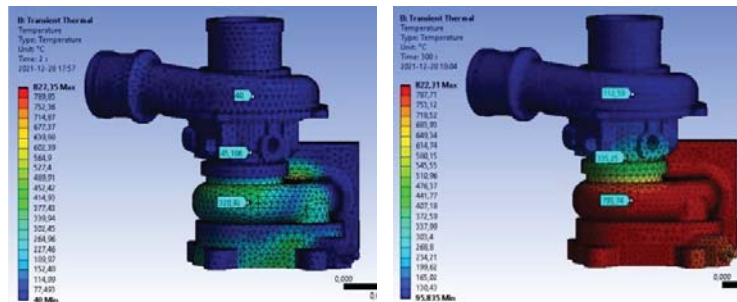
Na potrzeby analizy model geometryczny został uproszczony oraz wyznaczono trzy punkty, w których szczegółowo była monitorowana temperatura. Jako temperaturę bazową przyjęto tę występującą po $t=2$ s, czas trwania całej symulacji wyniósł 300 sekund, z krokiem co 1 sekundę. Przyjęta temperatura spalin wynosiła 800°C [1]. Na Rys. 1-2 znajdują się wyniki analiz turbosprężarki wraz z kanałami chłodzącymi, natomiast na Rys. 3-4 bez.

Aby sprawdzić wiarygodność wyników przeprowadzono również badanie rzeczywistego nagrzewania się turbosprężarki za pomocą kamery termowizyjnej. Do tego celu wykorzystano

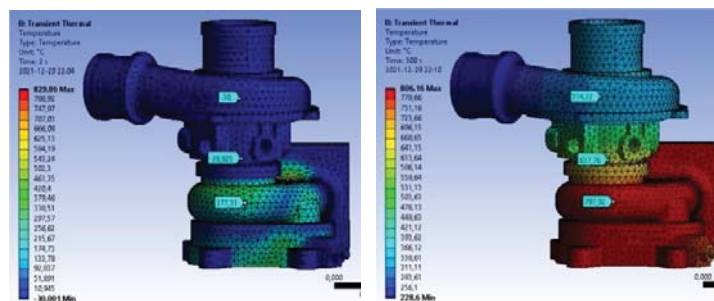
samochód Fiat Tipo z silnikiem 1.4 T-jet o mocy 120KM wyposażony w turbosprężarkę IHI VL39. Próba została przeprowadzona w temperaturze bliskiej -15°C i polegała na przejechaniu dystansu około 10km, a następnie pomiarze.



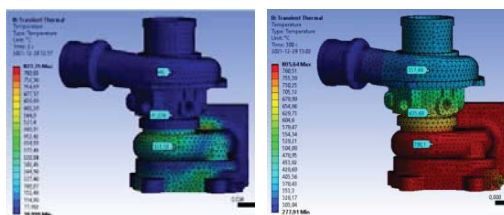
Rys.1. Wynik analizy nr 1, w chwili: $t=2$ i $t=300$, temperatura otoczenia: -30°C
Fig.1. Results of analysis 1 at the moment: $t=2$ and $t=300$, ambient temperature: -30°C



Rys.2. Wynik analizy nr 2, w chwili: $t=2$ i $t=300$, temperatura otoczenia: 40°C
Fig.2. Results of analysis 2 at the moment: $t=2$ and $t=300$, ambient temperature: 40°C



Rys.3. Wynik analizy nr 3, w chwili: $t=2$ i $t=300$, temperatura otoczenia: -30°C
Fig.3. Results of analysis 3 at the moment: $t=2$ and $t=300$, ambient temperature: -30°C



Rys.4. Wynik analizy nr 4, w chwili: t=2 i t=300, temperatura otoczenia: 40°C
Fig.4. Results of analysis 4at the moment: t=2 and t=300, ambient temperature: 40°C

Tabela 1. Porównanie wyników symulacji w temperaturze -30°C.

Table 1. Comparison of simulation results in temperature -30°C

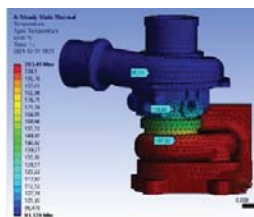
Temperatura [°C]	Czas t [s]	Punkt na modelu	Model z kanałami chłodzącymi	Model bez kanałów chłodzących	Różnica temperatur [%]
-30	2	Muszlą ssącą	-30,00	-30,00	0,00
		Korpus	-17,49	-28,83	64,84
		Muszlą wydechową	293,19	277,31	5,42
	60	Muszlą ssącą	3,99	-4,32	208,27
		Korpus	217,75	402,07	84,65
		Muszlą wydechową	793,71	795,39	0,21
	120	Muszlą ssącą	48,72	84,38	73,19
		Korpus	238,83	524,22	119,50
		Muszlą wydechową	792,39	796,82	0,56
	180	Muszlą ssącą	73,89	172,27	133,14
		Korpus	254,06	567,35	123,31
		Muszlą wydechową	793,89	797,26	0,42
	240	Muszlą ssącą	91,40	246,90	170,13
		Korpus	255,75	594,89	132,61
		Muszlą wydechową	793,91	797,62	0,47
	300	Muszlą ssącą	102,59	314,32	206,38
		Korpus	276,89	637,76	130,33
		Muszlą wydechową	793,91	797,92	0,51

Tabela 2. Porównanie wyników symulacji w temperaturze 40°C.

Table 2. Comparison of simulation results in temperature 40°C

Temperatura [°C]	Czas t [s]	Punkt na modelu	Model z kanałami chłodzącymi	Model bez kanałów chłodzących	Różnica temperatur [%]
40	2	Muszlą ssącą	40,00	40,00	0,00
		Korpus	45,186	41,08	9,09
		Muszlą wydechową	320,92	321,39	0,15
	60	Muszlą ssącą	58,36	63,86	9,42
		Korpus	250,79	468,68	86,88
		Muszlą wydechową	793,59	795,80	0,28
	120	Muszlą ssącą	82,48	146,35	77,44
		Korpus	254,77	547,06	114,73
		Muszlą wydechową	793,72	797,03	0,42
	180	Muszlą ssącą	97,20	225,25	131,74
		Korpus	276,43	584,11	111,30
		Muszlą wydechową	793,73	797,49	0,47
	240	Muszlą ssącą	106,49	295,60	177,58
		Korpus	300,50	612,15	103,71
		Muszlą wydechową	793,84	797,82	0,50
	300	Muszlą ssącą	112,59	357,49	217,51
		Korpus	335,25	635,69	89,62
		Muszlą wydechową	793,74	798,1	0,55

Przed przeprowadzeniem próby, samochód przebywał na zewnątrz, dlatego przyjęto temperaturę początkową jako temperaturę otoczenia. Po przebyciu zadanego dystansu dokonano pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej typu FLIR. W programie ANSYS zasymulowano działanie turbosprężarki w danych warunkach.



Rys.5. Wynik analizy w stanie ustalonym.
Fig.5. Results of the Steady-State Thermal Analysis



Rys.6. Wynik pomiaru temperatury na: korpusie, muszli wydechowej i muszli ssącej
Fig.6. Results of temperature measurement by thermal imaging camera.

3. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz (Tab. 1 i 2), wykazano znaczący wpływ kanałów chłodzących na temperaturę muszli ssącej, a tym samym temperaturę powietrza na wyjściu z układu. Przy temperaturze otoczenia wynoszącej -30°C , temperatura muszli ssącej turbosprężarki bez kanałów chłodzących, była wyższa o ponad 200% względem wersji chłodzonej cieczą, temperatura korpusu bez chłodzenia była natomiast wyższa o około 130%. Przy temperaturze otoczenia wynoszącej 40°C , temperatura muszli ssącej była o około 220% wyższa w przypadku modelu bez kanałów, a na korpusie różnica wyniosła już około 90%. Dzięki symulacji pracy w skrajnych warunkach, dobrze widoczny jest wpływ temperatury otoczenia na nagrzewanie turbosprężarki-temperatura końcowa korpusu w warunkach 40°C była wyższa o około 60°C względem próby realizowanej w warunkach -30°C , natomiast temperatura końcowa, osiągnięta w warunkach -30°C , w warunkach 40°C została osiągnięta już w czasie 180 sekund. Wartości temperatur uzyskane podczas próby na rzeczywistym modelu turbosprężarki, są bardzo zbliżone na korpusie i muszli wydechowej, różnice pojawiły się natomiast na muszli ssącej. Może to wynikać z niepełnego dogrzania podzespołów - symulacja komputerowa przebiega w warunkach idealnych ze stałą temperaturą spalin, która w warunkach rzeczywistych jest niemożliwa do utrzymania. Różnice mogą również wynikać z niedokładności użytego sprzętu pomiarowego oraz opóźnienia w wykonaniu pomiaru względem prędkości wychładzania się elementów turbosprężarki.

Literatura

1. Wajand J.A., Wajand J.T., Tłokowe silniki spalinowe. WNT, Warszawa (2005).
2. Mysłowski J., Doładowanie silników. WKiŁ, Warszawa (2011).

MODEL ZDALNIE STEROWANEGO SAMOCHODU Z FUNKCJAMI ADAS

inż. PATRYK KULCZYK,

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Witold Beluch, Prof. PŚ

Streszczenie. Celem pracy było wykonanie oraz zaprogramowanie modelu zdalnie sterowanego samochodu wraz z zaawansowanymi systemami wspomagania kierowcy. Model samochodu został wykonany z wykorzystaniem platformy komputerowej Raspberry Pi 4B oraz nakładki Motor Hat TB6612. Do analizy danych środowiskowych zostały wykorzystane ultradźwiękowe czujniki odległości oraz podczerwone czujniki odległości.



REMOTE CONTROL CAR MODEL WITH ADAS FUNCTIONS

Abstract. The aim of the work was to build, and program a remote-controlled car model with Advance Driver Assistance Systems (ADAS). The car model was made using a Raspberry Pi 4B computer platform and Motor Hat TB6612 overlay. Ultrasonic distance sensors and infrared distance sensors were used to analyse environmental data.

1. Wprowadzenie

Celem pracy było przedstawienie idei zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) oraz stworzenie modelu zdalnie sterowanego samochodu wykorzystującego te systemy. Zgodnie z [1] każdy samochód wyprodukowany po 2022 w Unii Europejskiej będzie musiał posiadać przynajmniej funkcje ADAS związane z bezpieczeństwem. W praktyce motoryzacyjnej stosowana jest szeroka gama sensorów takich jak czujniki ultradźwiękowe, radary (krótkiego i dalekiego zasięgu), czujniki podczerwieni (IR), kamery oraz czujniki LiDAR (Light Detection and Ranging, wykrywanie światła i odległości).

W ramach pracy zastosowano funkcje LKA (Line Keeping Assist, asystent utrzymania pasa ruchu) oraz ACC (Adaptive Cruise Control, zaawansowany tempomat). Analiza implementacji tych systemów w samochodach została dokonana w oparciu o dostępną literaturę [2,3].

W celu praktycznego wdrożenia i przetestowania wybranych funkcji ADAS, stworzono model zdalnie sterowanego samochodu. Model samochodu wyposażony w czujniki stanowi platformę do testów wybranych istniejących systemów wspomagania kierowcy. Pozwala również łatwe wdrażanie nowych rozwiązań z tego zakresu.

2. Założenia projektowe

Przyjęto następujące założenia projektowe:

- a) sterowanie pojazdem odbywa się w sposób zdalny;
- b) implementacja wybranych funkcji ADAS: LKA oraz ACC;
- c) stworzenie platformy umożliwiającej łatwą rozbudowę o istniejące i nowe funkcje ADAS.

3. Model zdalnie sterowanego samochodu

W celu stworzenia modelu samochodu RC należało dobrać odpowiednią bazę (podwozie), na której można zamocować mikrokomputer, silniki oraz wymagane dodatkowe układy. Aby zminimalizować koszt, do modelu samochodu RC wybrano nieskomplikowaną metalową obudowę z czterema silnikami prądu stałego, z odpowiednio dużą liczbą otworów montażowych, przedstawioną na Rys. 1a.



Rys. 1. a) Podwozie modelu samochodu RC z zamontowanymi silnikami prądu stałego,
b) sterownik silników prądu stałego Motor Hat TB6612

Fig. 1. a) Chassis of RC car model with mounted DC engines,
b) Hat TB6612 DC motor engine driver

Głównym elementem samochodu jest mikrokomputer, który zarządza czterema niezależnymi silnikami napędzającymi koła, łączy się zdalnie z komputerem osobistym oraz zbiera

i przetwarza informacje środowiskowe z sensorów. Do sterowania modelem samochodu został wybrany mikrokomputer Raspberry Pi 4B [4].

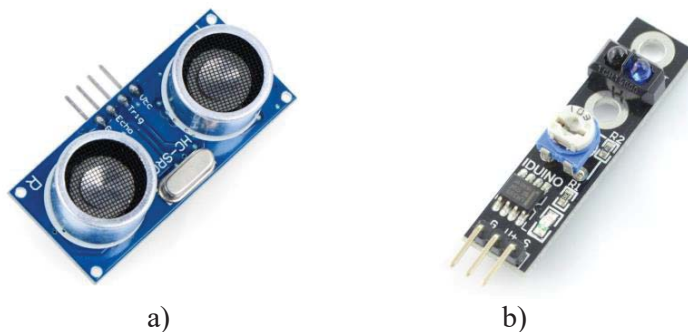
Sterowanie silnikami prądu stałego odbywa się w następujący sposób. Mikrokomputer zarządza zestawem czterech silników DC za pomocą magistrali I2C oraz nakładki Motor HAT TB6612 (Rys. 1b), która wysyła odpowiednie sygnały PWM (Pulse-Width Modulation, modulacja szerokości impulsów) do silników.

4. Czujniki wykorzystane w projekcie

Model samochodu w założeniach powinien wykonywać funkcje ADAS. Sensory ADAS są kluczowymi elementami służącymi do obserwowania środowiska, mierzenia dystansu, pozycji oraz ruchów samochodu z uwzględnieniem otoczenia. W projekcie wykorzystano czujniki: ultradźwiękowy oraz podczerwieni.

Jako czujnik ultradźwiękowy wykorzystano model HC-SR04 (Rys.2a). Jest to czujnik pozwalający na precyzyjne mierzenie odległości od obiektów znajdujących się w zakresie 2-200 cm od czujnika.

W projekcie został wykorzystany odbiciowy czujnik odległości Iduino ST1140 (Rys.2b). Moduł został wykorzystany w modelu samochodu w celu wykrywania linii, po której porusza się samochód. Została w ten sposób zrealizowana funkcja asystenta pasa ruchu (LKA).



Rys. 2. a) Ultradźwiękowy czujnik HC-SR04, b) podczerwony czujnik Iduino ST1140
 Fig. 5. a) HC-SR04 ultrasonic sensor, b) Iduino ST1140 infrared sensor

5. Oprogramowanie

Kod programu wykonywanego przez mikrokomputer został napisany w języku Python [5]. W ramach projektu utworzono biblioteki odpowiedzialne za sterowanie modelem, wykrywanie kolizji oraz za podążaniem pojazdu na podstawie linii.

Programowanie mikrokomputera zostało wykonane za pomocą kompilacji skróśnej w programie Visual Code; pozwoliło to na kompilację kodu na komputerze, a następnie przesłanie go i wykonywanie na mikrokomputerze Raspberry Pi.

5.1 Przykładowa funkcja wykrywania kolizji

W projekcie zaimplementowano funkcję wykrywania kolizji, która jest wykorzystywana do spełnienia założonych funkcji ADAS w postaci ACC. Model samochodu w 100 milisekundowych interwałach sprawdza odległość odczytaną z sensora. Raspberry porównuje odczytaną odległość z odpowiednimi zakresami, do których przypisane są następujące działania:

- jeśli zmierzona odległość jest większa niż 40 centymetrów – funkcja nie wpływa na sterowanie modelem samochodu;
- jeśli zmierzona odległość jest mniejsza niż 40 centymetrów, ale większa niż 10 centymetrów oraz *shift* (bieg samochodu odpowiadający za prędkość) jest większy niż 5 – funkcja obniża prędkość pojazdu o 2 biegi;
- jeśli zmierzona odległość jest mniejsza niż 10 centymetrów – funkcja zatrzymuje samochód.

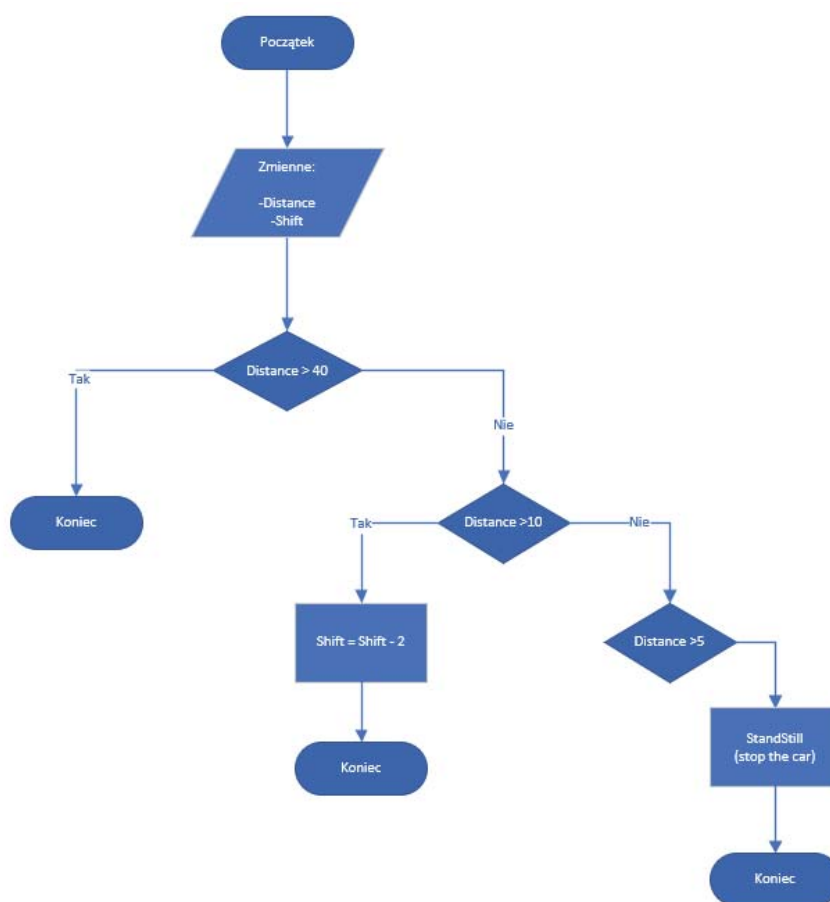
Schemat blokowy zaimplementowanej funkcji wykrywania kolizji został przedstawiony na Rys. 3.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono idee zaawansowanych funkcji wspomagania kierowcy oraz zaimplementowano dwie z nich w modelu zdalnie sterowanego samochodu. Do wykonania modelu wykorzystano podwozie z silnikami prądu stałego, mikrokomputer Raspberry Pi i odpowiednie czujniki. Tak zbudowany zdalnie sterowany samochód pozwolił zaimplementować podstawowe funkcje ADAS w postaci LKA oraz ACC.

Kod programu napisany w celu realizacji tych funkcji analizuje dane z czujników odbiciowych oraz ultradźwiękowych. Pozwoli to w przyszłości na łatwiejszą rozbudowę modelu samochodu o algorytmy funkcji wykorzystujących te czujniki.

Na potrzeby modelu samochodu napisano również fragment kodu odpowiedzialny za sterowanie silnikami oraz zaproponowano jego rozwinięcie w przyszłości. Projekt został wykonany zgodnie z przyjętymi założeniami dając możliwość dalszego rozwoju oraz testów innych funkcji ADAS.



Rys. 3. Schemat blokowy działania funkcji odpowiedzialnej za detekcję kolizji
Fig. 3. Block diagram of the function responsible for collision detection

Literatura

1. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1793, Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives, Komisja Europejska, (26.03. 2019).
2. Haas R.E., T., Bhattacharjee S., Möller D.P.F, Advanced Driver Assistance Systems, w: Akhilesh, K., Möller, D. (eds): Smart Technologies Scope and Applications, Springer, Singapore (2020).
3. Mammeri A., Lu G., Boukerche A., Design of lane keeping assist system for autonomous vehicles, 2015 7th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), s. 1-5 (2015).
4. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>, strona Raspberry Pi 4, (data dostępu: 10.01.2022).
5. Lutz M., Python. Wprowadzenie. Wydanie V, Helion, Gliwice (2020).

MODEL ZASTAWKI AORTALNEJ I SYMULACJA NUMERYCZNA PROCESU ZACISKANIA

inż. PAWEŁ MAKOWSKI,

Mechanika i Budowa Maszyn, ZMB, semestr VII, 1 stopień

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

Streszczenie. Artykuł przedstawia proces odtworzenia geometrii sztucznych zastawek aortalnych Medtronic Evolut R, Acurate neo2 oraz SAPIEN XT. Przetestowano możliwości popularnych programów w tym zakresie (m.in. Autodesk ReCap, Autodesk Inventor). Opracowano trójwymiarowe modele geometryczne zastawek aortalnych, a następnie stosując metodę elementów skończonych przeprowadzono analizę odkształceń zastawki SAPIEN XT podczas zaciskania w trakcie zabiegu TAVI używając oprogramowania MSC.Apex i MSC.Marc.



AORTIC VALVE MODEL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE CLAMPING PROCESS

Abstract. The article describes the process of reconstruction of the geometry of Medtronic Evolut R, Acurate neo2 and SAPIEN XT artificial aortic valves. The capabilities of popular software in this field were tested (e.g. Autodesk ReCap, Autodesk Inventor). Three-dimensional geometric models of the aortic valves were developed and then, using the finite element method, deformations of the clamped SAPIEN XT valve during the TAVI procedure were analysed using MSC.Apex and MSC.Marc software.

1. Wprowadzenie

Choroby serca oraz wady jego funkcjonowania to najczęściej określane powody zgonów. Spośród wszystkich chorób serca to właśnie choroba zastawkowa jest najczęściej diagnozowana u pacjentów. Ze względu na liczne wady funkcjonowania zastawek serca, takie jak zwężenie i niedomykalność, na przestrzeni lat zaprojektowano dziesiątki sztucznych implantów i wciąż poszukuje się nowych rozwiązań [1,2].

Zabiegi wszczepienia sztucznej zastawki aortalnej coraz częściej wykonywane są metodą przezcewnikowej implantacji TAVI (Transcatheter Aortic Valve Implantation). Jednym z najbardziej skomplikowanych etapów implantacji jest sprężenie zastawki w kapsule transportowej. Symulacja numeryczna tego procesu wymaga przygotowania dokładnie zaprojektowanego modelu 3D zastawki o wysokiej jakości powierzchni i jednolitym korpusie brylowym. Dodatkowym problemem staje się skomplikowana geometria większości implantów, która utrudnia proces modelowania.

W artykule przedstawiono przebieg testów modelowania trzech zastawek aortalnych w oprogramowaniu CAD, wyniki testów – trzy modele 3D sztucznych implantów spełniające wymagania do przeprowadzenia symulacji numerycznej oraz zaprezentowano wyniki testowej symulacji numerycznej zaciskania jednej z zastawek.

2. Modele geometryczne zastawki aortalnej

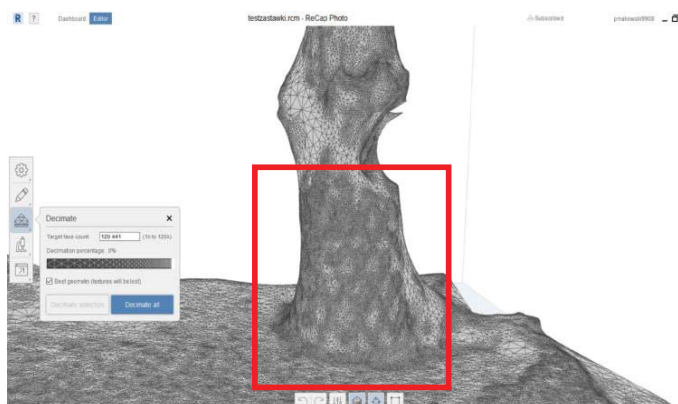
Podczas badań przeanalizowano geometrię zastawek pod kątem utworzenia modeli 3D, następnie testowano dostępne oprogramowania do projektowania CAD, które umożliwiłyby jak najdokładniejsze odwzorowanie geometrii i dalszą dyskretyzację modeli, w celu wykonania symulacji numerycznej. Medtronic Evolut R, Acurate neo 2 oraz SAPIEN XT (rys. 1.) to jedne z najczęściej wykorzystywanych sztucznych zastawek aortalnych podczas zabiegów implantacji. Wszystkie trzy implanty wszczepiane są metodą przezcewnnikowej implantacji TAVI.



Rys. 1. Badane zastawki aortalne (od lewej: Medtronic Evolut R, Acurate neo 2 oraz SAPIEN XT)
Fig. 1. Examined aortic valves (from the left: Medtronic Evolut R, Acurate neo 2 and SAPIEN XT)

Pierwszym testowanym oprogramowaniem był program ReCap firmy Autodesk. Jest to oprogramowanie, które pozwala generować modele 3D wykorzystując zaimportowane skany lub zdjęcia. Program generuje model poprzez utworzenie chmury punktów, które połączone płaszczyznami tworzą powierzchnie lub bryły badanych obiektów. Wygenerowany model może być modyfikowany i poprawiany bezpośrednio w programie ReCap bądź w programach CAD [3]. Jest to rozwiązanie znacznie tańsze niż stosowanie systemów profesjonalnych w tym zakresie, dlatego też zdecydowano się na wykonanie testów możliwości tego systemu, w zakresie odwzorowania skomplikowanej konstrukcji siatek zastawek.

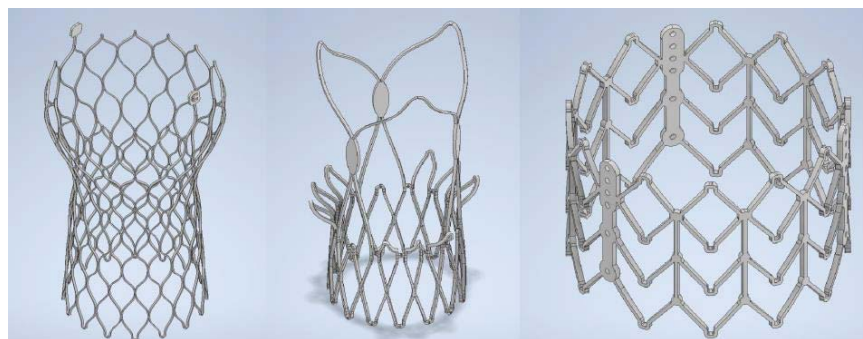
Do testów wybrano zastawkę Medtronic Evolut R. Jest ona wykonana z nitinolu (NiTi), co wymagało zastosowania farby matującej aby zminimalizować efekt metalicznego połysku. Stent zastawki posiada strukturę koronki o przekroju okrągłym, przez co widoczna jest jego przeciwległa powierzchnia. Aby wyeliminować ten problem zastawkę nałożono na czarny walec, który umożliwił widoczność na zdjęciach tylko frontalnej części zastawki. Wykonano serię testów generowania modelu zastawki, wynik jednego z nich przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Test wygenerowania modelu zastawki Evolut R w programie ReCap
Fig. 2. Test of generating the Evolut R valve model in the ReCap program

Na rys. 2. można zaobserwować do połowy wysokości modelu zarys stentu oznaczony kolorem czerwonym. Pozostała, górna część modelu była całkowicie zdeformowana. Był to obszar, w którym stent jest oddalony od walca. Kolejną wadą było wygenerowanie powierzchni samego walca, która nałożyła się na model zastawki. Program nie mógł utworzyć modelu, który umożliwi przeprowadzenie modyfikacji i wykonanie symulacji zaciskania zastawki. Ze względu na niezadowalające wyniki spowodowane ograniczonymi możliwościami oprogramowania zdecydowano przerwać testy programu Autodesk ReCap.

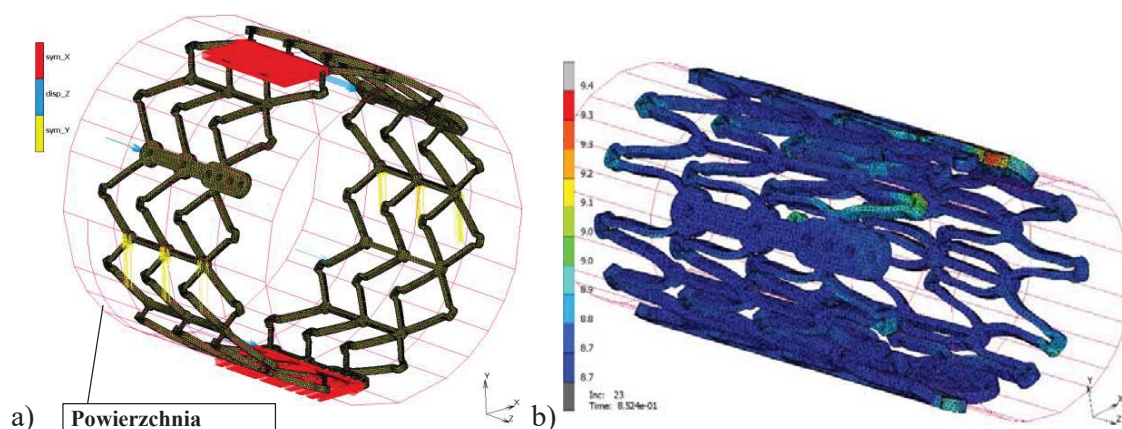
Oprogramowaniem, które zostało wykorzystane jako następne środowisko testów utworzenia modeli 3D zastawek aortalnych, był program Inventor firmy Autodesk. Przed modelowaniem przeprowadzono serię pomiarów z użyciem suwmiarki DIN 862. Wykonano modele 3D stosując narzędzia do modelowania powierzchniowego oraz bryłowego. Zastosowano funkcje szkicu 3D oraz rzutowania na płaszczyznę, aby jak najdokładniej odwzorować geometrię implantów. Wykonane modele przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Modele 3D zastawek (od lewej: Medtronic Evolut R, Acurate neo 2 oraz SAPIEN XT)
 Fig. 3. 3D models of the valves (from the left: Medtronic Evolut R, Acurate neo 2 and SAPIEN XT)

Program Autodesk Inventor umożliwił wykonanie modeli wszystkich trzech zastawek aortalnych. Ich powierzchnie były ciągłe i gładkie, wszystkie modele posiadały jeden korpus bryłowy, a liczba krawędzi zmiany geometrii została zminimalizowana. Umożliwiło to zakończenie części testowej i przeprowadzenie testowej symulacji numerycznej.

Symulacja numeryczna procesu zaciskania zastawki SAPIEN XT przeprowadzona została z wykorzystaniem oprogramowania MSC.Apex oraz MSC.Marc. Przeprowadzono dyskretyzację utworzonego modelu i po wprowadzeniu parametrów analizy MES wykonano symulację numeryczną. Opracowany model dyskretny bazuje na elementach skończonych typu TET (liczba elementów 0,3 mln, liczba węzłów 0,5 mln, ok. 1,5 mln stopni swobody). Podczas analizy wykorzystano parametry materiałowe materiału z pamięcią kształtu (materiał Nitinol, dane materiałowe: $\sigma_s^{AS+}=500$ MPa, $\sigma_f^{AS+}=500$ MPa, $\sigma_s^{SA+}=300$ MPa, $\sigma_f^{SA+}=500$ MPa, $\sigma_s^{AS-}=700$ MPa, $\nu=0.3$, $\varepsilon_L=0.007$, $\alpha=0.12$). Przyjęto odpowiednie warunki brzegowe zapewniające swobodną deformację elementu a zarazem spełniające warunki uzyskania rozwiązania (rys. 4a). Symulacja procesu zaciskania i rozprężania przebiega przy automatycznie dobieranej liczbie iteracji. Wynik symulacji przedstawiono na rysunku 4b. Obciążenie realizowane jest poprzez zmianę średnicy sztywnej zewnętrznej powierzchni walcowej w kolejnym kroku iteracji (warunek przemieszczeniowy, zmniejszenie średnicy o 60%). W obszarze styku pomiędzy powierzchnią sztywną i modelem dyskretnym przyjęto dodatkowy warunek kontaktu (kontakt typu *touching*). Rys. 4b przedstawia deformację zastawki w końcowej fazie procesu zaciskania (przemieszczenia wyrażone są [mm]).



Rys. 4. Symulacja numeryczna procesu zaciskania zastawki SAPIEN XT: a) warunki brzegowe, b) deformacja (przeszyczenia w [mm])

Fig. 4. Numerical simulation of the SAPIEN XT valve clamping process (displacements in [mm])

Największe deformacje można zaobserwować w górnej i dolnej części koronki stentu. Doszło zarówno do skrócenia tych elementów i przeszczenia w kierunku prostopadłym do ich osi. Na zniekształcenie najbardziej narażone są zagięcia drutu, ale również miejsca jego połączenia z płytkami mocującymi zwierzące osierdzie. W tych obszarach przeszczenia wahają się od 8,7 do 9,4 mm. Pozostały obszar modelu nie doznał większych zniekształceń. Powierzchnia ta oznaczona jest kolorem niebieskim, a różnice w deformacjach wynoszą około 0,1 mm.

3. Podsumowanie

Wykonane próby odwzorowania modeli 3D konstrukcji zastawek aortalnych wykazały, że testowane oprogramowanie Autodesk ReCap ma duże trudności z poprawnym odtworzeniem kształtów zastawki na podstawie prostego obrazowania (wykorzystano tu profesjonalny aparat fotograficzny). Prawdopodobnie należałoby tu zastosować znacznie bardziej zaawansowane systemy inżynierii odwrotnej w zakresie odtwarzania geometrii 3D (np. Geomagic Design X). Natomiast dostępne w zakresie wersji studenckiej oprogramowanie Autodesk Inventor umożliwiło stworzenie modeli 3D o skomplikowanym kształcie, spełniających wymagania dotyczące jakości powierzchni i brył, pod kątem przeprowadzenia na nich symulacji numerycznych. Jednakże takie podejście jest zdecydowane bardziej pracochłonne. Opracowane modele implantów nadają się do procesu dyskretyzacji i przygotowania modeli numerycznych pozwalających na wykonanie symulacji procesów spotykanych w trakcie implantacji (np. proces zaciskania i rozprężania) i obserwacji stanu deformacji poszczególnych fazach zaciskania i rozprężania zastawki.

4. Literatura

- [1] Ajit P. Yoganathan, Zhaoming He, S. Casey Jones: Fluidmechanics of heart valves, Annual Review of Biomedical Engineering, 2004.
- [2] Chodór, P., Wilczek, K., & Kalarus, Z.: The concept of a novel transcatheter aortic valve. Advances in Interventional Cardiology/Postępy w Kardiologii Interwencyjnej, 2020, 16(4), 482-485. <https://doi.org/10.5114/aic.2020.101776>.
- [3] <https://www.arkance-systems.pl/oprogramowanie/autodesk-recap-pro>. Dostęp: 06.01.2022 r.

ANALIZA STANU NAPRĘŻENIA NA POZIOMIE MIKROSTRUKTURY KOMPOZYTU WZMACNIANEGO CZĄSTECZKAMI

inż. JAKUB MARCZAK,

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Witold Ogierman

Streszczenie. Niniejszy artykuł skupia się na numerycznej analizie stanu naprężenia na poziomie mikrostruktury materiału kompozytowego wzmocnianego cząsteczkami. Analizie poddano wycinek materiału w postaci sześcianu, który został potraktowany jako reprezentatywny element objętościowy. Rozpatrywany model kompozytu składa się z osnowy w postaci stopu aluminium oraz kulistych wtrąceń ceramicznych. Rozkład naprężeń wyznaczono z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES).



STRESS ANALYSIS ON THE MICROSTRUCTURE LEVEL OF THE PARTICLE REINFORCED COMPOSITE

Abstract. The present paper is focused on the stress analysis at the microstructure level of a particle reinforced composite material. A cubic section of the material was taken into account and treated as the representative volume element. The considered model of the composite consists of an aluminium matrix and spherical ceramic inclusions. The stress distribution was determined using the finite element method (FEM).

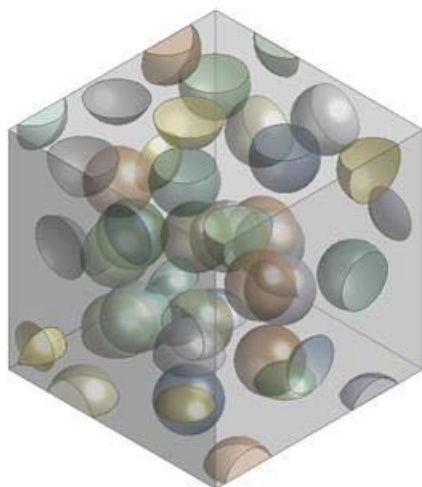
1. Wprowadzenie

Materiały kompozytowe o osnowie ze stopu aluminium wzmocnione cząstkami ceramicznymi są dobrze znane ze swojego wysokiego stosunku wytrzymałości do gęstości, dobrych właściwości tribologicznych i odporności na korozję. W związku z tym coraz częściej zastępują one swoje stopy monolityczne w dziedzinie inżynierii samochodowej, morskiej i lotniczej. Od trzech dekad naukowcy wykazują zainteresowanie tymi materiałami i starają się ulepszyć ich właściwości, aby nadawały się do stosowania w różnych obszarach [1-3]. Ze względu na niejednorodną budowę materiału i duży kontrast własności mechanicznych poszczególnych faz, rozkład naprężenia na poziomie mikrostruktury charakteryzuje się zwykle wysokim stopniem niejednorodności. Celem przeprowadzonych badań jest numeryczne wyznaczenie rozkładu naprężenia na poziomie mikrostruktury materiału. Z przeglądu literatury wynika, że najczęściej stosowaną metodą wykorzystywaną w tym zakresie jest metoda elementów skończonych [4]. W ramach niniejszego artykułu analizie poddano model wycinka materiału w postaci sześcianu, który został potraktowany jako reprezentatywny element objętościowy. Rozpatrzono trzy modele zawierające kuliste cząsteczki wzmocniające o trzech różnych udziałach objętościowych. Do wyznaczenia rozkładów naprężeń zastosowano metodę elementów skończonych realizując obliczenia w programie Ansys. Wyznaczone rozkłady naprężeń zobrazowano za pomocą barwnych map oraz histogramów.

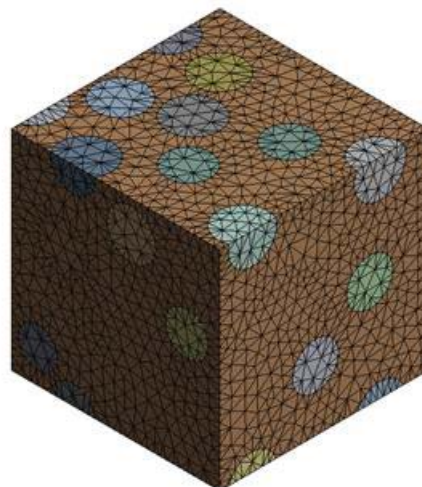
2. Model numeryczny

Model geometryczny mikrostruktury analizowanego kompozytu został utworzony w programie MSC Digimat. Następnie został on wyeksportowany do programu Ansys, w którym wygenerowano siatkę elementów skończonych, zadano warunki brzegowe oraz przeprowadzono obliczenia numeryczne. Analizie poddano sześcienny reprezentatywny element objętościowy zawierający 30 kulistych wtrąceń (rys. 1). Model dyskretny zbudowano dzieląc układ na czworościenne elementy skończone z kwadratowymi funkcjami kształtu. Zadano przemieszczeniowe warunki brzegowe symulując jednoosiowe rozciąganie sześcianu powodujące odkształcenie w kierunku rozciągania o wartości 0.001. Zarówno dla osnowy jak i wzmocnienia przyjęto liniowosprężysty model materiału uwzględniając następujące stałe:

- moduł Younga:
 - o dla stopu aluminium, $E_{Alu} = 69000$ [MPa],
 - o dla ceramiki Al_2O_3 , $E_{Cer} = 380000$ [MPa],
- liczba Poissona:
 - o dla stopu aluminium, $\nu_{Alu} = 0,33$,
 - o dla ceramiki Al_2O_3 , $\nu_{Cer} = 0,17$.



a)



b)

Rys. 1. Model mikrostruktury o udziale objętościowym wzmocnienia 20%: a) model geometryczny,

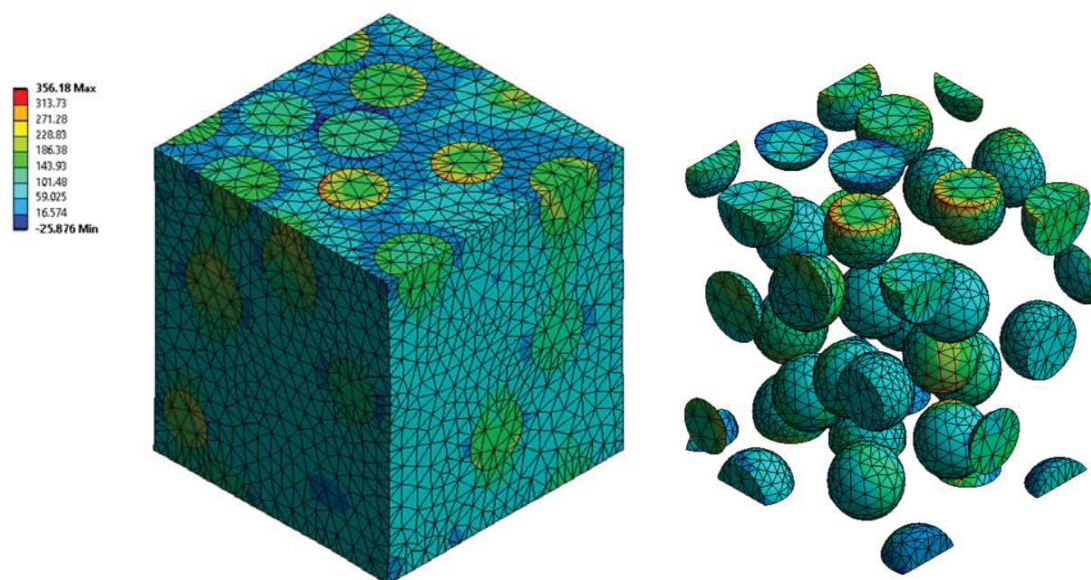
b) siatka elementów skończonych

Fig. 1. Model of the microstructure with a volume fraction of 20%: a) geometrical model, b) finite element mesh

3. Wyniki obliczeń

Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych zobrazowano na przykładzie kompozytu o udziale objętościowym fazy wzmacniającej 20% za pomocą barwnych map maksymalnych naprężeń głównych (rys. 2), a także histogramu przedstawiającego rozkład maksymalnych naprężeń głównych (rys. 3). Wpływ udziału objętościowego wzmocnienia na rozkład maksymalnych naprężeń głównych w cząsteczkach wzmacniających zaprezentowano

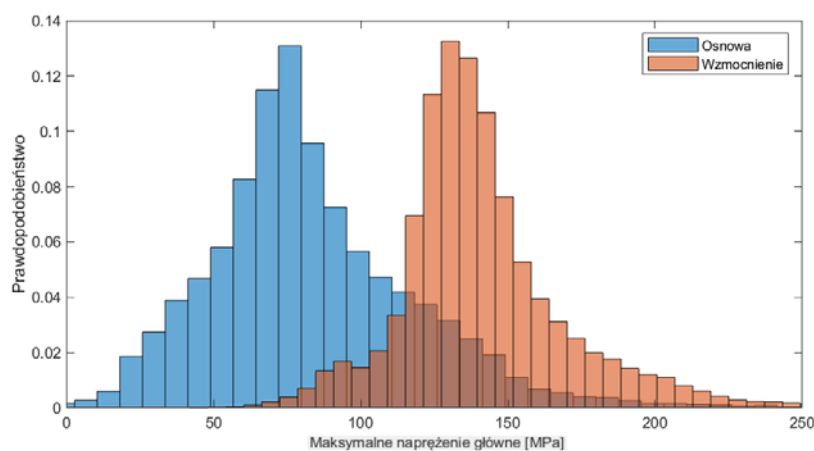
natomiast na rys. 4, gdzie zilustrowano wyniki dla udziałów objętościowych 10%, 15% oraz 20%. Średnie wartości maksymalnego naprężenia głównego dla poszczególnych faz i udziałów objętościowych wzmocnienia zostały zawarte w tabeli 1.



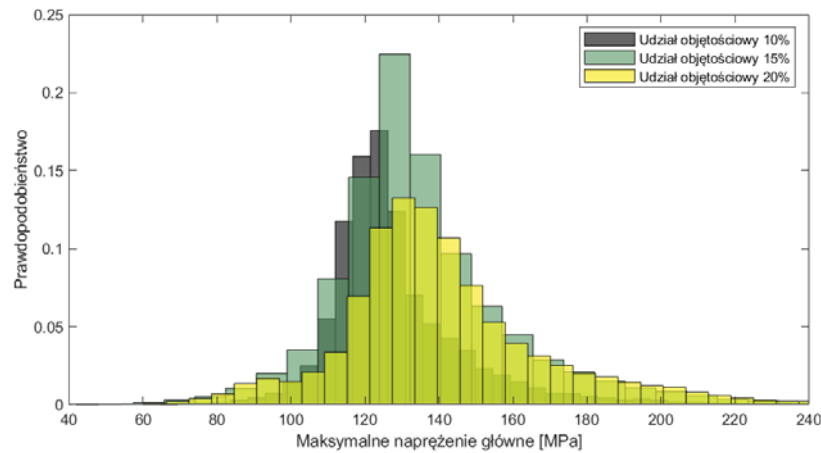
a)

b)

Rys. 2. Rozkład maksymalnego naprężenia głównego dla kompozytu o udziale objętościowym wzmocnienia 20%: a) widok ogólny, b) widok na cząsteczki [MPa]
 Fig. 2. Distribution of maximum principal stress in composite with volume fraction of 20%:
 a) overall view, b) view on the particles [MPa]



Rys. 3. Rozkłady maksymalnych naprężeń głównych w poszczególnych fazach dla kompozytu o udziale objętościowym 20%
 Fig. 3. Distribution of the maximum principal stresses in the material phases for composite with a volume fraction of 20%



Rys. 4. Rozkład maksymalnych naprężeń głównych w fazie wzmacniającej dla trzech różnych udziałów objętościowych

Fig. 4. Distribution of the maximum principal stresses in the reinforcement for three different volume fractions

Tabela 1. Zestawienie średnich wartości maksymalnych naprężeń głównych w zależności od udziału objętościowego fazy wzmacniającej

Table 1. Summary of the average values of the maximum principal stress in terms of the reinforcement volume fraction

Faza	Udział objętościowy wzmocnienia		
	10%	15%	20%
Osnowa	76.06 MPa	80.78 MPa	83.56 MPa
Wzmocnienie	128.75 MPa	136.11 MPa	141.9 MPa

4. Wnioski

Zastosowanie metody elementów skończonych pozwoliło na wyznaczenie rozkładów naprężeń na poziomie mikrostruktury materiału. W analizowanym przypadku, różne poziomy udziału objętościowego fazy wzmacniającej skutkowały odmiennymi rozkładami naprężeń w poszczególnych fazach. We wszystkich przypadkach wartość średnia naprężenia dla wzmocnienia jest większa niż w przypadku osnowy. Można również zaobserwować, że szerokość histogramów związanych z naprężeniami rośnie wraz ze wzrostem udziału objętościowego fazy wzmacniającej.

Literatura

1. Kalkanli A., Yilmaz S., Synthesis and characterization of aluminum alloy 7075 reinforced with silicon carbide particulates. *Materials and Design*, Vol. 29, s. 775–780 (2008).
2. Manoharan M., Gupta M., Effect of silicon carbide volume fraction on the work hardening behaviour of thermo mechanically processed aluminium-based metal–matrix composites. *Composites: Part B*, Vol. 30, s. 107–112 (1999).
3. Srivatsan T.S., Prakash, A., The quasi-static fracture behaviour of an aluminum alloy metal–matrix composite. *Composites Science and Technology*, Vol. 53, s. 307–315 (1995).
4. Rasool A., Böhm H.J., Effects of particle shape on the macroscopic and microscopic linear behaviors of particle reinforced composites. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 58, s.21-34 (2012).

STUDIUM ZASTOSOWANIA BUDOWLANYCH MATERIAŁÓW TERMOOSZCZĘDNYCH

**DANIEL MICHALSKI, MICHAŁ ŚWIETLIK, MATEUSZ BERZOWSKI,
BARTŁOMIEJ CICHY, SZYMON BIJAŃSKI,**

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr V, 1 stopień

Automatyka i Robotyka, semestr V, 1 stopień

Opiekunowie naukowci: Dr inż. Anna Korczak, Dr inż. Jolanta Dziatkiewicz,

Dr inż. Grażyna Kałuża

Streszczenie. W niniejszej pracy opracowano porównanie dostępnych na rynku materiałów termoizolacyjnych oraz budowlanych w odniesieniu do ich własności izolacyjnych. Wzięto pod uwagę ich cenę, jak i własności termoizolacyjne, a także obowiązujące w Polsce aktualnie prawo. Przeprowadzono również symulację w środowisku MES oprogramowania Ansys obrazującą problematykę przepływu ciepła przez przegrody budowlane.

APPLICATION STUDIES IN THE IMPLEMENTATION OF INSULATING BUILDING MATERIALS

Abstract. In this study the comparison of the thermal insulation and construction materials available on the market with regard to their performance in preventing heat loss through the walls of buildings is presented. Their price and thermal insulation properties as well as the law currently in force in Poland were taken into account. As an addition, a simulation was carried out in the FEM environment of the Ansys software, showing the problem of heat flow through building partitions.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach dostrzeżono potrzebę redukcji emisji gazów cieplarnianych, w celu redukcji zjawiska globalnego ocieplenia oraz polepszenia stanu atmosfery. Wielu specjalistów z różnych dziedzin pochyliło się nad opracowaniem możliwych rozwiązań danego problemu, dokładając doświadczenie, wiedzę i swój czas w celu opracowania realnych i możliwych do zaimplementowania rozwiązań. Jednym z wychodzących przed szereg, możliwych rozwiązań zredukowania emisji gazów cieplarnianych, jest zmniejszenie ilości energii używanej do ogrzania domostw w okresie grzewczym. Dokonać tego można poprzez zastosowanie termoizolacji ścian, która oprócz korzyści redukcji zużycia energii przeznaczonej do generowania ciepła i co za tym idzie zmniejszenia ilości gazów cieplarnianych, bezpośrednio przełożyłaby się na redukcję kosztów ogrzewania.

2. Przebieg analizy porównawczej

Do przeprowadzenia analizy wybrano cztery najpopularniejsze materiały budowlane (cegła ceramiczna, pustak ceramiczny, beton komórkowy, silikat) oraz 7 materiałów termoizolacyjnych (styropian EPS, styropian XPS, wełna szklana, wełna skalna, piana PUR

otwarto-komórkowa, piana PUR zamknięto-komórkowa, płyty PIR) [4]. Wykonano tabelę łączącą wszystkie typy materiałów, obliczając współczynniki przenikania ciepła i oporność cieplną tych połączeń. Przyjęto jednakową lub najbardziej zbliżoną grubość tychże materiałów. Zastosowano ku temu trzy zależności: (1), (2) oraz (3) [1]:

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie: R – opór przejmowania ciepła, L [m] – grubość materiału, λ [(W/(m·K))] – współczynnik przewodzenia ciepła.

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

gdzie: R_i [(m²·K)/W] – opór przejmowania ciepła składowych warstw przegrody. Ostatecznie wzór na współczynnik przenikania ciepła U ma postać

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

Po utworzeniu kombinacji materiałowych, której wartością wynikową jest uzyskany współczynnik przenikania ciepła, pierwszym etapem było usunięcie połączeń materiałów niespełniających wymogów WT 2021, czyli posiadających wynikowy współczynnik przenikania większy od 0,2 W/(m²·K) [3] i następnie dokonania analizy. Początkowo wybrano kombinacje materiałów o najlepszym stosunku ceny do własności termoizolacyjnych. Bezapelacyjnie najlepszymi materiałami pod tym kątem okazały się piana PUR zamknięto-komórkowa oraz beton komórkowy. W kolejnej analizie wzięto pod uwagę sens inwestowania w lepsze pod kątem izolacyjności materiały. Wykorzystano do tego wskaźnik efektywności ekonomicznej SPBT (Simple Payback Time) określający stosunek zainwestowanego kapitału względem oszczędności kosztów użytkowania energii.

$$SPBT = \frac{N_u}{\sum_n \Delta o_{rU}} \text{ [lata]} \quad (4)$$

gdzie: N_u [zł] – planowane koszty robót związanych ze zmniejszeniem strat przenikania ciepła dla całkowitej powierzchni wybranej przegrody, Δo_{rU} [zł/rok] – roczna oszczędność kosztów energii wynikająca z zastosowania ulepszenia termomodernizacyjnego, przypadająca na poszczególne lata z n wykorzystanych źródeł energii.

W tabeli 1 przedstawiono teoretyczne roczne zyski na ogrzewaniu przy zastosowaniu danych materiałów do termomodernizacji, natomiast w Tabeli 2 umieszczono obliczenia czasu zwrotu danej inwestycji.

Tabela 1. Porównanie skali zysków rocznych na ogrzewaniu [zł/rok]
Table 1. Comparison of the annual profits for heating [PLN/year]

	K 1	K 4	K 10	K 16	K 20	K 21	K 23	K 25
Iz 3	-	-	5007,76	6753,22	7771,46	3567,15	5253,58	-
Iz 9	34219,30	12562,06	5398,40	7196,06	8238,53	3899,40	5652,58	27586,27
Iz 15	34143,60	12499,81	5352,01	7144,01	8183,88	3859,46	5605,28	27512,85
Iz 20	-	12316,71	5217,51	6992,28	8024,19	3744,40	5468,01	-
Iz 27	34837,26	13083,31	5800,61	7641,46	8703,49	4251,40	6061,82	28188,01
Iz 33	-	12377,14	5261,59	7042,13	8076,72	3781,98	5513,01	-
Iz 35	-	12377,14	5261,59	7042,13	8076,72	3781,98	5513,01	-
Iz 39	34837,26	13083,31	5800,61	7641,46	8703,49	4251,40	6061,82	28188,01

Tabela 2. Porównanie okresu zwrotu ocieplenia izolacją [lata]
Table 2. Comparison of the payback period of thermal insulation [years]

	K 1	K 4	K 10	K 16	K 20	K 21	K 23	K 25
Iz 3	-	-	2,35	1,75	1,52	3,31	2,24	-
Iz 9	0,43	1,18	2,75	2,06	1,80	3,80	2,62	0,54
Iz 15	0,87	2,38	5,57	4,17	3,64	7,72	5,32	1,08
Iz 20	-	1,71	4,03	3,01	2,62	5,62	3,85	-
Iz 27	1,82	4,85	10,94	8,30	7,29	14,92	10,46	2,25
Iz 33	-	0,77	1,82	1,36	1,19	2,53	1,74	-
Iz 35	-	1,02	2,39	1,79	1,56	3,33	2,29	-
Iz 39	1,29	3,44	7,76	5,89	5,17	10,58	7,42	1,60

Oznaczenia:

Iz – materiał izolacyjny: 3 – styropian EPS biały, 9 – styropian EPS grafit, 15 – styropian XPS, 20 – wełna skalna, 27 – płyta PIR, 33 – wełna szklana, 35 – piana PUR zamknięto-komórkowa, 39 – piana PUR otwarcio-komórkowa

K – materiał konstrukcyjny: 1 – cegła ceramiczna pełna, 4 – pustak ceramiczny, 10 – beton komórkowy Solbet 500, 16 – beton komórkowy Solbet 600, 20 – beton komórkowy Solbet 700, 21 – beton komórkowy Ytong Forte, 23 – beton komórkowy Ytong Acura, 25 – błączek silikatowy

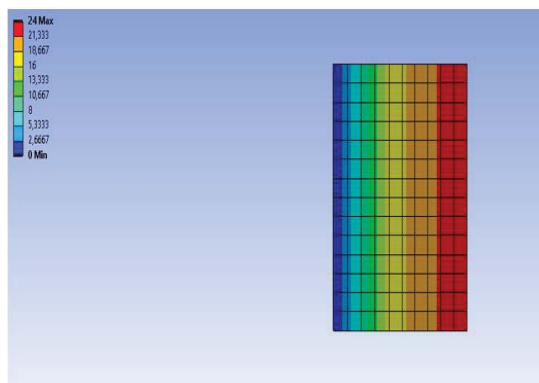
3. Symulacja przepływu ciepła

W celu zobrazowania problemu przepływu ciepła przez przegrody i dokonania analizy w stanie ustalonym, dwuwymiarowym wykorzystano oprogramowanie Ansys, w którym przygotowano model, wprowadzono odpowiednie wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów i dokonano ustaleń warunków brzegowych. Na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej analizowanej przegrody przyjęto temperaturę równą $T_z = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T_w = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, natomiast na górnej i dolnej powierzchni przegrody założono warunek brzegowy, w którym strumień ciepła $q = 0\text{ W/m}^2$ [2]. W tabeli 3 ujęto porównywane zestawienia – o najmniejszym oraz największym współczynniku przewodzenia ciepła.

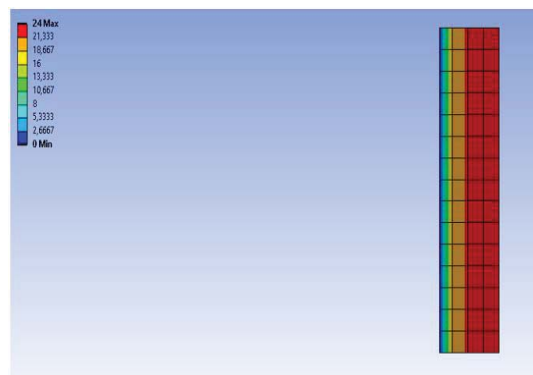
Tabela 3. Dane dotyczące analizy
Table 3. Analysis data

Numer przykłądu	Zestawienie materiałowe	Grubość izolacji [cm]	Grubość mat. konstr. [cm]	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$
1	Piana PUR zamknięto-komórkowa i Solbet 350	30	42	0,05
2	Styropian EPS biały i Silikat E18A	5	18	0,68

W analizie MES zauważono zależność gradientu temperaturowego od grubości przegrody; na rysunku 2 gradient ten jest dużo większy niż na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład temperatury - przykład 1
Fig. 1. Temperature distribution - example 1



Rys. 2. Rozkład temperatury - przykład 2
Fig. 2. Temperature distribution - example 2

4. Wnioski

Po przeprowadzeniu analizy materiałów budowlanych i termoizolacyjnych, można bardzo łatwo dostrzec, jak ważną rolę odgrywa odpowiedni dobór materiałów izolacyjnych oraz konstrukcyjnych. Zastosowanie termoizolacji znacząco poprawia energooszczędność, co po uwzględnieniu krótkiego czasu zwrotu kosztów, staje się bardzo opłacalną inwestycją. Wywnioskowano z przedstawionej powyżej analizy, iż:

- najkorzystniejszymi materiałami w perspektywie długoterminowej, byłoby zastosowanie materiałów o jak najmniejszym współczynniku przewodzenia ciepła (beton komórkowy Solbet 600 i 500 oraz piana PUR zamknięto-komórkowa),
- aby móc najtańszym kosztem spełnić normy budowlane, należy wybierać jak najlepsze i najgrubsze materiały na izolację zewnętrzną oraz unikać kosztów związanych z grubością materiałów konstrukcyjnych,
- najbardziej znaczącym czynnikiem pod kątem termoizolacyjnym jest grubość izolacji zewnętrznej, ze względu na niskie współczynniki przewodzenia,
- piany wydają się lepszym wyborem z uwagi na mniejszy koszt oraz redukcję mostków termicznych,
- materiały konwencjonalne typu styropian, wełna skalna i wełna szklana są korzystne w ujęciu krótkoterminowym - gwarantują szybki zwrot inwestycji przy zachowaniu stosunkowo dobrych właściwości izolacyjnych.

Literatura

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego.
2. <https://www.ansys.com/products/structures> (dostęp 7.02.2022).
3. <https://uprawnienia-budowlane.pl/wymagania-stawiane-materialom.html> (dostęp 5.01.2022).
4. <http://www.polskidom.com.pl/materiały-budowlane-podział-rodzaje-i-zastosowanie> (dostęp 5.01.2022).

MODELE POŻAROWE STOSOWANE W SYMULACJACH NUMERYCZNYCH ODDZIAŁYWANIA OGNI

inż. DAGMARA NIEMCZYK,

Mechanika i Budowa Maszyn, TM, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marek Paruch, Prof. PŚ

Streszczenie. Celem pracy było przeprowadzenie symulacji numerycznej dla drewnianej belki stropowej poddanej oddziaływaniu ognia. W trakcie przeprowadzania obliczeń przeanalizowano dwa rodzaje drewna (dąb oraz sosnę), które poddano oddziaływaniu źródła ognia za pomocą odpowiednio zdefiniowanych krzywych pożarowych. Porównując otrzymane mapy temperatur zauważono, że w każdej z analiz materiałem mniej odpornym na oddziaływanie ognia była sosna. Zauważono również, że najbardziej agresywnym pożarem był pożar węglowodorowy.



FIRE MODELS USED IN NUMERICAL SIMULATIONS OF THE FIRE IMPACT

Abstract. The aim of the thesis was to carry out a numerical simulation of the effect of fire on a wooden ceiling beam. During the calculations two types of wood (oak and pine) were analyzed, each material was subjected to the action of a fire source using appropriately defined fire curves. When comparing the obtained temperature maps, it was noticed that in each of the analyzes, pine was the material that was destroyed faster. It has also been noted that the most aggressive fire is hydrocarbon fire.

1. Wprowadzenie

Ogromną rolę w przedstawieniu jak zachowa się element w sytuacji pożaru odgrywają symulacje komputerowe. Są one jedną z podstaw nowoczesnej nauki, a modelowanie komputerowe jest efektywnym narzędziem analizy złożonych problemów inżynierskich i technicznych. Podstawową zaletą tego podejścia jest duża dokładność uzyskiwanych wyników oraz możliwość dynamicznej zmiany parametrów fizycznych modelu lub warunków jego pracy, bez konieczności powtórnej implementacji analizowanego zjawiska.

Do rozwiązania zadania zostało wykorzystane oprogramowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych, która jest jedną z podstawowych metod numerycznych stosowanych w obliczeniach inżynierskich. Podstawowym założeniem tej metody jest rezygnacja z analitycznego rozwiązania problemu na rzecz podziału obszaru na elementy skończone i przeprowadzenie obliczeń tylko dla wyróżnionych punktów. Poza węzłami rozwiązanie przybliżane jest na podstawie wyników otrzymanych dla poszczególnych węzłów [1, 2, 3].

2. Modele pożarowe

W zależności od rozpatrywanego zagadnienia modele pożarowe można podzielić na proste i zaawansowane. Proste modele pożarowe dzielą się na pożary strefowe oraz lokalne, cechują

się niewielką liczbą analizowanych parametrów i ograniczonym zakresem analizy. W przypadku pożaru lokalnego analizuje się zazwyczaj jeden element, w przypadku pożaru strefowego analizie może zostać poddane całe pomieszczenie.

3. Model matematyczny przepływu ciepła

Równaniem wykorzystanym do opisu zagadnienia przepływu ciepła podczas oddziaływania ognia jest równanie Fouriera (przy założeniu zerowej funkcji źródła) [4]

$$X \in \Omega: c(T)\rho(T)\frac{\partial T(X, t)}{\partial t} = \text{div}[\lambda(T)\text{grad}T(X, t)] \quad (1)$$

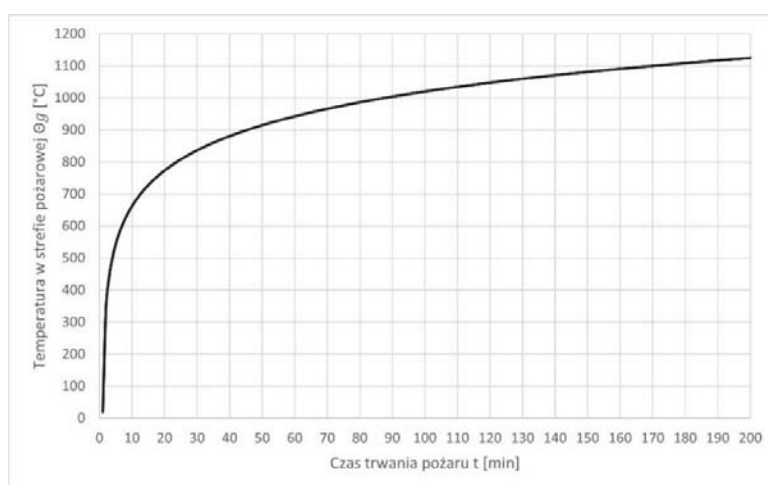
gdzie: X – współrzędne geometryczne, t [s] – czas, T [°C] – temperatura, $\lambda(T)$ [W/mK] – współczynnik przewodzenia ciepła, c [J/kgK] – ciepło właściwe, ρ [kg/m³] – gęstość, natomiast div jest operatorem dywergencji. Równanie (1) zostało uzupełnione za pomocą odpowiednich warunków brzegowo-początkowych. W tabeli 1 przedstawiono referencyjne wartości parametrów termofizycznych drewna dla temperatury 20°C.

Tabela. 1. Parametry termofizyczne
Table 1. Thermophysical parameters

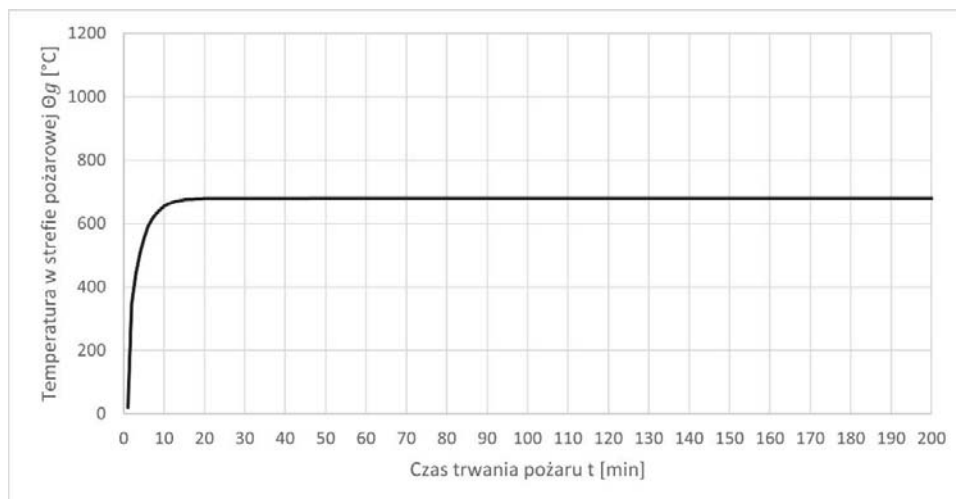
	Drewno sosnowe	Drewno dębowe
Wsp. przewodzenia ciepła [W/mK]	0.21	0.25
Ciepło właściwe [J/kgK]	2510	2510
Gęstość [kg/m ³]	550	800

4. Krzywe temperaturowe

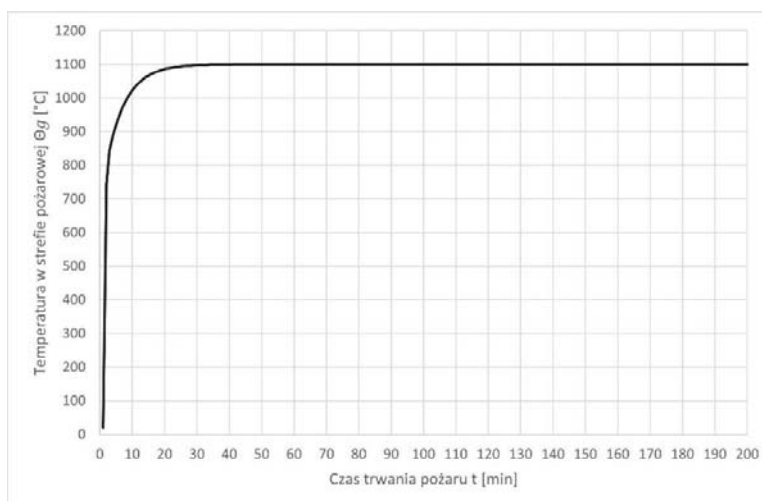
W przypadku modelowania pożaru za pomocą modelu prostego wykorzystuje się do tego celu odpowiednie krzywe pożarowe, wśród których możemy wyróżnić pożar zewnętrzny, pożar standardowy ISO oraz pożar węglowodorowy. Krzywe temperaturowe wszystkich trzech rodzajów pożarów przedstawiono na rysunkach poniżej (por. Rys. 1, 2, 3).



Rys. 1. Krzywa pożaru zewnętrznego
Fig. 1. External fire curve



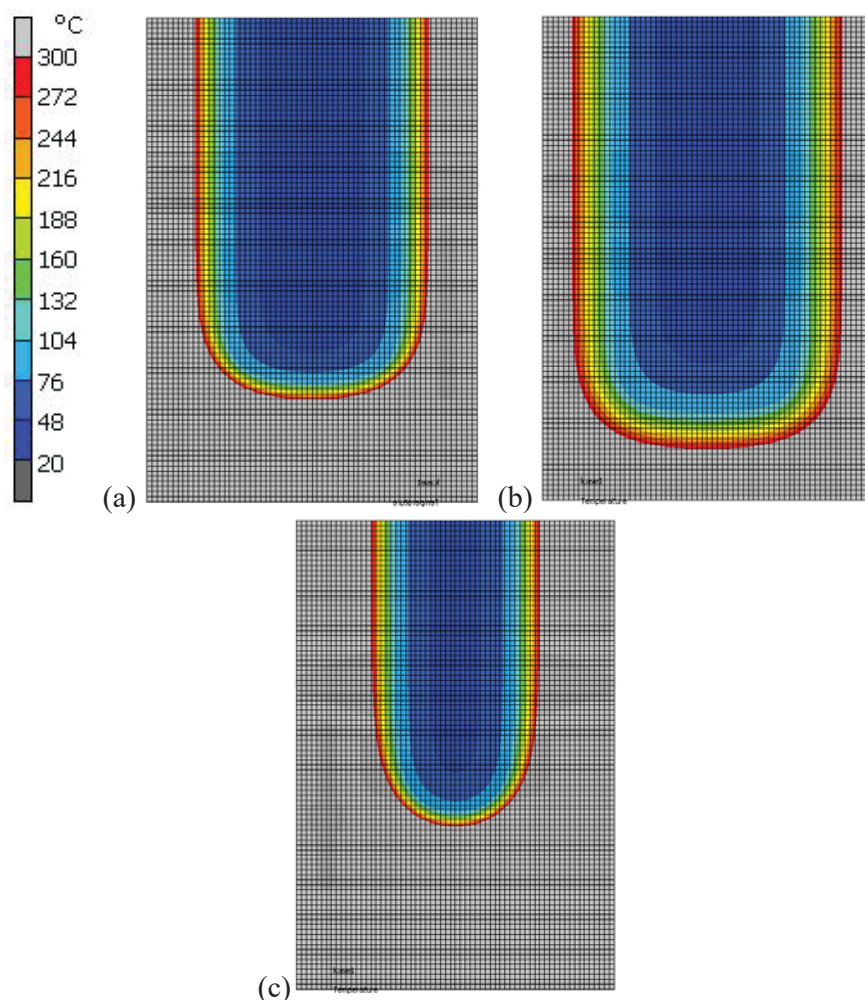
Rys. 2. Krzywa pożaru standardowego ISO
Fig. 2. Standard ISO fire curve



Rys. 3. Krzywa pożaru węglowodorowego
Fig. 3. The hydrocarbon fire curve

5. Wyniki obliczeń

Analizie poddano dwuwymiarowy, prostokątny przekrój belki drewnianej o wymiarach 190x280 mm (por. Rys. 4). Na krawędziach lewej, prawej i dolnej założono warunek brzegowy I rodzaju opisujący oddziaływanie pożaru za pomocą krzywej pożarowej. Na krawędzi górnej założono warunek brzegowy adiabatyczny. Temperatura początkowa wynosiła 20°C. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład pola temperatury dla belki wykonanej z drewna dębowego, po czasie 100 minut. Kolor szary oznacza, że temperatura obiektu przekroczyła temperaturę 300°C, co jest wyznacznikiem zwęglenia, czyli całkowitego zniszczenia materiału. Parametry termofizyczne analizowanych elementów drewnianych są zależne od temperatury i opisywane są za pomocą odpowiednich krzywych [5]. Zadanie zostało rozwiązane za pomocą oprogramowania MSC MARC.



Rys. 4. Rozkład temperatury dla poszczególnych pożarów: (a) pożar ISO, (b) pożar zewnętrzny, (c) pożar węglowodorowy

Fig. 4. Temperature distribution for individual fires: (a) ISO, (b) external fire, (c) hydrocarbon fire

Obliczenia wykonano dla dwóch rodzajów drewna, które poddano oddziaływaniu źródła ognia za pomocą trzech różnych krzywych pożarowych. W trakcie analiz zauważono, że najbardziej agresywnym pożarem jest pożar węglowodorowy, dla którego zaobserwowano najwięcej zniszczeń materiału. Mniej agresywnym, ale również szybko niszczącym belkę był pożar standardowy, a więc taki, który można obserwować w pomieszczeniach zamkniętych. Najmniej niszczącym pożarem okazał się pożar zewnętrzny.

Literatura

1. Balonek K., Gozdur S., Wprowadzenie do Metody Elementu Skończonego, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH, Kraków (1999).
2. Milenin A., Podstawy metody elementów skończonych: zagadnienia termomechaniczne, Wydawnictwa AGH, Kraków (2010).
3. Zienkiewicz O.C., Metoda elementów skończonych, Wyd. Arkady, Warszawa (1972).
4. Kostowski E., Przepływ ciepła, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice (2006).
5. PN-EN 1995-1-2 maj 2008. Projektowanie konstrukcji z uwagi na warunki pożarowe.

ZASTOSOWANIE METODY FACT W PROJEKTOWANIU MECHANIZMÓW PODATNYCH

inż. WOJCIECH NITKA,

Mechanika i Budowa Maszyn, SMB2, semestr III, 2 stopień

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie projektowania mechanizmów podatnych. Krótko opisano dwie metody za pomocą których projektowane i analizowane są struktury podatne oraz na przykładzie prostego mechanizmu zaprezentowano sposób postępowania w trzeciej, metodzie FACT (ang. *Freedom And Constraint Topologies*) co można przetłumaczyć jako metoda topologii wolnych i związanych. Następnie zaprojektowaną geometrię poddano weryfikacji wytrzymałościowej.

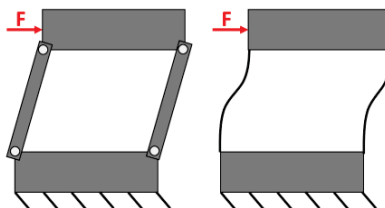


APPLICATION OF FACT METHOD IN DESIGNING COMPLIANT MECHANISMS

Abstract. In the article problem of designing compliant mechanisms has been presented. Two methods of designing and analyzing compliant structures were described and the third one, FACT, was shown in the simple example. Furthermore designed geometry was subjected to a strength analysis.

1. Wprowadzenie

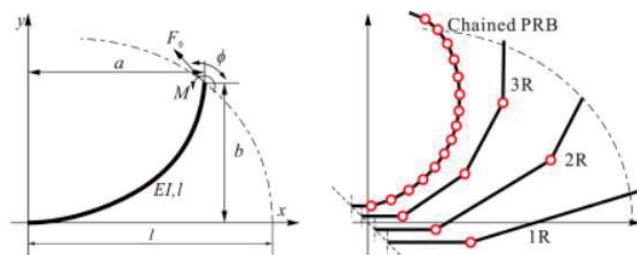
Mechanizmy podatne to układy mechaniczne, które do wykonania ruchu wykorzystują, w przeciwieństwie do klasycznych mechanizmów opartych o połączenia cierne, własności sprężyste materiału, z którego są wykonane. Choć idea wykorzystania własności sprężystych materiałów w mechanice konstrukcji znana jest już od bardzo dawna, to metody optymalizacji takich układów zostały opracowane stosunkowo niedawno. Na Rys. 1 zaprezentowano porównanie układu podatnego i sztywnego.



Rys. 1. Porównanie mechanizmu klasycznego i podatnego
Fig. 1. Comparison of classical and compliant mechanism.

Pierwsza z nich, metoda ciała pseudo sztywnego została opracowana przez prof. Larrego Howella z BYU [1], który jest pionierem w rozwoju tej dziedziny mechaniki. Opiera się ona na przekształceniu układu podatnego w układ ciał sztywnych połączonych przegubami,

który stanowi kinematyczny odpowiednik układu podatnego. Dodatkowo przegubom nadaje się sztywność skrętną. Kształt oraz wymiary ciał nieodkształcalnych dobiera się tak, aby ich wzajemny ruch odpowiadał połączeniu podatnemu. Na Rys. 2 [2] przedstawiono sposób transformacji prostego układu podatnego w metodzie ciała pseudo sztywnego.

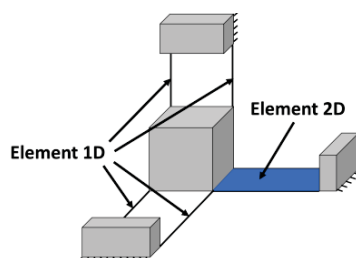


Rys. 2. Przykład transformacji układu podatnego w układ pseudo sztywny [2]

Fig. 2. Example of compliant system transformation into pseudo rigid body analog. [2]

Kolejną metodą wykorzystywaną w projektowaniu mechanizmów podatnych jest optymalizacja topologiczna. Jest to metoda, która znalazła szerokie zastosowanie w redukcji masy projektowanych konstrukcji. Niewątpliwą zaletą jest jej szybkość i prostota użytkowania. Po przygotowaniu geometrii do optymalizacji i ustaleniu funkcji celu, algorytm wykonuje obliczenia bez ingerencji użytkownika. Jest to także wadą tej metody, ponieważ cechuje się ona małą kontrolą nad uzyskanymi wynikami. Ponadto często geometria uzyskana za pomocą optymalizacji topologicznej jest trudna lub wręcz niemożliwa do odtworzenia wykorzystując standardowe metody wytwarzania.

Ostatnią z prezentowanych metod jest metoda FACT. Została ona zaproponowana przez prof. Jonathana Hopkinnsa w celu projektowania i analizy mechanizmów podatnych o różnym poziomie skomplikowania. Oparta jest na analizie budowy mechanizmów podatnych oraz mechaniki, która je opisuje. Na poziomie koncepcyjnym układy podatne można analizować całkowicie w oderwaniu od ich geometrii skupiając się jedynie na topologii połączeń pomiędzy bryłami sztywnymi. W metodzie wykorzystuje się twierdzenia o translacjach i obrotach z zakresu geometrii rzutowej oraz twierdzenia Maxwella o stopniach swobody [3][4].



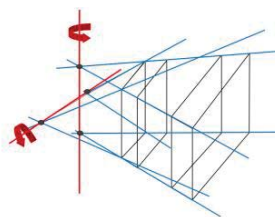
Rys. 3. Reprezentacja elementów podatnych 1D i 2D.

Fig. 3. Representation of 1D and 2D compliant elements..

2. Opracowanie koncepcji mechanizmu podatnego.

W celu zaznajomienia się z metodą FACT zaprojektowano prosty mechanizm podatny. Celem było stworzenie układu o dwóch obrotowych stopniach swobody, których osie obrotu będą przecinały się na wspólnej płaszczyźnie nazywanej także płaszczyzną swobody. Taki układ pozwala na obrót względem dowolnej osi leżącej na płaszczyźnie swobody. Aby

umożliwić proces wytworzenia mechanizmu za pomocą druku 3D w technologii FDM wykorzystano elementy 2D. Rys. 4 przedstawia reprezentację topologiczną projektowanego układu wraz z zaznaczonymi na niebiesko liniami wiązań oraz zaznaczonymi na czerwono możliwymi do uzyskania osiami obrotu. Rys. 5 z kolei przedstawia zamodelowaną geometrię.



Rys. 4. Topologia projektowanego układu
Fig. 4. Topology of the designed system



Rys. 5. Geometria mechanizmu
Fig. 5. Geometry of the mechanism

3. Obliczenia wytrzymałościowe

Obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzono w środowisku ANSYS Workbench. Parametry materiałowe oparto o filament Stratasys FDM Nylon 6 [5]. Jako że mechanizm miał być analogiem gałki sterującej, obciążenia jakie przyjęto w obliczeniach oparto o dane eksperymentalne siły, z którymi może oddziaływać palec wskazujący na modelowany mechanizm [6].

Przed przeprowadzeniem właściwych analiz wytrzymałościowych wykonano analizę modalną w celu sprawdzenia czy zamodelowana geometria spełnia przyjęte założenia o dwóch stopniach swobody. Otrzymane częstości wykazały, iż mechanizm działa w sposób przewidziany w pracach koncepcyjnych.

Tab. 1. Wyniki analizy modalnej.
Tab. 1. Modal analysis results.

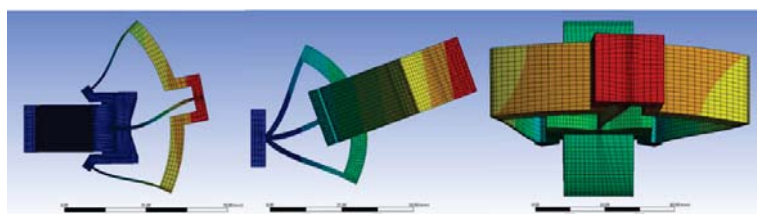
L.p.	1	2	3	4	5	6
Częstość [Hz]	49,91	76,70	500,22	616,96	1030,1	1204,1

4. Wyniki obliczeń

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie analiz wytrzymałościowych. Wykonano trzy symulacje dla różnych kierunków obciążenia zachowując tą samą siłę działającą na mechanizm podatny. Wyniki zestawiono w Tab. 2. Na Rys. 6 zaprezentowano przemieszczenia w kierunku działania siły kolejno dla drugiego, pierwszego stopnia oraz przemieszczenia całkowite dla przypadku wieloosiowego obciążenia.

Tab. 2. Wyniki przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych.
Tab. 2. Results of conducted analysis.

Kierunek obciążenia	Przemieszczenie [mm]				Napężenia [MPa]
	Ux	Uy	Uz	Ucałk.	
X	13,82	0,04	4,98	-	56,16
Y	0,05	26,34	7,03	-	54,10
Z	0,01	0,01	<0,01	-	3,02
XY	9,25	17,823	5,23	20,25	59,92



Rys. 6. Wizualizacja przemieszczeń dla rozważanych przypadków obliczeniowych
Fig. 6. Visualization of displacements for considered calculation scenarios.

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone prace miały na celu zapoznanie się z zagadnieniem projektowania mechanizmów podatnych. W tym celu wybrano metodę FACT, która ułatwia analizowanie układów podatnych podczas fazy koncepcyjnej. Pozwala także na poznanie ich topologii, która dyktuje zachowanie rzeczywistego mechanizmu. Wadą metody jest brak analitycznych narzędzi, które pozwoliłyby w sposób analityczny analizować układy podatne w sposób ilościowy tj. badanie przemieszczeń, odkształceń naprężeń itp.

W ramach artykułu przedstawiono na prostym przykładzie istotę metody topologii wolnych i związanych w zakresie teoretyczno-koncepcyjnym, którą kolejno połączono z analizą MES w celu weryfikacji poprawności uzyskanego rozwiązania.

Literatura

1. Verotti M., A pseudo-rigid body model based on finite displacements and strain energy, Mechanism and Machine Theory, Vol. 149, (2020).
2. Hao Xu, Jinqiang Gan, Xianmin Zhang, A generalized pseudo-rigid-body PPRR model for both straight and circular beams in compliant mechanisms, Mechanism and Machine Theory, Vol. 154, (2020).
3. Compliant Mechanisms Lecture 4 Part 2, The FACTs of Mechanical Design, YouTube, Dostęp online: <https://www.youtube.com/watch?v=iNOGucwkLK8> (pobrano 22.04.2022).
4. Compliant Mechanisms Lecture 4 Part 4, The FACTs of Mechanical Design, YouTube, Dostęp online: <https://www.youtube.com/watch?v=rolaXJMwbnw> (pobrano 22.04.2022).
5. Stratasys FDM Nylon 6, Stratasys, Dostęp online: https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_nylon6_1117a.pdf. (pobrano 22.04.2022).
6. Gratz-Kelly S., Meyer A., Motzki P., Nalbach S., Rizzello G., Seelecke S.S., Force measurement based on dielectric elastomers for an intelligent glove providing worker assessment in the digital production, SPIE Smart Structures and Nondestructive Evaluation, (2020).

BADANIE WPLYWU TEMPERATURY NA JAKOŚĆ WYTWORÓW WYKONANYCH W TECHNOLOGII FDM

inż. WOJCIECH NITKA,

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

JAKUB BRĘCZEWSKI,

Fizyka Techniczna, semestr IV, 1 stopień

PATRYK STAWCZYK,

Automatyka i Robotyka, semestr IV, 1 stopień

Opiekunowie naukowci: Dr inż. Wawrzyniec Panfil,

Dr hab. inż. Jacek Ptaszny, Prof. PŚ

Streszczenie. W ramach badań sprawdzono jakość próbek wykonanych w technologii FDM, otrzymanych przy różnych warunkach temperaturowych procesu druku. Wraz ze wzrostem temperatury w obszarze roboczym możliwe było łatwiejsze drukowanie oraz osiągnięcie poprawy jednorodności materiału pomiędzy warstwami. Testy wytrzymałościowe wskazały na tendencję wzrostową wartości maksymalnej siły jaką wydruk jest w stanie wytrzymać przed jego rozerwaniem.



TEMPERATURE INFLUENCE ON QUALITY OF FDM MANUFACTURED PARTS

Abstract. As part of the study, the quality of samples made in FDM technology obtained at different temperature conditions of the print process was checked. With the increase in temperature in the working area, it was possible to print easier and achieving the improvement of the homogeneity of the material between layers. Strength tests indicated the growth tendency of the maximum force value that the printout can withstand before breaking.



1. Wprowadzenie

Celem badania było sprawdzenie wpływu temperatury otoczenia na materiał oraz model końcowy wykonany za pomocą technologii FDM. Jest to jedna z metod druku trójwymiarowego, w której filament jest podawany w sposób ciągły do rozgrzanej głowicy. Po podgrzaniu w stanie uplastycznionym jest rozmieszczany warstwami tworząc docelowy kształt modelu. W badaniu wykorzystano trzy rodzaje filamentów, dla których sprawdzono wpływ podwyższonej temperatury na skurcz oraz adhezję warstw. Do badań użyto następujących rodzajów filamentów:

ASA [1] – charakteryzuje się wyższą rozciągliwością niż filamenty takie jak PETG oraz wytrzymałością na wysokie temperatury środowiska pracy.

PETG [2] – jest to materiał stosowany w elementach działających pod ciągłym obciążeniem. Posiada wysoką elastyczność oraz dobrą odporność na kontakt z wodą.

XT-CF20 [3] – ma zbliżone właściwościach do PETG, lecz charakteryzuje się większą sztywnością.

2. Parametry druku

Próbki do testów zostały wykonywane na drukarkach wyposażonych w komory umożliwiające druk w podwyższonej temperaturze. W Tab. 1 zestawiono przyjęte parametry druku.

Tabela 1 Zestawienie parametrów druku

Table 1. Listing of printing parameters

Parametr	<i>Średnica dyszy</i>	<i>Temp. bloku grzewczego</i>	<i>Temp. stołu</i>	<i>Temp. komory</i>	<i>Liczba obrysów</i>	<i>Wypełnienie</i>
Jednostka	mm	°C	°C	°C	-	%
Wartość	0,4	260	110	35-50	4	100

Kształt próbek jest zgodny z normą ISO 527-1:2012. Wykorzystano dwa rozmiary próbek, większy wariant 1A oraz mniejszy 1BA.

3. Metodyka badań

W celu oceny jakości otrzymanych modeli wykonanych w technologii FDM została przeprowadzona statyczna próba rozciągania. Próbie została poddana każda z próbek przygotowanych zgodnie z normą ISO 527-1:2012. Łącznie przetestowano 3 różne materiały: PRUSAMENT PETG, ColorFabb XT-CF20 oraz PRUSAMENT ASA. Dla dwóch pierwszych modelei wykonano korzystając z komory oraz bez jej użycia. Dla materiału ASA wykonano próbki na drukarce wyposażonej w komorę, która umożliwia druk w wyższej temperaturze otoczenia. Nie było to możliwe dla innych materiałów z powodu ograniczonego czasu realizacji jaki został przeznaczony na badanie. Ponadto wydruki z ASA'y w każdym z wariantów zostały wydrukowane w pozycji pionowej o przekroju 5x10 mm oraz poziomej o przekroju 5x5 mm.

Dla każdej z przedstawionych wyżej kombinacji wykonano po 3 próbki. Daje to łączną liczbę 30 wykonanych prób wytrzymałościowych. Podczas prób rozciągania mierzono maksymalną siłę, jaką próbka jest w stanie wytrzymać przed jej zerwaniem.

4. Jakość wykonanych próbek i ich charakterystyka

Korzystanie z komory zdecydowanie ułatwiało drukowanie szczególnie z materiałów wykazujących znaczne skurcze wraz ze spadkiem temperatury (np. PETG). Na Rys. 1 można zauważyć różnice pomiędzy modelem wydrukowanym poza drukarką (nr 1) oraz korzystając z komory (nr 2 i 3).



Rys. 1. Uzyskane próbki z materiału ASA, drukowane w pozycji pionowej w różnych warunkach

Fig. 1. ASA samples printed in a vertical position under various conditions

5. Wyniki próby rozciągania

Próby rozciągania zostały przeprowadzone za pomocą maszyny wytrzymałościowej będącej na wyposażeniu Laboratorium Zastosowań Metod Sztucznej Inteligencji Katedry Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Politechniki Śląskiej. Wyniki badań zestawiono w Tab.2 – Tab.5 oraz na Rys.2.

Tabela 2. Wyniki dla próbek z PETG wydrukowanych w orientacji poziomej

Table 2. Results for PETG samples printed in horizontal orientation

Warunki druku	F_{max} [N]	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Poza komorą	1089,93	14,58	1,34
W komorze #1	1105,07	5,20	0,47

Tabela 3. Wyniki dla próbek z XTCF wydrukowanych w orientacji poziomej

Table 3. Results for XTCF samples printed in horizontal orientation

Warunki druku	F_{max} [N]	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Poza komorą	1310,57	3,81	0,29
W komorze #1	1475,97	7,76	0,53

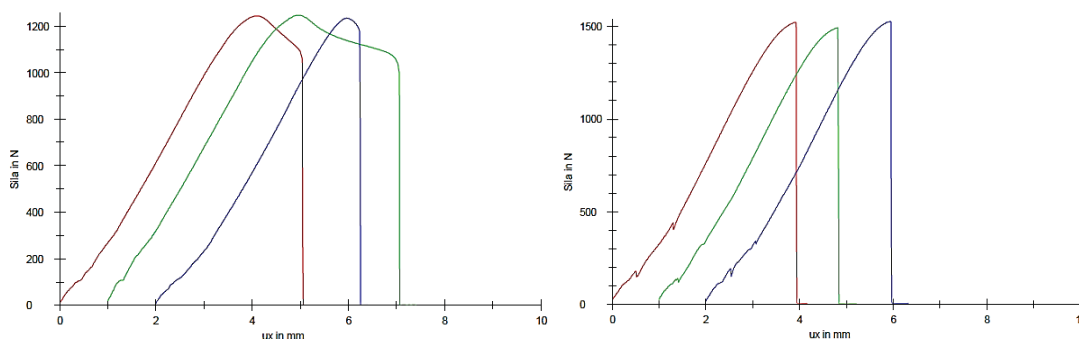
Tabela 4. Wyniki dla próbek z ASA wydrukowanych w orientacji poziomej

Table 4. Results for ASA samples printed in horizontal orientation

Warunki druku	F_{max} [N]	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Poza komorą	1082,49	13,25	1,22
W komorze #1	936,38	18,80	2,01
W komorze #2	1242,40	6,92	0,56

Tabela 5. Wyniki dla próbek z ASA wydrukowanych w orientacji pionowej
Table 5. Results for ASA samples printed in vertical orientation

Warunki druku	F_{max} [N]	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Poza komorą	917,46	136,62	14,89
W komorze #1	906,43	45,54	5,02
W komorze #2	1512,88	18,20	1,20



Rys. 2. Wykresy sił rozciągania dla próbek z ASA, wydrukowanych w orientacji poziomej oraz pionowej. Oś pionowa reprezentuje siłę w niutonach (N) oraz oś pozioma przemieszczenie w milimetrach (mm)

Fig. 2. Stretching forces for ASA samples printed in horizontal and vertical orientation. The vertical axis represents the force in newtons (N) and the horizontal axis represents the displacement in millimeters (mm)

6. Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują na pozytywny wpływ podwyższonej temperatury otoczenia podczas procesu drukowania na jakość oraz wytrzymałość otrzymanych wydruków. Jednakże wyniki dla komory nr 1 widoczne w Tab. 2 oraz Tab. 3 mogłyby wskazywać na jego brak, bądź nawet negatywny wpływ. Związane jest to prawdopodobnie z innymi parametrami występującymi podczas procesu drukowania, takimi jak wypoziomowanie stołu lub szczelność wykorzystywanej komory. Sugerują to wyniki uzyskane dla komory nr 2, przedstawiające znaczną poprawę własności mechanicznych. Dokładna weryfikacja tej hipotezy pozostaje do ewentualnego dalszego zbadania.

Literatura

1. Prusa Polymers by Josef Prusa, Technical Datasheet Prusament ASA by Prusa Polymers. (https://prusament.com/media/2018/09/Prusament_techsheat_ASA.pdf) [20.04.2022].
2. Prusa Polymers by Josef Prusa, Technical Datasheet Prusament PETG by Prusa Polymers, version 1.0 (https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf) [20.04.2022].
3. ColorFabb, Technical Datasheet colorFabb XT-CF20, version 1.0 (https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_ASA.pdf) [20.04.2022].

MODELOWANIE I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ORTEZY KOŃCZYNY DOLNEJ

inż. PAWEŁ PASZKA,

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

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Antoni John

Streszczenie. Ortezy kończyny dolnej to przyrządy umożliwiające rehabilitację oraz leczenie w przypadku problemów pacjenta z nogą, stopą bądź kolanem. Coraz szersze zastosowania ortez wymagają coraz bardziej skomplikowanych modeli i analiz wytrzymałościowych. W niniejszej pracy wykorzystano programu ANSYS do zamodelowania i analizy wytrzymałościowej zaproponowanego rozwiązania.



MODELLING AND STRENGTH ANALYSIS OF LOWER LIMB ORTHOSIS

Abstract. Lower limb orthoses are devices that enable rehabilitation and medical treatment in case of patient problems with leg, foot or knee. The need to understand orthoses forces the continuous development of 3D analyses, which include modeling of orthosis and conducting strength analyses. In this paper, ANSYS was used to create model and performed analyses of proposed solution.

1. Wprowadzenie

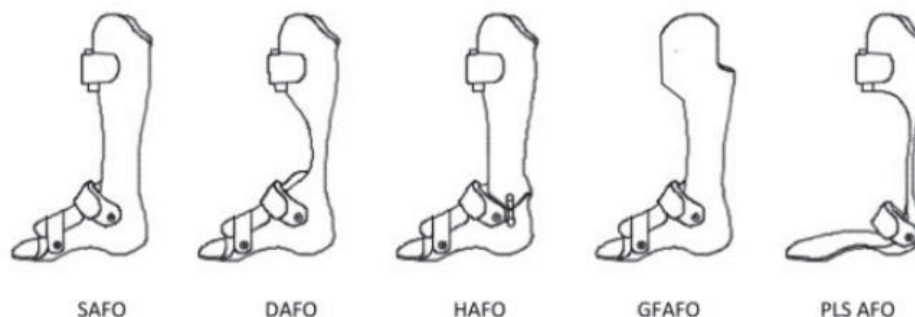
Orteza kończyny dolnej jest ważna jako przyrząd rehabilitacyjny z punktu widzenia medycyny i biomechaniki. Ortezę definiujemy jako sztuczne wsparcie kończyny bądź kręgosłupa, starające się jednocześnie odtworzyć wygląd zewnętrzny w celu uzyskania odpowiednich własności wizualnych oraz maksymalnej poprawy własności użytkowych, które mają zapewnić komfortowe użytkowanie przyrządu przez pacjenta [1].

Ortezy kończyny dolnej najczęściej są dzielone w literaturze ze względu na część kończyny, która wymaga interwencji. Z tego też powodu wyróżnić można ortezę stopy, stawu skokowego, kolanową, biodrową. Każdy z rodzajów ortez wyróżnia się unikalnym kształtem oraz wymogami, jakie musi spełniać w celu przydatności do użytkowania [2].

W przypadku ortezy stawu skokowego, literatura wyróżnia kilka szczególnych rodzajów, które można uzależnić wprost od kwestii usztywnienia nogi oraz sposobu w jaki dana orteza ma chronić staw skokowy. Najpopularniejsze przypadki, które są wykorzystywane od wielu lat w rehabilitacji pacjentów [3] zostały przedstawione na rys.1.

Pierwszą z przedstawionych na rys. 1 jest orteza typu SAFO, czyli pełna orteza stawu skokowego, która unieruchamia staw skokowy we wszystkich kierunkach. Drugim przypadkiem jest DAFO, czyli dynamiczna orteza stawu skokowego, charakteryzująca się zdecydowanie bardziej ergonomicznym kształtem przy większej swobodzie w zginaniu stawu. Podobnym przypadkiem jest również orteza typu HAFO, która osiąga podobny skutek co DAFO, z tą różnicą że orteza jest podzielona na dwie osobne części połączona przez zawias,

który z reguły umieszczony jest w okolicy kostki. Odmiennym podejściem jest orteza typu GFAFO, która podpira staw kolany z przodu oraz PLS AFO wykorzystujący koncept zbliżony do resora piórowego [3].



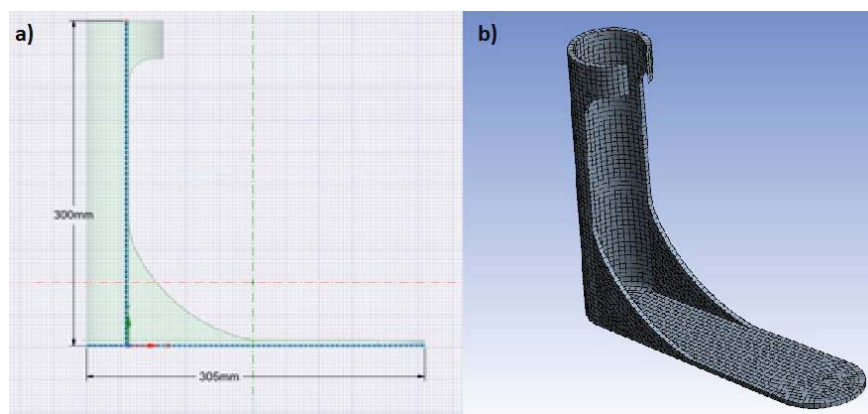
Rys. 1 Przykłady ortezy stawu skokowego [3]

Fig. 1 Examples of ankle foot orthosis [3]

Niezwykle ważnym, z punktu widzenia projektowania jest właściwe zamodelowanie ortezy. Od wielu lat można zaobserwować w literaturze różne przypadki analiz numerycznych modeli ortezy prowadzonych w bardzo zróżnicowany sposób. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań [4,5] można zauważyć szczególnie często wymieniane cele, którymi są próby dostosowania kształtu oraz zminimalizowania wartości maksymalnych naprężeń występujących w ortezie.

2. Model i wyniki analizy numerycznej ortezy

Pierwszym etapem pracy było zamodelowanie ortezy stawu skokowego z zachowaniem odpowiednich wymiarów, tak aby były zgodne z oczekiwanymi dla użytkownika. Tutaj, na potrzeby badania przyjęto że będzie nim dziecko w wieku około 140 centymetrów wzrostu, dla wartości na siatce centylowej – 50 [6]. Model przedstawiony na rys. 2 został wykonany za pomocą modułu SpaceClaim będącego częścią programu ANSYS, w którym przeprowadzone zostały również analizy numeryczne. Wykonany model wzorowano na ortezie dynamicznej – DAFO, zaś sam model jest częścią kolejnego etapu modelowania, a nie ostatecznym projektem.



Rys. 2 a) Rzut boczny modelu z wymiarami gabarytowymi b) model z nałożoną siatką

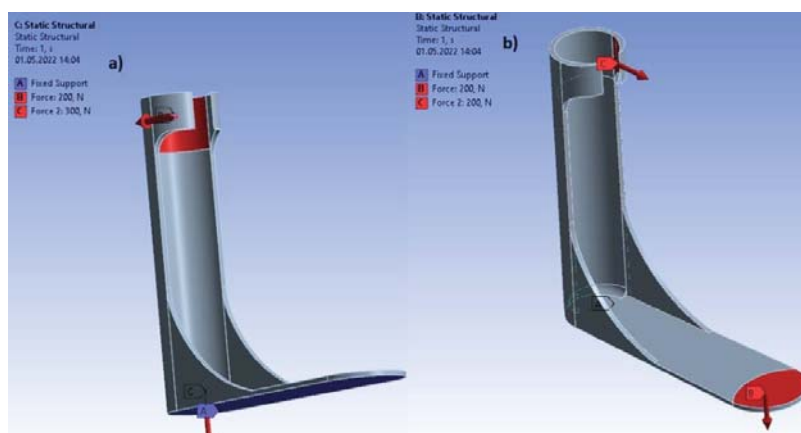
Fig. 2 a) Side projection of model with general dimensions b) meshed model

Po utworzeniu modelu geometrycznego należy uzupełnić model poprzez zadanie materiału, nałożenie siatki oraz warunków brzegowych. W przypadku materiału wybrano homopolimer polipropylenu, który bardzo często jest stosowany w tego typu urządzeniach [2]. W przypadku siatki zdecydowano się przyjąć siatkę z dominacją elementów 8-węzłowych typu *hex* oraz *tet*, które musiały zostać zastosowane na bocznych podporach, o wymiarze krawędzi 8 mm.

Tabela 1. Własności materiału
Table 1. Material properties

Gęstość	Moduł Younga	Granica plastyczności	Wsp. Poissona
0,903 g/cm ³	1461 MPa	34,6 MPa	0,4087

Zdecydowanie ważniejszym problemem było zdefiniowanie warunków brzegowych. Przygotowane zostały 2 warianty warunków brzegowych, w zależności od przypadku, dla którego mają zastosowanie. Warianty zostały zaprezentowane na rys. 3. Wartość przyłożonej siły w przypadku a) wynosi 230N i 300N, natomiast w przypadku b) po 200N na każdą z powierzchni. W podparciu, dla każdego przypadku, odebrano wszystkie stopnie swobody na dolnej powierzchni, odpowiednio - w rejonie pięty (a) i palców (b). W pierwszym przypadku (b) starano się przedstawić sytuację, w której główny nacisk jest wywierany przez przednią część stopy naciskając na ortezę, drugi przypadek (a) dotyczy odwrotnej sytuacji, czyli wtedy gdy pięta wywiera nacisk na ortezę. Fizjologicznie odpowiada to typowym fazom chodu.



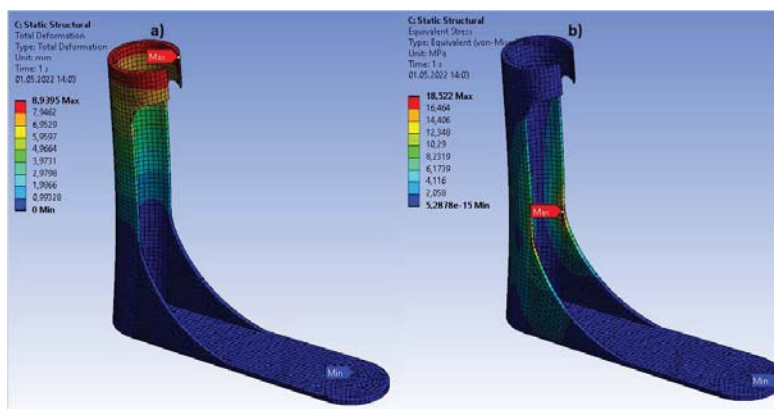
Rys. 3 Przykład zastosowanych warunków brzegowych a) nacisk na piętę, b) nacisk na palce
Fig. 3 Example of applied boundary conditions a) force on heel, b) force on the fingers

W ramach przeprowadzonych analiz numerycznych przedstawiono wyniki w postaci przemieszczeń wypadkowych oraz naprężeń redukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa. Wyniki analizy dla wariantu drugiego (warunków brzegowych w oparciu o nacisk pięty) zostały przedstawione na rys. 4, natomiast wartości liczbowe zostały zapisane w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki symulacji numerycznej
Table 2. Results of numerical simulation

	Przypadek a	Przypadek b
Przemieszczenie wypadkowe maksymalne	8,939 mm	10,276 mm
Naprężenia redukowane maksymalne	18,522 MPa	19,116 MPa

Otrzymane wyniki wskazują, że maksymalne naprężenie redukowane jest niższe o ponad 2 razy od granicy plastyczności. Należy uznać, że model ortezy z przyjętym materiałem i zadanymi warunkami brzegowymi jest w stanie przenieść naprężenia powstałe podczas użytkowania. Dodatkowo uzyskane wyniki symulacji przemieszczeń pozwalają ocenić, iż model jest wystarczająco sztywny.



Rys. 4 a) Przemieszczenia wypadkowe (w mm) i b) naprężenia redukowane (w MPa) w analizowanym modelu

Fig.4 a) Total displacement (in [mm]) and b) equivalent stresses (in [MPa]) for tested model

3. Podsumowanie

Analizując wyniki analizy wytrzymałościowej można stwierdzić, że zaproponowane rozwiązanie spełnia kryteria wytrzymałościowe, a uzyskane wartości naprężeń i przemieszczeń są porównywalne z wynikami prezentowanymi w literaturze [4]. Należy jednak zaznaczyć, że obecny model jest wyłącznie kolejnym etapem modelowania, a nie ostatecznym efektem.

W dalszych badaniach należy również wziąć pod uwagę warunki brzegowe uwzględniające kontakt ortezy z podłożem z uwzględnieniem kontaktu z tarcie i bez tarcia. Istotnym może być w tym przypadku zasymulowanie kontaktu z tarcie, które może mieć znaczący wpływ na uzyskane wyniki.

Literatura

1. Miro R.M., Lewandowski A.L, Kahle J.T, Mengelhook L.J., Boone D., Highsmith M., Bibliometric Analysis of Articles Published from 2009 through 2011 in the Journal of Prosthetics and Orthotics, Journal of the American Academy of Orthotists and Prosthetists, JPO Journal of Prosthetics and Orthotics, Vol. 25 s. 201-208 (2013).
2. Wong M.S., Zheng Y., Beygi B.H., Materials for Exoskeletal Orthotic and Prosthetic Systems”, Elsevier (2019).
3. Choo Y.J., Chang M. Ch., Commonly used types and recent development of Ankle-Foot Orthosis: a narrative review, Healthcare (2021).
4. Yadav G., Jain M.L., Gehlot V., Design and analysis of thermoplastic polypropylene ankle foot orthosis, Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 16 s. 87-91 (2021).
5. Ali H., Smagulov Z., Otepbergenov T., Finite element analysis of the CFRP-based 3D printed ankle-foot orthosis”, Procedia Computer Science Vol. 179, s. 55-62 (2021).
6. Strona internetowa: <https://www.cgc.gov/growcharts> [dostęp: 02-05-2022]

MODEL BIEŻNI ODCHUDZAJĄCEJ DLA MAŁYCH PSÓW

inż. GRZEGORZ PIEKARSKI,

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Witold Beluch, Prof. PŚ

Streszczenie. Celem pracy było wykonanie projektu bieżni do celów odchudzających dla małych psów. Projekt ten rozpatruje problematykę realizacji urządzenia zarówno pod względem mechanicznym, jak również elektrycznym i sterowania, uwzględniając zachowanie i warunki fizyczne psa. Do realizacji projektu wykorzystano oprogramowanie Ansys Workbench, Siemens NX i Matlab Simulink symulujące działanie mikrokontrolera Arduino Uno. Uzyskane wyniki wskazują na bezpieczeństwo i opłacalność ekonomiczną realizacji projektu.



MODEL OF WEIGHT LOSS TREADMILL FOR SMALL DOGS

Abstract. The aim of the work was to design a treadmill for weight loss purposes for small dogs. This project considers the implementation of the device in terms of mechanical as well as electrical and control aspects, taking into account the behaviour and physical conditions of the dog. The software used in the project was Ansys Workbench, Siemens NX and Matlab Simulink simulating the operation of an Arduino Uno microcontroller. Obtained results indicate the safety and cost-effectiveness of implementing the project.

1. Wprowadzenie

Otyłość, czyli stan, w którym nagromadzenie zbyt dużej ilości tkanki tłuszczowej stanowi zagrożenie dla zdrowia stanowi obecnie znaczący problem dotyczący zarówno ludzi [1], jak i zwierząt domowych [2]. Przykładowo dla psów jest to stan, gdy masa zwierzęcia przekracza 30% masy wskazanej, natomiast za nadwagę u psów rozumie się przekroczenie normy masy o co najmniej 15% [2]. Dla małych psów norma, w zależności od gatunku, mieści się w zakresie 4-14 kg [3]. Jedną z metod przywrócenia prawidłowej masy zwierzęcia jest zwiększenie aktywności ruchowej psa. Opracowana w ramach niniejszej pracy bieżnia ma za zadanie umożliwić taką aktywność niezależnie od możliwości wyprowadzania psa przez opiekuna bądź warunków pogodowych utrudniających spacer.

2. Założenia konstrukcyjne

Po rozpatrzeniu dwóch dostępnych na rynku typów bieżni, to znaczy mechanicznej i elektrycznej, zdecydowano się na realizację bieżni elektrycznej, ze względu na możliwość wymuszenia zmiany prędkości biegu, zmuszając tym samym zwierzę do wysiłku fizycznego niezależnie od jego chęci. Założono przy projekcie górną masę zwierzęcia wynoszącą 18,5 kg, co stanowi stan otyłości najcięższego z analizowanych małych psów.

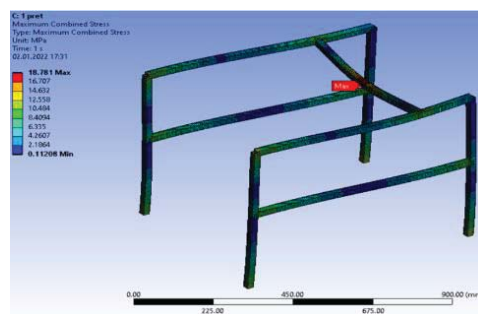
Ze względu na bezpieczeństwo psa, założono potrzebę monitorowania jego obecności na

bieżni poprzez zastosowanie czujników optycznych oraz zastosowano system bezpieczeństwa z wykorzystaniem przycisku pozwalającego na natychmiastowe zatrzymanie bieżni w sytuacji niebezpiecznej dla zwierzęcia lub opiekuna, przy jednoczesnym zachowaniu przemieszczeń nie przekraczających 2mm. Wymuszono również odpowiedni czas zatrzymania w celu zapewnienia możliwości spokojnego zejścia psa z pasa bieżni. Przyjęto maksymalną prędkość równą 25 km/h, co stanowi wartość przekraczającą maksymalną prędkość osiąganą przez psy o założonej masie [4].

W projekcie uwzględniono również odpowiednie zasilanie dla napędu i elementów elektronicznych, jak również mocowanie uprząży w sposób pozwalający na wygodne dla zwierzęcia poruszanie się po bieżni przy jednoczesnym uniemożliwieniu mu położenia się na taśmie lub zejścia z urządzenia.

3. Projekt bieżni

Projekt części mechanicznej bieżni opracowano w programie Siemens NX a następnie zweryfikowano od strony wytrzymałościowej przy pomocy metody elementów skończonych w oprogramowaniu Ansys Workbench (rysunek 1). Dzięki zastosowaniu tej metody obliczeniowej, możliwe było dopasowanie najlepszego materiału pod względem stosunku ceny do masy i możliwości wytrzymałościowych. Dla ramy o wymiarach 530x560x1250 okazało się, że najlepszym materiałem spośród rozpatrywanych opcji o przekrojach kwadratowych w zakresie długości ściany bocznej 12-20 mm i grubości 1-2 mm, jest profil stalowy 15x15x1,5mm. Do jego zalet można zaliczyć dostępność, własności wytrzymałościowe i niewysoką cenę względem rozpatrywanych również profili aluminiowych. W projekcie rozpatrywano również różne możliwości wzmocnienia ramy, poprzez dodatkowe zastrzały bocznych ścian i dodatkową belkę łączącą obie części konstrukcji, jednak w wyniku obliczeń zdecydowano się na rozwiązanie widoczne na rysunku 1.



Rys. 1. Rozkład naprężeń zredukowanych (Hubera-von Misesa) w ramie
Fig. 1. Huber-von Mises stress distribution in the frame

W projekcie zastosowano silnik dedykowany do bieżni o mocy 1,5KM Tewe Engines C8APB1 wraz ze sterownikiem JMC 3DM860. Całość systemu nadzorowana jest przy pomocy mikrokontrolera Arduino Uno. Silnik przy pomocy przekładni pasowej przenosi napęd na wał napędowy wykonany z rury stalowej 2000x20mm, pozwalając na napędzanie pasa bieżni.

Ze względów bezpieczeństwa zastosowano w bieżni czujniki optyczne E18-D80NK pozwalające na wykrycie obecności zwierzęcia na pasie, jak również karabińczyk pozwalający na przymocowanie smyczy z psem w szelkach w sposób pozwalający na swobodny chód i bieg zwierzęcia.

Zabezpieczono również boki bieżni przy pomocy płyt PCV, zachowując przy tym estetykę

urządzenia. W przedniej części urządzenia znajduje się panel zawierający wyświetlacz z informacją o aktualnie ustawionym tempie bieżni, przyciski sterowania prędkością i przycisk bezpieczeństwa. Widok bieżni został zaprezentowany na rysunku 2.



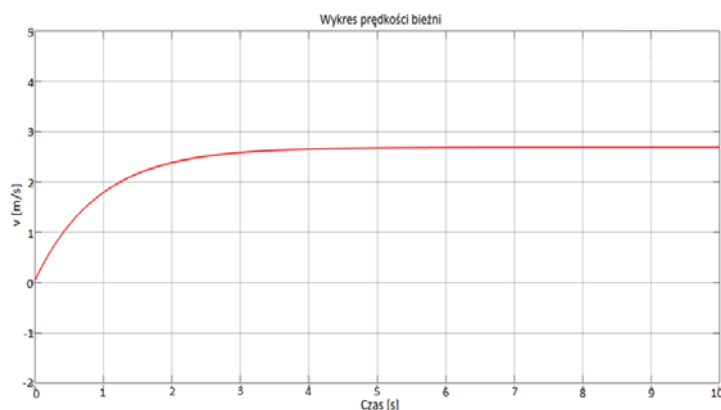
Rys. 2. Widok projektu CAD bieżni
Fig. 2. CAD design view of the treadmill

Sterowanie zostało wykonane w środowisku Matlab Simulink wraz z rozszerzeniami Simulink Support Package for Arduino oraz Simscape Electrical, przy czym informacje o parametrach silnika zaczerpnięto z [5]. W algorytmie sterującym określono kilka wartości prędkości obrotowych, uzyskanych poprzez zmianę napięcia silnika. W oprogramowaniu uwzględniono również wartości sygnałów z czujników i przycisku bezpieczeństwa w celu umożliwienia startu i zatrzymania bieżni.

4. Uzyskane wyniki i ich interpretacja

W celu określenia poprawności działania kodu przeprowadzono symulację, zadając w oprogramowaniu Matlab określone wartości i obserwując reakcję układu na ich zmianę.

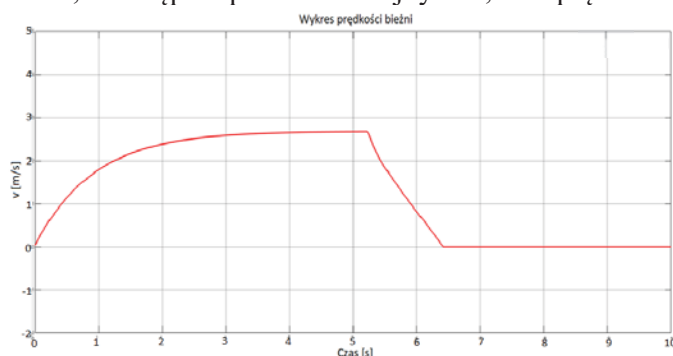
Pierwszą analizowaną sytuacją było rozpędzenie bieżni do prędkości maksymalnej możliwej do osiągnięcia przez psy małych ras, to znaczy 2,68 m/s, co zostało przedstawione na rysunku 3. Określono, że czas potrzebny do uzyskania maksymalnej prędkości to około 4,5 s.



Rys. 3. Rozpędzenie bieżni od 0 do prędkości maksymalnej.
Fig. 3. Acceleration of the treadmill from 0 to maximum speed.

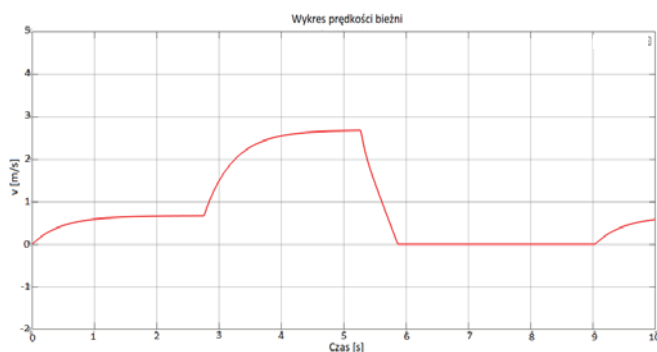
Druga analiza (rysunek 4) pozwoliła na sprawdzenie, jaki jest potrzebny czas do zatrzymania w sytuacji awaryjnej. Określono, że czas potrzebny na zatrzymanie wynosi około 1 s.

Analiza widoczna na rysunku 5 pozwoliła na określenie zachowania bieżni kolejno po rozpędzeniu jej do prędkości chodu, prędkości maksymalnej, awaryjnym zatrzymaniu i ponownym uruchomieniu. Bieżnia jest w stanie po około 2 s osiągnąć wartość prędkości chodu, to znaczy 0,68 m/s, a następnie po około kolejnych 2,5 s – prędkości maksymalnej.



Rys. 4. Rozpędzenie bieżni do prędkości maksymalnej, a następnie awaryjnie zatrzymanie.

Fig. 4. Accelerate the treadmill to maximum speed and then stop in an emergency.



Rys. 5. Rozpędzenie bieżni do prędkości chodu, osiągnięcie prędkości maksymalnej, awaryjne zatrzymanie i ponowne uruchomienie.

Fig. 4. Acceleration to walking speed, reaching max speed, emergency stop and restart.

5. Podsumowanie i wnioski

Po wykonaniu symulacji uznano, że bieżnia spełnia wymagany poziom bezpieczeństwa i jest dobrą, tańszą alternatywą dla dostępnych na polskim rynku na dzień 1.01.2022 podobnych urządzeń [6] i może zostać wykonana jako urządzenie odchudzające dla psów małych ras.

Literatura

1. Ofei F., Obesity - A Preventable Disease, Ghana Medical Journal, Vol. 39(3), s. 98-101 (2005).
2. Gossellin J., Wren J. A., Sunderlan S. J., Canine obesity: an overview, Journal of veterinary pharmacology and therapeutics. Vol. 30 s. 1-10 (2007).
3. <https://www.telekarma.pl/porady/10/kontrola.masy.ciala.psa./#top>, strona producenta karmy (dostęp 23.03.2022).
4. <https://www.rover.com/blog/how-fast-can-a-dog-run/>, strona wiodącej aplikacji mobilnej z ofertami usług opieki czasowej nad psami (dostęp 23.03.2022).
5. Sirin O., External control interface, dynamic modeling and parameter estimation of a research treadmill, Cleveland State University (2013).
6. <https://ipo-sklep.pl>, strona dystrybutora akcesoriów dla psów (dostęp 01.01.2022).

OPTIMALIZACJA AERODYNAMICZNA PRZEDNIEGO SKRZYDŁA BOLIDU WYŚCIGOWEGO

inż. MATEUSZ PIETYRA,

Mechanika i Budowa Maszyn, semestr I, 2 stopień

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

Streszczenie. Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie przedniego skrzydła bolidu wyścigowego. W tym celu zaprojektowano skrzydło w oparciu o przegląd rozwiązań z motorsportu a następnie poddano geometrię optymalizacji aerodynamicznej w oprogramowaniu ANSYS Fluent. Efektem prac jest otrzymanie kompletnego skrzydła o zadowalających parametrach aerodynamicznych.



AERODYNAMIC OPTIMISATION OF FRONT WING OF A RACING CAR

Abstract. The aim of this work was to design the front wing of a racing car. For this purpose, a wing was designed based on an overview of motorsport solutions and then the geometry was aerodynamically optimized in ANSYS Fluent software [1]. The result of the work is to obtain a complete wing with satisfactory aerodynamic parameters.

1. Wprowadzenie

Samochód wyścigowy projektowany jest w taki sposób, aby mógł poruszać się po ciasnych i krętych torach wyścigowych. Wymaga to dobrej sterowności, która jest utrudniona poprzez znaczne przesunięcie środka ciężkości pojazdów sportowych w kierunku tylnej osi. Aby uniknąć zjawiska podsterowności podczas pokonywania zakrętów konieczne jest podjęcie wielu działań mających na celu zwiększenie przyczepności kół przedniej osi. Jednym z nich jest uzyskanie docisku aerodynamicznego w przedniej części pojazdu za pomocą przedniego skrzydła [2]. Należy jednak pamiętać o sile oporu aerodynamicznego, która generowana jest przez każdy element bolidu w tym przez skrzydła, co wiąże się z koniecznością optymalizacji aerodynamicznej [3].

2. Projekt

W celu zaprojektowania kompletnego skrzydła spełniającego swoje zadanie wzorowano się na postaciach przedniego skrzydła w istniejących samochodach wyścigowych. Na podstawie tych wzorców przygotowano wstępny projekt przedstawiony na rysunku 1. Projekt uwzględnia jedynie połowę skrzydła, ponieważ jest ono symetryczne. Na potrzeby dalszych badań podzielono opisywaną geometrię na dwie części, które są niezmiennie w pewnym przedziale długości. Fragment skrzydła znajdujący się przed kołem jest najbardziej wysuniętym do zewnątrz segmentem, dlatego też został nazwany zewnętrzną częścią skrzydła. Na rysunku oznaczono go za pomocą żółtego koloru. Odcinek znajdujący się bliżej płaszczyzny symetrii nosi miano części wewnętrznej oraz otrzymał oznaczenie niebieskie.

Kolejnym etapem prac było przygotowanie analizy numerycznej. W tym celu skorzystano z modułu Fluent oprogramowania ANSYS 2021 R2. Pierwotnie przygotowano domyślną siatkę numeryczną.

Następnie przygotowano optymalizację wariantową siatki numerycznej. W tym celu na podstawie własnego doświadczenia wygenerowano 40 różnych (w tym domyślny) modeli dyskretnych, każdy z nich posiadał nieznacznie zmieniony maksymalny rozmiar pojedynczego elementu skończonego. Spośród nich wybrano dwa, które charakteryzowały się największą stabilnością obliczeń przy zachowaniu korzystnego czasu rozwiązania.

4. Optymalizacja

Zadanie optymalizacji polegało na poszukiwaniu maksymalnej wartości funkcji celu zdefiniowanej poprzez stosunek siły docisku do siły oporu aerodynamicznego. Zmiennymi projektowymi zadania są parametry geometryczne skrzydła, które w sposób jednoznaczny opisują jego postać konstrukcyjną. Na zmienne projektowe nałożono nierównościowe ograniczenia geometryczne wynikające z technicznych i technologicznych aspektów związanych z budową oraz produkcją tego typu konstrukcji. Optymalizację przeprowadzono z wykorzystaniem modułu optymalizacji zawartego w oprogramowaniu ANSYS. Wspomniany moduł z użyciem algorytmu genetycznego przygotowuje macierz wartości parametrów oraz dokonuje obliczeń wartości docisku i oporu skrzydła. Na tej podstawie budowana jest powierzchnia odpowiedzi. Następnie z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, na zbudowanej powierzchni poszukiwane jest najlepsze rozwiązanie zgodnie z zadanymi parametrami. Ostateczne wyniki analiz zestawiono z wynikami uzyskanymi dla podstawowej geometrii skrzydła zaproponowanej przed optymalizacją. Wyniki prac prezentuje tabela 1.

Tabela 1. Wyniki symulacji
Table 1. Simulation results

Część	Docisk [N]	Opór [N]
Wewnętrzna przed optymalizacją	-335,31	66,07
Wewnętrzna po optymalizacji	-696,12	44,69
Zewnętrzna przed optymalizacją	-30,25	9,09
Zewnętrzna po optymalizacji	-47,86	5,43

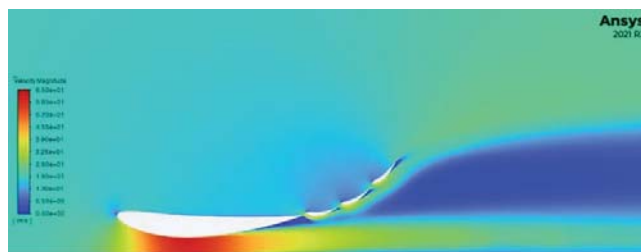
Rysunki 4-7 przedstawiają pola rozkładu prędkości oraz ciśnień dla otrzymanych w procesie optymalizacji postaci geometrycznych wewnętrznej i zewnętrznej części skrzydła.



Rys. 4. Pole rozkładu prędkości dla wewnętrznej części skrzydła
Fig. 4. Velocity distribution for the internal wing



Rys. 5. Pole rozkładu ciśnień dla wewnętrznej części skrzydła
Fig. 5. Pressure distribution for the internal wing



Rys. 6. Pole rozkładu prędkości dla zewnętrznej części skrzydła
Fig. 6. Velocity distribution for the external wing



Rys. 7. Pole rozkładu ciśnień dla zewnętrznej części skrzydła
Fig. 7. Pressure distribution for the external wing

5. Podsumowanie

Niniejsza praca ukazuje proces projektowania elementu aerodynamicznego o skomplikowanym kształcie, jakim niewątpliwie jest przednie skrzydło bolidu wyścigowego. Optymalizacja pozwoliła na znaczne ulepszenie pierwotnie przygotowanej geometrii. Dla uzyskanej wynikowej geometrii zewnętrznej części skrzydła zaobserwować można było wzrost siły docisku o ponad 50% przy jednoczesnej redukcji siły oporu o około 40% względem postaci geometrycznej zaproponowanej przed procesem optymalizacji. Natomiast optymalizacja wewnętrznej części skrzydła wykazała ponad 100% wzrostu siły docisku oraz redukcję oporu o około 30%. Uzyskane wyniki udowadniają jak znaczącą rolę w procesie projektowania elementów aerodynamicznych pełni proces optymalizacji.

Literatura

1. ANSYS FLUENT User's Guide
2. Katz J., Race car aerodynamics. Designing for speed. Cambridge (1996).
3. Piechna J., Podstawy aerodynamiki pojazdów. WKŁ, Warszawa (2000).

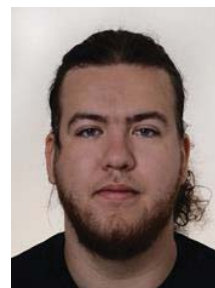
MODELOWANIE SZTUCZNEJ HIPERTERMII Z WYKORZYSTANIEM RÓWNANIA Z DWOMA CZASAMI OPÓŹNIEŃ

inż. PATRYK PISZCZEK,

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

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Streszczenie. Hipertermia to odbiegający od normy wzrost temperatury ciała. Hipertermia może być efektem niepożądanych czynników lub zostać sztucznie wywołana w celu zapobiegania lub leczenia dolegliwości organizmu. Przedmiotem pracy jest modelowanie nagrzewania tkanki skórnej poddanej działaniu zewnętrznego strumienia ciepła. Model bazuje na równaniu z dwoma czasami opóźnień, w którym parametry termofizyczne tkanki są zależne od temperatury. Zadanie rozwiązano stosując jawny schemat metody różnic skończonych. Opracowano program, który pozwala na analizę rozkładów temperatury w tkance.



THE MODELING OF AN ARTIFICIAL HYPERTHERMIA USING A DUAL PHASE EQUATION

Abstract. Hyperthermia is defined as an unusual increase of a body temperature. It can appear as an effect of unwanted cases or can be artificially induced in order to prevent or cure body diseases. The subject of the work is modeling the heating of skin tissue exposed to an external heat flux. The model is based on the dual-phase lag equation in which the thermophysical parameters of the tissue are temperature dependent. The problem was solved using an explicit scheme of the finite difference method. A program was developed that allows the analysis of temperature distributions in the tissue.

1. Wprowadzenie

Hipertermia z punktu medycznego ma w dwa znaczenia: jako objaw jest to niebezpieczny dla organizmu stan podwyższonej temperatury ciała spowodowany chorobą lub zewnętrznym czynnikiem, który może doprowadzić do poważnych uszkodzeń organizmu. Jako forma leczenia, hipertermia to sztuczne podwyższenie temperatury fragmentu lub całości ciała w celu zapobiegania lub leczenia jego dolegliwości, w tym nowotworów. Mimo ciągłych postępów naukowych, choroby nowotworowe wydają się być zbyt trudnym wyzwaniem dla współczesnej medycyny. Istnieje wiele konwencjonalnych metod walki z nowotworem, jednak nie każdy może z nich skorzystać, a ich efektywność jest zadziwiająco niska. Według statystyk z artykułu [1], na terenie całych Stanów Zjednoczonych w 2016 roku zezwolono na poddanie chemioterapii 80% pacjentów chorych na raka jelita grubego, z czego 50% z nich przeżyło kolejne 5 lat. Sumując tę statystykę, przyjmuje się efektywność chemioterapii rzędu 40%.

Podczas badania wpływu temperatury na tkankę ludzką odkryto, że komórki nowotworowe tracą swoją trwałość w podwyższonej temperaturze. Oszacowano krytyczną wartość temperatury rozpoczynającej obumieranie nowotworu na 41,5°C. Rozpoczął się rozwój hipertermii, której celem jest niszczenie nowotworów i ochrona otaczających zdrowych tkanek. Pomocne w tym zakresie są metody komputerowego planowania tego typu zabiegów.

2. Model matematyczny nagrzewania tkanki biologicznej

Do modelowania procesu nagrzewania tkanki biologicznej zastosowano równanie z dwoma czasami opóźnień (zadanie 1D) [2, 3]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_q \frac{\partial}{\partial t} \left[c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \right\} + Q(T) + \tau_q \frac{\partial Q(T)}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie $T=T(x, t)$ oznacza temperaturę, x współrzędną geometryczną, t czas, $c(T)$ to objętościowe ciepło właściwe, $\lambda(T)$ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, τ_q oznacza czas relaksacji, a τ_T czas termalizacji, natomiast

$$Q(T) = w(T)c_b(T_a - T) + Q_{met}(T) \quad (2)$$

gdzie $w(T)$ jest prędkością perfuzji krwi, c_b ciepłem właściwym krwi, T_a temperaturą krwi w aorcie i $Q_{met}(T)$ jest składnikiem metabolicznym.

Na powierzchni tkanki biologicznej przyjęto warunek brzegowy Neumanna

$$x = 0: \quad -\lambda(T) \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \tau_T \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \right] = q_b + \tau_q \frac{\partial q_b}{\partial t} \quad (3)$$

gdzie q_b jest brzegowym strumieniem ciepła, natomiast na powierzchni wewnętrznej tkanki założono stałą temperaturę równą temperaturze wnętrza ciała

$$x = G: \quad T = T_c \quad (4)$$

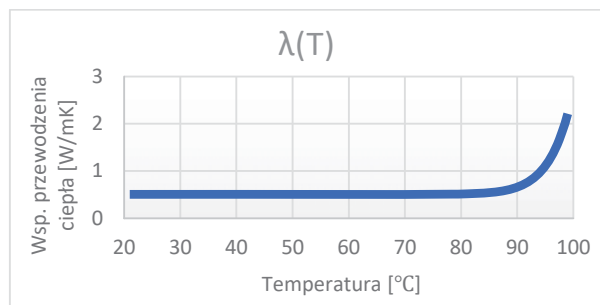
Warunki początkowe są następujące

$$t = 0: \quad T = T_p, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=0} = u = \frac{Q(T_p)}{c(T_p)} \quad (5)$$

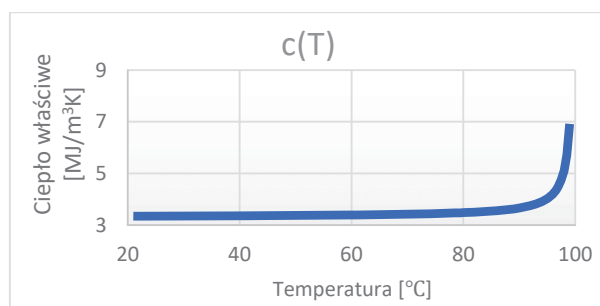
gdzie T_p oznacza temperaturę początkową tkanki, u jest początkową prędkością nagrzewania.

Sformułowane zadanie rozwiązano za pomocą jawnego schematu metody różnic skończonych [3].

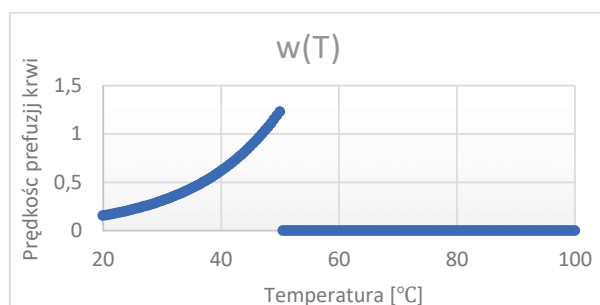
Parametry tkanki wyznaczono za pomocą badań eksperymentalnych na wątrobie bydlęcej, owczej oraz wieprzowej [4]. Wyniki badań pozwoliły na określenie zależności parametrów termofizycznych tkanek od temperatury. Okazuje się, że dla różnych tkanek zależności te są bardzo do siebie przybliżone. Stąd nasuwa się wniosek, że zależności te można również stosować analogicznie dla tkanek ludzkich. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono przebiegi współczynnika przewodzenia ciepła oraz objętościowego ciepła właściwego wątroby bydlęcej [4]. Rysunki 3 i 4 przedstawiają zależności prędkości perfuzji krwi oraz składnika metabolicznego od temperatury.



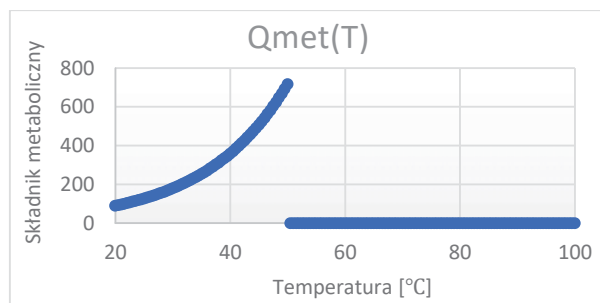
Rys. 1. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury
Fig. 1. Temperature-dependent thermal conductivity



Rys. 2. Zależność objętościowego ciepła właściwego od temperatury
Fig. 2. Temperature-dependent volumetric specific heat



Rys. 3. Zależność prędkości perfuzji krwi od temperatury
Fig. 3. Temperature-dependent blood perfusion rate

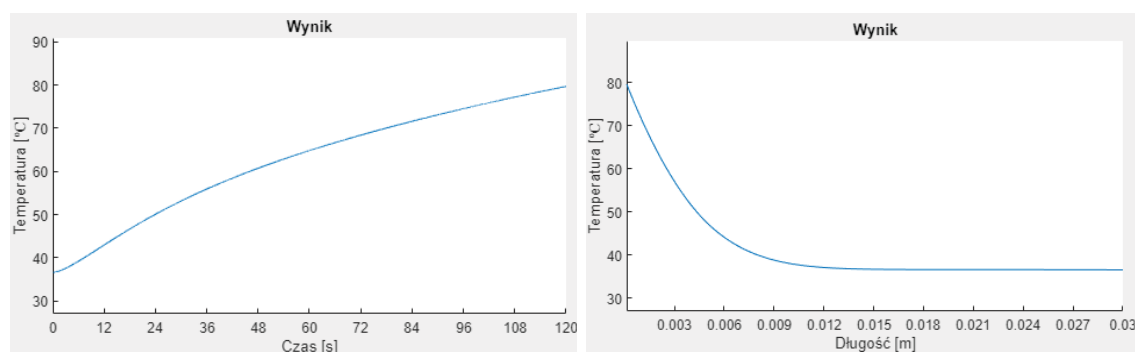


Rys. 4. Zależność składnika metabolicznego od temperatury
Fig. 4. Temperature-dependent metabolic heat source

3. Wyniki obliczeń

W celu przeprowadzenia obliczeń opracowano program okienkowy w środowisku MATLAB. Wyniki przedstawiane są w postaci wykresów temperatury w rozpatrywanym obszarze lub krzywych nagrzewania w wybranym punkcie obszaru.

Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla warstwy tkanki o grubości 0,03m, która jest nagrzewana przez 120 sekund strumieniem ciepła o wartości 5000 W/m². Temperatura początkowa tkanki wynosi 36,6°C. Przyjęto ciepło właściwe krwi równe 3770 J/kgK, temperaturę krwi w aorcie 37°C, czas termalizacji 10 s i czas relaksacji 15 s. W obszarze tkanki wyróżniono 240 węzłów, krok czasu był równy 0,012 s. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki analizy.



Rys. 5. Krzywa nagrzewania na powierzchni tkanki oraz rozkład temperatury po czasie 120 s
Fig. 2. Heating curve on the tissue surface and the temperature distribution after 120 s

4. Wnioski

Dokładność obliczeń zależy od gęstości siatki różnicowej oraz kroku czasu. Zastosowano schemat jawny metody różnic skończonych, który wymaga spełnienia kryterium stabilności. Nie sformułowano tego kryterium dla równania z dwoma czasami opóźnień (jest to trudne zadanie), krok czasu dobrano metodą prób.

Obliczenia zostały przeprowadzone dla temperatur poniżej 100°C. Powyżej tej temperatury należy w modelu uwzględnić zjawisko parowania wody zawartej w tkance.

W dalszych badaniach w obszarze tkanki zostanie wyodrębniony podobszar guza, co pozwoli na dokładniejsze odzwierciedlenie zjawisk cieplnych zachodzących w obszarach nowotworowym i zdrowej tkanki pod wpływem działania wysokiej temperatury.

Literatura

1. <https://www.medicalnewstoday.com/articles/326031> (Stan z 08.02.2022, 16:20).
2. Tzou D. Y., Macro- to Microscale Heat Transfer: The Lagging Behavior, Washington, DC: Taylor and Francis (1996).
3. Majchrzak E., Turchan Ł., Działkiewicz J., Modeling of skin tissue heating using the generalized dual-phase lag equation, Archives of Mechanics, s. 417-437 (2015).
4. Lopresto V., Argentieri A., Pinto R., Cavagnaro M., Temperature dependence of thermal properties of ex vivo liver tissue up to ablative temperatures, Physics in Medicine and Biology (2019).

DYDAKTYCZNY ROBOT EKPLORACYJNY Z SYSTEMEM AUTONOMICZNEGO OMIJANIA PRZESZKÓD

inż. PAWEŁ POLNIK,

Automatyka i Robotyka, AB5, semestr III, 2 stopień

Opiekuni naukowci: Dr inż. Marcin Januszka, Mgr inż. Mateusz Kosior

Streszczenie. W artykule przedstawiona została koncepcja oraz wytworzenie prototypowej platformy robotycznej do nauki i rozwoju autonomicznych systemów sterowania w kontekście robotów eksploracyjnych z szczególnym uwzględnieniem marsjańskich robotów eksploracyjnych tzw. łazików marsjańskich. Zaimplementowano system sterowania umożliwiający identyfikację oraz omijanie przeszkód bazujący na głębokich sieciach neuronowych. Utworzony zestaw danych przetrenowany został dzięki wykorzystaniu architektury Alexnet. Wykonana platforma oraz zaimplementowany na niej system sterowania pozwoliły na przeprowadzenie testów weryfikacyjnych, które były niezbędne do potwierdzenia prawidłowego działania platformy oraz systemu.



THE DIDACTIC EXPLORATION ROBOT WITH AN AUTONOMOUS OBSTACLE AVOIDANCE SYSTEM

Abstract. The paper presents the concept and creation of a robotic platform for the study and development of autonomous control systems in the context of exploration robots with particular emphasis on the so-called Martian rovers. A control system for identification and avoidance of obstacles based on deep neural networks has been implemented. The created data set was trained using Alexnet architecture. The platform and control system implemented on it allowed to perform verification tests, which were necessary to confirm the correct operation of the platform and system.

1. Wprowadzenie

Obecnie jesteśmy świadkami postępującego rozwoju pojazdów, robotów i systemów autonomicznych. Przykłady można mnożyć – autonomiczne roboty zastępują ludzi w wykonywaniu codziennych obowiązków jak na przykład sprzątanie, ale także w czynnościach niezbędnych do prawidłowego przebiegu procesu w zakładach produkcyjnych tj. transport. Jednak współczesne roboty mobilne wykonują coraz bardziej złożone zadania, jednocześnie cechując się zwiększoną autonomią. Postęp ten determinują m.in.: nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne. Jednak przede wszystkim znaczący rozwój następuje w dziedzinie rozwoju oprogramowania oraz algorytmów sterowania. Rozwój autonomii ma miejsce także w pojazdach do zastosowań specjalnych. Dobrym przykładem są marsjańskie roboty eksploracyjne tzw. łaziki marsjańskie. W związku ze światowym kierunkiem rozwoju systemów autonomicznych opartych na technikach głębokiego uczenia zdecydowano się na utworzenie platformy robotycznej do rozwoju ww. systemów (Rys. 1).



Rys. 1. Widok wytworzonego robota eksploracyjnego
Fig. 1. View of the manufactured exploration robot

2. Założenia

Platforma robotyczna powinna umożliwiać pokonywanie przeszkód o zróżnicowanej geometrii (kamienie, zagłębienia, itp.) i wymiarach maksymalnych – długość x szerokość x wysokość - 120x50x5 mm, symulujących warunki eksploracyjne Marsa. Z tego powodu wybrano zawieszenie typu „rocker-bogie” oparte na projekcie mgr inż. Tadeusza Cabana [1]. Platforma powinna opierać się na otwarto-źródłowym projekcie firmy Nvidia pt. Jetbot AI [2]. Zgodnie z doбором optymalnej liczby napędów wykorzystano 6 silników prądu stałego DC. Do integracji ich z zestawem programistycznym Jetson Nano zastosowano dwa sterowniki silników oparte na chipsetach TB6612 oraz kontrolerze PCA968. Jest to podejście nowatorskie i zgodnie z najlepszą wiedzą autorów pracy nie znaleziono informacji w literaturze o takiej konfiguracji.

3. Budowa platformy robotycznej oraz systemu sterowania

W ramach prac zaprojektowano i wykonano sześciokołową platformę robotyczną opartą na projekcie Jetbot AI posiadającą własności terenowe do pokonywania założonych przeszkód. Do realizacji projektu wykorzystano zestaw programistyczny Jetson Nano A02 Developer Kit firmy Nvidia wraz z urządzeniami peryferyjnymi tj.: karta sieciowa Intel Dual Band Wireless-AC 8265, kamera Raspberry Pi Camera HD v2 8MPx oraz sterowniki silników. Poprzez tą konfigurację możliwe jest zdalne sterowanie robotem przy wykorzystaniu kontrolera Microsoft Xbox Series X w celu zebrania danych uczących.

Istotną kwestią mobilności robota jest tematyka zasilania. Zgodnie z dokumentacją moduł Jetson Nano powinien pobierać 5-10 W. NVIDIA zaleca wykorzystanie zasilacza microUSB o wydajności minimum 2 A, co pozwoli na pracę w trybie 5 W po przeprowadzeniu konfiguracji w systemie Linux. W projekcie zdecydowano się na wykorzystanie jako źródła zasilania dwóch magazynów energii tzw. powerbanków o wydajności prądowej 3 A na każdym z czterech

wyjść. Determinuje to pracę w trybie zasalania 5 W powodującym wykorzystanie tylko dwóch z czterech rdzeni procesora CPU, a także skalowanie ich częstotliwości w celu optymalizacji zgodnie z mechanizmem DVFS (ang. Dynamic Voltage and Frequency Scaling). Z tego powodu po dokonanych zebraniach danych rekomendowane jest przeprowadzenie procesu obliczeń w trakcie trenowania modelu na zewnętrznym urządzeniu wyposażonym w procesor graficzny GPU lub obliczeniowe rozwiązanie chmurowe tj. Google Colaboratory.

Komunikacja z robotem odbywa się poprzez podłączenie robota do tej samej sieci zewnętrznej co urządzenie zdalne np. laptop. Robot eksploracyjny dysponuje przydzielonym adresem IP generowanym przez serwer DHCP wraz z numerem portu, do którego każdy użytkownik sieci lokalnej ma możliwość odwołania. Alternatywny sposób komunikacji opiera się na skonfigurowaniu w systemie Linux zestawu programistycznego Jetson Nano Developer Kit w funkcji routera Wi-Fi. Generowany jest Hotspot o predefiniowanej nazwie, z którym można się połączyć z dowolnego urządzenia poprzez sieć Wi-Fi. W tej konfiguracji robota przydziela sobie oraz innym użytkownikom adres IP.

4. Implementacja systemu unikania kolizji

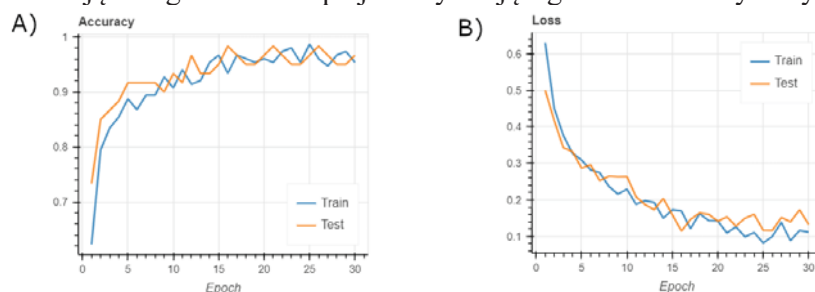
System unikania kolizji jest składową otwarto-źródłowego projektu Nvidii Jetbot AI. Analizuje on w czasie rzeczywistym obraz z kamery robota. Następnie wyznacza prawdopodobieństwo występowania przeszkody na drodze robota zgodnie z wyuczonym modelem. W celu nauczania modelu rozpoznawania przeszkód utworzono zestaw danych uczących podzielonych na scenariusze zajętej oraz wolnej drogi. Naukę modelu wykonano w oparciu o przetrenowaną architekturę Alexnet [3].

Istotnym etapem w opracowaniu oprogramowania jest kontrola poprawności jego działania, która stanowi finalny etap wykonanych prac. Badania zostały zaplanowane i przeprowadzone na wytworzonym torze do zebrania danych uczących. W trakcie weryfikacji poprawności działania testy przeprowadzono w dwóch etapach. Weryfikację wstępną przeprowadzono oceniając model w oparciu o uzyskane wykresy dokładności oraz straty trenowania i walidacji.

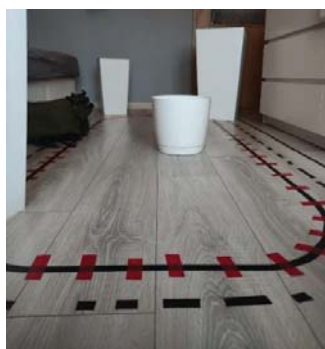
Początkowe wyniki trenowania wskazały, że uzyskany model jest niestabilny, a przyjęty podział na wartości testowe i walidacyjne nieodpowiedni. Dostrojono parametry optymalizatora stochastycznego spadku gradientu SGD (ang. Stochastic Gradient Descent) tj. $\text{learning rate} = 0.0001$, $\text{momentum} = 0.7$ oraz zwiększono liczbę próbek zbioru testowego. W ten sposób uzyskano większą dokładność detekcji modelu konwolucyjnego (Rys. 2.A.) wynoszącą 94,71% na danych treningowych oraz 96,02% na danych walidacyjnych. Wykres funkcji straty przedstawiony na Rys. 3.B. ukazuje stratę na danych treningowych i walidacyjnych do punktu stabilności w okolicach wartości 0.1 z niewielką różnicą pomiędzy dwiema końcowymi stratami noszącą nazwę *generalization gap*.

Przebieg wykresu obrazuje dobre dopasowanie algorytmu uczenia. Widoczna po ostatniej epoce tendencja minimalizacji wartości *generalization gap* wskazuje że powinno się zwiększyć liczbę epok i ponownie przetrenować model. Jednak dobre praktyki wskazują [4], że dalsze szkolenie w celu lepszego dopasowania prawdopodobnie doprowadzi do nadmiernego dopasowania modelu (ang. *overfitting*). Uzyskany model został w pierwszej kolejności przetestowany podczas autonomicznej jazdy robota po torze (Rys. 3.) z obiektami ujętymi w trakcie zbierania danych. Poprawnie zidentyfikowano oraz ominięto wszystkie zdefiniowane przeszkody. Następnie dodano nowe obiekty o różnych kształtach nie widzianych wcześniej przez model i powtórzono eksperyment. Identyfikacja nieznanymi obiektów o kształtach zbliżonych do przetrenowanych przebiegła pomyślnie. Jednak w przypadku małych obiektów,

które nie były w zbiorze uczącym wystąpiły problemy z poprawną identyfikacją. W celu identyfikacji nowych przeszkód należy powiększyć zbiór uczący lub przeprowadzić badania nad implementacją innego modelu lepiej identyfikującego nowe kształty danych wejściowych.



Rys. 2. Wykres (A) dokładności trenowania i walidacji oraz (B) straty trenowania i walidacji
Fig. 2. Plot of (A) training and validation accuracy and (B) training and validation loss



Rys. 3. Widok toru testowego do zbierania danych oraz testowania modelu
Fig. 3. View of test track for data collection and model testing

5. Wnioski

Zadaniem do rozwiązania w projekcie było opracowanie platformy robotycznej charakteryzującej się określonymi w założeniach właściwościami terenowymi a także systemu sterowania robotem opartym na głębokich sieciach neuronowych umożliwiających wykrywanie przeszkód i ich omijanie. Powstały system sterowania oraz platforma robotyczna przeznaczona do rozwoju takich systemów pozwala na realizację założonych początkowo funkcjonalności. Uzyskane w trakcie badań weryfikacyjnych wyniki potwierdziły, że wykonana platforma oraz zaimplementowany na niej system reaguje poprawnie, spełnia stawiane wymagania oraz posiada duży potencjał praktyczny.

Literatura

1. Caban T., RC Rocker-bogie chassis - Mini maratian rover (2019).
2. Dokumentacja projektu Jetbot <https://jetbot.org/master/>, Nvidia (2022).
3. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G., ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, University of Toronto (2012).
4. Goodfellow I., Bengio T., Courville A., Deep Learning Systemy uczące się, PWN, Warszawa (2018).

STATYSTYCZNA OCENA JAKOŚCI OPERACJI DOKRĘCANIA POŁĄCZEŃ GWINTOWYCH WIELOWRZECIONOWYMI WKRĘTARKAMI ELEKTRYCZNYMI

mgr inż. RAFAŁ POPIEL,

Inżynieria Mechaniczna, IV rok, 3 stopień

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

Streszczenie. W pracy przedstawiono zastosowanie wybranych metod statystycznych do ilościowej oceny jakości operacji dokręcania łączników gwintowych wielowrzecionowymi wkrętarkami elektrycznymi. Na podstawie omówionego w pracy badania dokonano ilościowej oceny jakości wkrętarek elektrycznych ze względu na stabilność, zdolność i wydajność procesu, a także powtarzalności i odtwarzalności pomiarów statycznego momentu kontrolnego pomiędzy wrzecionami narzędzia dokręcającego.



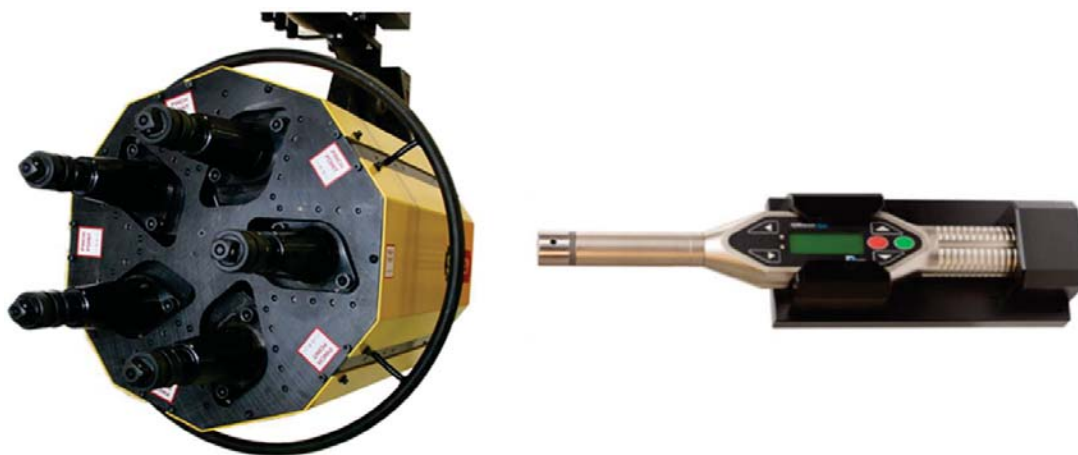
STATISTICAL QUALITY ASSESSMENT OF BOLTED JOINT TIGHTENING OPERATION BY MULTI-SPINDLE ELECTRIC SCREWDRIVERS

Abstract. The paper presents selected statistical methods for the quantitative evaluation of the quality of tightening the threaded fasteners with multi-spindle electric screwdrivers. Based on the study discussed in the paper, a quantitative assessment of the quality of electric screwdrivers was made in terms of stability, ability and efficiency of the process, and repeatability and reproducibility of measurements of the static control torque between the spindles of the tightening tool.

1. Wprowadzenie

W przemyśle motoryzacyjnym wykorzystanie technologii połączeń gwintowych jest bardzo częstą formą łączenia elementów konstrukcyjnych w operacjach montażowych. Nowoczesne przedsiębiorstwa wykorzystują w tym celu zaawansowane narzędzia dynamometryczne, których użycie dostarcza ilościowych informacji o jakości operacji dokręcania i kontroli łączników gwintowych. Jeżeli łączone są elementy, których połączenie odbywa się za pomocą kilku śrub, w celu utrzymania wysokiej jakości połączenia gwintowego, stosuje się wielowrzecionowe wkrętarki elektryczne. Wrzeciona narzędzia dokręcającego powinny być badane pod względem powtarzalności i odtwarzalności, a wyniki pomiarów powinny być opracowane metodami statystycznymi [1]. Głowicę pięciowrzecionową przedstawiono na Rys. 1a. Do oceny jakości dokręconych łączników gwintowych wykorzystuje się ręczne narzędzia dynamometryczne typu 1 najczęściej klasy C, czyli narzędzia w sztywnej obudowie z elektronicznym podsystemem pomiarowym, pokazane na Rys. 1b.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań dla kontroli jakości operacji dokręcania koła jezdnego samochodu osobowego. Koło samochodu osobowego mocowane jest do piasty za pomocą pięciu śrub dokręcanych w tzw. strategii dokręcania na określony moment dokręcenia [2] wynoszący 130 Nm.



Rys. 1. a) Głowica pięciowrzecionowa, b) Ręczne narzędzie dynamometryczne typu 1 klasy C [3]

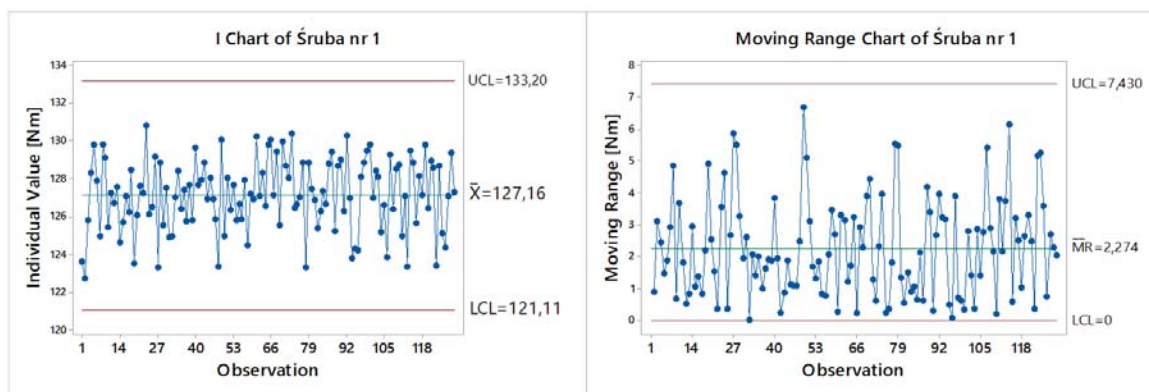
Fig. 1. a) The five-spindle head, b) Type 1 C class hand torque tool [3]

2. Analiza i ocena jakości za pomocą pomiarów momentu kontrolnego

Główną charakterystyką jakości w ilościowej ocenie operacji dokręcania jest statyczny moment kontrolny, nazywany także momentem inspekcyjnym, którego pomiar dokonywany jest po zakończeniu operacji dokręcania, za pomocą ręcznego narzędzia dynamometrycznego typu 1 [4]. Podstawowym celem tego pomiaru jest detekcja jego odchylenia od zadanej wartości dynamicznego momentu dokręcenia w operacji dokręcania łącznika gwintowego oraz ocena zmienności, stabilności, zdolności i wydajności procesu pomiaru momentu kontrolnego. Odchylenia wartości statycznego momentu kontrolnego poniżej wartości dynamicznego momentu dokręcenia mogą być spowodowane pojawieniem się zjawisk reologicznych pełzania i relaksacji naprężeń oraz trwałych odkształceń kontaktowych w połączeniu gwintowym, przy czym kluczowe dla jakości procesu montażu są te zjawiska, które zachodzą głównie w czasie rzędu 100-200 ms od zakończenia operacji dokręcania [2]. Spadek naprężenia osiowego w połączeniu gwintowym, może prowadzić do utraty jego funkcjonalności. Do oceny występowania zjawiska relaksacji naprężeń w złączu śrubowym zaproponowano parametryczny test t-Studenta dla wartości oczekiwanej [5]. Wykonano 50 pomiarów dla jednej ze śrub połączenia (dla próbki z populacji tych połączeń, montowanych w trybie produkcji seryjnej). Uzyskano średnią wartość statycznego momentu kontrolnego jako 126,858 Nm, przy odchyleniu standardowym 1,908 Nm. Przedział ufności dla średniej z próby dla poziomu ufności 95% oszacowano jako (126,316; 127,400) Nm. W wyniku analizy stwierdzono istotność statystyczną zjawiska relaksacji ($p\text{-value } 0,00 < \alpha = 0,05$). Spadek wartości momentu kontrolnego w odniesieniu do momentu dokręcania wyniósł ok. 3,14 Nm, względnie tj. 2,41%.

3. Ocena stabilności procesu pomiarów kontrolnych

Ocenę stabilności procesu pomiarów momentów kontrolnych wykonano za pomocą kart kontrolnych Shewharta [6, 7]: karty wartości indywidualnej i ruchomego rozstępu, co przedstawia Rys. 3. Rysunek wskazuje na stabilny proces. Zarówno przebieg wartości indywidualnej jak i ruchomego rozstępu nie wykazuje oznak zmienności specjalnej i braku stabilności rozkładu momentów kontrolnych, co prowadzi do obserwacji braku sytuacji niefortunnych, mogących sugerować obniżenie jakości procesu.

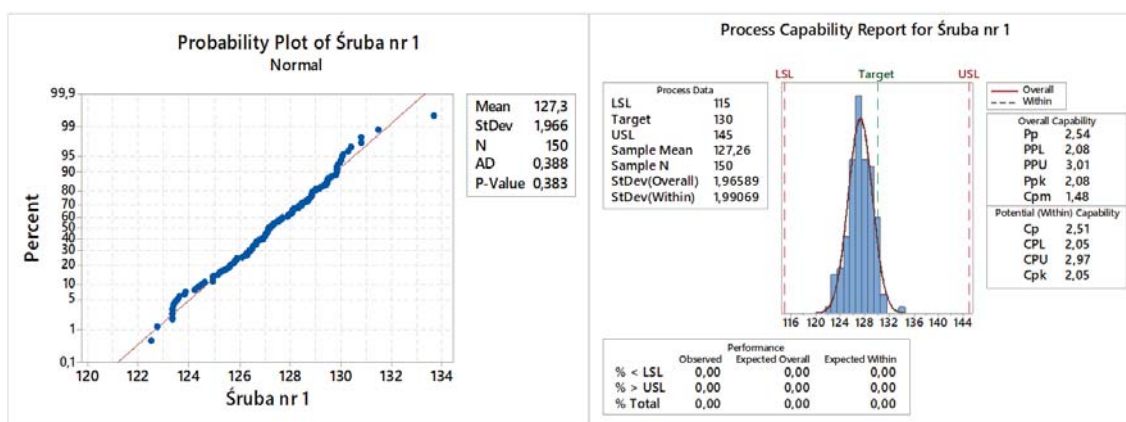


Rys. 3 Karta kontrolna wartości indywidualnej i ruchomego rozstępu pomiarów momentu kontrolnego śruby mocującej koło jezdne samochodu osobowego

Fig. 3. Control chart of the individual value and the moving range of test torque measurements of the bolt connecting the road wheel of a passenger car

4. Analiza zdolności i wydajności procesu pomiarów kontrolnych

Analiza zdolności i wydajności procesu pomiarów momentu statycznego, w głównej mierze, opiera się na estymacji wskaźników zdolności (C_p/C_{pk}) i wydajności (P_p/P_{pk}) procesu oraz oszacowaniu prawdopodobieństwa wystąpienia obserwacji poza zdefiniowanymi granicami tolerancji (ang. USL/LSL – Upper/Lower Specification Limit) [7]. Na Rys.4. przedstawiono wynik takiej analizy. Z Rys. 4, wynika, że wartości wskaźników C_{pk} (2,05) oraz P_{pk} (2,08) okazały się wyższe od granicznej wartości 1,33, przyjmowanej dla procesów pod statystyczną kontrolą, stwierdzono, że proces pomiarów momentu kontrolnego uznać należy za zdolny i wydajny. Również prawdopodobieństwo występowania obserwacji poza granicami tolerancji, będące bliskie zeru, uznać należy za wskaźnik potwierdzający wysoką jakość procesu. Rys. 4 pochodzi z programu MINITAB, gdzie przeprowadzono obliczenia.

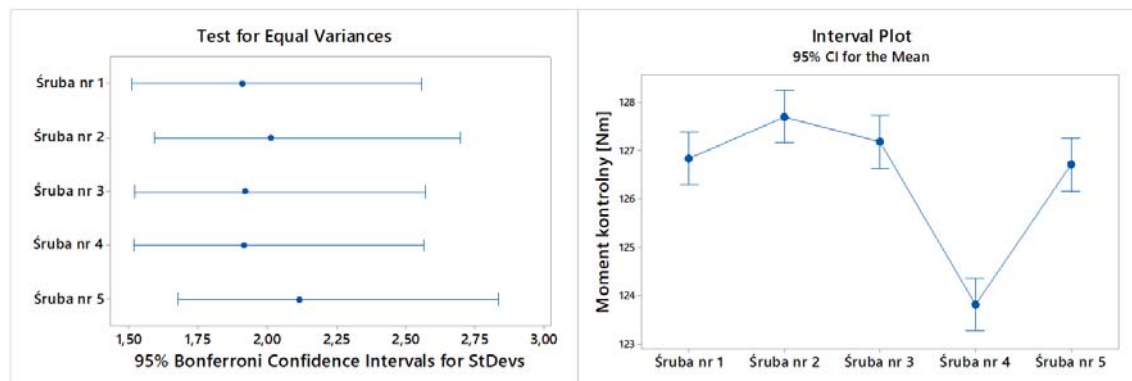


Rys. 4. Analiza zdolności i wydajności procesu pomiarów momentu statycznego

Fig. 4. Analysis of the capability and performance of the static moment measurement process

5. Ocena powtarzalności i odtwarzalności pomiarów momentów kontrolnych

Pomiary momentów kontrolnych śrub dokręcanych niezależnymi wkrętarkami wielowrzecionowego narzędzia dokręcającego poddane zostały ocenie porównania zmienności wyrażonej estymatorem odchylenia standardowego (co określa powtarzalność) oraz porównania średnich arytmetycznych (co określa odtwarzalność) z prób pomiarowych [8]. Na Rys. 5. przedstawiono wynik badania powtarzalności z wykorzystaniem parametrycznego testu Bartletta oraz wynik badania odtwarzalności za pomocą parametrycznego testu jednorodności wielu średnich [5].



Rys. 5. Analiza powtarzalności i odtwarzalności pomiarów momentu kontrolnego
Fig. 5. Analysis of the repeatability and reproducibility of the control torque measurements

W wyniku analizy powtarzalności pomiarów momentów kontrolnych ($p\text{-value} = 0,938 > \alpha = 0,05$ dla testu Bartletta) stwierdzono, że wrzeciona elektryczne dokręcają powtarzalnie. Natomiast z analizy odtwarzalności ($p\text{-value} = 0,00 < \alpha = 0,05$ na podstawie testu jednorodności wielu średnich oraz wykresu przedziałowego dla estymatorów średniej arytmetycznej) wynika, że wkrętarka nr 4 dokręca z mniejszymi wartościami momentu dokręcania. Jako zalecenie doskonalące można wskazać, że wkrętarce nr 4 głowicy należy poddać kalibracji.

Literatura

1. ISO 22514-8:2014, Part 8: Machine performance of a multi-state production process.
2. Bickford J. H., Introduction to the design and behaviour of bolted joints, CDC Press, Boca Raton (2008).
3. <https://despoltm.pl> – dostęp 30.04.2022.
4. PN-EN ISO 6789-1:2017, Narzędzia montażowe do wkrętów i nakrętek. Ręczne narzędzia dynamometryczne. Część 1: Wymagania i metody badań dotyczące zgodności projektu i jakości wyrobu: minimalne wymagania dotyczące deklaracji zgodności.
5. Maliński M., Weryfikacja hipotez statystycznych wspomaganých komputerowo, Wyd. Pol. Śl., Gliwice (2004).
6. PN-ISO 8258:1996. Karty kontrolne Shewharta. 1996.
7. Oakland J., Oakland R., Statistical process control, Routledge, New York (2019).
8. Burdick R.K., Borror C.M., Montgomery D.C., Design and analysis of gauge R&R studies, SIAM and ASA, Philadelphia (2005).

ANALIZA SKUTECZNOŚCI WARSTWY OCHRONNEJ PROCESORA

inż. PAWEŁ PROFASKA,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AB5, semestr 1, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Jolanta Dziatkiewicz

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę skuteczności i wpływu warstw ochronnych, czyli past termoprzewodzących, na działanie procesora. W trakcie badania skupiono się nad sprawdzeniem wpływu grubości warstwy ochronnej oraz jej rodzaju na szybkość przepływu ciepła oddawanego przez procesor do elementu oddającego to ciepło a następnie do otoczenia. Zaprezentowano także metodę obliczeń, tj. metodę różnic skończonych, oraz wyniki badań uzupełnione odpowiednimi wnioskami.



ANALYSIS OF THE PROCESSOR'S PROTECTION LAYER EFFICIENCY

Abstract. The article presents an analysis of the effectiveness and influence of protective layers, i.e. thermally conductive pastes, on the operation of the processor. During the test, the focus was on checking the effect of the thickness of the protective layer and its type on the rate of heat flow given by the processor to the element that transfers this heat to the environment. It presents also the method of calculation, it is the finite difference method, and the results of the research, which were complemented with appropriate conclusions.

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach procesory są jednymi z najważniejszych elementów wielu maszyn oraz urządzeń we wszystkich gałęziach przemysłu. Sterują procesami odbywającymi się wewnątrz układu w celu prawidłowego wykonania zadania. Są „mózgiem” wszystkich operacji dzięki możliwościom jakie oferują i mogą wykonywać jednocześnie tysiące operacji. Niestety niesie to za sobą również negatywne skutki, jak na przykład wydzielanie się ciepła. Aby procesor pracował prawidłowo pod dużym obciążeniem przez dłuższy okres czasu, trzeba zadbać o odpowiednie chłodzenie, aby nie przegrzewał się, ponieważ nadmierne przegrzewanie powoduje znaczny spadek wydajności oraz w skrajnych przypadkach uszkodzenie.

Procesor jest zbudowany jako układ scalony, którego głównym materiałem budulcowym jest monokryształ krzemu, na powierzchnie którego w procesie produkcji nanoszone są warstwy półprzewodnikowe, a następnie jest szczelnie zamknięty w hermetycznej obudowie. Podstawowym elementem budowy procesora jest tranzystor, czyli element półprzewodnikowy, za pomocą którego można sterować przepływem napięcia [1]. Przy wysokim obciążeniu procesora, wydziela on z siebie duże ilości ciepła w krótkim czasie. Wynika to z przepływu prądów przez rdzenie procesora, a naturalne jest, że część energii elektrycznej zamieniana jest podczas pracy w ciepło, dlatego bardzo ważne jest, aby odpowiednio szybko odprowadzać ciepło wytwarzane przez procesor [2]. Istotną rolę w poprawnym działaniu procesora odgrywa więc chłodzenie. Najczęstszym rozwiązaniem z jakim można się spotkać jest oddawanie ciepła z procesora przez radiator do otoczenia lub poprzez chłodzenie wodne, które ostatecznie też wymienia temperaturę

z otoczeniem. Trzeba zauważyć, że jest jeszcze jeden ważny element, który bierze udział w procesie chłodzenia procesora. Są nimi właśnie warstwy ochronne, które nakładane są na procesor. Nazywane są pastami termoprzewodzącymi. Potrzeba korzystania z past wynika z tego, że każdy materiał wytworzony przez człowieka nie posiada idealnej gładkości. Na skutek tego w momencie przyłożenia radiatora bezpośrednio na procesor, na styku materiałów będą powstawać mikroszczeliny, w które dostanie się powietrze, a jak wiadomo nie jest ono dobrym przewodnikiem ciepła. Prowadzi to do znacznego pogorszenia przepływu ciepła z jednego elementu na drugi. Wykorzystując pasty termoprzewodzące można zniwelować ten problem. Charakteryzują się one stosunkowo dobrym przewodnictwem cieplnym i zazwyczaj są w postaci plastycznej masy. Pasta wypełnia mikroszczeliny, przez co zwiększa powierzchnię przewodzenia ciepła wytwarzanego przez układ [2, 3].

2. Nieustalony przepływ ciepła

W poniższej pracy rozpatrywano nieustalony przepływ ciepła. Do analizy skuteczności wykorzystana została metoda różnic skończonych. Metoda ta polega na zamianie występujących pochodnych w równaniu różniczkowym na odpowiednie ilorazy różnicowe, które wiążą ze sobą wartości szukanej funkcji w wybranych punktach. Na rozpatrywany układ nakłada siatkę punktów. Nieustalony proces przewodzenia ciepła w ośrodku izobarycznym, izotropowym w obecności wewnętrznych objętościowych źródeł ciepła opisuje równanie Fouriera [4]:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Q(x,t)}{c \cdot \rho} \quad (1)$$

gdzie: T [K] lub T [°C] – temperatura, t [s] – czas, λ [W/(mK)] – współczynnik przewodzenia ciepła, c [J/(kgK)] – ciepło właściwe, ρ [kg/m³] lub [g/cm³] – gęstość, $Q(x, t)$ [W/m³] – funkcja źródła.

Parametrami termofizycznymi materiału, czyli w tym przypadku pasty termoprzewodzącej, które były zmieniane w zależności od rodzaju analizowanej pasty są: λ , c , ρ . W celu wykonania poprawnych obliczeń należy ustalić warunki brzegowe oraz warunki początkowe układu, siatkę różnicową (czyli podzielić układ na konkretną liczbę węzłów) i wykonać dyskretyzację czasu. W schemacie jawnym MRS należy spełnić warunek stabilności układu:

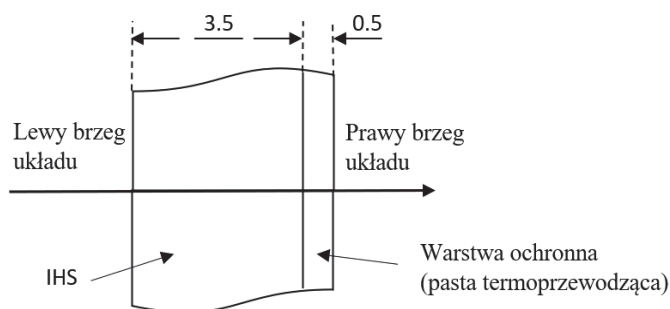
$$\left(1 - 2 \frac{a \Delta t}{h^2}\right) \geq 0 \Rightarrow \Delta t \leq \frac{h^2}{2a} \quad (2)$$

gdzie: a – współczynnik dyfuzji ciepła, Δt [s] – krok czasu, h [m] – krok siatki między kolejnymi węzłami siatki.

3. Sposób przeprowadzenia analizy

W pracy rozpatrywany był przypadek, w którym procesor nagrzewa się do maksymalnej temperatury w sposób skokowy. Zazwyczaj procesor na rdzeniach utrzymuje temperaturę od 28°C do 35°C zależnie od różnych czynników. Do obliczeń przyjęto wartość uśrednioną 32°C czyli 305K, która będzie warunkiem początkowym całego układu. W pracy założono, że

procesor może nagrzać się maksymalnie do temperatury od 60°C do 70°C, tak więc uśredniając przyjęto do obliczeń 65°C, czyli 338K. Ta wartość temperatury będzie warunkiem brzegowym na lewym brzegu układu, czyli w miejscu styku IHSa (odpromiennika ciepła) z rdzeniami procesora. Na prawym brzegu zadano warunek brzegowy trzeciego rodzaju (temperatura otoczenia równa 300K, $\alpha = 10$ [W/(m²K)]) Na rysunku 1 przedstawiono schemat, dla którego wykonano obliczenia.



Rys. 1. Analizowany układ
Fig. 1. The system analyzed

Informacja o grubości IHSa pochodzi bezpośrednio od producenta procesorów „Intel”, która wynosi w tym procesorze 3.553mm. Producent zapewnił, że inne procesory posiadają podobne grubości IHSów, dlatego do obliczeń przyjęto wartość 3,5mm. IHSy wykonywane są najczęściej z miedzi, dlatego do obliczeń przyjęte zostały parametry termofizyczne miedzi jako materiału pierwszego. Do analizy zostało wybranych 5 past o zupełnie różnych parametrach, aby sprawdzić jaki wpływ ma przewodność cieplna pasty na szybkość przekazywania ciepła z procesora. W tabeli 1 przedstawione zostały parametry wybranych past oraz innych materiałów użytych do analizy. Podczas analizy porównane zostały wyniki dla każdej z past o podanych powyżej parametrach dla warstwy o grubości 0,5mm, czyli tak jak jest to przedstawione na rysunku 1.

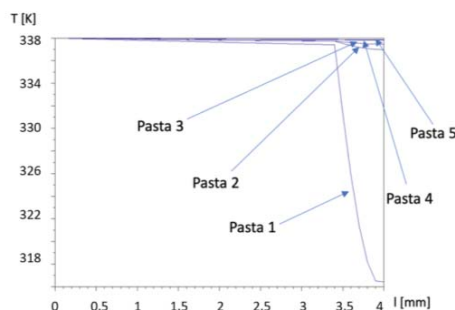
Tabela 1. Parametry wybranych past i materiałów
Table 1. Parameters of selected pastes and materials

Opis	Materiał	Przewodność cieplna - λ [W/(mK)]	Ciepło właściwe - c [J/(kgK)]	Gęstość - ρ [g/cm ³]
IHS	miedź	370	380	8.96
Pasta 1	silikonowa	0.88	1000	2.58
Pasta 2	węglowa	5.6	500	3.69
Pasta 3	silikonowa z dodatkami metali	12.5	700	3.7
Pasta 4	ciekły metal	40	300	6.44
Pasta 5	ciekły metal	73	300	6.24

4. Analiza wyników oraz wnioski

Otrzymane wyniki jednej z past zdecydowanie odbiegają od reszty (rysunek 2). Pasta 1 osiąga temperaturę zbliżoną do temperatury wytwarzanej przez procesor dopiero po około 2,5 sekundach, co jest słabym wynikiem. Przy czym trzeba zauważyć, że jej temperatura na

końcu układu jest niższa o ponad 1°C od temperatury docelowej (odpowiadającej warunkowi brzegowemu na lewym brzegu) ustalonej na poziomie 338 K. Wbrew mogącym pojawić się oczekiwaniom, różnice między pozostałymi pastami są niewielkie, a czas jaki potrzebują do osiągnięcia tej samej temperatury mieści się w okresie 0,5 sekundy co można uznać za wynik satysfakcjonujący. Na wykresie porównawczym, również widać, że pasta 1 znacznie odstaje od reszty i w czasie 0,3 sekundy osiąga na końcu układu temperaturę zaledwie 316K, czyli 44°C. Reszta past po tym czasie jest już bardzo blisko osiągnięcia temperatury docelowej.



Rys. 2. Porównanie temperatur wszystkich past w rozpatrywanym układzie po czasie 0,3 s
Fig. 2. Comparison of the temperatures of all pastes in the considered system after 0.3 s

W tabeli 2 przedstawiono czasy w jakich została osiągnięta temperatura docelowa dla poszczególnych past.

Tabela 2. Czasy osiągnięcia temperatury docelowej przez wybrane warstwy ochronne
Table 2. Times for the selected protective layers to reach the target temperature

	Pasta 1	Pasta 2	Pasta 3	Pasta 4	Pasta 5
Czas osiągnięcia temperatury 338 K [s]	2.5	0.46	0.41	0.36	0.33

Wnioskiem, który można wyciągnąć na podstawie przedstawionej powyżej analizy, jest zauważalna różnica prędkości nagrzewania się, między pastami o różnych współczynnikach przewodzenia ciepła. Im współczynnik był wyższy, tym szybciej układ potrafił przekazać pełną temperaturę, którą dawał procesor, lecz warto zauważyć, że największe różnice powstały między pastą 1 a pastą 2, mimo że różnica między współczynnikami przewodzenia ciepłego nie była aż tak znaczna jak na przykład między pastą 3, a pastą 5, co podsuwa kolejny wniosek, że nie warto skupiać się na pastach najniższej jakości. Między resztą nie ma aż tak znaczących różnic. Z pozostałych należy dopasować pastę do potrzeb użytkownika.

Bibliografia

1. Metzger P., Anatomia PC. Helion, Gliwice (2007).
2. Lander S., What causes a processor to heat up?, <https://smallbusiness.chron.com/causes-processor-heat-up-66866.html> (02.2022).
3. Chrobak M., Nakładanie pasty termoprzewodzącej. <https://proline.pl/?n=nakladanie-pasty-termoprzewodzacej-na-procesor-najlepsza-metoda>, (08.10.2014).
4. Majchrzak E., Mochnacki B., Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2004).

PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA RAKIETY TENISOWEJ

inż. PIOTR REKUS,

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

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

Streszczenie. Artykuł przedstawia projekt oraz analizę wytrzymałościową rakiety tenisowej. W ramach pracy, wykonano model rakiety tenisowej, zgodnej z regulaminem Międzynarodowej Federacji Tenisa. Rakieta została zaprojektowana w środowisku Autodesk Inventor. Analizę numeryczną wykonano za pomocą metody elementów skończonych w celach określenia jej sztywności w środowisku ANSYS.



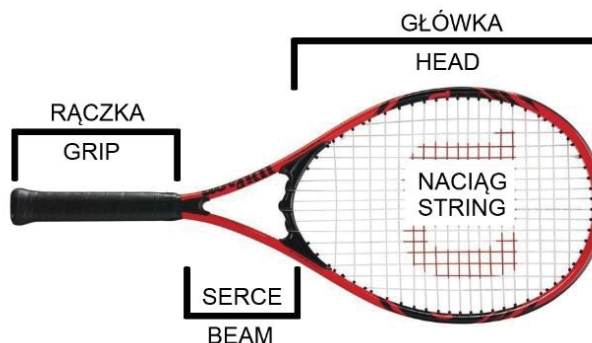
PROJECT AND STRENGTH ANALYSIS OF TENNIS RACKET

Abstract. The article presents the design and strength analysis of a tennis racket. In this work, a model of a tennis racket was made, in accordance with the regulations of the International Tennis Federation. The racket was designed in Autodesk Inventor software. A numerical analysis was performed using the finite element method to determine its stiffness in ANSYS software.

1. Wprowadzenie

Tenis jest popularną dyscypliną sportową polegającą na przebijaniu piłki tenisowej rakieta, nad siatką znajdującą się w połowie kortu tenisowego. Punkt otrzymuje gracz, który zdoła trafić piłką w pole przeciwnika, a piłka odbije się dwukrotnie od ziemi bez odbicia przeciwnika.

Pieczę nad zasadami gry oraz osprzętu sprawuje Międzynarodowa Federacja Tenisa ITF. Zgodnie z regulaminem Międzynarodowej Federacji Tenisa rakieta powinna składać się z ramy oraz naciągu [1]. Rama składa się z rączki, główki oraz serca, które łączy ramę z główką.



Rys. 1. Budowa rakiety tenisowej [2]
Fig. 1. Construction of a tennis racket [2]

Płaszczyzna uderzenia piłki jest definiowana jako główna powierzchnia strunowego wzoru definiowana jako punkt wejścia struny do główki rakiety albo jako punkt kontaktu struny z główką, zależnie które jest mniejsze. Powierzchnia powinna być płaska i zawierać wzór krzyżowy strun, który jest łączony bądź przeplatany w miejscu krzyżowania. Strunowy wzór powinien być jednorodny [1].

Strunowy wzór jest uzyskiwany przez naciąg, który jest cienkim drutem. Wykonany jest z tworzyw sztucznych, a jego średnica mieści się w przedziale 1,1 – 1,4 mm.

Budowa rakiety tenisowej została pokazana na Rys. 1.

2. Założenia projektowe

Przyjęto poniższe wymagania dotyczące rakiety tenisowej:

- długość rakiety: 685 mm,
- powierzchnia główki: powyżej 680 cm^2 ,
- masa: poniżej 290 g,
- rozmiar rączki: G4,
- materiał ramy: Aluminium 6061,
- materiał rączki: Polipropylen.

3. Projekt rakiety

Szkic rakiety został oparty na główce, która została opisana na elipsie o wymiarach półosi wielkiej równej 170 mm i półosi małej równej 129 mm. Pole powierzchni utworzonej figury wyniosło niecałe 689 cm^2 . Długość rączki określono na 180 mm, natomiast jej szerokość na 30mm. Wysokość całej rakiety określono na 685 mm. Zdecydowano się wypełnić szkic profilem prostokątnym o stałej geometrii o wymiarze 20x10 mm. Zastosowano promienie zaokrągleń w sercu rakiety oraz na krawędziach zewnętrznych i wewnętrznych rączki i główki.



Rys. 2. Model rakiety tenisowej
Fig. 2. Model of a tennis racquet

Następnie zamodelowano wycięcia pod gromety. Gromety są częścią ochronną rakiety tłumiącą drgania. Dodatkową funkcją grometu jest przeprowadzenie naciągu. Następnie przekształcono ramę rakiety w element cienkościenny o grubości 1mm. Przygotowana rakietka jest odlewana.

W następnym etapie zostały zamodelowane otwory o średnicy $\varnothing 3$ mm, służące do zamontowania grometu wraz z naciągami. Zdecydowano o zastosowaniu otwartego układu strun w postaci 16x19. Pierwsza liczba oznacza liczbę strun równoległych do osi podłużnej rączki, natomiast druga liczba oznacza liczbę strun prostokątnych do osi podłużnej rączki.

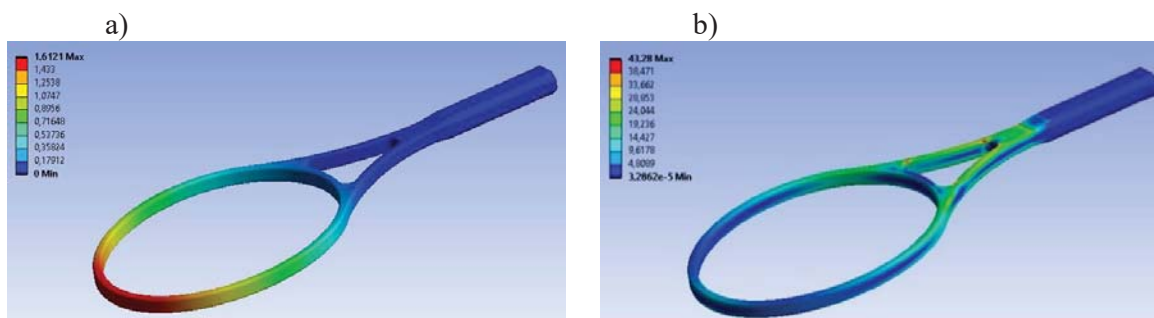
Następnie zamodelowano rączkę rakiety. Geometria części chwytowej została oparta na zfazowanym prostokącie o wymiarach 36x28 mm z fazami o wymiarze $6 \times 45^\circ$. Obwód geometrii wynosi w przybliżeniu 114 mm, a więc zamodelowany obwód rączki można przyporządkować do rozmiaru G4. Do górnej jak i dolnej części rączki dodano fazy optymalizujące kształt. Zamodelowana rakietka tenisowa została pokazana na Rys. 2.

Masa własna rakiety wynosi 283 g. W projekcie nie zamodelowano grometu, naciągu oraz owijki na rączkę, ze względu, iż są to przedmioty eksploatacyjne rakiety.

4. Analiza wytrzymałościowa rakiety

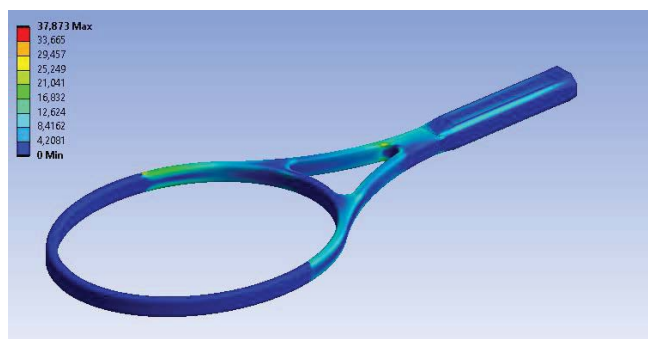
Model rakiety poddano procesowi dyskretyzacji. Rama rakiety została zdyskretyzowana elementami powierzchniowym trójkątnymi oraz czworokątnymi, o liniowej funkcji kształtu. Wygenerowany model posiada 50412 węzłów oraz 50644 elementów skończonych. Rączka rakiety została zdyskretyzowana elementami bryłowymi tetraedronami oraz hexahedronami, o kwadratowej funkcji kształtu. Wygenerowany model posiada 65541 węzłów oraz 20889 elementów skończonych.

Jedną z metod analizy, oceniającą sztywność rakiety, jest metoda stosowana przez firmę Wilson, oparta na parametrze S.I. (Stiffness Index). Badanie polega na utwierdzeniu części chwytowej rączki, a następnie przyłożeniu obciążnika o masie 2,8 kg do główki rakiety. Parametrem mierzonym jest ugięcie rakiety pod wpływem obciążenia. Pod wpływem obciążenia rakietka ugięła się o wartość 1,61 mm, natomiast maksymalna wartość naprężenia zredukowanego wyniosła 43,28 MPa. Wyniki symulacji pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. a) Ugięcie rakiety tenisowej [mm],
b) mapa naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa [MPa]
Fig. 3. a) Deflection of a tennis racquet [mm], b) distribution of Huber-Mises stresses [MPa]

Następnie dokonano analizy sztywności skrętnej rakiety. Utwierdzono boczne części główki rakiety na powierzchni przedniej i tylnej, a następnie obciążono część chwytową rączki obciążeniem odpowiadającym odważnikowi o masie 2,8 kg na ramieniu wynoszącym 0,5 m. Wartość kąta skręcenia w osi rakiety wyniosła 1,77°. Maksymalna wartość naprężenia redukowanego wyniosła 37,87 MPa. Wyniki symulacji pokazano na Rys. 4.



Rys. 4. Mapa naprężeń redukowanych Hubera-Missesa [MPa]
Fig. 4. Distribution of Huber-Mises stresses [MPa]

5. Podsumowanie

Wykonano model rakiety tenisowej spełniające wymagane założenia projektowe. Całkowita wysokość rakiety wyniosła 685 mm. Powierzchnia główki wyniosła 689 cm². Zastosowano układ strun typu otwartego o wartości 16x19. Obwód rączki wynosi 114 mm, który mieści się w grupie rozmiaru G4. Masa własna rakiety wynosi 283 g.

Wykonano również analizę wytrzymałościową oceniającą sztywność poprzeczną główki rakiety oraz sztywność skrętą rakiety. Maksymalna wartość ugięcia przy badaniu sztywności poprzecznej rakiety, wyniosła 1,61 mm, natomiast wartość maksymalnego naprężenia redukowanego wyniosło 43,28 MPa. Wartość kąta skręcenia w osi rakiety, przy badaniu sztywności skrętnej rakiety, wyniosła 1,77°, natomiast wartość maksymalnego naprężenia redukowanego wyniosło 37,87 MPa. Uzyskane wartości ugięcia i kąta skręcenia rakiety zostały porównane z wartościami uzyskanymi w trakcie badania rakiety Wilson Jack Kramer, która jest wykonana z drewna. Dla tej rakiety analiza wykazała, że wartość ugięcia rakiety wyniosła 9,5 mm, natomiast wartość kąta skręcenia wyniosła 9,8° [4]. Zamodelowana rakietka jest około 83% sztywniejsza na obciążenie poprzeczne oraz ponad 5,5 krotnie mniej podatna na obciążenie skręcające, niż rakietka wykonana z drewna.

Literatura

1. IFT rules of tennis 2022 - <https://www.itftennis.com/en/about-us/governance/rules-and-regulations/> (dostęp z dnia 07.04.2022)
2. https://centerofsport.pl/blog/post/jak-dobrac-rakiety-tenisowa-?page_type=post___ (dostęp z dnia 07.04.2022)
3. <http://www.madehow.com/Volume-3/Tennis-Racket.html> (dostęp z dnia 07.04.2022)
4. <https://www.wilson.com/en-us/blog/tennis/wilson-labs/wilson-labs-clash-racket#> (dostęp z dnia 07.04.2022)

UCZENIE SIECI NEURONOWYCH NA BAZIE WYNIKÓW ANALIZ MES

mgr inż. PRZEMYSŁAW SEBASTJAN,
Inżynieria Mechaniczna, semestr VI, 3 stopień

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest opisowi tworzenia sztucznej sieci neuronowej, która jako metamodel nieliniowej analizy MES, użyta będzie do poprawy wydajności algorytmów optymalizacyjnych. Badany jest wpływ architektury sieci, funkcji aktywacji, procesu regularyzacji czy też normalizacji wyników na końcowe wartości współczynników oceny jakości sieci. Przedstawione badania oparte są o rzeczywiste przemysłowe zastosowanie nieliniowych analiz MES w zakresie optymalizacji topologicznej części amortyzatorów samochodowych



TRAINING OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS USING FEM-BASED SIMULATION DATA

Abstract. The article presents the process of creating and adjusting the artificial neural network, based on the finite element method analyses results. Aim of this paper is to investigate the influence of ANN structure, activation functions, regularization or normalization methods on the final quality of the metamodel, which will be used for tuning of the optimization algorithms parameters. All of the presented data is based on the industrial implementation of FEM simulations for topology optimization of automotive shock absorber components.

1. Wprowadzenie

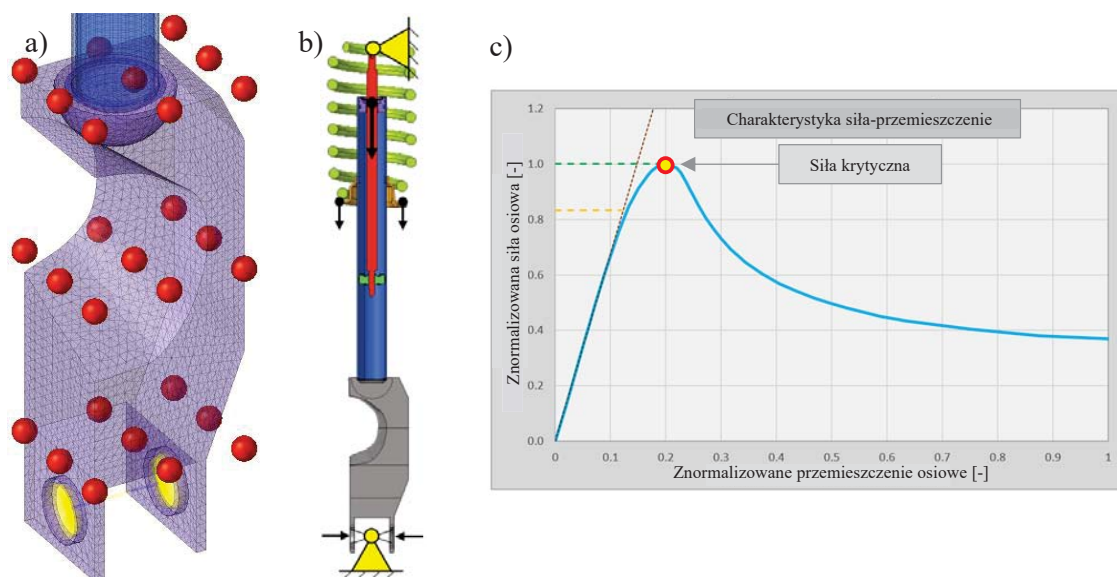
W przypadku zagadnień związanych z minimalizacją funkcji celu, jedną z trudności jest dobór odpowiedniego algorytmu optymalizacji do rozwiązania postawionego problemu. Jednak gdy taki algorytm jest już wybrany, kolejnym wyzwaniem staje się określenie właściwych wartości jego parametrów. Cel, jaki przyświeca doborowi odpowiednich wielkości, to maksymalizacja wydajności algorytmu, jak np. zmniejszenie ilości iteracji niezbędnych do znalezienia optimum, lub osiągnięcie możliwie „najlepszego” quasi-optimum przy narzuconej z góry ilości wywołań funkcji celu.

W praktycznych zastosowaniach optymalizacji, duży czas obliczenia funkcji celu istotnie utrudnia proces znalezienia odpowiednich ustawień algorytmu. Jednym z rozwiązań jest zastąpienie kosztownego obliczeniowo modelu numerycznego (jakim jest np. nieliniowa symulacja MES), znacznie bardziej wydajnym czasowo metamodelem, jak np. sztuczna sieć neuronowa. Opisany w tym artykule proces doboru architektury sieci oraz jej uczenia, oparty jest o rzeczywisty problem optymalizacji uchwytu amortyzatora samochodowego.

2. Optymalizacja kształtu uchwytu amortyzatora

Wspomniany wyżej problem optymalizacji dolnego uchwytu łączącego amortyzator samochodowy z wahaczem, rozwiązywany jest przy pomocy nieliniowej analizy metodą

elementów skończonych. Kształt części opisany jest niejawnie za pomocą dodatkowego pola skalarne, którego wartość w danym punkcie przestrzeni określa, czy dany obszar (element skończony) stanowi część uchwytu, czy też należy go usunąć. Zmiennymi są wagi radialnych funkcji bazowych, opisanych na wprowadzonych „węzłach” (rys. 1a)[1], których ilość i rozmieszczenie decyduje o dokładności, z jaką można zmieniać kształt części. Tak sparametryzowana przestrzeń wraz z pozostałymi komponentami, stanowi wsad do symulacji MES (wykonywanej za pomocą oprogramowania Abaqus/Standard), w której amortyzator poddany jest działaniu sił montażowych oraz zewnętrznych sił osiowych (rys. 1b). W efekcie obliczana jest maksymalna siła, jaką jest w stanie przenieść amortyzator przed utratą stateczności (rys. 1c). Siła ta stanowi ograniczenie (tj. minimalna siła przy utracie stateczności) w zagadnieniu minimalizacji masy uchwytu amortyzatora.



Rys. 1. a) parametryzacja kształtu części, b) schemat obciążenia konstrukcji, c) charakterystyka siła-przemieszczenie, z której wyznaczana jest siła krytyczna
Fig. 1. a) shape parametrization, b) loads and boundary conditions, c) load-deflection relationship and limit load extraction

3. Metamodel

Przeprowadzając szereg analiz MES dla różnych parametrów sterujących kształtem uchwytu amortyzatora (np. poprzez próbkowanie za pomocą optymalnych łącińskich hipersześcianów), można stworzyć zbiór danych uczących i testowych dla metamodelu jakim jest sztuczna sieć neuronowa. Układ mechaniczny przedstawiony w poprzednim rozdziale ma 27 wejść (parametry sterujące kształtem) oraz dwa wyjścia – siła krytyczna oraz masa. Masę części można wyznaczyć w sposób przybliżony i szybki w oparciu o siatkę wsadową MES, natomiast siłę krytyczną wyznacza się poprzez kosztowną, nieliniową symulację. Stąd zastąpienie tej ostatniej części metamodeliem pozwala na niemal natychmiastową weryfikację wielu kombinacji ustawień algorytmów optymalizacyjnych.

Testowane są dwa rodzaje sieci neuronowych, obie będące wielowarstwowym perceptronem, zaimplementowane w języku Python przy użyciu pakietu pyTorch. Pierwsza sieć to najbardziej podstawowa forma MLP – sieć z jedną warstwą ukrytą i sigmoidalną funkcją aktywacji, której wagi optymalizowane są za pomocą metody najszybszego spadku. Druga sieć

ma dwie warstwy ukryte, a jednocześnie testowane są różne funkcje aktywacji, liczby neuronów w poszczególnych warstwach, metody regularyzacji struktury sieci [2] jak również normalizacja wyników. Do optymalizacji wag użyto metody quasi-Newtonowskiej L-BFGS. Za miarę jakości metamodeli [3] przyjęto błąd średniokwadratowy (MSE) oraz współczynnik determinacji (R^2), zgodnie z wzorami (1) i (2).

$$MSE = \frac{\sum_{i=0}^{n_t} (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2}{n_t}, \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{n_t} (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2}{\sum_{i=0}^{n_t} (y^{(i)} - \bar{y})^2} = 1 - \frac{MSE}{Var(y)}, \text{ gdzie:} \quad (2)$$

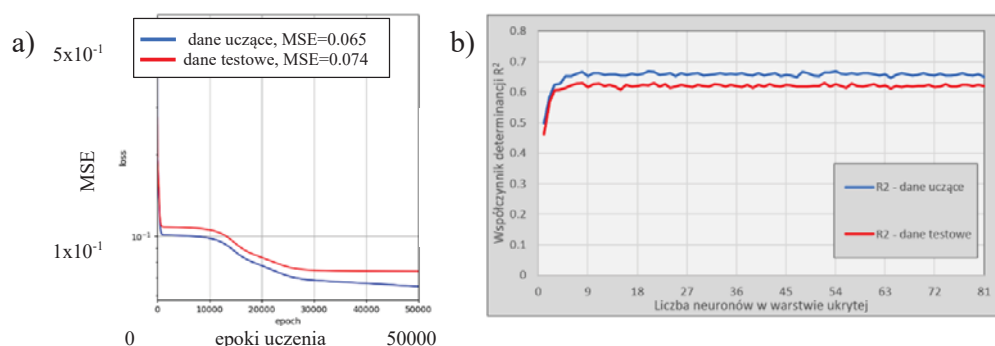
n_t – liczba punktów, dla których przewiduje się wartość za pomocą metamodelu,

$y^{(i)}$ – i -ta wartość rzeczywista (z symulacji MES),

$\hat{y}^{(i)}$ – i -ta wartość przewidywana za pomocą metamodelu,

$\bar{y}$ – średnia arytmetyczna z wartości rzeczywistych (z symulacji MES).

Dane użyte do procesu uczenia sieci zostały znormalizowane do przedziału [0,1]. W przypadku sieci jednowarstwowej, najlepszy pod względem błędu MSE wynik otrzymano dla 54 neuronów w warstwie ukrytej oraz 50 000 epok użytych do uczenia sieci. Poniższe rysunki przedstawiają: zmianę błędu MSE jako funkcję kolejnych epok (rys. 2a), oraz wpływ liczby neuronów ukrytych na współczynnik determinacji R^2 (rys. 2b). Rozpatrywana sieć cechuje się współczynnikiem R^2 dla danych uczących oraz testowych równym odpowiednio 0.67 i 0.63. Drugi typ sieci, z dwoma warstwami ukrytymi, testowany był w wielu kombinacjach parametrów, które wyszczególniono poniżej (tabela 1).



Rys. 2. a) błąd średniokwadratowy (MSE) dla danych uczących i testowych, b) współczynnik determinacji R^2 dla danych uczących i testowych, w zależności od liczby neuronów ukrytych

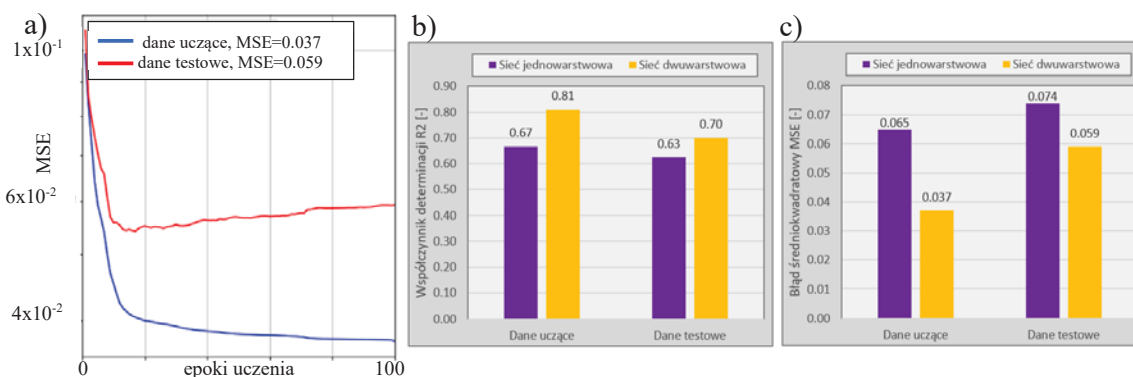
Fig. 2. a) mean squared error (MSE) for training and testing data, b) coefficient of determination as a function of the number of neurons in the hidden layer

Tabela 1. Zmienne parametry dwuwarstwowej sieci neuronowej
Table 1. List of variable parameters of the artificial neural network

Parametr	Min	Max
Prędkość uczenia	0.25	1.0
Liczba neuronów ukrytych – warstwa 1	9	81
Liczba neuronów ukrytych – warstwa 2	9	81
Funkcja aktywacji*	„Sigmoid”	„ReLU”
Regularyzacja sieci*	Brak	„Dropout”
Normalizacja wyjścia sieci*	Brak	Sigmoid

* - w przypadku danych atrybutowych, parametr nie zmienia się w sposób ciągły, a przyjmuje jedynie jedną z dwóch wartości

Sieć, dla której parametry jakościowe uzyskane dla danych testowych były najlepsze (największy R^2 i najmniejszy MSE), uzyskano w konfiguracji neuronów w poszczególnych warstwach: 27x9x81x1 (gdzie 9 i 81 to odpowiednio liczba neuronów w dwóch kolejnych warstwach ukrytych). W warstwach ukrytych użyto prostej liniowej funkcji aktywacji („ReLU”), natomiast nie użyto normalizacji wyjścia sieci (tj. zastosowania końcowej funkcji aktywacji ograniczającej zakres zmienności wyjścia do przedziału $[0,1]$ – jak np. funkcja sigmoidalna). Zastosowano prędkość uczenia równą 1.0. Regularyzacja sieci za pomocą funkcji „dropout” nie przyniosła korzyści w rozpatrywanym przypadku, a uczenie sieci zostało zakończone po 100 epokach. Zmianę błędu sieci w funkcji epok pokazano na rys. 3a, obok porównania sieci pod kątem miar jakości: R^2 (rys. 3b) oraz MSE (rys. 3c).



Rys. 3. a) błąd średniokwadratowy (MSE) dla danych uczących i testowych, b) porównanie wyników R^2 dla obu sieci, c) porównanie wyników MSE dla obu sieci
Fig. 3. a) mean squared error (MSE) for training and testing data, b) comparison of R^2 for both networks, c) comparison of MSE for both networks

4. Wnioski

Zastąpienie prostej jednowarstwowej sieci neuronowej siecią dwuwarstwową, pozwoliło na zmniejszenie błędu średniokwadratowego, jednocześnie zwiększając współczynnik determinacji sieci dla danych testowych do poziomu 0.7. Jest to wartość przyjęta jako progowa, poniżej której metamodel może nie spełniać wymogu dot. poprawnego odwzorowania trendów wynikających z charakteru oryginalnego modelu MES. Mimo, iż sieć dwuwarstwowa jest bardziej rozbudowana niż jej jednowarstwowy odpowiednik, jej uczenie przebiegło znacznie szybciej, z uwagi na bardziej wydajny algorytm optymalizacji wag sieci L-BFGS. Tak zdefiniowanym metamodelem posłużono się do doboru parametrów algorytmów optymalizacyjnych na potrzeby symulacji MES.

Literatura

1. Sebastjan P., Kuś W., Optimization of material distribution for forged automotive components using hybrid optimization techniques, Computer Methods in Materials Science, Vol. 21, s.63-74 (2021).
2. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R., Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting, Journal of Machine Learning Research 15, s. 1929-1958 (2014).
3. Forrester A., Sobester A., Keane A., Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide, Wiley (2008).

MODELOWANIE PROCESU SKRAWANIA STOPU TYTANU ZA POMOCĄ METODY SPG

inż. MICHAŁ SOBOTA,

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

Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński

Streszczenie. Artykuł przedstawia metodę numerycznej analizy procesu skrawania z wykorzystaniem nowej, intensywnie rozwijanej metody bezsiatkowej SPG (Smooth Particle Galerkin). Proces skrawania jest trudny do zasymulowania z powodu występowania szeregu zjawisk mechanicznych, termicznych oraz chemicznych. Dzięki zastosowaniu sprzężenia mechaniczno-termicznego oraz zaawansowanego modelu materiałowego można odwzorować eksperymentalne siły skrawania. Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone za pomocą programu LS-DYNA R13.



MODELING OF THE TITANIUM ALLOY CUTTING PROCESS USING THE SPG METHOD

Abstract. The article presents a numerical analysis of the cutting process with the use of a new, intensively developed SPG (Smooth Particle Galerkin) mesh-free method. The cutting process is difficult to simulate because of the presence of a number of mechanical, thermal, and chemical phenomena. It is possible to model experimental cutting forces by taking into account coupling of mechanical and thermal fields and by applying an advanced material model. All calculations were carried out using the LS-DYNA R13 software.

1. Wprowadzenie

Pomimo jej powszechnego stosowania, obróbka skrawaniem jest jednym z najmniej zrozumianych procesów obróbki przemysłowej ze względu na znaczne odkształcenia materiału obrabianego, dużą prędkość obróbki, wysoką temperaturę występującą podczas skrawania bez chłodziwa oraz reakcje chemiczne zachodzące pomiędzy powstającym wiórem, a ostrzem skrawającym. W niniejszej pracy analizowano skrawanie prostopadłe z ruchem prostoliniowym bez chłodziwa, gdzie proces oddzielania się wióra odbywa się poprzez ścinanie górnej warstwy materiału w pierwszorzędowej strefie natarcia. Następnie wiór ten przesuwał się po powierzchni narzędzia w drugorzędnej strefie natarcia generuje dużą ilość ciepła na skutek tarcia co powoduje wzrost temperatury narzędzia o kilkaset stopni. Duża prędkość skrawania sprawia, że materiał ma znacznie odmienne właściwości mechaniczne niż w przypadku analizy statycznej, co w połączeniu z wysoką temperaturą skutkuje koniecznością zastosowania modelu materiałowego uwzględniającego zależność od tempa odkształceń i zmiękczenia temperaturowego. Metoda bezsiatkowa SPG pozwala na swobodne poruszanie się cząstek względem siebie oraz uwzględnia kryteria zniszczeniowe, wobec czego idealnie nadaje się do symulowania zjawisk szybkozmiennych i z dużymi przemieszczeniami takich jak zderzenia, pęknięcia, kucie, wytłaczanie, gwintowanie, tłoczenie oraz omawiane skrawanie.

2. Opis metody SPG

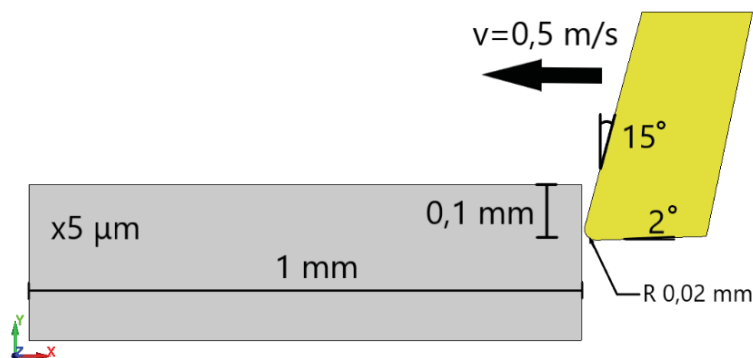
Metoda bezsiatkowej dyskretyzacji przestrzennej SPG jest relatywnie nową metodą stosowaną w analizach numerycznych. Pierwsze publikacje na temat tej metody ukazały się w roku 2015. Następnie jest ona rozwijana przez firmę LSTC (będąca producentem oprogramowania LS-DYNA). Metoda SPG to pewne rozwinięcie metody SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) jednak zawiera szereg usprawnień, m.in. schemat wygładzający oraz aktualizację funkcji jądra, co sprawia, że jest ona bardzo stabilna obliczeniowo [1]. Dodatkowo umożliwia ona zdefiniowanie wiązań pomiędzy cząstkami, które mogą zostać przerwane, przez co dużo łatwiej sterować zniszczeniem materiału. W roku 2019 opracowano metodę MC-SPG (Momentum-Consistent Smoothed Particle Galerkin) wprowadzającą wygładzanie prędkości oraz zmniejszenie liczby koniecznych punktów całkowania, przez co znacznie skraca ona czas obliczeń.

3. Model materiałowy Johnsona-Cooka

Model materiałowy Johnsona-Cooka jest stosowany w przypadku odwzorowania zachowania materiału (najczęściej metalu) podlegającemu dużym odkształceniom, gdzie prędkość odkształceń oraz zmiękczenie temperaturowe grają kluczową rolę. Większość prac badawczych wykorzystuje ten model [1-3] ze względu na relatywnie małą ilość parametrów oraz dostępność w komercyjnym programach obliczeniowych. Model Johnsona-Cooka jest fenomenologicznym modelem uwzględniającym wiele czynników, gdzie poszczególne wyrażenia odpowiadają za uwzględnienie umocnienia odkształceniowego, tempa odkształceń oraz zmiękczenia temperaturowego. Na ich podstawie można wyliczyć efektywne naprężenia plastyczne w materiale. Dodatkowo model materiałowy jest w stanie wyznaczyć zastępcze odkształcenie przy zniszczeniu oraz pełni rolę zaawansowanego kryterium zniszczeniowego.

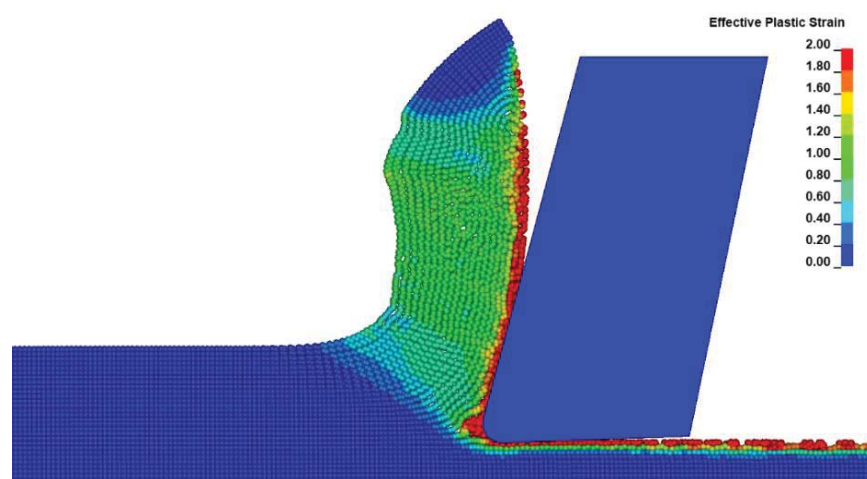
4. Analiza numeryczna procesu skrawania

Aby móc zbadać poprawność otrzymanych wyników, parametry modelu bazowały na wynikach eksperymentalnych dostępnych w literaturze oraz wynikach analiz numerycznych przeprowadzonych za pomocą metody SPH [2]. Dane wejściowe dla modelu materiałowego również zaczerpnięto z badań eksperymentalnych [3] przeprowadzonych na najczęściej stosowanym w przemyśle stopie tytanu o nazwie Ti6Al4V. Rysunek 1 przedstawia charakterystyczne wymiary układu.

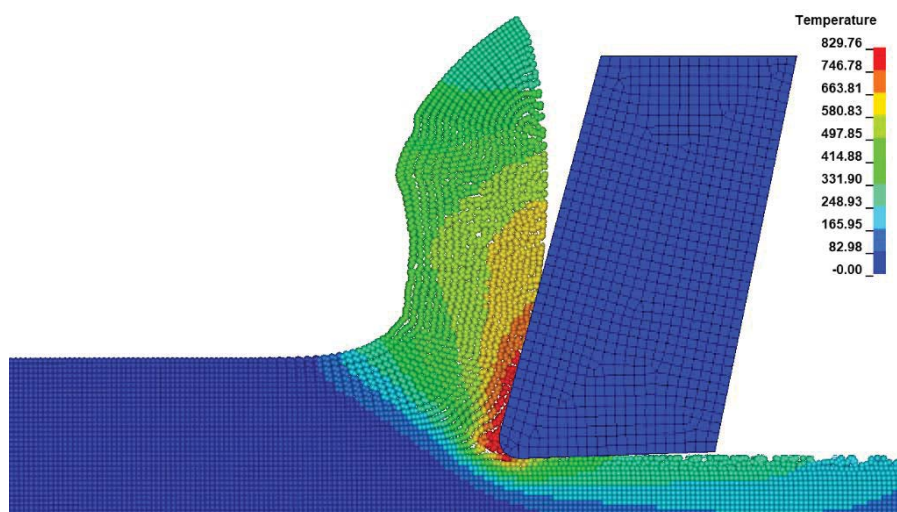


Rys. 1. Wymiary analizowanego układu
Fig. 1. Dimensions of analyzed setup

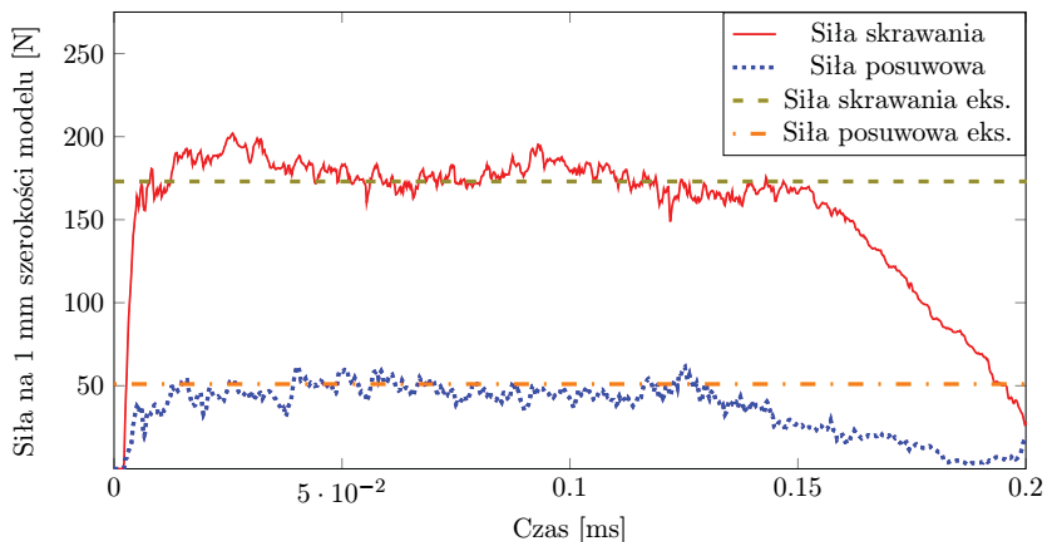
Opracowano model przestrzenny analizowanego układu. Częstki SPG mają odebrane translacyjne stopnie swobody na kierunku Z oraz rotacyjne stopnie swobody względem osi X oraz Y. Odpowiada to analizie w płaskim stanie odkształcenia. Przyjęto uśrednioną wartość współczynnika tarcia równą 0.2 na powierzchni natarcia narzędzia. Parametry termiczne zostały przyjęte jako niezależne od temperatury. Przepływ ciepła pomiędzy materiałem skrawanym, a narzędziem nie był brany pod uwagę ze względu na jego mały udział w całym procesie. Metoda SPG posiada 15 odrębnych parametrów kontrolujących jej zachowanie. W celu dobrania odpowiednich ich wartości przeprowadzono szereg symulacji. Gęstość elementów została dobrana tak aby ich dalsze zagęszczanie nie wpływało znacząco na wyniki. Rysunek 2 przedstawia rozkład zastępczego odkształcenia plastycznego w materiale obrabianym. Rysunek 3 przedstawia rozkład temperatury. Rysunek 4 przedstawia wykres sił działających na narzędzie otrzymanych eksperymentalnie [2] i metodą numeryczną. Można zaobserwować bardzo dobrą zgodność wyników podczas ustalonej części symulacji co wskazuje na jej poprawność.



Rys. 2. Mapa rozkładu zastępczego odkształcenia plastycznego na materiale obrabianym
Fig. 2. Map of effective plastic strain distribution on cut material



Rys. 3. Mapa rozkładu temperatury [°C] na materiale obrabianym
Fig. 3. Map of temperature [°C] distribution on cut material



Rys. 4. Zależność sił jednostkowych działających na narzędzie od czasu
Fig. 4. Unit forces acting on the tool with respect to time

5. Wnioski

Zastosowanie metody SPG pozwoliło na ominięcie głównych problemów podczas symulowania procesu skrawania standardową siatką MES, tj. dużej degeneracji elementów oraz konieczności usuwania elementów. Siatka SPG pozwala na stosowanie stałego kroku całkowania przez co czas symulacji nie wydłuża się wraz ze wzrostem deformacji. Z powodu bardzo dużego wzrostu temperatury, pasma ścinania w wiórze zanikają. Współczynnik tarcia ma mały wpływ na wartości sił skrawania. Kryterium zniszczeniowe Johnsona-Cooka ma duży wpływ na kształt wióra. Dzięki uwzględnieniu analizy termicznej w obliczeniach otrzymano poprawne wyniki. Metoda SPG pomimo bycia najwydajniejszą metodą bezsiatkową dostępną w programie LS-DYNA jest czterokrotnie bardziej wymagająca obliczeniowo od MES. Możliwość swobodnego łączenia siatki MES oraz elementów SPG w obszarze jednego ciała jest w stanie znacznie przyspieszyć obliczenia. Wyznaczenie odpowiednich parametrów wejściowych modelu Johnsona-Cooka dla badanego materiału jest trudne i wymaga szeregu testów eksperymentalnych oraz wykorzystania metod aproksymacji. Dodatkowo ten model materiałowy nie jest w stanie uwzględnić zmiękczenia stopu przebiegającego na skutek przemiany alotropowej tytanu.

Literatura

1. Wu C. T., Quoc Bui T., Wu Y., Luo T., Wang M., Liao C., Chen P., Lai Y., Numerical and experimental validation of a particle Galerkin method for metal grinding simulation, *Computational Mechanics*, Vol. 61, s. 365–383, (2018)
2. Lampropoulos A. D., Markopoulos A. P., Manolacos D. E., Modeling of Ti6Al4V alloy orthogonal cutting with smooth particle hydrodynamics: a parametric analysis on formulation and particle density, *Metals*, Vol. 9, Issue 4, (2019)
3. Ducobu F., Rivi`ere-Lorph`evre E., Filippi E., On the importance of the choice of the parameters of the Johnson-Cook constitutive model and their influence on the results of a Ti6Al4V orthogonal cutting model, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 122, s. 143-155, (2017)

ZASTOSOWANIE WYBRANYCH ALGORYTMÓW NIEDETERMINISTYCZNYCH W ROZWIĄZYWANIU ZADAŃ OPTYMALIZACJI

inż. PRZEMYSŁAW SZYMONIAK,

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marek Paruch, Prof. PŚ

Streszczenie. Artykuł opisuje zastosowanie dwóch niedeterministycznych algorytmów w wybranych problemach optymalizacji. Algorytmy te to metoda Monte Carlo oraz metoda symulowanego wyżarzania. Zostały one użyte w procesach optymalizacji funkcji zdefiniowanych analitycznie, losowo generowanych powierzchni, a także w rozwiązywaniu zadań liniowych z ograniczeniami. Otrzymane wyniki porównane zostały z wartościami analitycznymi dla poszczególnych problemów, oceniona została również efektywność obu metod ze względu na dokładność rozwiązań.



APPLICATION OF NONDETERMINISTIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION PROBLEMS

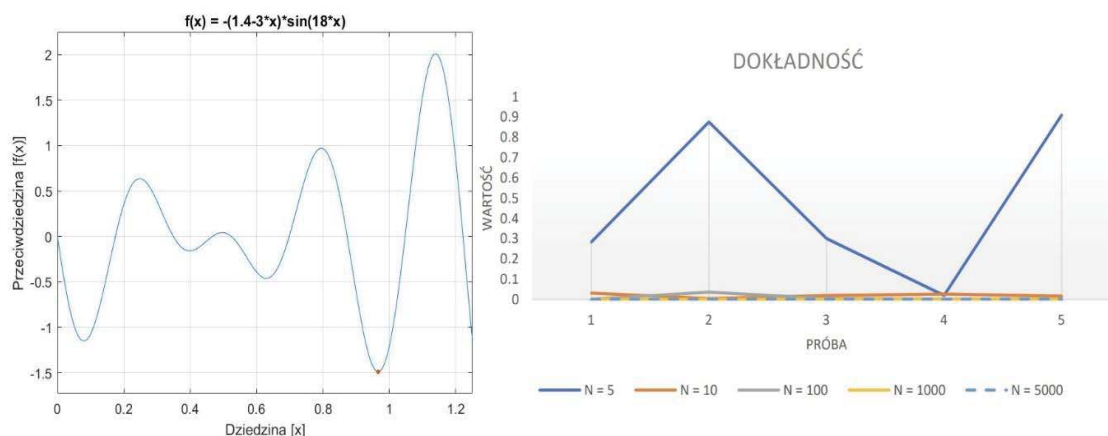
Abstract. This article describes the application of two nondeterministic algorithms in specified optimization problems. These algorithms are Monte Carlo method and simulated annealing and were used in optimization of analytic functions, randomly generated surfaces and linear problems with constraints. The obtained results were compared with analytical values for specific problems and methods efficiency has been assessed in terms of solution accuracy.

1. Wprowadzenie

Problematyka rozważana w niniejszym artykule skupia się głównie na analizie jakości rozwiązań otrzymanych za pomocą dwóch algorytmów niedeterministycznych. Algorytmy te to metoda Monte Carlo oraz metoda symulowanego wyżarzania. W przypadku metody Monte Carlo kluczowym parametrem była liczba próbek N , która ma znaczący wpływ na jakość znajdowanych rozwiązań [1]. W przypadku metody symulowanego wyżarzania kluczową rolę odgrywała długość epoki, czyli ilość wewnętrznych iteracji algorytmu oraz liczba zewnętrznych iteracji, która przyjęta została jako warunek zatrzymania działania algorytmu [2]. Zarówno dla algorytmu Monte Carlo, jak i symulowanego wyżarzania kryterium porównawczym jest kryterium oparte na pojęciu dokładności. Dokładność zdefiniowana została jako moduł z różnicy wartości dziedziny rozwiązania analitycznego i numerycznego. Symulacje przeprowadzone zostały dla różnych wartości wybranych parametrów charakteryzujących proces działania algorytmów. Symulacje wraz z odpowiednio sformułowanymi problemami zrealizowane zostały w środowisku MATLAB.

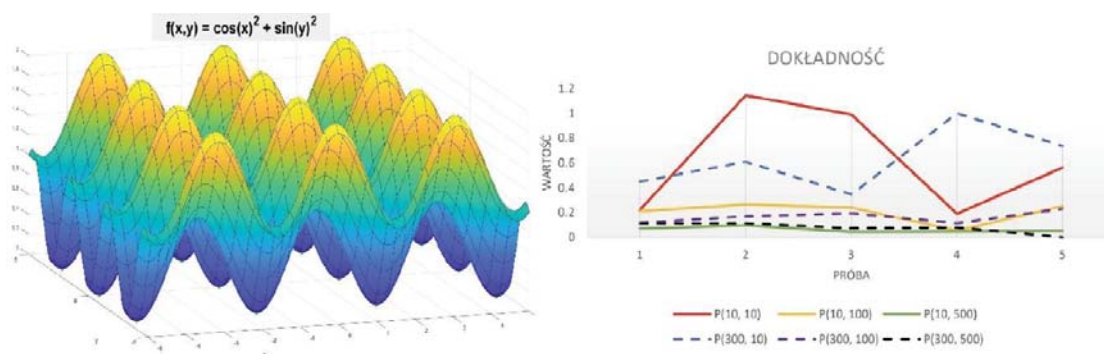
2. Optymalizacja funkcji

Z uwagi na możliwość wizualizacji rozważane były funkcje co najwyżej dwóch zmiennych. W ogólności jednak metody te mogą być sukcesywnie stosowane dla funkcji o dowolnej argumentowości. Charakterystyczną cechą obiektów poddanych analizie było istnienie postaci analitycznych co oznacza, że interesujące nas wartości ekstremalne mogły z łatwością zostać wyznaczone na poziomie analizy matematycznej. Dla potrzeb badania efektywności algorytmów, funkcje celu zostały dobrane w taki sposób, aby charakteryzowały się unimodalnością, jak i wielomodalnością. Przykładowe wyniki wraz z odpowiadającą im funkcją przedstawione zostały w postaci poniższych wykresów (por. Rys. 1, 2).



Rys. 1. Przykładowa funkcja celu wraz z wartościami dokładności w zależności od liczby próbek N dla metody Monte Carlo

Fig 1. An example test function with accuracy values depending on the sample values N for Monte Carlo method



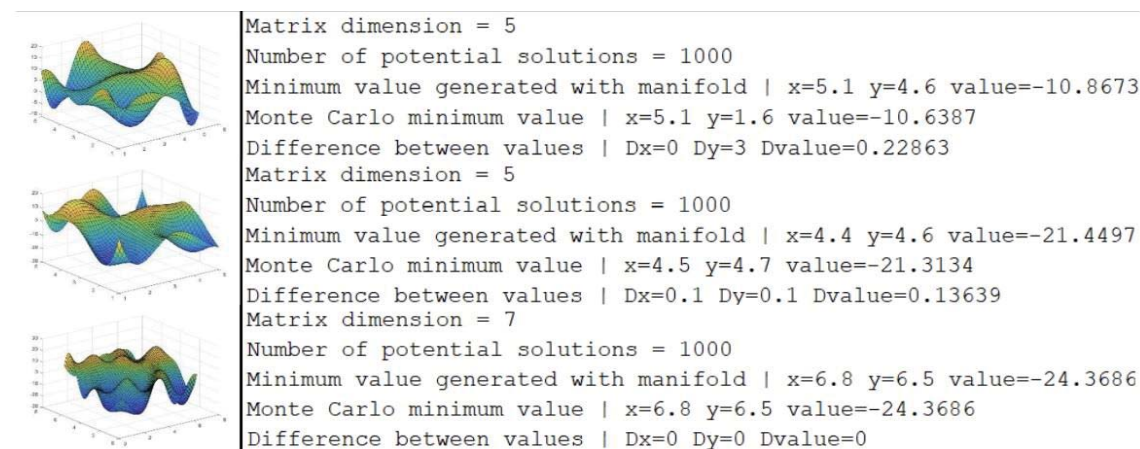
Rys. 2. Przykładowa funkcja celu wraz z wartościami dokładności w zależności od liczby iteracji i długości epoki (gdzie: $P(\text{długość epoki, liczba iteracji})$) dla metody symulowanego wyżarzania

Fig. 2. An example test function with accuracy values depending on the iteration values and epoch length (where: $P(\text{epoch length, iteration value})$) for simulated annealing method

Dla każdej permutacji parametrów wykonane zostało po pięć prób. Pozwoliło to na porównanie obu metod ze względu na dokładność rozwiązania numerycznego. W przypadku każdej z funkcji widać było dużą dokładność rozwiązania numerycznego wraz ze wzrostem wartości parametrów ulegających wariacji, przy czym czas symulacji nie ulegał znaczącym zmianom i wykazywał zadowalająco niskie wartości.

3. Optymalizacja losowo generowanych powierzchni

Często zdarza się, że nie jesteśmy w stanie podać analitycznej postaci funkcji, która podlegać będzie analizie. Ograniczając się tylko do trójwymiarowych przestrzeni euklidesowych, analizie podlegać mogą również powierzchnie opisane przez zbiory danych które nie posiadają analitycznej postaci [3]. Z uwagi na ten fakt również i do takich problemów zastosować można powyższe metody. Algorytmy zaimplementowane zostały do programu generującego powierzchnie na podstawie n -wymiarowej macierzy kwadratowej zawierającej losowe wartości. Na ich podstawie interpolowane były wartości pośrednie co pozwoliło na wygenerowanie ciągłej powierzchni. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe powierzchnie wraz z wartością minimalną macierzy i wartością wygenerowaną numerycznie (metoda Monte Carlo)

Fig. 3. An example of surfaces with matrix minima values and values generated numerically (Monte Carlo method)

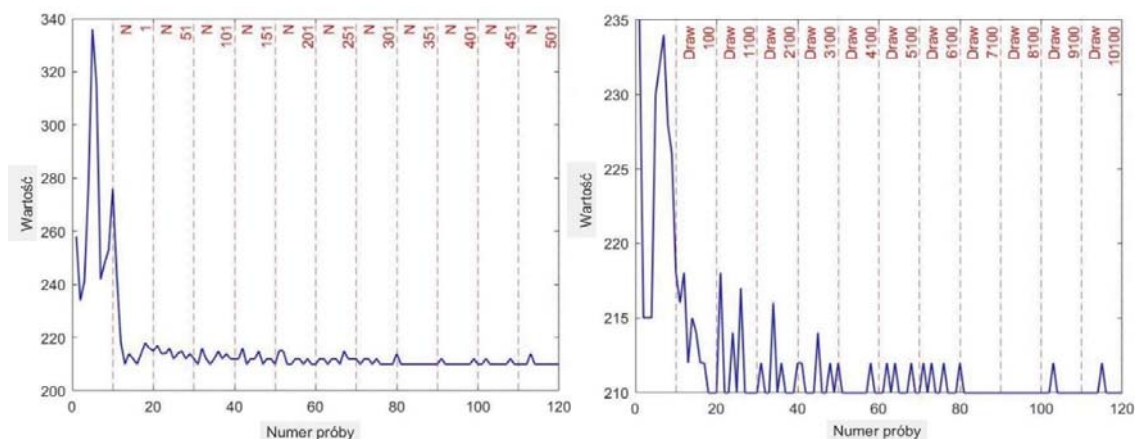
4. Programowanie liniowe

Algorytmy niedeterministycznie mogą być również użyte w przypadku problemów liniowych z ograniczeniami [4]. W celu rozwiązania problemu, sformułowany został odpowiedni model matematyczny, opisany zależnościami (1), (2) oraz (3). Symulacje, podobnie jak wcześniej, wykonane zostały dla różnych parametrów (liczba próbek N dla metody Monte Carlo oraz liczba zewnętrznych iteracji $Draw$ dla metody symulowanego wyżarzania – por. Rys. 4). Wykresy przedstawione na rysunku 4 przedstawiają zbieżność dokładności dla obydwu metod wraz ze wzrostem wartości parametru.

$$\text{FC: } f(x_1, x_2) = 5x_1 + 8x_2 \rightarrow \text{MIN} \quad (1)$$

$$\text{O: } \begin{cases} 16x_1 + 4x_2 \geq 240 \\ 4x_1 + 8x_2 \geq 200 \\ 4x_1 + 4x_2 \leq 180 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{WB: } x_1, x_2 \geq 0 \wedge x_1, x_2 \in \mathbb{C} \quad (3)$$



Rys. 4. Wykresy zbieżności dokładności dla obu metod (po lewej – Monte Carlo, po prawej – symulowane wyżarzanie)

Fig. 4. Plots of accuracy convergence for both methods (left – Monte Carlo, right – simulated annealing)

5. Podsumowanie

Analiza wyników wykazała, że metoda Monte Carlo wraz z metodą symulowanego wyżarzania dobrze poradziły sobie z problemami optymalizacji, które przedstawione zostały w niniejszym artykule. Wyniki otrzymane drogą numeryczną były bardzo zbliżone do wyników analitycznych. Powyższe metody niedeterministyczne mogą być zatem z sukcesem używane do rozwiązywania problemów optymalizacji tego typu nie tylko dzięki ich efektywności, lecz również z uwagi na ich elastyczność i potencjał do modyfikacji w kontekście interesujących nas problemów.

Literatura

1. Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań, PWN, Warszawa, (2009).
2. Pijarski P., Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin, (2019).
3. [Mykel J. Kochenderfer](#), [Tim A. Wheeler](#), Algorithms for Optimization, MIT Press, (2019).
4. [Marco Cavazzuti](#), Optimization Methods: From Theory to Design Scientific and Technological Aspects in Mechanics, Springer Science & Business Media, (2012).

NARZĘDZIE DO WSPOMAGANIA NAPRAW SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH

inż. RAFAŁ TOMAN,
Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, semestr I, 2 stopień
Opiekun naukowy: Dr inż. Sebastian Rzydzik

Streszczenie. W artykule przedstawiono opis konstrukcji narzędzia przeznaczonego do wspomagania prac serwisowych siłowników hydraulicznych. We wstępie przedstawiono zastosowanie tego typu narzędzia, nazywanego dynamometrycznym kluczem hydraulicznym, zasadę jego działania oraz budowę typowego serwisowanego siłownika hydraulicznego. Ze względu na złożoność narzędzia, opis prac konstrukcyjnych, w tym analizę MES z optymalizacją strukturalną, skrócono do jednego zespołu.

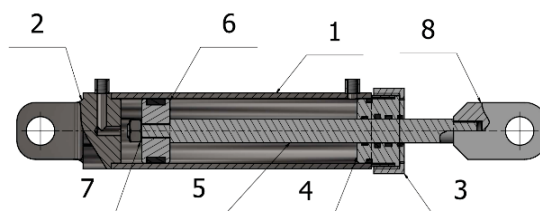


A TOOL FOR SUPPORTING THE REPAIR OF HYDRAULIC CYLINDERS

Abstract. The article presents a description of the design of a tool intended to support the service of hydraulic cylinders. The introduction presents the use of this type of tool, called a hydraulic torque wrench, the principle of its operation, and the construction of a typical serviced hydraulic cylinder. Due to the complexity of the tool, the description of the design work, including FEM analysis with structural optimization, was reduced to one assembly.

1. Wprowadzenie

Siłowniki hydrauliczne stosuje się m.in. w takich maszynach i urządzeniach jak koparko-ładowarki, prasy hydrauliczne, dźwigi, maszyny rolnicze, czy też śmieciarki. Standardowy siłownik hydrauliczny dwustronnego działania jest zbudowany z Cylindra 1, Dna cylindra 2, Nakrętki 3, Dławicy 4, Tłocyska 5, Tłoka 6, Nakrętki tłoka 7 oraz Ucha 8 (Rys. 1).



Rys. 1. Elementy siłownika hydraulicznego

Fig. 1. Parts of a hydraulic cylinder

W czasie demontażu siłownika hydraulicznego duży problem sprawia odkręcenie nakrętki 3 zabezpieczającej dławicę. Jest to spowodowane bardzo dużym momentem obrotowym z jakim jest taka nakrętka przykręcona oraz wpływ takich czynników jak np. korozja czy też

uszkodzenia mechaniczne. Do tej operacji potrzebne jest narzędzie dysponujące bardzo dużym momentem obrotowym rzędu kilkudziesięciu kNm. Narzędziem, które to umożliwia jest hydrauliczny klucz dynamometryczny [1][2][3].

2. Zasada działania urządzenia

Zasada działania hydraulicznego klucza dynamometrycznego została przedstawiona na Rys. 2. Jego konstrukcja jest zazwyczaj oparta na dwóch siłownikach hydraulicznych działających w tym samym kierunku, lecz o przeciwnych zwrotach. Tłoczyska tych siłowników działając z siłą F na tarczę o promieniu r generują moment obrotowy M . Poszczególne rozwiązania konstrukcyjne mogą się różnić wielkością siłowników (średnicą i skokiem), zakończeniem tłoczków, średnicą tarczy oraz kształtem wycięć na jej obwodzie, typem głowicy, długością stołu, czy też dostępnymi akcesoriami.

Siła generowana przez jeden siłownik jest równa [4]:

$$F = s \cdot p \quad (1.1)$$

gdzie:

s – pole powierzchni tłoka [m^2],

p – ciśnienie płynu hydraulicznego [Pa].

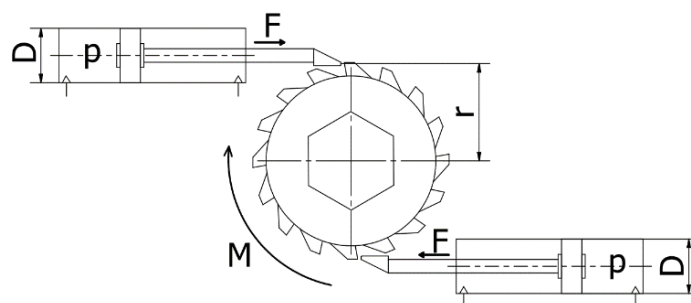
Moment obrotowy generowany przez układ dwóch siłowników wynosi:

$$M = 2 \cdot F \cdot r \quad [Nm] \quad (1.2)$$

gdzie:

F – siła generowana przez jeden siłownik [N],

r – długość ramienia na którą działa jeden siłownik [m].



Rys. 2. Zasada działania hydraulicznego klucza dynamometrycznego

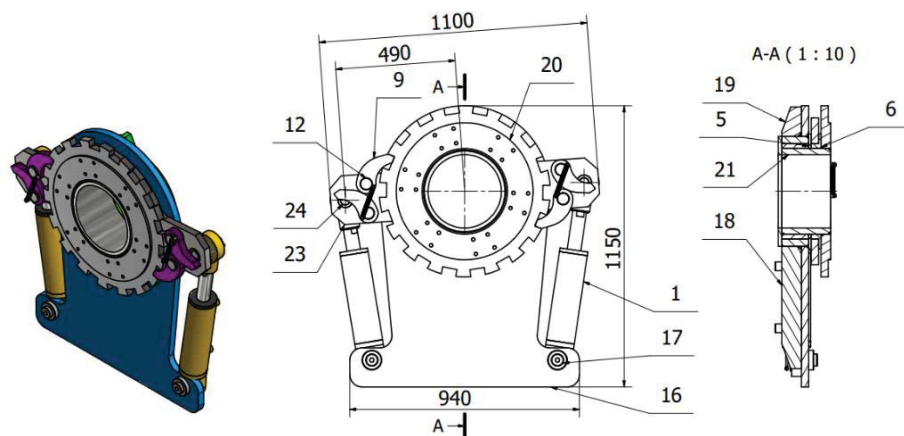
Fig. 2. Functional principle of the hydraulic torque wrench

3. Modelowanie i analiza numeryczna

Konstrukcja narzędzia została podzielona na kilka zespołów. Podział ten ułatwił proces projektowania i konstruowania oraz późniejszą analizę wytrzymałościową. Analiza podzespołów o prostszej konstrukcji zajmowała znacznie mniej czasu, łatwiej było dobrać parametry analizy oraz szybciej wprowadzało się konieczne poprawki i modyfikacji.

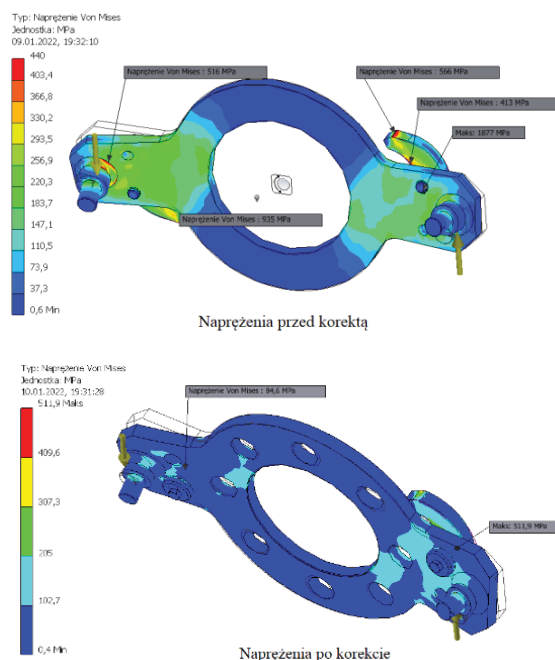
Na Rys. 3 przedstawiono konstrukcję podstawowego zespołu, tj. napędu wrzeciona. Podstawę jego konstrukcji stanowi płyta 16. Płyta ta jest usztywniona wspawanymi żebrami 18 oraz 9. Do napędu wykorzystano dwa siłowniki hydrauliczne CJ-100/56 firmy Artom o skoku 200mm. Siłowniki te poruszają ramieniem 23, które poprzez zapadki 9 przekazują moment

obrotowy na koło zębate. Siłowniki są osadzone na sworzniach 17 przyspawanych do płyty 16 oraz na sworzniach 24 przyspawanych do ramienia 23. Każda z par zapadek 9 jest spięta za pomocą sprężyny naciągowej. Sprężyna ta pozwala na odpowiednie ustawienie jednej zapadki w każdej parze, a tym samym na wymuszenie odpowiedniego kierunku obrotów wrzeciona. Tarcza zębata 20 jest zespawana z pierścieniem 21. Całość jest łożyskowana za pomocą tulei 5 oraz 6 wykonanych z brązu Rg7.



Rys. 3. Napęd wrzeciona
Fig. 3. Spindle drive

Zespół ten został podzielony na mniejsze podzespoły, a następnie zostały one poddane numerycznej analizie wytrzymałościowej w środowisku Autodesk Inventor 2019 w module „Analiza Naprężeń”. Na Rys. 4 pokazano wyniki analizy podzespołu napędu wrzeciona.

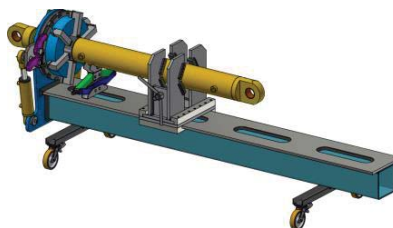


Rys. 4. Wyniki analizy MES podzespołu napędu wrzeciona
Fig. 4. The results of the FEM analysis of the spindle drive assembly

Do sworzni została przyłożona para sił wywołująca moment obrotowy 100 kNm. Wewnętrzna, walcowa część ramienia została związana wiązaniem walcowym, a końce zapadek wiązaniami nieruchomymi. Średnia wielkość elementu skończonego została ustawiona na 10 mm co odpowiada 3 elementom skończonym na grubość analizowanego elementu. Na górnym rysunku widoczne są rozkłady naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa w pierwszej wersji podzespołu, a na dolnym rozkłady naprężeń po wprowadzonych modyfikacjach konstrukcyjnych. Modyfikacji został poddany między innymi sposób zabezpieczenia sworzni zapadek. Pierścienie osadcze sprężynujące zostały zastąpione śrubami oraz podkładkami o większej średnicy, które pozwoliły na rozłożenie sił na większej powierzchni. Dzięki temu udało się zredukować maksymalne naprężenia z prawie 1900 MPa do nieco ponad 500 MPa. Podobnej analizie zostały poddane wszystkie zespoły narzędzia, a zmiany konstrukcyjne były sukcesywnie wprowadzane do kolejnych elementów składowych.

Postać geometryczna całego narzędzia została przedstawiona na Rys. 5. Charakteryzuje się ona następującymi właściwościami:

- maksymalne ciśnienie w układzie hydraulicznym: 15 MPa
- maksymalny moment obrotowy: 97 kNm
- maksymalna średnica obsługiwanego siłownika: 300 mm
- długość robocza stołu: 4000 mm



Rys. 5. Postać geometryczna hydraulicznego klucza dynamometrycznego
Fig. 5. Geometrical form of a hydraulic torque wrench

4. Podsumowanie

Podczas projektowania hydraulicznego klucza dynamometrycznego częściowo wzorowano się na konstrukcji fabrycznej, której maksymalny moment obrotowy jest pięciokrotnie mniejszy od założonego w opracowywanej konstrukcji. Było to przyczyną problemów związanych z występowaniem bardzo dużych naprężeń w najbardziej obciążonych elementach.

Zastosowana weryfikacja MES pozwoliła ujawnić niedoskonałości pierwszej wersji konstrukcyjnej narzędzia. Analiza wyników rozkładów naprężeń zredukowanych umożliwiła wprowadzenie świadomych zmian konstrukcyjnych wybranych zespołów, które ostatecznie pozwalają uznać, że narzędzie spełnia założone nominalne parametry użytkowe.

Literatura

1. Cylinder Cyclones, [online]. USA. 03.06.2021.[dostęp 20.01.2022]. Dostęp w Internecie: www.cylindercyclone.com
2. Delsbo Industrihandel, [online]. Szwecja. 10.12.2020.[dostęp 20.01.2022]. Dostęp w Internecie: <http://www.delsboindustri.se/beskrivning-av-hcrm-20>
3. Machinery Service Design, [online]. USA. 30.09.2009.[dostęp 20.01.2022]. Dostęp w Internecie: <https://www.ms-d.com/nutBuster.html>
4. Wydawnictwo REA-SJ, Poradnik mechanika, (2015).

ANALIZA STANU WYŁĘŻENIA KOŚCI ŻUCHWY Z UBYTKIEM ORAZ PO UZUPEŁNIENIU IMPLANTOLOGICZNYM W RÓŻNYCH WARUNKACH ŻUCIA

mgr inż. ANNA TOMASZEWSKA,

Inżynieria biomedyczna, semestr IV, 3 stopień

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Szczepan Piszczatowski

Streszczenie. Celem pracy była ocena wyłężenia żuchwy z ubytkiem oraz po jego uzupełnieniu implantem, w różnych warunkach żucia. Analizowano cztery warianty żucia, uwzględniając symetryczny kontakt siekaczy lub zębów trzonowych, oraz niesymetryczny kontakt zębów trzonowych po stronie ubytku lub po stronie przeciwnej. Wyniki wskazują, że uzupełnienie ubytku implantem zmniejsza naprężenia HMH w kości korowej o co najmniej 50 %. Niesymetria kontaktu zębów skutkuje niesymetrycznym rozkładem naprężenia w kości.



STRENGTH ANALYSIS OF THE MANDIBULAR BONE WITH DEFECT AND WITH IMPLANT UNDER VARIOUS CHEWING CONDITIONS

Abstract. The aim of the study was to evaluate the strength of the mandibular bone with the defect and with implant under various chewing conditions. Four variants of chewing were analysed, taking symmetrical contact between incisors or molars as well as asymmetrical contact of molars on the side of the defect or on the opposite side to the defect. The results of the study show that filling the defect with an implant reduces the HMH stress in the cortical bone by at least 50%. Asymmetry of teeth contact results in asymmetry of stress pattern in bone tissue.

1. Wprowadzenie

Defekt kości żuchwy w postaci ubytku, będący najczęściej efektem usunięcia zmiany nowotworowej kości, oraz jego późniejsze uzupełnienie implantologiczne, zaburza biomechaniczne warunki pracy kości żuchwy. Jest dość oczywiste, że resekcja fragmentu kości musi prowadzić do zmiany warunków pracy pozostałej jej części. W przypadku wszczepienia implantu zastępującego usuniętą część kości dochodzi ponadto do zjawisk związanych ze wzajemnym oddziaływaniem na siebie materiałów o znacząco różnych właściwościach mechanicznych. Prowadzi to do zmiany wyłężenia materiału kostnego, mających wpływ między innymi na proces przebudowy tkanki. Znaczący udział w tym procesie mają również zaburzenia obciążeń działających na układ kość – implant, w tym ich asymetria warunków żucia często towarzysząca zmianom pooperacyjnym.

Celem niniejszej pracy była analiza wyłężenia kości żuchwy z ubytkiem oraz ze wszczepionym implantem, w przypadku zróżnicowanych warunków kontaktu zębów żuchwy i szczęki, wynikających z odmiennych wariantów żucia.

2. Materiały i metody

a. Model geometryczny

Badanie zostało wykonane przy wykorzystaniu geometrycznego modelu żuchwy opracowanego na podstawie danych pozyskanych z użyciem komputerowej tomografii rentgenowskiej, przetworzonych w programie MIMICS (Materialise, Belgium). Całą objętość kości podzielono na część wewnętrzną zajmowaną przez tkankę gąbczastą oraz warstwę zewnętrzną, której grubość mieściła się w zakresie od 1,6 do 7,8 mm, zbudowaną z kości korowej [1]. Przygotowano trzy warianty modelu żuchwy: (1) model anatomiczny, (2) model z ubytkiem zlokalizowanym w dolnej części trzonu żuchwy, po stronie tylnej, oraz (3) model ze wszczepionym metalicznym implantem uzupełniającym ubytek. Kształt implantu został dopasowany do zamodelowanego ubytku.

b. Dyskretyzacja modelu

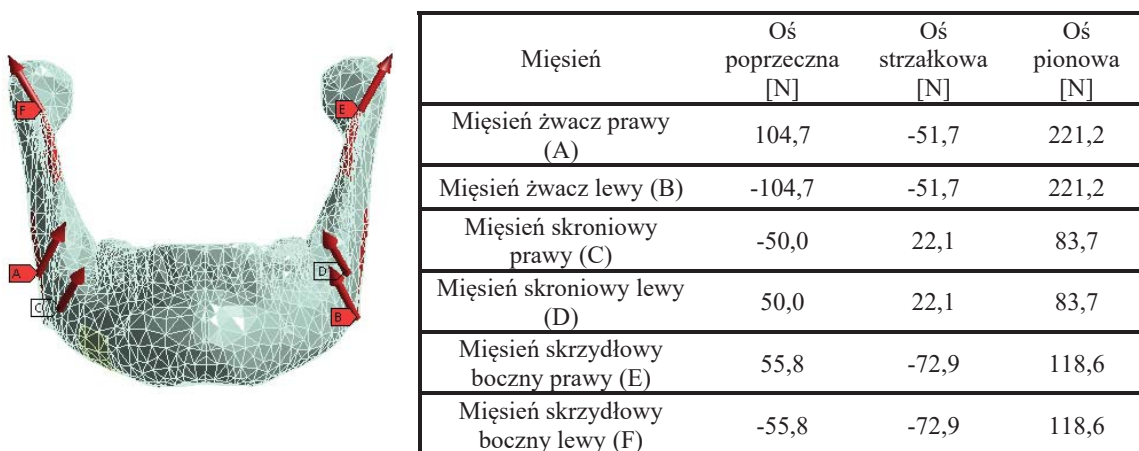
Wykonano dyskretyzację modelu w systemie ANSYS (Ansys Inc., Canonsburg, USA) używając 10-węzłowych elementów czworościennych Solid187, po czym przeprowadzono test jakości siatki dla naprężenia zredukowanego Hubera - von Misesa - Hencky'ego (HMH). Siatka dla modelu żuchwy została zoptymalizowana globalnie, a także lokalnie – w rejonie kontaktu implantu z kością (w tym obszarze długość krawędzi elementów skończonych wynosiła około 1 mm). Siatka modelu po optymalizacji (5 iteracji), składała się z około 100 tysięcy elementów skończonych rozpiętych na około 162 tysiącach węzłach.

c. Właściwości materiałowe

Chociaż zarówno tkanka korowa jak i gąbczasta są strukturami niejednorodnymi o anizotropowych właściwościach mechanicznych, w prezentowanych badaniach zastosowano uproszczony model izotropowy, przyjmując następujące stałe materiałowe: dla tkanki kostnej gąbczastej: $E=1,37$ GPa; $\nu=0,3$; $G=0,52$ GPa, dla tkanki kostnej korowej: $E=13,7$ GPa; $\nu=0,3$; $G=5,26$ GPa. Właściwości materiałowe implantu odpowiadały czystemu technicznie tytanowi ($E=103$ GPa; $\nu=0,3$; $G=76,9$ GPa) [2,3].

d. Warunki podparcia i obciążenia

Obciążenia działające na badany model wynikały z sił rozwijanych przez poszczególne mięśnie uczestniczące w procesie żucia. Ich lokalizację, zgodnie z anatomią układu szkieletowo-mięśniowego oraz wartości [4] przedstawiono na rys. 1.

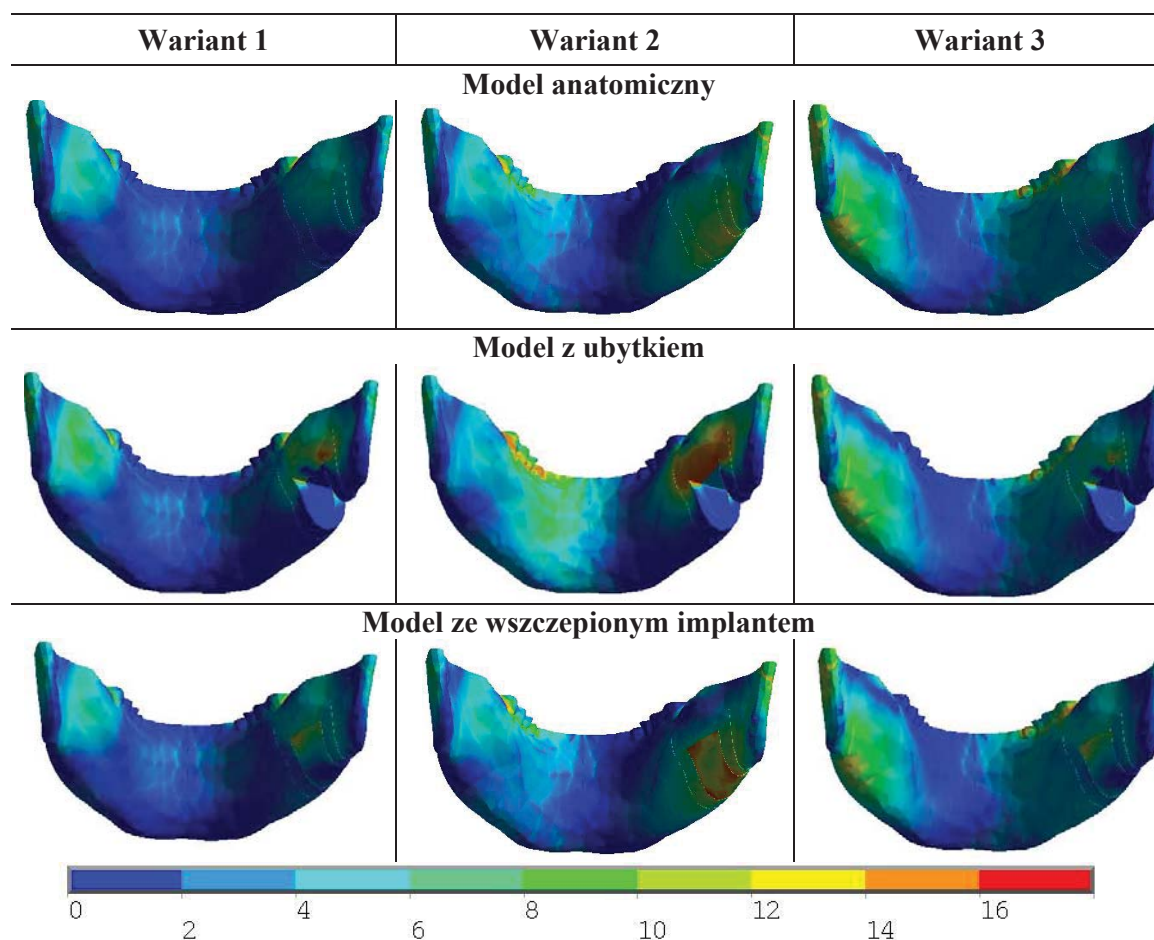


Rys. 1. Lokalizacja oraz wartości sił mięśniowych działających na model żuchwy

Fig. 1. View and values of muscle forces acting on model of the mandible

Model żuchwy podparto odtwarzając warunki panujące w stawie skroniowo-żuchwowym, pozostawiając jedynie możliwość obrotu wokół osi stawu i blokując pozostałe stopnie swobody. Odtworzono też warunku kontaktu pomiędzy zębami żuchwy i szczęki, które występują podczas żucia. W wariancie podstawowym siekacze dolne symetrycznie kontaktują się z siekaczami górnymi (wariant podstawowy). Rozważono też trzy warianty uwzględniające możliwe zróżnicowanie warunków zgryzu u osób po resekcji fragmentu kości oraz po jego uzupełnieniu. W pierwszym, zęby trzonowe dolne symetrycznie kontaktują się z zębami trzonowymi górnymi (wariant 1); w drugim, zęby trzonowe dolne jedynie po stronie ubytku/implantu kontaktują się z zębami trzonowymi górnymi (wariant 2); w trzecim, zęby trzonowe dolne kontaktują się z zębami trzonowymi górnymi jedynie po stronie przeciwnej do ubytku/implantu (wariant 3).

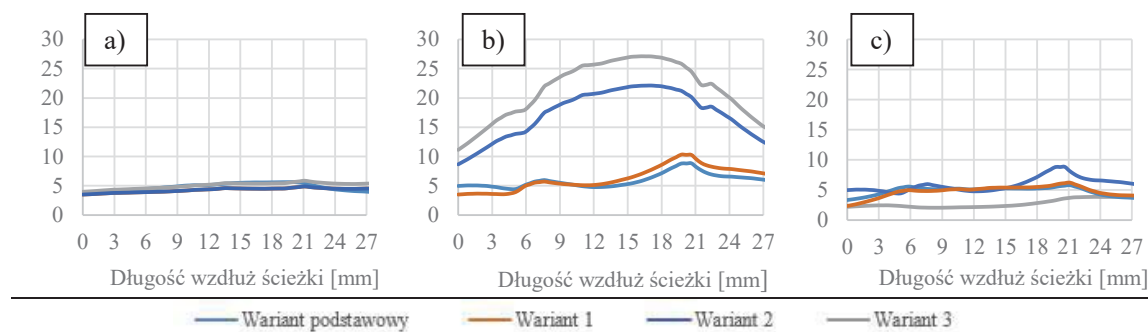
3. Wyniki i dyskusja



Rys. 2. Widok wewnętrznej strony modelu żuchwy prezentujący rozkład naprężeń HMH gdy kontakt zębów jest: symetryczny między trzonowcami (wariant 1), między trzonowcami po stronie ubytku (wariant 2), między trzonowcami po stronie przeciwnej do ubytku (wariant 3)

Fig. 2. View of the inner side of the mandible model presenting HMH stress distribution when the teeth contact is: symmetrical between the molars (variant 1), between molars on the side of the defect (variant 2), between molars on the opposite side to the defect (variant 3)

Wyniki przedstawiono w formie rozkładów naprężenia HMH (rys. 2) oraz na wykresach prezentujących rozkład naprężenia HMH wzdłuż ścieżki umiejscowionej wewnątrz kości żuchwy, 2 mm nad miejscem ubytku (rys 3). Całkowita długość ścieżki wynosiła 27 mm i obejmowała długość ubytku / implantu (17 mm) oraz dodatkowo po 5 mm z obu jego stron.



Rys. 3. Rozkład naprężenia HMH wzdłuż ścieżki umiejscowionej wewnątrz kości żuchwy:
a) model anatomiczny, b) model z ubytkiem, c) model z implantem.

Fig. 3. Distribution of the HMH stress along path located inside the mandible: a) anatomical model, b) model with bone defect, c) model with implant

Uzyskane wyniki wskazują na wyraźny wzrost wartości naprężenia w modelu z ubytkiem kostnym (rys. 2, rys. 3b). Największe naprężenia występują w przypadku kontaktu pomiędzy siekaczami (wariant podstawowy) oraz przy kontakcie zębów trzonowych po stronie ubytku (wariant 2). Uzupełnienie ubytku implantem zmniejsza wartość naprężenia w kości korowej o co najmniej 50% dla wszystkich warunków żucia (rys. 3c), przy czym największa zmiana widoczna jest dla symetrycznego kontaktu między siekaczami jak dla kontaktu pomiędzy zębami trzonowymi po stronie ubytku.

Dla warunków żucia, gdzie kontakt między dolnymi a górnymi zębami trzonowymi jest niesymetryczny (warianty 2 i 3), rozkład naprężenia jest również niesymetryczny względem płaszczyzny strzałkowej (rys. 2) z przesunięciem koncentracji naprężenia na stronę, po której występuje zwarecie zębów. Ma to szczególne znaczenie w przypadku obecności ubytku kostnego oraz wszczepienia implantu. W tych sytuacjach zaburzenia spowodowane asymetria warunków żucia nakłada się bowiem na efekty związane ze zmienioną strukturą geometryczną i materiałową kości żuchwy.

Literatura

1. Cox T., Kohn M. W., Impelluso T., Computerized Analysis of Resorbable Polymer Plates and Screws for the Rigid Fixation of Mandibular Angle Fractures, J Oral Maxil Surg. 2003, 61(4): 481-487,
2. Menicucci G, Lorenzetti M, Pera P i in. Mandibular Implant-Retained Overdenture: Finite Element Analysis of Two Anchorage Systems. Int. J. Oral Maxillofac. Implants. 1998; 13(3): 369-376,
3. Najeeb S, Sultan Khursid Z. Applications of PEEK in oral implantology and prosthodontics. J. Prosthodont. Res. 2015; 298: 1-8,
4. Gregolin RF, Zavaglia CA, Tokimatsu RC i in. Biomechanical Stress and Strain Analysis of Mandibular Human Region from Computed Tomography to Custom Implant Development. Adv. Mater. Sci. Eng. 2017, 2017: 1-9.

Praca finansowana ze środków na naukę w ramach projektu nr WI/WM- IIB/7/2021.

HOMOGENIZACJA NUMERYCZNA MATERIAŁÓW HYBRYDOWYCH Z FAZĄ AUKSETYCZNĄ

inż. KATARZYNA TOMICZEK,

Automatyka i Robotyka, AB3, semestr III, 2 stopień

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

Streszczenie. W pracy rozpatrywane są materiały hybrydowe w postaci kompozytów zawierających składniki auksetyczne. Wyniki dostępne w literaturze wskazują, że zastępcze własności sprężyste takich materiałów mogą mieć ekstrema przy pośrednich wartościach udziału objętościowego składników. W artykule zbadano wpływ liczby wtrąceń w reprezentatywnym elemencie objętości (ang. RVE) oraz wpływ udziału objętościowego faz na wyznaczony zastępczy moduł Younga. Wyniki są zgodne z danymi dostępnymi w literaturze. Do analiz wykorzystano oprogramowanie Material Designer.



NUMERICAL HOMOGENIZATION OF HYBRID MATERIALS WITH AUXETIC PHASE

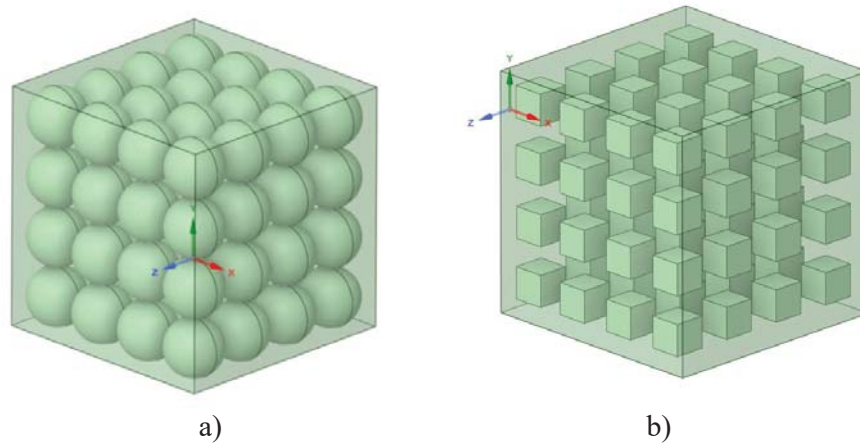
Abstract. In this paper, hybrid materials in the form of composites containing auxetic components are considered. Results available in the literature indicate that the equivalent elastic properties of such materials can have extremes at intermediate values of the volume fraction of the components. In this paper, the effect of the number of inclusions in a representative volume element (RVE) and the effect of the volume fraction of the phases on the determined effective Young's modulus are investigated. The results are consistent with data available in the literature. Material Designer software was used for the analyses.

1. Wprowadzenie

Materiały hybrydowe charakteryzują się specyficznymi własnościami wytrzymałościowymi, które można kształtować przez projektowanie struktury materiałów składowych. Zastosowanie materiału auksetycznego posiadającego ujemny współczynnik Poissona wpływa na osiąganą własność sprężystą materiału hybrydowego [1, 2]. W ramach niniejszej pracy wyznaczono sprężystą własność zastępczą materiałów zawierających w swojej strukturze wtrącenia kuliste lub sześciennie oraz osnowę auksetyczną. Wtrącenia zostały zamodelowane jako materiały nieauksetyczne. Do analiz wykorzystano komórki reprezentatywne (ang. representative volume elements, RVE) z wtrąceniami tworzącymi strukturę kubiczną [3]. Do badań przyjęto, iż materiał jest jednorodny na poziomie makroskopowym. Obliczenia numeryczne przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych (MES) korzystając z oprogramowania ANSYS Workbench oraz modułu Material Designer pozwalającego na zamodelowanie komórki RVE badanego materiału [4].

2. Modelowanie materiału

Dokonano zbadania wpływu liczby wtrąceń kulistych modelu na obliczone sprężyste własności zastępcze materiału hybrydowego. Następnie dokonano analizy sprężystych własności zastępczych w zależności od udziału objętościowego poszczególnych faz wchodzących w skład materiału. Przykład komórki RVE poddanej obliczeniom został przedstawiony na rys. 1a oraz na rys. 1b.



Rys. 1. Przykład komórki RVE z wtrąceniami kulistymi (a) oraz sześciennymi (b)
Fig. 1. Example of an RVE cell with spherical inclusion (a) and cubic inclusion (b)

Własności mechaniczne osnowy oraz fazy stanowiącej wtrącenia w materiale, które zaczerpnięto z pracy [2], zostały zestawione w tabeli 1.

Tabela 1. Własności mechaniczne faz komórki RVE
Table 1. Mechanical properties of RVE cell phases

Faza	Własność	Wartość
wtrącenia (faza I)	moduł Younga E_I [GPa]	1
	liczba Poissona ν_I	0.4
osnowa (faza II)	moduł Younga E_{II} [GPa]	1
	liczba Poissona ν_{II}	-0.9

3. Wyniki analizy

W tabeli 2 przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy wpływu liczby wtrąceń kulistych na sprężyste własności zastępcze badanego materiału. Udział objętościowy wtrąceń w przeprowadzonych analizach wynosił 50%. Zastępczy moduł Younga (E^{eff}), jako wartość średnia modułu Younga w trzech kierunkach, został obliczony według wzoru:

$$E^{eff} = \frac{E_1^{eff} + E_2^{eff} + E_3^{eff}}{3} \quad (1)$$

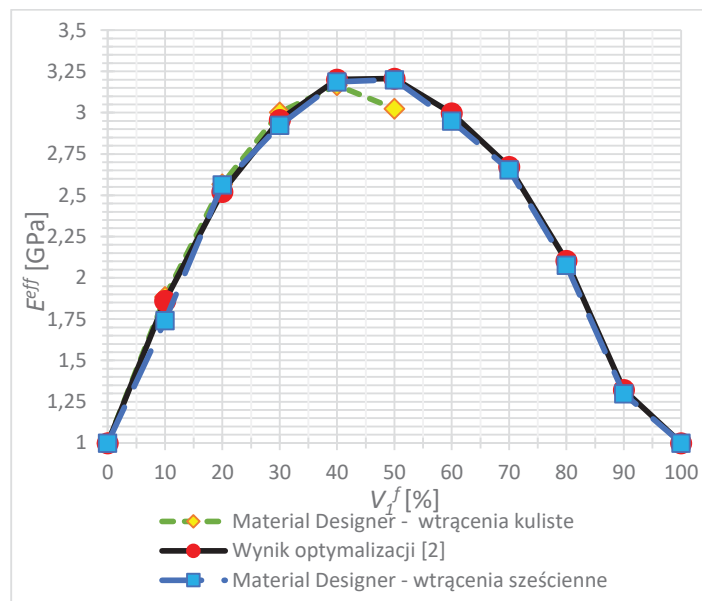
Tabela 2. Obliczony zastępczy moduł Younga (E^{eff}) w zależności od liczby wtrąceń kulistych
Table 2. Calculated effective Young's modulus (E^{eff}) of the material as a function of the number of spherical inclusions

Lp.	Liczba wtrąceń kulistych	E^{eff} [GPa]
1	1	3.010833
2	4	3.020367
3	27	3.020489
4	64	3.024433
5	125	3.024435

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 2, wykazujących stabilizację osiąganą wartości zastępczego modułu Younga, gdy liczba wtrąceń kulistych występujących w materiale wynosi 64, dokonano przeprowadzenia kolejnych analiz. Wyznaczono wartości zastępczego modułu Younga materiału z wtrąceniami kulistymi (E_k^{eff}) oraz sześciennymi (E_s^{eff}), dla określonego udziału objętościowego fazy I (V_I^f). Wyniki przeprowadzonych analiz oraz porównanie z wynikami przedstawionymi w literaturze zostały przedstawione w tabeli 3 oraz na rys. 2. Wyniki przedstawione w literaturze [2] są wynikiem procesu optymalizacji przy różnym udziale objętościowym. Wynikowe wtrącenia przyjmują kształt pośredni pomiędzy kulą a sześcianem dla większych udziałów objętościowych. Zastosowanie składnika auksetycznego zwiększa zastępczy moduł Younga analizowanego materiału hybrydowego ponad 3- krotnie mimo, że moduł Younga materiałów składowych jest taki sam.

Tabela 3. Zastępczy moduł Younga materiału w zależności od udziału objętościowego wtrąceń kulistych oraz sześciennych
Table 3. Effective Young's modulus of a material depending on the volume fraction of spherical and cubic inclusions

Lp.	V_I^f [%]	E_k^{eff} [GPa]	E_s^{eff} [GPa]	E^{eff} [GPa] [2]
1	0	1	1	1
2	10	1.8861	1.7421	1.8615
3	20	2.5661	2.5625	2.5220
4	30	3.0034	2.9245	2.9565
5	40	3.1663	3.1859	3.2015
6	50	3.0244	3.2002	3.2071
7	60		2.9501	2.9969
8	70		2.6550	2.6720
9	80		2.0771	2.1041
10	90		1.2979	1.3223



Rys. 2. Wpływ udziału objętościowego (V_I^f) wtrąceń kulistych oraz sześciennych na zastępczy moduł Younga (E^{eff})

Fig. 2. Effect of the volume fraction (V_I^f) of spherical and cubic inclusion on the effective Young's modulus (E^{eff})

4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników przedstawionych w tabeli 2 można zauważyć, iż zwiększanie liczby wtrąceń kulistych występujących w materiale przyczynia się do stabilizacji otrzymywanych sprężystych własności zastępczych badanego materiału. Obserwuje się, że w przypadku gdy liczba wtrąceń kulistych wynosi 64 lub więcej, wartość zastępczego modułu Younga stabilizuje się i osiąga stałą wartość z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

Na podstawie analizy wyników przedstawionych na rys. 3 można zauważyć, iż w przypadku gdy wtrącenia kuliste stanowią 40% udziału objętościowego osiągany jest najwyższy zastępczy moduł Younga wynoszący 3.1663 GPa. W przypadku wtrąceń sześciennych najwyższy zastępczy moduł Younga wynosi 3.2002 GPa gdy udział objętościowy wtrąceń stanowi 50%.

W ramach dalszych prac zostanie przeprowadzona optymalizacja rozpatrywanych materiałów z wykorzystaniem modułu Material Designer.

Literatura

1. Shufrin I., Pasternak E., Dyskin A., Hybrid materials with negative Poisson's ratio inclusions, International Journal of Engineering Science, Vol. 89, pp. 100-120 (2015).
2. Long K., Du X., Xie Y., Maximizing the effective Young's modulus of composite material by exploiting the Poisson effect, Composite Structures, Vol.153,pp. 593-600 (2016).
3. Ganczarski A., Skrzypek J., Mechanika nowoczesnych materiałów, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków (2013).
4. www.ansys.com [dostęp 28 marzec 2022].

DOBÓR LAMINATU DO STOSOWANIA W CZĘŚCIOWEJ ZABUDOWIE OTWORU W POSZYCIU KADŁUBA JACHTU

inż. MICHAŁ WĄDEK,

Mechanika i Budowa Maszyn, MB2, semestr III, 2 stopień

Opiekunowie naukowcy: Dr inż. Paweł Chrzanowski,

Dr hab. inż. Wacław Kuś, Prof. PŚ

Streszczenie. Celem pracy było określenie własności wytrzymałościowych i plastycznych laminatów, planowanych do zastosowania w częściowej zabudowie otworu w poszyciu kadłuba jachtu. Do realizacji i analizy badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS Insight 10 kN oraz środowisko Microsoft Excel. Badaniom poddano próbki z laminatu poliestrowo-szklanego zbrojonego tkaninami oraz matami i materiałem rdzeniowym.



SELECTION OF LAMINATE FOR USE IN PARTIAL BUILDING HOLE IN YACHT HULL

Abstract. The aim of this work was to determine the strength and plastic properties of laminates, in order to use them for partial building of a hole in the yacht hull. A MTS Insight 10 kN machine and Microsoft Excel environment were used to carry out and analyze the experiments. Specimens were made of GRP laminate reinforced by glass mats, fiber and core material.

1. Problematyka

W remontowanym żaglowym jachcie morskim, klasy Bonito 9, zaistniała potrzeba wymiany luków otwieranych nowymi, stare luki są nieszczelne i nie ma możliwości ich kompleksowej naprawy. Obecnie zastosowane luki są tzw. lukami gdańskimi, ich historia sięga lat 70. Pokład na jachcie jest pokryty drewnem, które ogranicza maksymalne wymiary zewnętrzne kołnierza luku do 550x550 mm. Obecnie dostępne luki przy podobnych wymiarach kołnierza posiadają mniejsze wymiary wewnętrzne, z tego powodu zaistniała potrzeba zabudowania części otworu, w taki sposób aby kołnierz luku był w pełni podparty o pokład. W pracy rozważono kilka wariantów laminatów i dobrano odpowiedni pozwalający na odpowiednią naprawę jachtu.

2. Założenia dotyczące rozwiązania

Laminat poliestrowo-szklany jest materiałem kompozytowym zbudowanym ze zbrojenia w postaci mat lub tkanin szklanych oraz lepiszcza będącego żywicą poliestrową [1]. Jacht nie tylko jest zbudowany z laminatu masywnego, ale również z laminatu przekładkowego zwanego sandwichem. Laminat typu sandwich składa się z dwóch warstw laminatu zwanych okładkami, które są odpowiednio cieńsze i wypełnienia znajdującego się między nimi [2]. Pokład jachtu w analizowanym przypadku jest zbudowany z laminatu przekładkowego o grubości około

8 mm, z tego powodu przyjęto, że główny laminat projektowanej zabudowy również musi być wykonany z laminatu przekładkowego o tej samej grubości.

Pierwszym etapem projektowania zabudowy było wyznaczenie minimalnych własności wytrzymałościowych i wymiarowych, określono że laminat zabudowy musi posiadać grubość większą niż 3,58 mm, masa zbrojenia na jednostkę powierzchni okładki musi być wyższa niż 950 [g/m²]. Wartości te zostały wyznaczone na podstawie przepisów Polskiego Rejestru Statków dotyczących jachtów morskich [3].

Częściowe zabudowanie otworu w poszyciu jachtu wymaga dołączenia nowego elementu z laminatu do obecnie istniejącego poszycia. Połączenia klejone są najczęściej wykorzystywanymi sposobami łączenia w przemyśle jachtowym, ich najważniejszymi zaletami są szczelność połączenia, brak naprężeń w złączu, brak wymuszonego ułożenia części laminatu [2]. Analizując wyżej przedstawione aspekty do łączenia laminatu w rozpatrywanym przypadku wybrano połączenia adhezyjne z wykorzystaniem klei.

Częściowa zabudowa otworu na luk jachtowy wymaga współliniowości laminatu zabudowy z laminatem poszycia jachtu. Analizując zagadnienia łączenia elementów oraz budowę luku i możliwe do wykorzystania materiały zostały określone możliwe sposoby połączenia elementów. Do łączenia zastosowano połączenia doczołowe (Rys. 1a), zakładkowe na ucios (Rys. 1b) i zakładkowe schodkowe (Rys. 1c).



Rys. 1. Wybrane sposoby ułożenia elementów zabudowy:

a) połączenie doczołowe, b) połączenie zakładkowe na ucios, c) połączenie schodkowe

Fig. 1. Selected laminate elements joints:

a) butt joint, b) bevel joint, c) step joint

3. Opracowanie próbek oraz badania wytrzymałościowe

Próbki laminatu zostały wycięte z płyt laminowanych przygotowanych metodą ręcznego laminowania kontaktowego. Laminowanie zachodziło żywicą penetrującą od dołu każda warstwa zbrojenia była wałkowana, taki proces eliminuje możliwość zapowietrzenia laminatu [4]. Wykonano 3 płyty, z których dwie były laminatem a jedna materiałem rdzeniowym o budowie plastra miodu.

Pierwsza z wykonanych płyt, o oznaczeniu LPPM2, posiadała zbrojenie w postaci 4 warstw maty szklanej typu E o masie na jednostkę powierzchni równą 300 [g/m²], zbrojenie było przesycające żywicą poliestrową Aropol M 604 TB. Druga płyta, o oznaczeniu LPPM4, została wykonana z wykorzystaniem 5 warstw tkaniny szklanej 390 [g/m²], do wykonania tej płyty zastosowano tą samą żywicę. Ostatnią płytę będącą przesyconym materiałem rdzeniowym, o oznaczeniu LRPM3, wytworzono poprzez przesyconie materiału rdzeniowego Coremat XM o grubości 3 mm, żywicą poliestrową. Parametry płyt przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry laminatu

Table 1. Laminate parameters

Oznaczenie płyty	LPPM2	LPPM4	LRPM3
Gęstość [kg/m ³]	1383,79	1514,12	602,518
Masa zbrojenia na jednostkę powierzchni [g/m ²]	1200	1950	110
Masowy udział osnowy M _m	0,74	0,24	0,93
Masowy udział zbrojenia M _f	0,26	0,76	0,07

Przedstawione wyżej próbki laminatu zostały poddane badaniom wytrzymałościowym na maszynie MTS Insight 10 kN, wykonano statyczną próbę rozciągania oraz zginanie trójpunktowe. Do obu badań wycięto po 5 próbek z płyt. Próbki rozciągane wycięto na wymiary 250 mm długości i 25 mm szerokości. Próbki do zginania trójpunktowego zostały wycięte na szerokość 15 mm i długość pozwalająca na zginanie przy rozstawie podpór 54 mm.

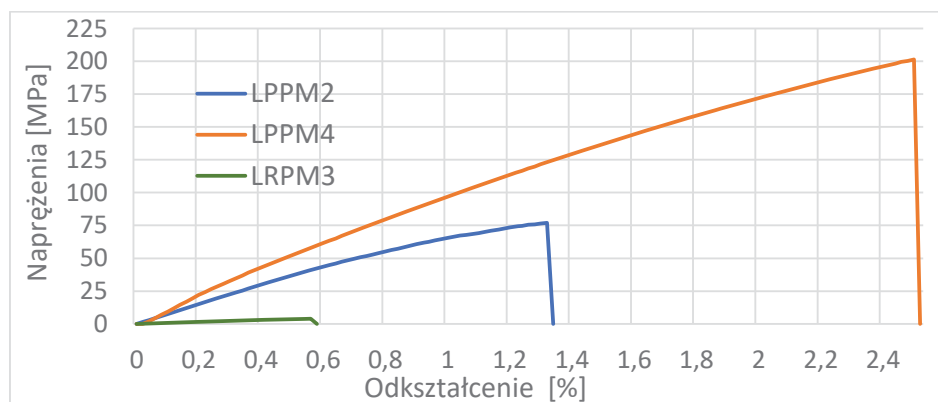
4. Analiza uzyskanych wyników

Wyniki uzyskane w badaniach zostały opracowane w programie Microsoft Excel. Dla każdej z próbek wyznaczono moduł Younga, naprężenia niszczące oraz wytrzymałość na rozciąganie, którą zdefiniowano jako stosunek siły rozciągającej przy pierwszych pęknięciach laminatu do powierzchni próbki. W próbie zginania trójpunktowego określono te same parametry. Przeprowadzenie tych dwóch badań pozwoliło na uzyskanie parametrów płyt w dwóch prostopadłych płaszczyznach. Parametry określone dla każdej z próbek pozwoliły na określenie średnich parametrów płyt zdefiniowanych jako średnia arytmetyczna wartości poszczególnych próbek. Średnie wartości parametrów przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Własności wytrzymałościowe i plastyczne materiału
Table 2. Strength and plastic properties of the material

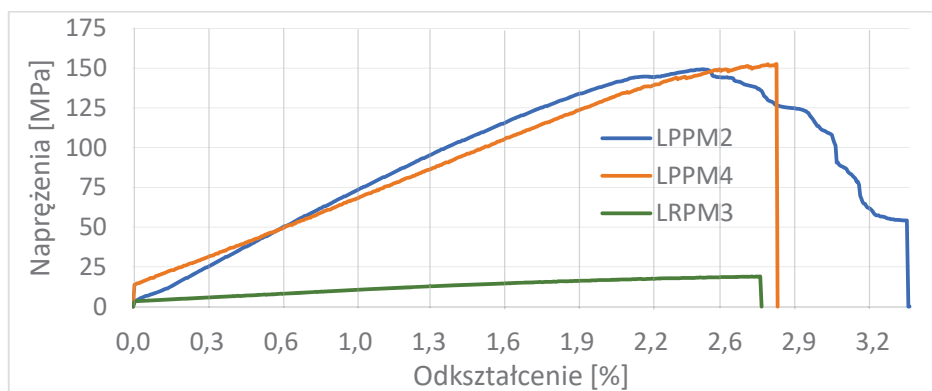
Oznaczenie płyt	LPPM2	LPPM4	LRPM3
Moduł Younga przy rozciąganiu [MPa]	6800,57	10176,63	759,96
Moduł Younga przy zginaniu [MPa]	833,76	1846,12	104,02
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	54,12	194,77	3,58
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	141,44	248,31	17,24
Naprężenia niszczące [MPa]	76,04	194,86	3,82

Na rysunku 2 przedstawiono wykres naprężeń w funkcji odkształcenia próbek rozciąganych. Analizując wykres oraz uzyskane własności określono, że wytrzymałość na rozciąganie laminatu ze zbrojeniem w postaci tkanin jest ponad dwa razy większa niż laminatu o zbrojeniu w postaci mat. Moduł Younga próbek LPPM4 jest znacząco wyższy w porównaniu z próbką LPPM2. Przy rozciąganiu próbki wzmocnionej matami zauważono, że słyszalne pęknięcia w próbce jak i zarejestrowane przy rozciąganiu występują znacznie wcześniej niż dochodzi do całkowitego zerwania próbki, jest to różnica około 20 MPa. Natomiast w przypadku próbki wzmocnionej tkaniną pierwsze pęknięcia pojawiają się zaraz przed całkowitym zerwaniem próbki. Odkształcenie laminatu LPPM4 jest blisko dwa razy większe niż laminatu LPPM2.



Rys. 2. Wykres rozciągania laminatów
Fig. 2. Laminates tensile test graph

Na rysunku 3 przedstawiono wykres naprężeń w funkcji odkształcenia próbek zginanych. Analizując wykres oraz uzyskane własności określono, że wytrzymałość obu laminatów jest zbliżona do 150 MPa. Zależność naprężeń od odkształcenia próbki LPPM4 jest zbliżona do liniowej. Po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia próbka wzmocniona tkaninami ulega nagłemu zniszczeniu, a próbka wzmocniona matami jeszcze ma zdolność przenoszenia obciążeń lecz znacznie mniejszych. Odkształcenie obu materiałów przy granicy wytrzymałości jest zbliżone.



Rys. 3. Wykres dla zginania trójpunktowego laminatów
Fig. 3. Laminates bending test graph.

Badany materiał rdzeniowy wykazał stosunkowo wysoką wytrzymałość na zginanie, ponad dwa razy wyższą od deklarowanej przez producenta. Odkształcenia materiału przekładkowego w stosunku do naprężeń są bardzo duże co może wpływać pozytywnie na własności laminatu.

5. Wnioski

Badane laminaty wykazały podobne właściwości wytrzymałościowe i plastyczne przy zginaniu trójpunktowym. Własności wytrzymałościowe jak i plastyczne określone przy statycznej próbie rozciągania uwidaczniają przewagę materiału zbrojonego tkaninami, laminaty te są ponad dwukrotnie wytrzymalsze. Obserwacja próbek w trakcie badań pozwala wywnioskować, że po pierwszych pęknięciach laminat zbrojony matami ma jeszcze duże możliwości przenoszenia obciążeń, a laminat zbrojony tkaninami ulega zniszczeniu zaraz po nich. Z tego wynika, że do technicznego zastosowania laminat zbrojony matami jest bezpieczniejszy.

Literatura

1. Ślężona J. Podstawy technologii kompozytów, wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (1998)
2. Bielawski R., Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa (2016)
3. Polski Rejestr Statków, Przepisy klasyfikacji i budowy jachtów morskich, część II Kałub, Gdańsk (1996)
4. C-L - Metoda laminowania kontaktowego, dostępne pod adresem: <https://c-l.pl/metoda-laminowania-kontaktowego/>; (dostęp dnia 12.01.2022)

GENERATOR MODELI GEOMETRYCZNYCH SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH

inż. DAWID WILCZEK

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AB5, semestr I, 2 stopień

Opiekun naukowy: Dr inż. Sebastian Rzydzik



Streszczenie. Wśród metod komputerowych stosowanych w inżynierii mechanicznej można wyróżnić zagadnienie jakim są modele autogenerujące. W pracy przedstawiono czym są takie modele, oraz opisano model autogenerujący wykonany dla rodziny konstrukcji siłowników hydraulicznych. Przeprowadzona została również weryfikacja poprawności działania narzędzia, możliwe zastosowania oraz kierunki dalszego rozwoju.

GENERATOR OF GEOMETRIC MODELS OF HYDRAULIC CYLINDERS

Abstract. Among computer methods used in mechanical engineering, a field called generative models can be found. This work describes what these models are, and also a generative model is presented, which was made for a series of hydraulic cylinders. Additionally, tests of this model were carried out. There are shown fields where this model can be used, and possibilities for further development.

1. Wprowadzenie

Spoglądając na trendy w rozwoju komputerowych narzędzi inżynierskich, coraz częściej można natknąć się na zagadnienia związane z automatyzacją procesu konstrukcyjnego. Interesującym narzędziem pozwalającym na usprawnienie projektowania przy pomocy systemów klasy CAX są systemy oparte na wiedzy, do których zaliczyć można modele autogenerujące. Charakteryzują się one wysokim stopniem parametryzacji oraz wykorzystaniem wiedzy konstruktorskiej w nich zawartej. Celem stosowania modeli autogenerujących jest m.in. automatyzacja powtarzalnych czynności, pozwalająca na zwiększenie wydajności procesu konstruowania.

2. Modele autogenerujące w inżynierii mechanicznej

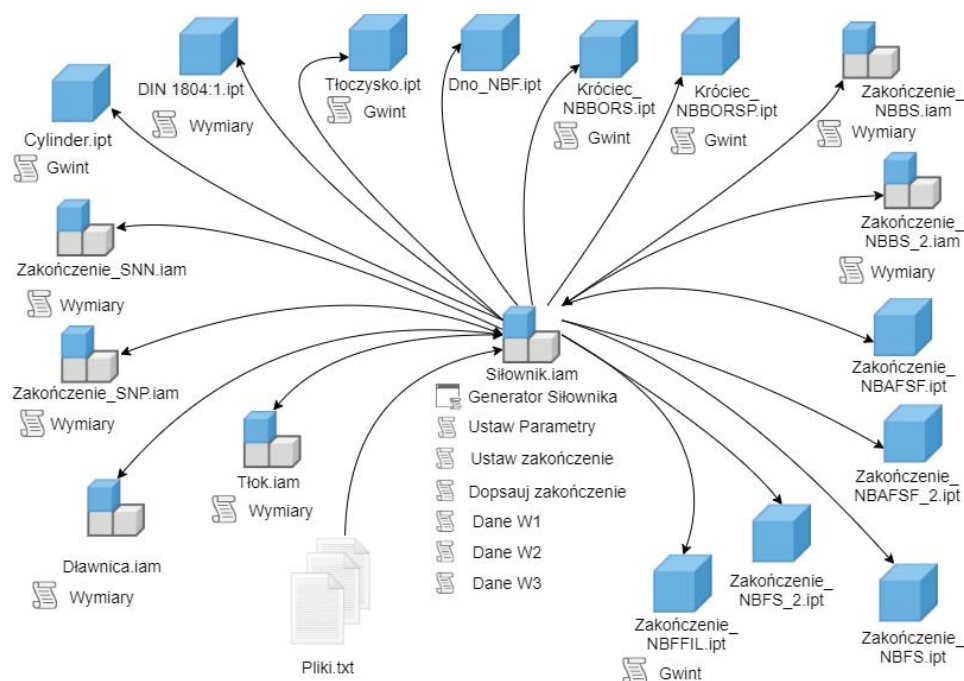
Mimo iż modele autogenerujące nie są zagadnieniem powszechnie znanym, nawet w środowisku inżynierskim, z roku na rok powstaje coraz więcej projektów o nie opartych. Producenci oprogramowania CAD oferują własne rozwiązania w tym zakresie. Jako przykład można wskazać kreator komponentów przekładni walcowych oraz kreator połączenia wpustowego zaimplementowane w systemie Autodesk Inventor. Znaleźć można również rozwiązania autorskie wykonane przez użytkowników oprogramowania CAD. Pochodzą one głównie ze środowiska akademickiego, jednak idąc za trendami automatyzacji procesu konstruowania mogą stawać się coraz bardziej popularne.

Twórcy systemów CAX, udostępniają narzędzia ułatwiające tworzenie własnych modeli autogenerujących (np. narzędzia iLogic udostępnione w oprogramowaniu Autodesk Inventor), a także dokumentację związaną z API. Przykład modelu autogenerującego można znaleźć

w książce S. Rzydzika [1]. Został w niej przedstawiony proces budowy takich modeli na przykładzie połączenia sworzniowego. Z kolei autorzy artykułu [2] opisują model autogenerujący przekładni ślimakowej w środowisku Catia V5. Interesujący projekt pokazano w artykule [3], gdzie zastosowano model autogenerujący wykorzystany w przemyśle meblarskim, wykonany przy użyciu oprogramowania SolidWorks. Warto zaznaczyć, że modele autogenerujące są narzędziem szczególnie perspektywicznym w inżynierii mechanicznej, gdzie wykorzystuje się znaczną ilość elementów standardowych i znormalizowanych.

3. Model autogenerujący zespołu siłownika hydraulicznego

Modele autogenerujące najczęściej wykonuje się dla rozwiązań standardowych, których poszczególne warianty odznaczają się znacznym podobieństwem. Elementami które spełniają to kryterium są niewątpliwie standardowe typy siłowników hydraulicznych, które można znaleźć w katalogach wielu producentów. Na podstawie jednego z takich rozwiązań wykonany został model autogenerujący rodziny siłowników hydraulicznych. Jako środowisko CAD wybrano Autodesk Inventor ze względu na pomocne narzędzia oferowane przez ten system, m.in. iLogic. W przypadku języka programowania zdecydowano się na VBA (Visual Basic for Applications) m.in. ze względu na wbudowany w oprogramowanie Autodesk Inventor kompilator, oraz intuicyjny edytor z udogodnieniami w tworzeniu skryptów w tym systemie.



Rys. 1. Struktura modelu autogenerującego wraz z przepływem danych.

Fig. 1. Structure of the generative model with data flow shown

W trakcie pracy nad modelem, w pierwszej kolejności należało zapisać dane i informacje katalogowe w formacie umożliwiającym ich odczyt przez aplikację sterującą. Zdecydowano się na zapis w plikach tekstowych o ustalonej strukturze, co znacznie ułatwia implementację oraz wdrożenie, gdyż nie jest wymagane użycie dodatkowych aplikacji (np. MS Excel).

Kolejnym krokiem była parametryzacja modeli geometrycznych, w skład których wchodziły elementy podstawowe: tłok, tłoczysko, cylinder, dno cylindra, dławnica, uszczelniacze

i nakrętka kontrująca, oraz elementy, które użytkownik może dobierać w trakcie pracy z modelem: jeden typ zakończenia cylindra, trzy typy zakończeń tłoczyska, trzy typy zakończeń uniwersalnych oraz dwa typy króćców przyłączeniowych. Mając wiedzę, przedstawioną jako zestaw relacji matematycznych wynikających z warunków doboru wymiarów siłowników, oraz sparametryzowane modele geometryczne, zapisano reguły sterujące przepływem danych, których większość zaimplementowano w złożeniu głównym (Rys. 1).

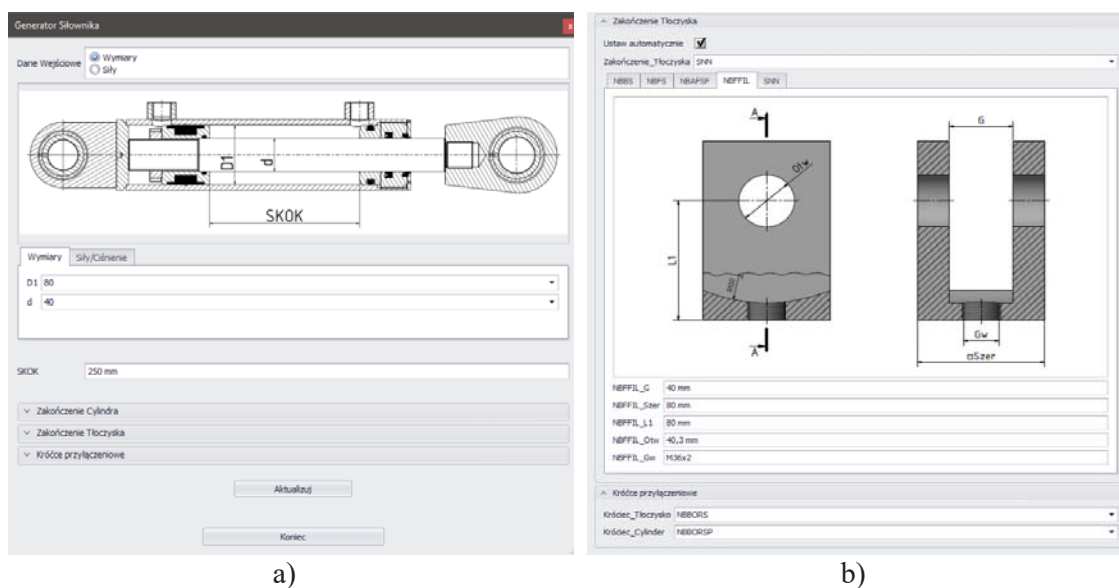
Opracowany model autogenerujący posiada możliwość wykonania obliczeń dla dwóch różnych zestawów danych wejściowych – użytkownik może wybrać średnice tłoka i tłoczyska, bądź podać siły od strony tłoka i tłoczyska oraz ciśnienie w instalacji hydraulicznej. Zaimplementowano również automatyczny dobór wartości zmiennych. Przykładowo, gdy użytkownik zdefiniuje średnicę tłoczyska, to algorytm dobierze odpowiednią średnicę tłoka. W takiej sytuacji obliczenia wykonywane są na podstawie wzorów wiążących zależności geometryczne, np. wzór na pole koła, oraz zależności fizyczne:

$$A = \frac{F_C}{p_p} [m^2] \quad (1)$$

gdzie:

- A – pole powierzchni tłoka,
- F_C – siła zewnętrzna działająca na tłoczek,
- p_p – ciśnienie w instalacji hydraulicznej.

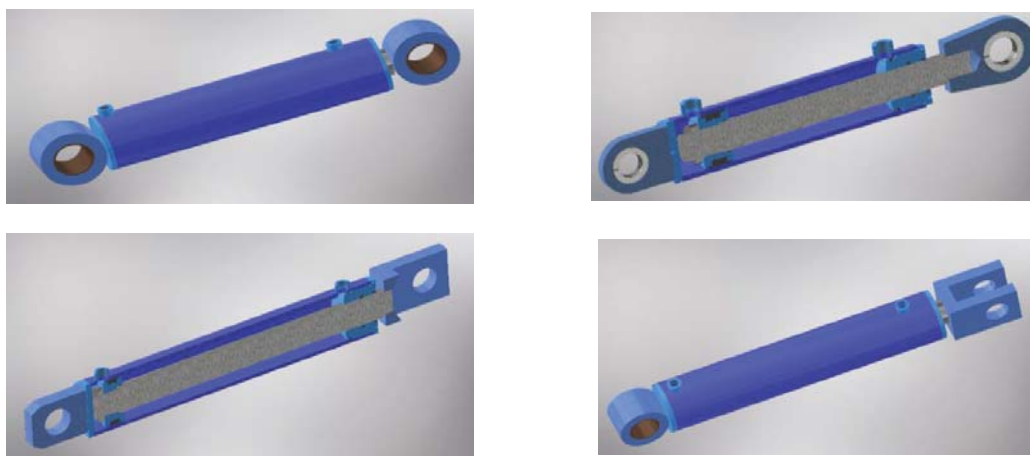
Opracowany model autogenerujący umożliwia również zmianę skoku siłownika, którą użytkownik wprowadza ręcznie. Kolejną funkcjonalnością jest możliwość wyboru zakończenia od strony tłoczyska oraz od strony cylindra. Umożliwiono ręczny lub automatyczny dobór wymiarów zakończeń. Została także dodana możliwość doboru jednego z dwóch typów króćców przyłączeniowych do instalacji hydraulicznej.



Rys. 2. Graficzny interfejs użytkownika, a) okno główne, b) moduł zmiany zakończenia
Fig. 2. Graphical user interface, a) main window, b) ending change module

W celu ułatwienia stosowania modelu, opracowano graficzny interfejs użytkownika (Rys. 2). W ramach pracy powstał również kalkulator podstawowych parametrów siłownika. Pozwala on na obliczenie sił wejściowych i wyjściowych, bądź obliczenie średnic tłoka i tłoczyska. Kalkulator jest dodatkową funkcją, niepowiązaną bezpośrednio z modelem autogenerującym.

Ostatnim krokiem podczas tworzenia modelu były testy weryfikacyjne. Polegały one na generowaniu różnych wariantów siłowników hydraulicznych (Rys. 3). W rezultacie sprawdzano poprawność działania reguł i poprawności generowania modeli geometrycznych. W większości przypadków nie napotkano na niezgodności, wychwycono jedynie kilka małych błędów, które poprawiono. Ostatecznie stwierdzono, że model autogenerujący, mógłby z powodzeniem zostać wykorzystany w pracy konstruktora, usprawniając jego pracę. Wykonany model autogenerujący można oczywiście rozbudować o kolejne funkcje. Jednym z nasuwających się usprawnień byłoby połączenie modułu obliczeniowego z modelem, tak aby na podstawie wykonanych obliczeń, generowana była odpowiednia wersja siłownika.



Rys. 3. Przykłady wygenerowanych wersji siłownika hydraulicznego.

Fig. 3. Examples of generated versions of the hydraulic cylinder

4. Podsumowanie

Modele autogenerujące są perspektywnym narzędziem wpisującym się w trendy automatyzacji projektowania. Z racji sporego nakładu pracy potrzebnego do wykonania takiego modelu, znajdują zastosowanie głównie przy modelowaniu powtarzalnych elementów standardowych. W ramach przedstawionej pracy, wykonany został model autogenerujący rodziny siłowników hydraulicznych. Po przeprowadzonych testach weryfikacyjnych, stwierdzono jego poprawne działanie. Model może posłużyć jako ułatwienie w pracy konstruktora, odciążając go w czynnościach powtarzalnych.

Literatura

1. Rzydzik S., Modele parametryczne w przykładach dla Autodesk Inventor. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2019).
2. Wronkowicz-Katunin A., Wachla D. Model autogenerujący cad zazębienia przekładni ślimakowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Transport, Vol. 82, s. 291–300 (2014).
3. M. Karpiuk, G. Kiszka. Modelowanie autogenerujące w systemie solidworks w przemyśle meblarskim. MECHANIK, Vol. 1, s. 94–96 (2018).

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI POWŁOK OCHRONNYCH NARZĘDZIA POD WPLYWEM SZOKU TERMICZNEGO

inż. MAREK WOLNY,

Automatyka i Robotyka Przemysłowa, AC7, semestr I, stopień II

Opiekun naukowy: Dr inż. Jolanta Dziatkiewicz

Streszczenie. Tematem artykułu jest zbadanie efektywności powłok ochronnych pod wpływem działania szoku termicznego na płytkę skrawającą wykorzystywaną w procesie toczenia, oraz określenia jak zmienia się temperatura powłok na skutek przepływu ciepła. Badanym narzędziem jest płytkę skrawającą wykonana z węgliką spiekanego i pokryta powłokami $\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$. Przedstawiono zestawienie właściwości badanego narzędzia, materiałów tworzących rdzeń narzędzia oraz powłoki, opis metody różnic skończonych oraz wyniki.



ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF TOOL PROTECTIVE COATINGS UNDER THE EFFECT OF THERMAL SHOCK

Abstract. The subject of the article is to investigate the effectiveness of protective coatings under the influence of the thermal shock to the cutting insert used in the turning process, and determining how the temperature of the coatings changes due to heat flow. The tested tool is the CNMG 190616-26 NTP35 cutting insert by Baildonit, made of sintered carbide and covered with $\text{TiN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiCN}$ coatings. The article presents the properties of the tested tool, the materials forming the tool core and the shell, the description of the analysis using the finite difference method and the results of the analysis.

1. Wprowadzenie

Podczas obróbki skrawaniem powstaje ciepło, które przy wysokich parametrach obróbki może spowodować bardzo szybkie nagrzewanie się narzędzia i powstawanie uszkodzeń z powodu szoku termicznego, dlatego na narzędzia najczęściej wykonane ze stali szybko tnącej lub węgliką spiekanego stosuje się powłoki ochronne. Ostrza z powłokami przeciwwzuyciowymi są zalecane do wykorzystywania w zautomatyzowanych procesach obróbki skrawaniem. Ostrza te przyczyniają się także do wzrostu wydajności obróbki [1]. Badane narzędzie jest wykonane z węgliką spiekanego S35S, wykorzystywanego do obróbki zgrubnej i kształtującej, oraz do stali z małymi i średnimi prędkościami skrawania. Ten gatunek węglików spiekanych można wykorzystywać w trudnych warunkach obróbki, gdy układ obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie ma małą sztywność. Gatunek ten może być stosowany w zakresie P30-P40 (norma ISO) [2]. Jako powłoki narzędzia zastosowano materiały $\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiCN}$ o łącznej grubości $8\mu\text{m}$.

2. Analizowane powłoki

Powłoka TiN wykazuje bardzo niską reaktywność z obrabianą stalą dlatego też zużycie na skutek procesów adhezyjnych występujących podczas obróbki mechanicznej jest silnie redukowane. Atrakcyjny złoty kolor w połączeniu z wysoką odpornością antykorozyjną i ścierną sprawia, że powłoka TiN często wykorzystywana jest w zastosowaniach dekoracyjnych. Powłoka ta charakteryzuje się również wysoką odpornością termiczną i chemiczną.

Powłoka Al_2O_3 posiada wysoką stabilność termiczną, oraz niską przewodność cieplną czyniąc ją idealną powłoką mającą chronić narzędzie przed działaniem wysokich temperatur, niestety fakt bycia mało wytrzymałym materiałem wymusza użycie jej przy obrabianiu miękkich materiałów lub razem z innymi powłokami.

Powłoka TiCN posiada strukturę wielowarstwową. Pomimo wysokiej twardości powłoka ta nie jest zbyt krucha. Do podstawowych właściwości tej powłoki należy jej wysoka twardość, niski współczynnik tarcia, oraz duża przewodność cieplna, co sprawia że powłoka dobrze znosi obciążenia mechaniczne [3].

3. Szok termiczny oraz obróbka skrawaniem

Szok termiczny to gwałtowna zmiana temperatury materiału, spowodowana jego gwałtownym nagrzaniem lub gwałtownym schłodzeniem. Jest to zjawisko wysoce niepożądane, gdyż powoduje naprężenia cieplne, mogące osłabić, a w krytycznych warunkach doprowadzić do zniszczenia materiału.

Wytrzymałość materiału na szok termiczny jest maksymalną zmianą temperatury materiału, której przekroczenie powoduje powstawanie uszkodzeń.

$$\Delta T = \frac{\sigma_f(1-\nu)}{E \cdot \alpha} \quad (1)$$

gdzie: ΔT [K] – parametr szoku termicznego pierwszego typu; σ_f [Pa] – wytrzymałość na zginanie (z reguły wytrzymałość dwuosiowa); ν – liczba Poissona, E [Pa] – moduł Younga; α [$10^{-6}/\text{K}$] – współczynnik rozszerzalności cieplnej.

W tabeli 1 przedstawiono maksymalną i minimalną zmianę temperatury jaką mogą wytrzymać materiały powłok, oraz rdzenia narzędzia obliczone dzięki wzorowi (1)

Tabela 1. Wytrzymałość materiałów powłok i narzędzia
Table 1. Durability of coating materials and tools

Nazwa materiału	Minimalna zmiana temperatury [K]	Maksymalna zmiana temperatury [K]
Węglik spiekany	321,15	595,91
TiN	488,14	1125
Al_2O_3	30,91	572,21
TiCN	1596,45	2208,05

W tabeli 2 przedstawione zostały parametry obróbki jakimi poddano badaną płytkę skrawającą, oraz ciepło powstałe w wyniku skrawania.

Tabela 2. Wartości parametrów skrawania i strumienia ciepła
Table 2. Values of cutting parameters and heat flux

Prędkość skrawania [m/min]	200
Posuw [mm/obr]	0,1
Głębokość skrawania [mm]	1
Strumień ciepła [J]	4,77

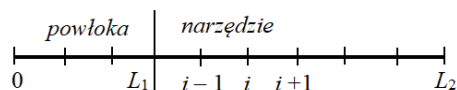
4. Analiza oraz wyniki obliczeń

W celu analizy efektywności powłok, należy wyznaczyć jak zmieni się temperatura na skutek działania ciepła na narzędzie pokryte powłoką. Rozkład temperatury opisuje równanie Fouriera:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{Q(x,t)}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

gdzie: $T(x,t)$ [K] – temperatura w określonym czasie w danym punkcie geometrycznym, λ [W/mK] – współczynnik przewodności cieplnej, c [J/kgK] – ciepło właściwe, ρ [kg/m³] – gęstość, t [s] – czas, $Q(x,t)$ [W/m³] – ciepło/funkcja źródła.

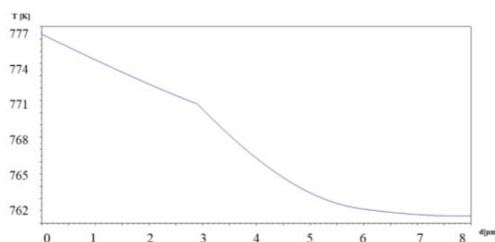
W ramach pracy analizowano różne powłoki nakładane na narzędzie. Do obliczeń zastosowano schemat jawny metody różnic skończonych. W tym celu zamieniono równanie różniczkowe na tożsame mu równanie różnicowe. W analizie przyjęto, że obróbka skrawaniem odbywała się przy zastosowaniu najwyższych możliwych zalecanych parametrów, więc strumień ciepła działający na materiał powłoki wynosi 4,77 J (lewy brzeg), oraz że temperatura początkowa materiału jest równa 295 K. Obszar podzielono na 150 węzłów. Na prawym brzegu zadano warunek brzegowy trzeciego rodzaju (temperatura otoczenia równa 300K, $\alpha = 10$ W/(m²K)). Na rysunku 1 zaprezentowano schemat zadania 1D z dyskretyzacją siatki ($L_1 = 3 \mu\text{m}$, $L_2 = 8 \mu\text{m}$).



Rys. 1. Analizowany obszar

Fig. 1. The domain analyzed

W artykule został przedstawiony przykład oddziaływania szoku termicznego na powłoki TiN+Al₂O₃+TiCN o grubościach 3 μm , 3 μm , 2 μm , przy czym przyjęto, że temperatura na początku układu będzie równa 777,37 K. Wyniki analizy ukazane są na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiana temperatury w powłokach TiN+Al₂O₃+TiCN

Fig. 2. Temperature change in TiN + Al₂O₃ + TiCN coatings

5. Porównanie wyników

W tabeli 3 zamieszczone zostały wyniki otrzymane za pomocą metody różnic skończonych wraz z wytrzymałościami materiałów na szok termiczny w celu określenia czy przy najwyższych zalecanych parametrach obróbki może dojść do uszkodzeń materiałów.

Tabela 3. Porównanie zmiany temperatury wyznaczonej za pomocą metody różnic skończonych z wytrzymałością materiałów na szok termiczny
Table 3. Comparison of the temperature change determined by the finite difference method with the resistance of materials to thermal shock

Materiał	Wytrzymałość na szok termiczny [K]	Wyniki MRS [K]	Zmiana temperatury z temperatury początkowej [K]
TiN	488,14-1125	777,37-771,7	482,23-476,7
Al ₂ O ₃	30,91-572,21	771,7-763,137	476,7-468,14
TiCN	1596,45-2208,05	763,137-762,556	468,14-467,56
Węglik spiekany	321,15-595,91	756,73	467,56

6. Wnioski

Powłoka Al₂O₃ posiada najniższą wytrzymałość na szok termiczny. Głównym zadaniem powłoki TiN jest zredukowanie maksymalnej temperatury na powierzchni w celu zapobiegnięcia wysokim zmianom temperatur, a także zmniejsza ilość ciepła przepływającego na powłokę Al₂O₃ co powoduje mniejszy szok termiczny, ale również zmniejsza redukcję temperatury przez powłokę. Zaleca się aby powłoka Al₂O₃ i węglik spiekany narzędzia miały jak największą wartość wytrzymałości na rozciąganie i jak najniższą wartość modułu Younga w celu uniknięcia powstawania uszkodzeń przy obróbce toczeniem z użyciem najwyższych parametrów skrawania. W przypadku obróbki z najwyższymi parametrami obróbki zaleca się stosowanie cieczy schładzających. Im większa powierzchnia narzędzia, na którą działa strumień ciepła tym gorsza jest redukcja ciepła, dlatego należy nie dopuścić do oddziaływania ciepła na dużych powierzchniach. Powłoka TiCN najgorzej pochłania ciepło z uwagi na bardzo wysoki współczynnik przewodzenia ciepła, przy największej odporności na szok termiczny ze wszystkich materiałów.

Literatura:

1. Kupczyk M.J., Inżynieria powierzchni Narzędzia skrawające. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej (2015).
2. Zalewski K., Matuszak J., Podstawy obróbki ubytkowej. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej (2016).
3. Olszak W., Obróbka skrawaniem. Wydawnictwo WNT wyd. 2 Warszawa (2017).

ZASTOSOWANIE METODY STRZAŁÓW W MODELOWANIU DYSTRYBUCJI TLENU

mgr inż. MARIA ZADOŃ,

Inżynieria Mechaniczna, semestr II, 3 stopień

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

Streszczenie. Celem pracy było porównanie różnych wariantów obliczeń wykorzystujących metodę strzałów w modelowaniu dystrybucji tlenu. Model ten opisano za pomocą nieliniowego równania różniczkowego rozkładu ciśnienia cząstkowego w obszarze tkanki uzupełnionego o warunki brzegowe Robina i Neumanna. W wariantach obliczeń uwzględniono metodę bisekcji, siecznych, stycznych, Rungego-Kutty oraz numeryczne algorytmy rozwiązywania równań różniczkowych (ang. solver) zdefiniowanych w programie Matlab. Wyniki przedstawiono w postaci tabeli oraz sformułowano wnioski.



COMPARISON OF SHOOTING STRATEGIES IN MODELING OF OXYGEN DISTRIBUTION

Abstract. The aim of this study was to compare different variants of calculations using the shooting method in modeling oxygen distribution. The model was described by a non-linear differential equation of partial pressure distribution in the tissue domain supplemented by Robin and Neumann boundary conditions. The variants of calculations included the method of bisection, secant, Newton, Runge-Kutta, and solvers defined in Matlab program. The results of the analysis as well as the conclusions are presented at the end of the paper.

1. Wprowadzenie

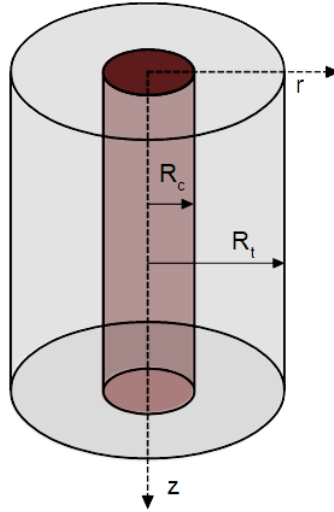
Metoda strzałów (ang. shooting method) polega na przekształceniu zagadnienia brzegowego w zagadnienie początkowe. Metoda wymaga znajomości dwóch warunków początkowych. Jako pierwszy warunek początkowy przyjmuje się znany warunek brzegowy z brzegu, z którego dokonuje się strzałów. Natomiast drugi warunek początkowy musi zostać oszacowany. W tym celu wykorzystuje się przybliżone metody rozwiązywania równań, tj. metodę bisekcji, siecznych oraz Newtona (stycznych). Następnie rozwiązuje się kilkakrotnie problem początkowy za pomocą algorytmów do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych (np. metodę Rungego-Kutty lub solverzy zaimplementowane w Matlab). W kolejnym kroku porównuje się wartość uzyskanego rozwiązania ze znanym warunkiem brzegowym na przeciwnym brzegu. Jeżeli dokładność obliczonego rozwiązania nie jest akceptowalna, wówczas korzysta się z metody iteracyjnej do zmiany oszacowania warunków początkowych [1, 2].

Zagadnienia brzegowe mogą zostać wykorzystane m.in. do modelowania dystrybucji tlenu. Należy jednak zaznaczyć, iż problemy brzegowe są jednymi z trudniejszych do rozwiązania

z powodu braku zapewnienia zbieżności wyników. W zagadnieniach tych istotne jest odpowiednie określenie danych początkowych, co jest utrudnione ze względu na konieczność stosowania metody prób i błędów [1].

2. Model matematyczny dystrybucji tlenu

W pracy wykorzystano model dystrybucji tlenu określony za pomocą modelu walca Krogha przedstawionego na rysunku 1. Model ten zakłada, że tkanka składa się z cylindrycznych jednostek zawierających kapilarę zorientowaną w kierunku osiowym, a jednostki nie wymieniają pomiędzy sobą tlenu [3].



Rys. 1. Walec Krogha
Fig. 1. The Krogh cylinder

Model Krogha pozwala na wyznaczenie rozkładu ciśnienia parcjalnego w obszarze tkanki za pomocą poniższego równania różniczkowego, które uzupełniono o model zużycia tlenu wg. Michaelis-Mentena [3]:

$$R_c < r < R_t : K \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dP}{dr} \right) - \frac{M_0 P}{P_{crit} + P} = 0 \quad (1)$$

gdzie: R_c – promień kapilary [cm], R_t – promień tkanki [cm], r – współrzędna promieniowa [cm], K – współczynnik Krogha $[(\text{cm}^2 \text{s}^{-1})(\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{cm}^{-3} (\text{mmHg})^{-1})]$, P – ciśnienie parcjalne tlenu [mmHg], P_{crit} – ciśnienie krytyczne [mmHg], M_0 – zapotrzebowanie na tlen $[(\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1})]$.

Przyjęte warunki brzegowe dla modelu dystrybucji tlenu mają postać [3]:

$$r = R_c : 2\pi R_c K \frac{dP}{dr} = -k(P_b - P) \quad (2)$$

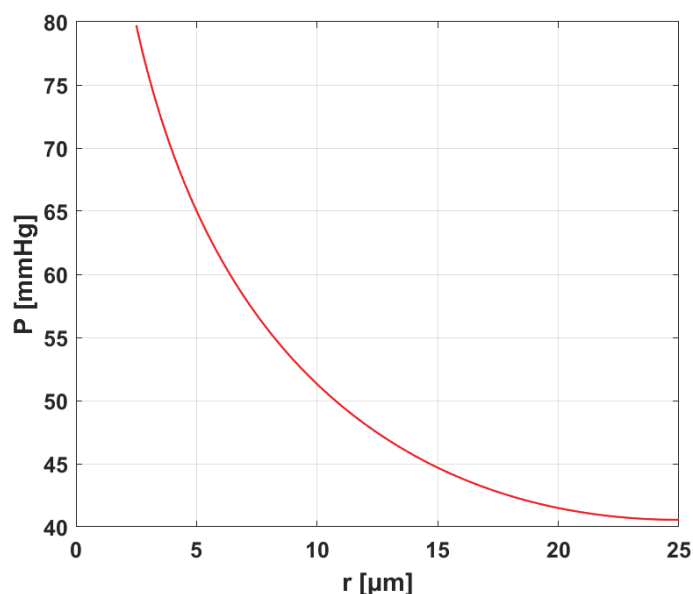
$$r = R_t : \frac{dP}{dr} = 0 \quad (3)$$

gdzie k to współczynnik przenikania masy $[(\text{cm}^2 \text{s}^{-1})(\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{cm}^{-3} (\text{mmHg})^{-1})]$, P_b – ciśnienie parcjalne tlenu w kapilarze [mmHg].

3. Wyniki obliczeń

Dla przyjętego modelu walca Krogha dokonano obliczeń, dla następujących parametrów: $K = 9.4 \cdot 10^{10} [(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})[\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{ cm}^{-3} (\text{mmHg})^{-1}]]$, $M_0 = 0.00667 [\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}]$, $k = 6.25 \cdot 10^{-9} [(\text{cm}^2 \text{ s}^{-1})[\text{cm}^3 \text{O}_2 \text{ cm}^{-3} (\text{mmHg})^{-1}]]$, $P_b = 100 [\text{mmHg}]$, $R_c = 0.00025 [\text{cm}]$, $R_t = 0.0025 [\text{cm}]$. Obliczenia modelu dokonano dla ośmiu różnych wariantów uwzględniających metodę strzałów. Obliczenia wykonano w programie Matlab 2021b.

W pierwszym etapie wyznaczono wartości ciśnienia parcjalego za pomocą dostępnej w oprogramowaniu funkcji do rozwiązywania zadań brzegowych – funkcji *bvp4c*. Uzyskane wartości (rysunek 2) stanowiły punkt odniesienia do porównywania wyników otrzymanych w analizowanych wariantach obliczeń. Następnie dokonano obliczeń dla modelu dystrybucji tlenu uwzględniając różne możliwości wyznaczania pierwiastka równania nieliniowego: metodę bisekcji - wariant 1, 2; funkcję *fzero* (kombinacja metod bisekcji, siecznych oraz interpolacji kwadratowej) - wariant 3, 4; metodę siecznych - wariant 5, 6; oraz metodę Newtona (stycznych) – wariant 7, 8.



Rys. 2. Rozkład ciśnienia parcjalego w tkance
Fig. 2. The distribution of the partial pressure in tissue

W rozpatrywanych wariantach wykorzystano zaimplementowany solver użytkownika *rk4* lub solver *ode45* dostępny w środowisku Matlab. Obydwa służą do rozwiązywania do rozwiązywania równań różniczkowych zwyczajnych, przy czym funkcja *rk4* odpowiada popularnej metodzie Rungego-Kutty czwartego rzędu, natomiast solver *ode45* jest zalecany jako solver pierwszego wyboru w środowisku Matlab.

Analizę przeprowadzono z rozróżnieniem kierunku obliczeń. Kierunek z lewego brzegu na prawy oznaczono z języka angielskiego jako *direct*, czyli bezpośredni. Natomiast kierunek z prawego brzegu na lewy jako *rewers*, czyli odwrotny.

Uzyskane wyniki wariantów wykorzystujących metodę strzałów porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą solvera *bvp4c* poprzez wyliczenie błędu aproksymacji funkcją *norm*. Funkcja ta zwraca normę euklidesową wektora będącą pierwiastkiem kwadratowym z sumy

kwadratów poszczególnych błędów. Funkcja określa jak bardzo wektory powstałe przy użyciu metody strzałów odbiegają od wektora będącego punktem odniesienia. W tabeli 1 zestawiono analizowane warianty oraz otrzymane błędy w zaokrągleniu do szóstego miejsca po przecinku.

Tabela 1. Błędy aproksymacji dla rozpatrywanych wariantów
Table 1. Approximation errors for the considered variants

Wariant	Direct	Rewers
1. Bisekcja + ode45	0.005942	1.430330
2. Bisekcja + rk4	0.000005	1.429856
3. Fzero + ode45	0.005942	0.002893
4. Fzero + rk4	0.000218	0.002081
5. Sieczne + ode45	1.173202	0.002893
6. Sieczne + rk4	1.177987	0.000005
7. Newton + ode45	1.173202	0.002793
8. Newton + rk4	1.177987	0.000184

Na podstawie uzyskanych wyników dla różnych wariantów można stwierdzić, że w większości przypadków bardziej skuteczny okazał się kierunek obliczeń typu rewers niż direct (wartości błędu aproksymacji w zakresach 0.000005 – 0.002893). Jednakże w wariantach wykorzystujących metodę bisekcji oraz w wariancie 4 zauważono, iż lepiej sprawdza się kierunek direct.

Porównując wyniki uzyskane za pomocą solvera *ode45* oraz *rk4*, można zauważyć, że mniejsze błędy aproksymacji osiągane są dla solvera *rk4*. Natomiast dla wariantów korzystających z metod siecznych i stycznych w kierunku direct lepiej sprawdza się solver *ode45*.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że skuteczniejszą metodą jest przeprowadzanie obliczeń w kierunku rewers, ponieważ łatwiej „strzelić” w warunek brzegowy trzeciego rodzaju będącego na lewym brzegu znając warunek brzegowy drugiego rodzaju na prawym brzegu.

W większości wariantów lepszym wyborem było wykorzystanie zaimplementowanego solvera *rk4*, ponieważ cechuje się większą stabilnością i dokładnością niż solver *ode45* dostępny w programie Matlab.

Literatura

1. Keskin A. Ü.: Boundary Value Problems for Engineers: with MATLAB Solutions, Heidelberg, Springer (2019).
2. Hoffman J. D.: Numerical Methods for Engineers and Scientists, New York (2001).
3. McGuire B. J., Secomb T. W.: A theoretical model for oxygen transport in skeletal muscle under conditions of high oxygen demand, Journal of Applied Physiology, 91, 2255-2265 (2001).

UPROSZCZONE MODELOWANIE ŁOŻYSK KULKOWYCH Z PODAPRCIEM CZTEROPUNKTOWYM

mgr inż. ARKADIUSZ ZAŁĘSKI,

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie wyników analiz modalnych dla dwóch pierwszych częstotliwości drgań własnych dla dwóch modeli łożyska kulkowego: modelu pełnego oraz przyjętego modelu uproszczonego. Opisano proces modelowania uproszczonego łożyska liniowego. Porównano różnice pomiędzy częstotliwościami drgań własnych obu modeli wykorzystując oprogramowania Abaqus.



SIMPLIFIED MODELLING OF LINEAR BEARING WITH FOUR-POINT SUPPORT

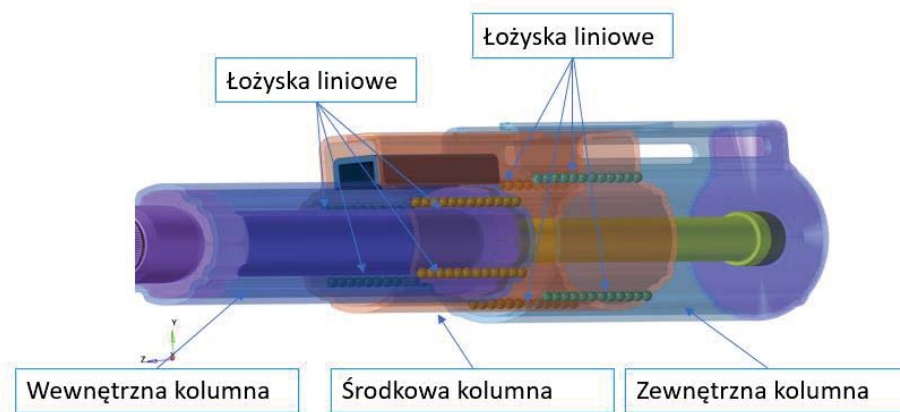
Abstract. The article presents a comparison of the results of modal analyzes for the first two natural frequencies for two linear ball bearing models: the full model and the adopted simplified model. Process of modeling a simplified linear ball bearing was described. Differences between the natural frequencies of both models were compared using Abaqus software.

1. Wprowadzenie

Łożyska liniowe kulkowe są to jedne z najpopularniejszych łożysk stosowanych w technice ruchu liniowego komponentów. Podzielić je można na zamknięte i otwarte. W artykule skupiono się na łożyskach otwartych, które mają swoje zastosowanie na wałkach podpartych. Zaletą tego rodzaju łożyska jest łatwa i szybka zmiana pozycji osiowej. Zasadniczym problemem łożysk liniowych jest mała sztywność pomiędzy komponentami, co sprzyja występowaniu niższych częstotliwości drgań własnych, jeżeli komponenty posiadają znaczącą masę.

2. Założenia modelu

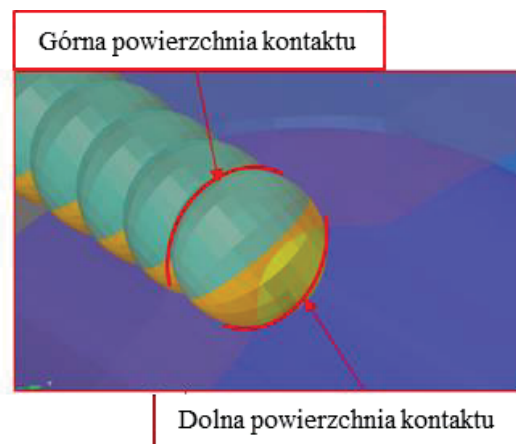
Modelem wykorzystanym w analizie porównawczej jest łożysko liniowe otwarte zamontowane w kolumnie kierowniczej. Łożyska liniowe umiejscowione są pomiędzy zewnętrzną i środkową rurą kolumny oraz środkową i wewnętrzną rurą kolumny (Rysunek 1). Na każde połączenie przypadają cztery rzędy łożysk liniowych. W celu uproszczenia analizy założono, że większość elementów została wykonana z stali. Model kolumny kierowniczej utwierdzony został we wszystkich kierunkach na końcu zewnętrznej kolumny. Analiza modalna została obliczona z użyciem algorytmu wyznaczania częstości drgań własnych Lanczosa, gdzie rozpatrywane są tylko dwie pierwsze częstotliwości drgań własnych [1].



Rys. 1. Geometria łożysk liniowych w kolumnie kierowniczej
 Fig. 1. Geometry of linear bearings in column drive

3. Budowa łożyska liniowego

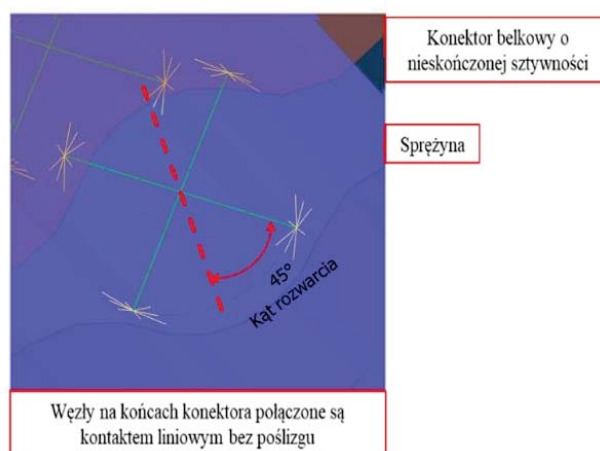
Łożysko liniowe zamodelowane zostało przy zastosowaniu elementów hexagonalnych. W połączeniu łożysk z współpracującymi powierzchniami zastosowano liniowy kontakt bez poślizgu (Rysunek 2). W danym przypadku dodatkowo zastosowano odpowiedni parametr kontaktu doberający węzły tak aby jak najlepiej odzwierciedlić kontakt cztero-punktowy łożysk liniowych [1].



Rys. 2. Kontakt łożysk liniowych z powierzchniami kolumn.
 Fig. 2. Linear bearings contact with active racetrack

4. Uproszczony model łożyska liniowego

Model uproszczony łożyska bazuje na sztywności jaką przekazuje ono oraz na powierzchni na jaką oddziałuje. Powierzchnia na jaką oddziałuje łożysko określona została na podstawie kontaktów Hertza i przedstawiona została poprzez łączniki belkowe o nieskończonej sztywności. Węzły na końcach łącznika są w kontakcie liniowym bez poślizgu z powierzchniami kolumn. Naprzeciwległe węzły środkowe konektorów połączone są poprzez sprężynę, której sztywność opisana jest na podstawie związku naprężeń i odkształceń wynikających z ciśnienia wywartego przez ciała elastyczne. Do opisu sztywności potrzebne są następujące parametry: średnica łożyska, parametr styczności, średnica osadzenia, kąt rozwarcia i obciążenie łożyska [2,3].



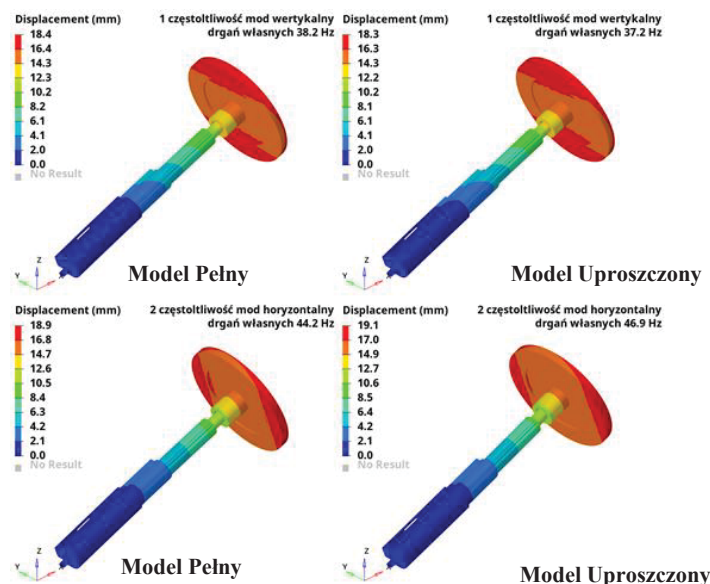
Rys. 3. Uprozczone modelowanie łożyska cztero-punktowego
Fig. 3. Simplified modeling of four-point bearing

5. Porównanie wyników

Nieliniową analizę odkształceń łożyska liniowego otwartego wykonano za pomocą programu Abaqus. Porównano wyniki dla pełnego i uproszczonego modelu łożyska liniowego. Przybliżony wynik modelu pełnego względem modelu uproszczonego uzyskano dla pierwszej częstotliwości drgań własnych wynosi 1 Hz a dla drugiej 2.7 Hz (Tabela 1).

Tabela 1. Wyniki częstotliwości drgań własnych.
Table 1. Results of natural frequency.

Wyniki	I częstotliwość drgań własnych [Hz]	II częstotliwość drgań własnych [Hz]
Uproszczony model łożyska liniowego	37.2	46.9
Model pełny	38.2	44.2



Rys. 4. Porównanie częstotliwości drgań własnych dla pełnego modelu i uproszczonego.
Fig. 4. Comparison of the eigenfrequencies for full model and simplified.

5. Wnioski

W pracy przeprowadzono porównawczą analizę modalną dla łożyska liniowego otwartego osadzonego w kolumnie kierowniczej. Porównano wyniki dwóch pierwszych częstotliwości drgań własnych modelu pełnego i uproszczonego. Opisano wzorami matematycznymi budowę uproszczonego modelu łożyska liniowego cztero-punktowego. Na podstawie wyników przedstawionych badań sformułowano następujące wnioski. Uprozczone modelowanie łożysk liniowych skraca znacząco czas obliczeniowy. Wykonanie i obliczenie parametrów w uproszczonym modelu łożyska liniowego jest czasochłonne ale lepiej uwzględnia rzeczywiste prace łożysk liniowych.

Literatura

1. Simulia B.S., Abaqus Analysis Users Guide Vol. I-IV. Providence, RI, USA, (2012).
2. Warren C.Y., Budynas G.R., Sadegh A. M., Roark's Formulas for Stress and Strain, Eighth Edition, McGraw-Hill Companies, (2012).
3. Ajala O., Pavlovskaja E., Wiercigroch M., Finite element modelling of the dynamics of groovy ball bearings, ICMPC, (2017).

ANALIZA PODŁUŻNEJ STATECZNOŚCI STATYCZNEJ STATKU POWIETRZNEGO W ZALEŻNOŚCI OD POŁOŻENIA ŚRODKA CIĘŻKOŚCI

Mgr inż. KAMIL ZENOWICZ (zdjęcie), Mgr inż. PAULINA ZENOWICZ,

Inżynieria Mechaniczna, semestr VI, 3 stopień

Opiekunowie naukowci: Dr hab. inż. Wojciech Skarka, Prof. PŚ,

Prof. dr hab. Wojciech Moczulski

Streszczenie. Artykuł dotyczy badania stateczności statku powietrznego w zależności od położenia środka ciężkości. Zależność tę wyznaczono na podstawie symulacyjnej analizy aerodynamicznej w oprogramowaniu XFLR5. Obliczono analitycznie wartości skrajne położenia środka ciężkości z którymi bezzałogowy statek powietrzny (BSP) został poddany analizie stateczności. Analizę przeprowadzono dla pięciu możliwych do osiągnięcia przez analizowany BSP wysokościach lotu. Uzyskano zależność statecznego kąta natarcia od wysokości lotu i konfiguracji drona.



ANALYSIS OF THE AIRCRAFT STATIC LONGITUDINAL STABILITY DEPENDING ON THE GRAVITY CENTER POSITION

Abstract. The article concerns the testing of aircraft stability depending on the location of the center of gravity. This relationship was determined by the method of virtual aerodynamic analysis with the use of XFLR5 software. The extreme values of the center of gravity with which the aircraft was subjected to the flight stability analysis were calculated analytically. The analysis was carried out for five flight altitudes achievable by the analyzed UAV. A dependence of the stable angle of attack on the flight altitude and drone configuration was obtained.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona analiza dotyczy bezzałogowego statku powietrznego o nieograniczonej długotrwałości lotu, osiągającej maksymalnie pięć kilometrów wysokości pułapu oraz o nietypowym układzie. Konstrukcja zakłada wykorzystanie wysoce elastycznej struktury wewnętrznej Bezzałogowego Statku Powietrznego (BSP) oraz dwóch kadłubów, w których umieszczone będą silniki działające przeciwbieżnie. Jednym z założeń jest osiąganie niskich prędkości lotu, ze względu na to przyjęto układ o zredukowanych powierzchniach sterowych. Rolę stabilizatora poziomego i pionowego pełnić mają powierzchnie sterowe umieszczone na ogonie którego płaty zostały zamodelowane zgodnie z wizualizacją przedstawioną na rysunku 1. Do analizy stateczności w zależności od położenia środka ciężkości rozpatrywanej konstrukcji wykorzystane zostało oprogramowanie XFLR5. Oprogramowanie to pozwala na wykonanie dokładnego modelu analizowanej konstrukcji oraz wykonania testów z wykorzystaniem wirtualnego tunelu aerodynamicznego [1]. Możliwa jest, między innymi:

- analiza strug powietrza opływającego model,
- analiza stateczności,
- analiza rozkładu sił na główne skrzydło nośne oraz usterzenie,
- analiza oporów aerodynamicznych wraz z uwzględnieniem momentów działających na poszczególne elementy układu nośnego,
- analiza głównego momentu działającego na rozpatrywaną konstrukcję.

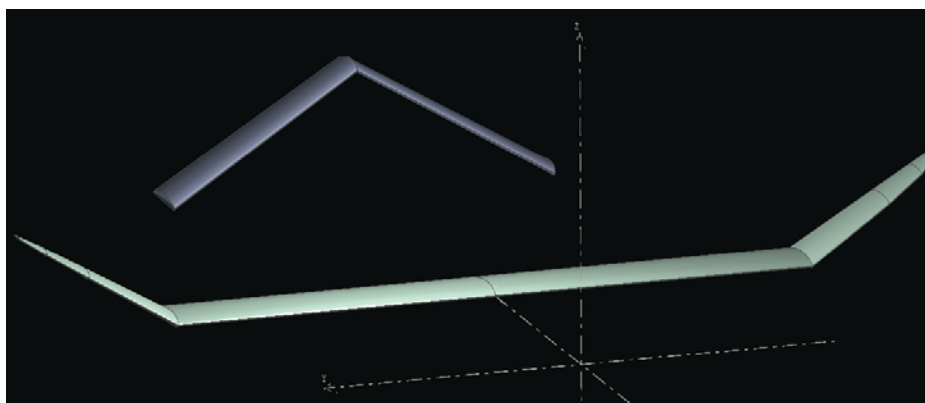
Ograniczeniem modelu wygenerowanego za pomocą wybranego do analizy oprogramowania jest brak możliwości uwzględnienia układu kadłubów odwzorowującego zakładany model.



Rys. 1. Wizualizacja BSP Twin Stratos w skali 1:7
Fig. 1. 1:7 scale visualization of the Twin Stratos BSP

2. Przygotowanie do analizy za pomocą oprogramowania XFLR5

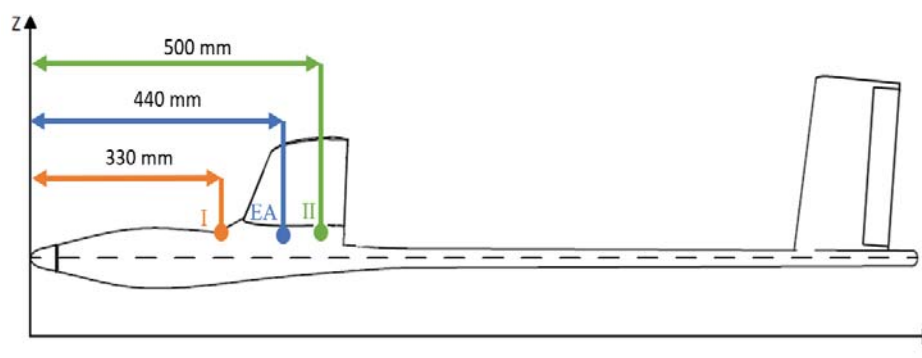
Ze względu na ograniczenia związane z wykonaniem dokładnego modelu przyjęto uproszczenie które zakłada konstrukcję nieodkształcalną co pozwoliło na zamodelowanie skrzydła oraz ogona z uwzględnieniem powierzchni sterowych bez fizycznego połączenia z głównym skrzydłem nośnym [2][3]. Połączenie obu powierzchni nośnych odbywa się na podstawie założonych odległości oraz kątów między nimi. Widok zaprojektowanego w ten sposób modelu przedstawiono na rysunku 2. Całość analizowanego układu zmienia położenie wraz ze zmianą kąta natarcia podczas analizy. Położenie środka ciężkości analizowanej konstrukcji jest sztywnie określoną wartością wprowadzoną do programu XFLR5.



Rys. 2. Model TwinStratos 1:7 w oprogramowaniu XFLR5
Fig. 2. TwinStratos 1: 7 model in XFLR5 software

Analiza wymaga wykorzystania wyznaczonych położenia środka ciężkości projektowanej konstrukcji z uwzględnieniem rozmieszczenia elementów układu elektronicznego uzyskanych w wyniku obliczeń analitycznych. Zostały one określone na podstawie rozłożenia mas wewnątrz analizowanego statku powietrznego. Jest to bezzałogowa platforma badawcza

z napędem elektrycznym, sugeruje to możliwość montażu dodatkowego oprzyrządowania w różnych konfiguracjach. Analiza rozkładu mas została wykonana na podstawie standardowych obliczeń szybowcowych [4]. Ze względu na znikomą różnicę położenia środka ciężkości wzdłuż osi Z, nie przekraczającej 2% wysokości statku powietrznego przyjęto uproszczenie zakładające położenie środka ciężkości na wysokości średniej między najniższym a najwyższym położeniem. Położenie środka ciężkości nie zmienia się też wzdłuż osi Y i znajduje się ono dokładnie w osi samolotu, co powoduje przyjęcie tylko jednej zmiennej położenia wzdłuż osi X. Wyznaczone położenia przedstawione zostały na rysunku 3.



Rys. 3. Wyznaczone położenia środka ciężkości rozpatrywanej konstrukcji BSP
Fig. 3. Designated locations of the center of gravity of the considered UAV structure

Przeprowadzona analiza zakłada uwzględnienie maksymalnych oraz minimalnych prędkości projektowanego BSP. Prędkości te w zależności od warunków panujących na zadanej wysokości lotu, zostały wyznaczone analitycznie na podstawie wcześniej przeprowadzonych analiz. Wyniki oraz prędkości skrajne w przedziale wysokości rozpatrywanym w artykule zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Skrajne prędkości lotu projektowanego BSP w zależności od wysokości
Table 1. Extreme flying speeds reachable of design UAV depending on altitude

Wysokość lotu [m n.p.m.]	Prędkość minimalna [m/s]	Prędkość maksymalna [m/s]
0	12,8	23,5
1000	13,5	23,1
2000	14,2	23,6
3000	14,9	24,1
4000	15,7	24,0
5000	16,6	24,1

3. Analiza stateczności projektowanego BSP w zależności od położenia środka ciężkości

Wprowadzono masę rozpatrywanej konstrukcji z uwzględnieniem opracowanego zestawu podzespołów elektronicznych oraz położenie środka ciężkości. Dla rozpatrywanych wysokości uwzględnione zostały skrajne wartości prędkości lotu oraz trzy położenia środka ciężkości wzdłuż osi X. Tabela 2 przedstawia wyniki wartości parametru C_m dla trzech analizowanych położen środka ciężkości, położenia skrajnego przedniego (I), skrajnego tylnego (II), oraz

wyznaczonego dla statku powietrznego bez dodatkowych urządzeń pomiarowych (EA). Graniczne położenie stateczne statycznie jest najdalszym położeniem środka ciężkości względem noska samolotu, przy którym suma sił oraz momentów powoduje zmniejszenia kąta natarcia [5]. Prezentowany współczynnik C_m jest generowany przez program XFLR5 na podstawie warunków równowagi, czyli sumy wszystkich sił i momentów względem środka ciężkości jako ogólny współczynnik momentu pochylającego samolot podczas lotu. Kąt dla którego współczynnik pochylający $C_m=0$ przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości kątów natarcia z współczynnikiem $C_m=0$
Table 2. The values of the angles of attack with the coefficient $C_m=0$

Wyniki to wartości kątów natarcia, dla których wartość głównego momentu pochylającego jest równa 0						
Wysokość lotu nad poziomem morza	Minimalna prędkość lotu			Maksymalna prędkość lotu		
	I położenie gondoli	bez głowicy pomiarowej EA	II położenie gondoli	I położenie gondoli	bez głowicy pomiarowej EA	II położenie gondoli
0 [m]	1.53°	-0.93°	-1.05°	1.44°	-1.13°	-1.23°
1000 [m]	1.53°	-0.94°	-1.05°	1.47°	-1.10°	-1.21°
2000 [m]	1.52°	-0.93°	-1.04°	1.51°	-1.08°	-1.18°
3000 [m]	1.51°	-0.92°	-1.03°	1.54°	-1.06°	-1.17°
4000 [m]	1.51°	-0.91°	-1.02°	1.57°	-1.03°	-1.14°
5000 [m]	1.59°	-1.01°	-1.12°	1.59°	-1.01°	-1.12°

4. Wnioski dotyczące przeprowadzonej analizy

Celem pracy było określenie wpływu położenia środka ciężkości na stateczność analizowanego statku powietrznego w locie poziomym oraz określenie kąta natarcia przy jakim ta stateczność występuje. Wizualizacja uzyskana na podstawie przeprowadzonej analizy pozwala jednoznacznie określić kąt stateczności lotu analizowanego BSP w każdym z rozpatrywanych położów środka ciężkości. Wartość głównego momentu pochylającego jest odwrotnie proporcjonalna do kąta natarcia. Powoduje to stałe dążenie drona do uzyskania stabilnego kąta natarcia podczas lotu. Określona została konieczność mocowania gondoli w pobliżu położenia (I) ze względu na tendencję do zwiększania kąta natarcia podczas lotu bez głowicy pomiarowej (EA) oraz z głowicą położoną w punkcie (II). Prędkość lotu ma znikomą wpływ na wartość określonego statecznego kąta natarcia konstrukcji. Przedstawiona w artykule tematyka jest wprowadzeniem do dalszej pracy badawczej związanej z zaprezentowanym bezzałogowym statkiem powietrznym Twin Stratos 1:7.

Literatura

1. Strona internetowa www.xflr5.tech (14 Styczeń 2021)
2. Abzug M. J., Larrabee E., Airplane Stability and Control, Cambridge University Press (2005)
3. Allerton D., Principles of flight simulations, John Wiley&Sons, Inc., International Edition. (2009)
4. Stafiej W., Obliczenia stosowane przy projektowaniu szybowców, Politechnika Warszawska, Warszawa (2000)
5. Phillips W. F., Mechanics of flight, John Wiley&Sons, Inc., International Edition. (2010).

WSTĘPNA ANALIZA STATECZNOŚCI STATYCZNEJ LOTU BEZZAŁOGOWEGO STATKU POWIETRZNEGO O NIETYPOWEJ KONFIGURACJI

Mgr inż. PAULINA ZENOWICZ(zdjęcie), **Mgr inż. KAMIL ZENOWICZ**,

Inżynieria Mechaniczna, semestr VI, 3 stopień

Opiekunowie naukowci: Prof. dr hab. Wojciech Moczulski,

Dr hab. inż. Wojciech Skarka, Prof. PŚ

Streszczenie. Celem pracy była wstępna analiza stateczności lotu bezzałogowego statku powietrznego (BSP) o nietypowej konfiguracji. Do realizacji analizy wykorzystano oprogramowanie MATLAB rozszerzone o narzędzie Aircraft Intuitive Design (AID), służące rozwijaniu intuicyjnego rozumienia projektowania samolotów. Otrzymane wyniki pozwoliły na wyznaczenie zakresu położenia środka ciężkości BSP, zapewniającego stateczność statyczną w locie poziomym.



INITIAL ANALYSIS OF THE STATIC STABILITY FLIGHT OF AN UNMANNED AIRCRAFT WITH NON-STANDARD CONFIGURATION

Abstract. The aim of the study was to conduct a preliminary analysis of the flight stability of an unmanned aerial vehicle (UAV) of an unusual configuration. The analysis was carried out with the use of MATLAB software extended with the Aircraft Intuitive Design (AID) tool, serving to develop an intuitive understanding of aircraft design. The obtained results made it possible to determine the range of the UAV's center of gravity positions, ensuring static stability in horizontal flight.

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe Statki Powietrzne znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. Rozpatrywany BSP ma służyć między innymi do profilowania zanieczyszczeń atmosferycznych, jego konfiguracja nie jest typowa. Celem badań było wyznaczenie zakresu położenia środka ciężkości BSP, zapewniającego stateczność statyczną w locie poziomym. Warunek stateczności jest określony jako równoważenie się sił aerodynamicznych względem orientacji kątowej dla danej konfiguracji samolotu, oznacza to że samolot wytrącony z ruchu prostoliniowego wraca do stanu początkowego [1]. Należy zwrócić uwagę na to, że bardzo stateczny statek powietrzny ma ograniczone zdolności manewrowania, dlatego czasami środek ciężkości zostaje przesunięty do tyłu stosując równocześnie systemy autonomicznej stabilizacji [2]. Przedstawiona konstrukcja posiada dwa kadłuby i zminimalizowaną liczbę powierzchni sterowych. Do wstępnych badań wybrano środowisko MATLAB. Oprogramowanie to ma pomóc w rozwijaniu intuicyjnego zrozumienia stateczności i sterowania samolotem. Dzięki modelowaniu samolotu połączonemu z szybką analizą aerodynamiczną można zaobserwować, w jaki sposób różne parametry projektowe wpływają na właściwości lotne BSP. Liczne parametry geometryczne i aerodynamiczne (tj. kształt samolotu, typ profilu, ogólna

konfiguracja) zostały dopracowane w fazie przedprojektowej, a wiedza o tym, jak te wartości wpływają na stateczność samolotu, ma kluczowe znaczenie dla podejmowania świadomych decyzji w celu osiągnięcia celów projektowych.

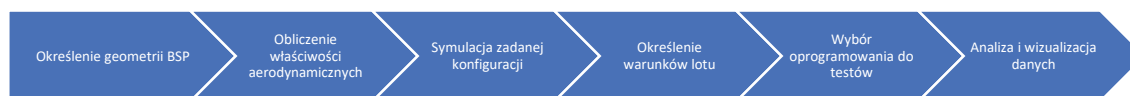
Obiekt badań to bezzałogowy statek powietrzny TWIN STRATOS, o rozpiętość skrzydeł 3,6 m, masie ok. 12 kg, oraz pułapie lotu do 5 km.

Problematyka analizy wyżej wymienionego BSP dotyczy:

- Lotu z małą prędkością,
- Lotu na dużej wysokości,
- Sterowania za pomocą powierzchni sterowych tylko na ogonie oraz przy pomocy silników.

2. Proces projektowania układu sterowania lotem statku powietrznego

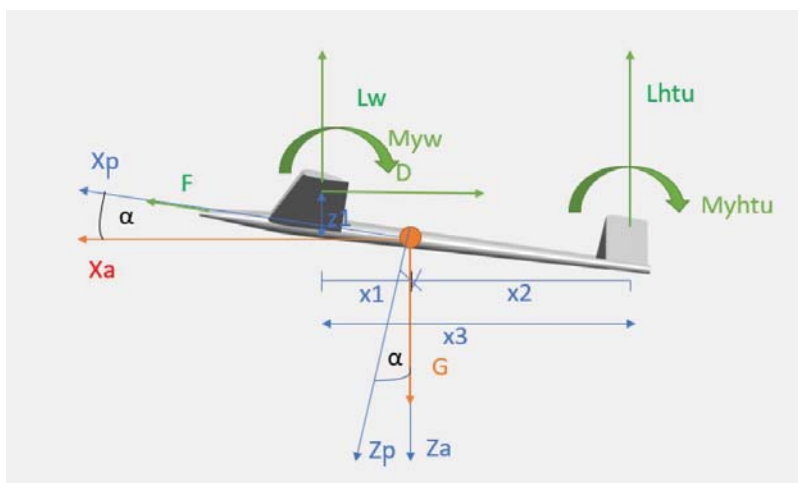
Na podstawie literatury [3][4] opracowano algorytm procesu projektowania układu sterowania lotem statku powietrznego który został przedstawiony na Rysunku 1. Pozwolił on na określenie danych wejściowych i wyjściowych niezbędnych do rozpoczęcia prac na każdym etapie określania stateczności i sterowalności statku powietrznego. Proces ten powinien zakończyć się analizą i wizualizacją danych dla wybranych najlepszych właściwości aerodynamicznych rozpatrywanego statku powietrznego.



Rys. 1. Schemat - Przykładowy proces projektowania układu sterowania lotem statku powietrznego

Fig. 1. Diagram - An exemplary process of designing the flight control system of an aircraft

Następnie wyprowadzono układ równań sił i momentów działających na BSP w locie poziomym. Rysunek 2 przedstawia środek ciężkości drona, a także osie i momenty mające wpływ na ruch w locie poziomym, w układzie nieruchomym OX_aZ_a , zaczepionym w środku ciężkości drona.



Rys. 2. Lot poziomy drona – siły i momenty

Fig. 2. Drone horizontal flight - forces and moments

Poniżej przedstawiono wyprowadzone równania równowagi dla analizowanej konstrukcji drona w locie poziomym [1]:

$$\Sigma Xa = F \cos(\alpha) - D = 0 \quad (1)$$

$$\Sigma Za = G - Lw - Lhtu - F \sin(\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$\Sigma Ma = Lwx1 - Lhtux2 + Dz1 + Myw + Myhtu = 0, \quad (3)$$

Gdzie:

F – siła ciągu generowanego przez układ napędowy [N];

D – opór aerodynamiczny statku powietrznego [N];

α – kąt natarcia [°];

G – ciężar konstrukcji [N];

Lw – siła nośna generowana przez skrzydło [N];

Lhtu – Siła nośna generowana przez ogon [N];

Myw – główny moment pochylający skrzydła [Nm];

Myhtu – główny moment pochylający części ogonowej [Nm];

x1, x2, x3, z1 – odległości oznaczone na rysunku 2 [m].

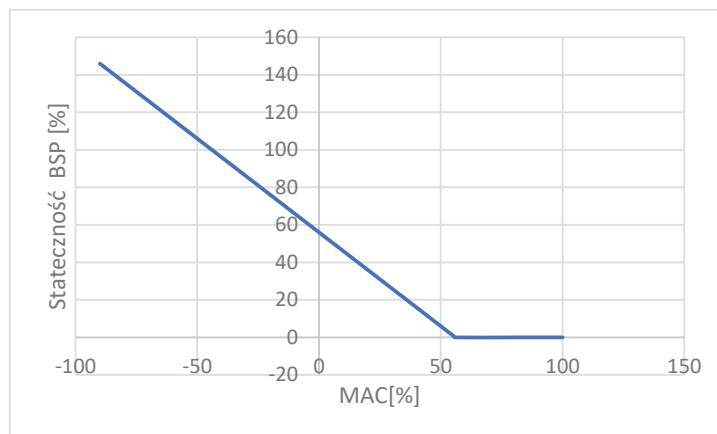
Dane dotyczące sił nośnych, oporu oraz momentów pochylających są wyznaczane na podstawie opracowanego modelu geometrycznego w środowisku Matlab. Stateczność statku powietrznego jest więc określana pośrednio na podstawie położenia środka ciężkości, środka aerodynamicznego powierzchni nośnych konstrukcji oraz przyjętych parametrów aerodynamicznych płata oraz części ogonowej.

3. Analiza komputerowa stateczności statycznej BSP

Do dalszej analizy i symulacji wykorzystano oprogramowanie Matlab oraz narzędzie Aircraft Intuitive Design (AID). Założono, że wygenerowany model numeryczny powinien uwzględniać: geometrię BSP, odpowiednio przyłożone siły i momenty oraz własności aerodynamiczne.

Na podstawie uzyskanych danych aerodynamicznych oraz schematu (Rys.1), wykonano model bryłowy w programie oraz przeprowadzono analizę stateczności dla wybranej konfiguracji drona. Wynikiem badań został margines stateczności, czyli zakres położenia środka ciężkości, względem początku średniej cięciwy aerodynamicznej skrzydła, zapewniający stateczność poziomą w locie poziomym. Na Rys. 3 przedstawiono zależność miary stateczności statycznej od położenia środka ciężkości BSP. Wyznaczono, że punkt neutralny statku powietrznego dla którego stateczność wynosi 0% - występuje on w 56% średniej cięciwy aerodynamicznej (Mean Aerodynamic Chord – MAC).

W tym przypadku im dalej środek ciężkości przesuwają się do przodu samolotu, tym większa staje się jego stateczność. Podczas określania stateczności BSP przyjęto nieodkształcalność elementów płatowca, nieruchome powierzchni sterowych oraz to, że występujące odchylenia są niewielkie [1][2].



Rys. 3. Zależność miary stateczności statycznej od położenia środka ciężkości BSP.
Fig. 3. The dependence of the static stability measure on the location of the UAV's center of gravity.

Niektóre z wartości procentowej MAC [5] mają ujemne wartości, należy to interpretować jako przesunięcie badanego środka ciężkości w przód samolotu, do dalszych obliczeń przyjęto wartość bezwzględną MAC. Wykres dla wartości od MAC 56% do MAC 100% posiada te same wartości ze względu na ograniczenia spowodowane możliwościami oprogramowania, które pozwala wizualizować wyniki dla stateczności od zera wzwyż, wartości ujemne są zastąpione informacją o braku stateczności.

4. Wnioski

Celem pracy było przeprowadzenie wstępnych analiz stateczności Bezzałogowego Statku Powietrznego. Otrzymano wstępne wyniki analiz, oraz przygotowano środowisko do dalszych obliczeń. Margines stateczności przesunięcia środka ciężkości wynosi od -44% MAC, gdzie stateczności BSP wynosi 100%, do 56% MAC, gdzie stateczność wynosi 0%. Przesuwając dalej w tył BSP, statek powietrzny staje się niestateczny statycznie. Następnym etapem prac będzie optymalizacja konfiguracji statku powietrznego z uwzględnieniem minimalizacji liczby powierzchni sterowych oraz optymalnej stateczności i sterowności w locie. Ze względu na znaczną ilość aparatury elektronicznej umieszczonej w przedniej części skrzydeł i kadłubów rozpatrywany BSP zachowuje odpowiedni poziom stateczności. Możliwość zmiany położenia ładunku pozwoli na zmianę położenia środka ciężkości BSP przed daną misją, w efekcie uzyskując stateczny lot lub ułatwienie sterowności badanego BSP.

Literatura

1. Etkin B., Reid L.D., Dynamics of flight. Stability and control., John Wiley&Sons, Inc., International Edition, (1994).
2. https://pl.wikipedia.org/wiki/Stateczno%C5%9B%C4%87_samolotu, dostępne dnia 22.02.2022r.
3. Allerton D., Principles of flight simulations., John Wiley&Sons, Inc., International Edition., (2009).
4. Diston D.J., Computational Modelling and Simulation of Aircraft and the Environment, Volume 1: Platform Kinematics and Synthetic Environment., John Wiley&Sons, Inc., International Edition, (2009).
5. Fiszdon W., Mechanika Lotu T1/T2., PWN, Warszawa, (1961).