

Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

**Zastosowanie metod obliczeniowych
i eksperymentalnych w rozwoju
urządzeń mechanicznych**

pod redakcją

Mariusza Cygnara

Anny Kochanek

Nowy Sącz 2025

Redaktor Naukowy

dr hab. inż. Mariusz Cygnar, prof. ANS

dr inż. Anna Kochanek

Recenzje

dr hab. inż. Andrzej Kurek, prof. PO

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. PM

Redaktor Techniczny

dr Tamara Bolanowska-Bobrek

© Copyright by Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
Nowy Sącz 2025

ISBN 978-83-67661-64-5

Wydawca

Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

ul. Staszica 1, 33-300 Nowy Sącz

tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: sog@ans-ns.edu.pl

Adres redakcji

Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

ul. Staszica 1, Nowy Sącz 33-300

tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: tbolanowska@ans-ns.edu.pl

Druk

Wydawnictwo i drukarnia NOVA SANDEC s.c.

Mariusz Kałyniuk, Roman Kałyniuk

ul. Lwowska 14, 333-300 Nowy Sącz

tel.: +48 18 441 02 88, e-mail: biuro@novasandec.pl

Spis treści

WPROWADZENIE	5
ROZDZIAŁ 1	
Matematyczne podejście do projektowania w zagadnieniach inżynierskich <i>(Anna Kochanek)</i>	6
ROZDZIAŁ 2	
Mikroprocesorowy system sterowania małą obrabiarką CNC <i>(Wiesław Madej)</i>	20
ROZDZIAŁ 3	
Urządzenie do pomiaru szczelności osłonek kolagenowych wykorzystywanych w przemyśle spożywczym <i>(Tadeusz Kantor, Sebastian Ulman)</i>	26
ROZDZIAŁ 4	
Głowica urabiająca do wierceń płuczkowych <i>(Dawid Kotlarski, Marcin Dudek)</i>	33
ROZDZIAŁ 5	
Urządzenie stolarskie do strugania i nadawania grubości materiałom drewnianym <i>(Dariusz Smolarski, Przemysław Ogorzałek)</i>	40
ROZDZIAŁ 6	
Elektronicznie wspomagana przekładnia w układzie napędowym roweru <i>(Zbigniew Smajdor, Sebastian Gondek)</i>	45
ROZDZIAŁ 7	
Projekt koncepcyjny pojazdu terenowego typu buggy <i>(Krzysztof Sulkowski, Jacek Klimek)</i>	52
ROZDZIAŁ 8	
Rekonstrukcja cyfrowa obiektu sakralnego z wykorzystaniem fotogrametrii BSP – na przykładzie ołtarza papieskiego w Starym Sączu <i>(Piotr Lachowski)</i>	59
ROZDZIAŁ 9	
Projekt koncepcyjny napędu hydrostatycznego przenośnika taśmowego pracującego z programowalną prędkością <i>(Piotr Obrzut)</i>	66
ROZDZIAŁ 10	
Projekt koncepcyjny humanitarnej łapki na kuny <i>(Mariusz Mikulski)</i>	77
ROZDZIAŁ 11	
Dozownik wagowy do materiałów sypkich ze sterowaniem elektronicznym <i>(Adam Ruszaj, Michał Pieszczyk)</i>	83

ROZDZIAŁ 12

Automatyczna kosiarka ogrodowa (*Józef Wójcik, Mateusz Więcek*)..... 90

ROZDZIAŁ 13

Urządzenie do łupania drewna (*Tadeusz Kantor, Jerzy Chruślicki*) 97

ROZDZIAŁ 14

Określanie ilości zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego w oleju silnikowym – propozycja testu diagnostycznego w warunkach warsztatowych (*Jerzy Langman*)..... 102

ROZDZIAŁ 15

Sterowanie pracą maszyn za pomocą sztucznych sieci neuronowych i porównanie z metodami klasycznymi (*Jerzy Langman*) 109

ROZDZIAŁ 16

Laserowe układy pomiarowe i kamery CCD w systemach wieloparametrycznej macierzowej oceny maszyn i wyrobów (*Andrzej Ryniewicz*) 115

ROZDZIAŁ 17

Modyfikacja silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego (*Tomasz Kądziołka*)..... 122

ROZDZIAŁ 18

Analiza pracy urządzenia grzewczego do samochodów kempingowych, w zależności od czynników zewnętrznych i nastawów urządzenia (*Kazimierz Opoka*)..... 129

ROZDZIAŁ 19

Projekt 3D (CAD) makiety edukacyjnej silnika sześciocylindrowego bazujący na rozwiązaniu technicznym opisanym w patencie firmy Porsche (*Piotr Lachowski*) 144

ROZDZIAŁ 20

Wpływ systemów mechatronicznych w pojazdach osobowych na redukcję emisji spalin i ich zgodność z normami środowiskowymi (*Mariusz Cygnar, Mateusz Kuzak*)..... 150

PODSUMOWANIE 157

BIBLIOGRAFIA 158

WPROWADZENIE

Monografia prezentuje szereg zagadnień mających charakter interdyscyplinarny. Zawiera 20 rozdziałów o bardzo szerokiej tematyce, mającej praktyczne zastosowanie w inżynierii. Podstawowym celem jest przedstawienie obecnie stosowanych rozwiązań technicznych w różnych obszarach, takich jak matematyka, informatyka, elektrotechnika, symulacje komputerowe, jak również zagadnienia z zakresu konstrukcji pojazdów samochodowych i mechatroniki.

Obecnie, w dobie zaawansowanej wiedzy, możemy w sposób precyzyjny konstruować elementy mechaniczne i mechatroniczne, a także odpowiednie układy sterowania o bardzo skomplikowanych rozwiązaniach technicznych.

Zrozumienie poruszanej w poszczególnych rozdziałach problematyki umożliwi Czytelnikom zdobycie solidnych podstaw teoretycznych i praktycznych.

Wiele prac ma charakter czysto projektowy lub przeprowadzono eksperymenty na stanowiskach badawczych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania, a także modelowania w programach CAD 2D i 3D. Daje to możliwość poprawy oraz doskonalenia funkcjonalności maszyn i urządzeń.

Monografia skierowana jest głównie do studentów kierunków technicznych, co przełoży się bezpośrednio na odpowiednie przygotowanie przyszłych prac dyplomowych – zarówno inżynierskich, jak i magisterskich. Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu prowadzi wszystkie kierunki o profilu praktycznym, dlatego też zasadnym jest publikowanie materiałów o treściach opartych na badaniach i eksperymentach.

Mariusz Cygnar
Anna Kochanek

ROZDZIAŁ 1

Matematyczne podejście do projektowania w zagadnieniach inżynierskich (*Anna Kochanek*¹)

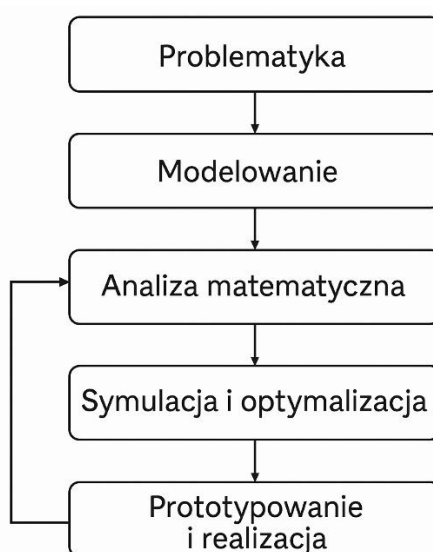
Matematyka od dawna stanowi fundament dla inżynierii, dostarczając zestawu narzędzi pozwalających na opis, analizę i przewidywanie działania skomplikowanych systemów technicznych. Mówiąc o „metodach matematycznych”, mamy na myśli przede wszystkim teorie i procedury pozwalające na budowanie modeli, analizowanie ich własności oraz rozwiązywanie równań opisujących rzeczywiste procesy i obiekty. Warto tu odróżnić te metody od narzędzi obliczeniowych, które są ich praktyczną implementacją w środowiskach komputerowych. To właśnie metody matematyczne pozwalają zrozumieć i opisać świat w sposób formalny, a dopiero później narzędzia obliczeniowe umożliwiają przełożenie tego opisu na wyniki liczbowe (Kreyszing, 2011; Quarteroni, 2008).

Obecnie obserwujemy wyraźny wzrost złożoności projektowanych systemów inżynierskich, niezależnie od dziedziny. Systemy mechaniczne, budowane czy też energetyczne wymagają od projektanta nie tylko wyobraźni technicznej, ale również umiejętności budowy modeli matematycznych oddających istotę ich działania (Quarteroni, 2008). Wraz z tym wzrostem złożoności rośnie też potrzeba formalizacji procesów projektowych i wdrażania procedur optymalizacyjnych. Nie chodzi tu wyłącznie o osiągnięcie celów ekonomicznych – coraz częściej optymalizuje się konstrukcje pod względem zużycia materiałów, energochłonności czy niezawodności. Złożoność współczesnych procesów projektowych wymaga uporządkowanego podejścia, w którym matematyka odgrywa rolę spoiwa między kolejnymi etapami pracy inżynierskiej – rysunek 1 (Logan, 2019).

Podstawą każdego etapu projektowania jest modelowanie. Jest to proces uproszczonego przedstawienia rzeczywistego obiektu w języku matematyki, często w postaci układów równań różniczkowych. Takie równania pozwalają opisać m.in., jak konstrukcja odkształca się pod wpływem obciążeń lub jak rozchodzi się ciepło w materiale (Haberman, 2013). Dzięki modelowi możliwe jest wczesne przewidywanie zachowania systemu, zanim zostanie on zbudowany. Kiedy model jest już zdefiniowany, konieczne jest jego przeanalizowanie – zbadanie, czy rozwiązania istnieją, czy są unikalne i jak reagują na zmiany parametrów (Kreyszing, 2011). Dopiero wtedy można przystąpić do przeprowadzania obliczeń, które zwykle odbywają się w środowisku komputerowym w ramach symulacji numerycznych. Metody takie jak metoda elementów skończonych (MES) są dziś standardem w inżynierii i pozwalają z dużą dokładnością przewidywać efekty skomplikowanych oddziaływań (Logan, 2019; Haberman, 2013). Poza analizą istniejących rozwiązań dość istotną rolę odgrywa optymalizacja. Dzięki metodom matematycznym można poszukiwać najlepszego wariantu konstrukcji spośród bardzo dużej liczby możliwych, biorąc pod uwagę różnorodne ograniczenia projektowe (Kreyszing, 2011). To nie tylko minimalizacja kosztów czy masy, ale też maksymalizacja

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0005-1859-5174.

trwałości, bezpieczeństwa oraz efektywności. Ważną część stanowi także analiza niezawodności i sterowania. Teoria sterowania oparta na matematycznych modelach umożliwia projektowanie układów odpornych na zakłócenia i pozwala zapewnić stabilność ich działania nawet w trudnych warunkach (Logan, 2019). Na końcu warto zaznaczyć, że do metod matematycznych coraz częściej włącza się elementy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego (AI/ML). Choć tradycyjnie te obszary kojarzone są z informatyką, w istocie korzystają z tych samych narzędzi matematycznych – optymalizacji, teorii prawdopodobieństwa oraz analizy danych – by uczyć systemy inżynierskie reagowania na nowe sytuacje (Quarteroni, 2008). Inspiracją w tej dziedzinie może być choćby klasyczna praca A. Turinga, w której autor pokazał, że proste zasady matematyczne mogą prowadzić do powstawania skomplikowanych struktur i wzorców (1952).



Rysunek 1. Schemat blokowy cyklu inżynierskiego z warstwą matematyczną.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Advanced Engineering Mathematics*, E. Kreyszing, 2011, New York: Wiley; *Mathematical Models in Science and Engineering*, A. Quarteroni, 2008, Milano: Society for Industrial and Applied Mathematics; *Applied mathematics* (wyd. 4), J.D. Logan, 2019, New York: Wiley.

Matematyka pełni w inżynierii rolę nie tylko narzędzia pomocniczego, ale często fundamentu umożliwiającego projektowanie i analizę złożonych systemów technicznych. Jej zastosowania można usystematyzować według kilku głównych kategorii, które są obecne w niemal każdej dziedzinie inżynierii.

Pierwszą kategorię stanowi modelowanie deterministyczne, które polega na budowaniu modeli opisujących procesy fizyczne i techniczne za pomocą jednoznacznych równań różniczkowych lub algebraicznych. Klasyczne przykłady to modele przepływu płynów (White, 2021) czy zagadnienia teorii pola (Kreyszing, 2011).

Drugą grupę stanowią modele probabilistyczne i statystyczne, gdzie niepewność lub zmienność danych wymaga podejścia statystycznego, np. w analizie danych pomiarowych lub prognozowaniu trendów. Metody te były rozwijane w kontekście analizy szeregów czasowych (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015).

Kolejną istotną dziedziną jest optymalizacja – poszukiwanie najlepszego rozwiązania wśród możliwych wariantów przy zadanych ograniczeniach. Szczególnie istotne są tu narzędzia optymalizacji wypukłej, szeroko stosowane w inżynierii i informatyce (Boyd, Vandenberghe, 2004).

Warto wyróżnić także sterowanie i systemy dynamiczne, gdzie teoria sterowania wykorzystuje modele matematyczne do zapewnienia stabilności i osiągnięcia pożądanych parametrów pracy układu (Kreyszing, 2011).

Analiza niezawodności jest kolejną kategorią – obejmuje techniki oceny ryzyka i szacowania trwałości systemów w czasie, z wykorzystaniem podejść probabilistycznych i statystycznych (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015).

Współczesna inżynieria coraz częściej opiera się także na metodach numerycznych wysokiej wydajności (HPC), takich jak metoda elementów skończonych czy metoda dyskretnych Galerina (Pozrikidis, 2011; Hesthaven, Warburton, 2008), które pozwalają rozwiązywać skomplikowane problemy z dużą dokładnością.

Wreszcie, należy wskazać uczenie maszynowe jako nowoczesne rozszerzenie matematyki stosowanej, które wykorzystuje m.in. elementy optymalizacji, analizy statystycznej i teorii prawdopodobieństwa do budowy modeli predykcyjnych (Boyd, Vandenberghe, 2004).

Tabela 1 prezentuje poglądową klasyfikację narzędzi matematycznych w kontekście wybranych obszarów inżynierii.

Tabela 1

Obszary inżynierii wraz z dominującymi narzędziami matematycznymi

Obszar inżynierii	Dominujące narzędzia matematyczne
Mechanika płynów	Modelowanie deterministyczne, metody numeryczne HPC
Systemy sterowania	Modele deterministyczne, teoria sterowania
Energetyka	Optymalizacja, niezawodność
Analiza danych i prognozowanie	Statystyka, modele probabilistyczne

Zródło: opracowanie własne na podstawie *Convex optimization*, S. Boyd, L. Vandenberghe, 2004, Cambridge: Cambridge University Press; *Time series analysis: Forecasting and control* (wyd. 5), G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel, G. Ljung, 2015, Hoboken: Wiley; *Advanced Engineering Mathematics*, E. Kreyszing, 2011, New York: Wiley.

Modelowanie matematyczne to proces budowania abstrakcyjnej reprezentacji rzeczywistego systemu fizycznego, technicznego lub biologicznego w celu analizy, prognozowania lub optymalizacji jego zachowania. Kluczowym elementem tego procesu jest przekształcenie zjawiska fizycznego w spójny i analizowany model matematyczny, który następnie może zostać rozwiązany analitycznie lub numerycznie (White, 2021).

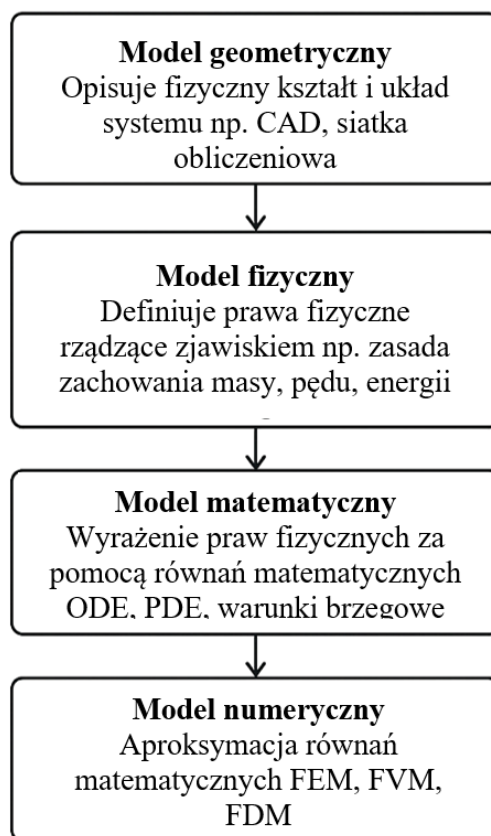
Proces modelowania rozpoczyna się od abstrakcji systemu, czyli zidentyfikowania kluczowych zmiennych stanu, parametrów oraz przyjęcia założeń upraszczających. Zmienne stanu to wielkości opisujące aktualny stan systemu, np. prędkość płynu $u(x,t)$, ciśnienie $p(x,t)$, temperatura $T(x,t)$, przemieszczenia $u(x,t)$ w analizie konstrukcyjnej. Parametry to stałe właściwości systemu – takie jak gęstość ρ , lepkość μ , współczynniki przewodzenia ciepła czy właściwości materiałowe. Założenia mogą obejmować np. stacjonarność (niezmiennność w czasie), jednofazowość, nieściśliwość czy symetrię geometryczną (White, 2021; Pozrikidis, 2011).

Po zdefiniowaniu systemu wybieramy typ modelu matematycznego, który może przyjąć różne formy w zależności od charakterystyki badanego zjawiska. Najczęściej spotykane typy modeli to:

- ODE (*Ordinary Differential Equations*) – modele jednowymiarowe w czasie, odpowiednie dla systemów o małej liczbie stopni swobody, np. prosty obieg cieplny lub zbiornik z przepływem.
- PDE (*Partial Differential Equations*) – modele równań różniczkowych cząstkowych, typowe dla opisów ciągłych zjawisk przestrzennych, takich jak przepływ cieczy (równania Naviera-Stokesa) (Pozrikidis, 2011), przewodnictwo ciepła, deformacja materiału (równania Lamego-Reddy) (Zienkiewicz, Taylor, Zhu, 2013).
- Modele statystyczne – wykorzystywane do opisu systemów z niepewnościami, np. metoda Monte Carlo, estymacja parametryczna, analiza regresji, stosowane np. przy modelowaniu przepływu turbulentnego (Patankar, 1980).
- Modele dyskretne – przydatne w systemach skokowych, logicznych lub zdarzeniowych. Mogą to być:
 - łańcuchy Markowa – probabilistyczne modele przejść między stanami,
 - sieci Petri – modelowanie systemów z równoległością i synchronizacją zdarzeń,
 - modele agentowe – np. dla systemów złożonych.
- Modele hybrydowe – łączą elementy modeli ciągłych oraz dyskretnych, np. połączenie PDE do opisu przepływu cieczy z modelem dyskretnym sterowania zaworem lub logicznej reakcji układu (Ferziger, Perić, 2020).

Kolejnym istotnym aspektem jest wybór poziomu szczegółowości modelu, co wiąże się z klasycznym kompromisem: dokładność a koszt obliczeń. Zbyt uproszczony model może nie oddać kluczowych zjawisk (np. pominięcie warstwy przyściennej w przepływie), z kolei zbyt szczegółowy model (np. DNS – *Direct Numerical Simulation*) może być nieosiągalny obliczeniowo. W praktyce stosuje się często modele pośrednie, takie jak RANS dla przepływów turbulentnych (Patankar, 1980) lub modele uśrednione w czasie oraz przestrzeni. Kryteria doboru obejmują dostępne zasoby obliczeniowe, wymagany poziom dokładności, dostępność danych wejściowych oraz cel analizy (np. projekt inżynierski a badania naukowe).

W celu uporządkowania procesu modelowania często stosuje się tzw. hierarchię modeli, którą można przedstawić jako łańcuch transformacji – rysunek 2.



Rysunek 2. Hierarchia modeli.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Introduction to theoretical and computational fluid dynamics*, C. Pozrikidis, 201, Oxford: Oxford University Press; *Advanced Engineering Mathematics*, E. Kreyszing, 2011, New York: Wiley.

Dla przykładu, w modelowaniu przepływu płynu przy pomocy metody elementów skończonych, rozpoczyna się od równań Naviera-Stokesa (model matematyczny), które następnie są przekształcane do formy słabej i dyskretyzowane na siatce numerycznej (Zienkiewicz, Taylor, Zhu, 2013). Model ten może zostać rozwiązany przy użyciu solvera numerycznego i odpowiednich algorytmów iteracyjnych (np. Newton-Raphson, algorytmy GMRES) (Ferziger, Perić, 2020).

Metody analityczne są fundamentem matematycznego opisu zjawisk fizycznych, szczególnie w fazie wstępnej analizy modelu. Stosowane są przede wszystkim tam, gdzie problem daje się zapisać w sposób liniowy i dopuszcza zamknięte rozwiązanie – czyli wyrażenie wyniku w postaci jawnej funkcji znanych parametrów i warunków początkowych. W tej kategorii mieszczą się klasyczne metody algebraiczne, analiza transformacyjna i narzędzia analizy wymiarowej.

Najbardziej podstawowym przykładem jest rozwiązywanie układów równań liniowych, które stanowią istotę modelowania w wielu dziedzinach inżynierii. Ich rozwiązania można znaleźć przez metody eliminacji Gaussa, rozkładów macierzowych czy transformacji (np. Laplace’a, Fouriera), jeśli układ wynika z równań różniczkowych liniowych o stałych współczynnikach (White, 2021; Trefethen, 2000). Transformacje te upraszczają analizę dynamicznych układów poprzez przejście z przestrzeni czasowej do dziedziny częstotliwości, co pozwala rozwiązywać problemy konwolucji, rezonansu i propagacji fali w sposób analityczny.

Analiza wymiarowa, choć pozornie elementarna, pozostaje potężnym narzędziem do uzyskiwania oszacowań rozwiązań, identyfikowania zależności bezwymiarowych (np. liczby Reynoldsa czy Prandtla) oraz upraszczania równań różniczkowych jeszcze przed ich dyskretyzacją (White, 2021).

Zakres stosowalności metod analitycznych jest jednak ograniczony. Ich główną słabością są trudności w radzeniu sobie z:

- nieliniowością równań – wiele problemów (np. przepływ turbulentny, sprzężone problemy mechaniczno-ciepłne) prowadzi do równań nieliniowych, dla których zamknięte rozwiązania nie istnieją lub mają formę szeregową niepraktyczną obliczeniowo (Reddy, 2019);
- złożonymi warunkami brzegowymi – obecność nieregularnych geometrii lub niestandardowych warunków często uniemożliwia klasyczne rozwiązanie (Trefethen, 2000);
- sprzężeniami wielopolowymi – np. między przepływem i polem temperatury, co prowadzi do układów nieliniowych z wzajemnymi zależnościami (Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery, 2007).

W tabeli 2 został zawarty przegląd metod analitycznych.

Współczesne podejście wykorzystuje często metody analityczne jako punkt wyjścia do walidacji lub uproszczenia modelu przed zastosowaniem rozwiązań numerycznych. Przykładem są rozwiązania wzorcowe do testowania algorytmów spektralnych lub FEM (Trefethen, 2000; Reddy, 2019).

Tabela 2
Przegląd metod analitycznych

Metoda	Typ problemu	Główne ograniczenia
Rozwiązania algebraiczne	Układy równań liniowych	Brak zastosowania do nieliniowych układów
Transformacja Laplace'a	Układy liniowe ODE/PDE o stałych współczynnikach	Trudności przy złożonych warunkach brzegowych
Transformacja Fouriera	Przewodnictwo ciepła, analiza harmoniczna	Wymaga okresowości, trudności przy sprzężeniu
Analiza wymiarowa	Oszacowania, skalowanie modeli	Nie daje pełnego rozwiązania, tylko struktury

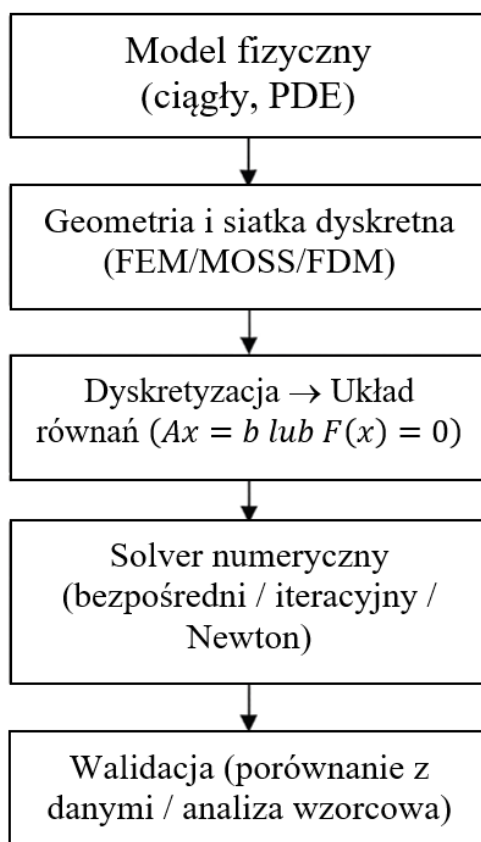
Źródło: opracowanie własne na podstawie *Applied partial differential equations*, R. Haberman, 2013, Harlow: Pearson.

Kolejnym przykładem są metody numeryczne i obliczeniowe, które stanowią podstawę praktyki inżynierskiej we współczesnym modelowaniu zjawisk fizycznych. Kluczowym etapem jest dyskretyzacja równań różniczkowych opisujących dany system – czyli przekształcenie równań ciągłych w układy algebraiczne, które można rozwiązywać numerycznie. W zależności od charakterystyki problemu stosuje się m.in. metodę elementów skończonych (MES), efektywną przy złożonej geometrii i warunkach brzegowych; metodę objętości skończonych (MOSS), szczególnie popularną w mechanice płynów; a także metodę różnic skończonych, wygodną w analizach regularnych dziedzin. Każda z tych technik prowadzi do utworzenia siatki obliczeniowej oraz lokalnej aproksymacji równań (Reddy, 2019; Patankar, 1980).

Po dyskretyzacji uzyskujemy układy równań – często o bardzo dużej liczbie niewiadomych – których rozwiązanie wymaga doboru odpowiednich algorytmów. Metody bezpośrednie (np. eliminacja Gaussa) są dokładne, ale kosztowne obliczeniowo dla dużych systemów. Dlatego w praktyce dominują metody iteracyjne, takie jak GMRES, BiCGSTAB czy CG, które pozwalają na stopniowe przybliżanie rozwiązania przy znacznie mniejszym zużyciu pamięci. W przypadku równań nieliniowych powszechnie wykorzystuje się algorytmy Newtona i quasi-Newtona, które wymagają iteracyjnego dopasowania rozwiązania aż do spełnienia warunków zbieżności (Saad, 2003).

Niezwykle istotne są właściwości numeryczne danego algorytmu: zbieżność (czy i kiedy uzyskamy wynik), stabilność (czy wynik nie będzie wrażliwy na zakłócenia) oraz kondycjonowanie (czy problem jest podatny na błędy numeryczne). W praktyce inżynierskiej często nie wystarczy dobrać algorytm – równie ważne są preconditionery, czyli techniki poprawiające kondycjonowanie macierzy i znacząco przyspieszające zbieżność metod iteracyjnych (Benzi, 2002).

W kontekście obliczeń wielkoskalowych wprowadza się elementy HPC (*High-Performance Computing*), takie jak równoległość obliczeń (np. MPI, OpenMP) oraz implementacja preconditionerów skalujących się z liczbą węzłów i stopniem rozproszenia danych. W praktycznym przepływie pracy, cały proces można przedstawić w postaci schematu (rysunek 3) z możliwą iteracją i korektą założeń na każdym etapie (Ferziger, Perić, 2020).



Rysunek 3. Schemat przepływu obliczeniowego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Nodal Discontinuous Galerkin Methods*, J.S. Hesthaven, T. Warburton, 2008, New York: Springer; *Computational Methods for Fluid Dynamics*, J.H. Ferziger, M. Perić, 2020, Berlin: Springer.

Stosowanie optymalizacji to element, który zapewnia kluczowy komponent w nowoczesnym projektowaniu inżynierskim, umożliwiając systematyczne poszukiwanie rozwiązań spełniających wymagania funkcjonalne, kosztowe oraz technologiczne. Fundamentem każdej procedury optymalizacyjnej jest poprawna formułacja problemu: zdefiniowanie funkcji celu, zmiennych decyzyjnych oraz ograniczeń – zarówno równościowych, jak i nierównościowych (Boyd, Vandenberghe, 2004). W przypadku problemów z wieloma lokalnymi minimami lub złożoną geometrią przestrzeni rozwiązań wybór odpowiedniej metody ma kluczowe znaczenie.

W przypadku dobrze uwarunkowanych, gładkich problemów wciąż dominują podejścia gradientowe. Do podstawowych zaliczamy:

- Programowanie liniowe (LP) – efektywnie rozwiązywane metodą simpleks lub metodami wewnętrznego punktu (Boyd, Vandenberghe, 2004).
- Programowanie nieliniowe (NLP) – rozwiązywane metodami takimi jak SQP (*Sequential Quadratic Programming*), które iteracyjnie rozwiązują przybliżone problemy kwadratowe (Nocedal, Wright, 2023).
- Programowanie całkowitoliczbowe i mieszane (MILP, MINLP) – obejmujące zmienne zarówno ciągłe, jak i dyskretne, wykorzystywane m.in. w planowaniu produkcji lub logistyce (Bertsekas, 2016).

Metody gradientowe oferują szybkość i precyzję, jednak wymagają dostępu do pochodnych i dobrej kondycji matematycznej problemu. W zastosowaniach inżynierskich często mamy do czynienia z funkcjami celu nieciągłymi, nieliniowymi bądź też stochastycznymi, dla których metody klasyczne tracą efektywność lub w ogóle nie mogą być zastosowane (Nocedal, Wright, 2023).

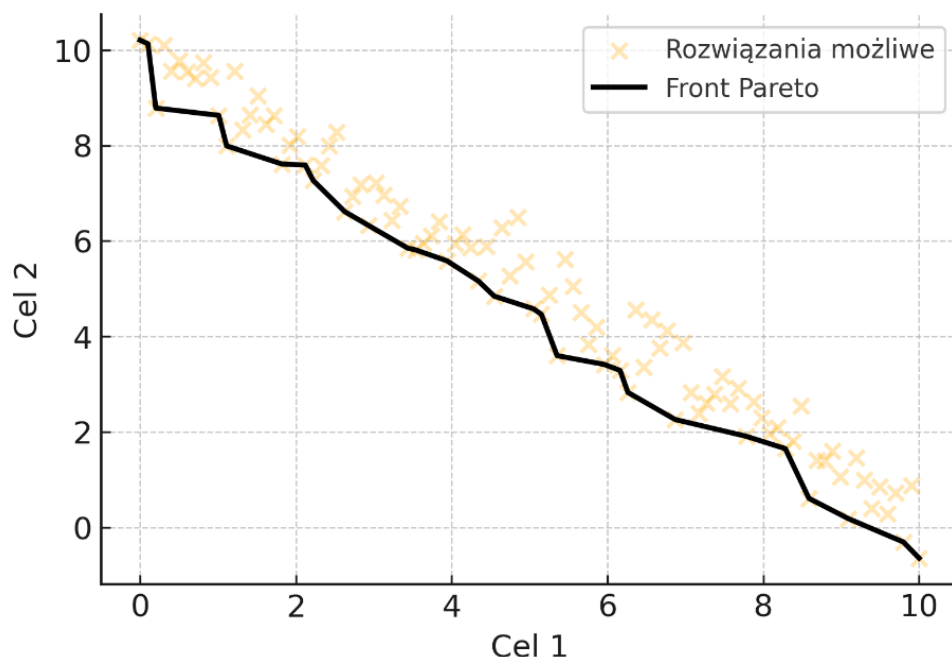
W takich przypadkach znajdują zastosowanie metaheurystyki – metody inspirowane zjawiskami naturalnymi, które przeszukują przestrzeń rozwiązań w sposób globalny, ale stochastyczny. Najczęściej stosowane to:

- Algorytmy genetyczne (GA).
- Algorytm rojowy PSO.
- Inne metaheurystyki, jak symulowane wyżarzanie, algorytmy mrówkowe, optymalizacja rojem świetlików.

Choć metaheurystyki nie dają gwarancji znalezienia optimum globalnego, są wyjątkowo odporne na lokalne minima i przydatne w optymalizacji problemów nieliniowych, dyskretnych i wielowymiarowych.

W praktyce inżynierskiej bardzo często nie istnieje jedna uniwersalna funkcja celu – trzeba uwzględniać kompromisy między kryteriami, takimi jak koszt, masa, wydajność czy bezpieczeństwo. Optymalizacja wielokryterialna (MOO) umożliwia analizę takich przypadków. W tym kontekście stosuje się dwie główne strategie:

- Funkcje agregujące.
- Optymalizacja Pareto – szukanie zbioru rozwiązań niedominowanych, które tworzą tzw. front Pareto, reprezentujący możliwe kompromisy (rysunek 4) (Coello Coello, Lamont, Van Veldhuizen, 2007).



Rysunek 4. Przykład frontu Pareto.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, C.A. Coello Coello, G.B. Lamont, D.A. Van Veldhuizen, 2007, New York: Springer.

Współczesne modelowanie inżynierskie wymaga nie tylko rozwiązywania równań deterministycznych, lecz także uwzględnienia niepewności, które występują na każdym etapie opisu rzeczywistości. Źródła tych niepewności są różnorodne – od parametrów materiałowych, przez zmienne środowiskowe i obciążeniowe, po błędy pomiarowe i ograniczenia modeli numerycznych (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015).

Aby właściwie reprezentować i zarządzać niepewnością, stosuje się różne metody probabilistyczne oraz statystyczne. Klasyczne podejścia obejmują m.in. estymację parametrów i testy statystyczne (Box, Hunter, Hunter, 2005), a nowoczesne techniki probabilistyczne sięgają po modele Bayesowskie, symulacje Monte Carlo oraz analizy wrażliwości (Gelman i in., 2013).

W przypadku eksperymentów lub kalibracji modeli niezbędne są metody estymacji – zarówno klasyczne (najmniejszych kwadratów, największej wiarygodności), jak również Bayesowskie, które pozwalają na ujęcie niepewności w postaci rozkładów a posteriori (Ibidem). Te ostatnie pozwalają na aktualizację wiedzy na podstawie obserwacji i pełne propagowanie niepewności w dalszych etapach analizy.

Jedną z najczęściej stosowanych technik są symulacje Monte Carlo, które pozwalają na propagację niepewności w modelach deterministycznych przez losowe próbkowanie przestrzeni wejściowej (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015). Aby zwiększyć efektywność obliczeniową, stosuje się techniki redukcji wariancji, takie jak próbki skorelowane (CRN), kontrolne zmienne losowe czy stratyfikacja.

Poniżej zestawiono wybrane metody kwantyfikacji niepewności wraz z ich podstawowymi cechami i zastosowaniami (tabela 3).

Tabela 3

Porównanie metod kwantyfikacji niepewności

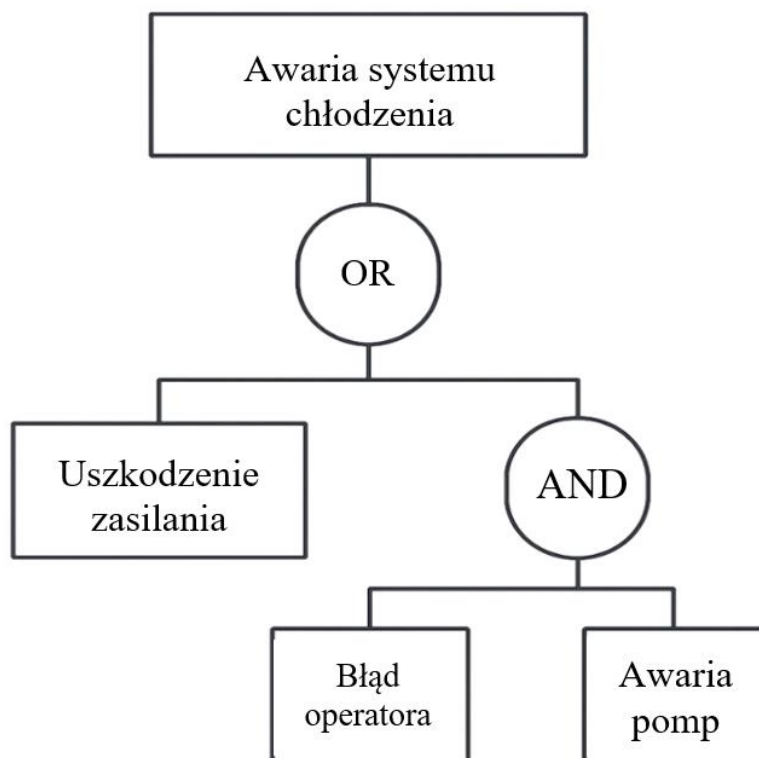
Metoda	Opis	Zakres zastosowania	Wymagania obliczeniowe
Estymacja klasyczna	Wyznaczanie parametrów na podstawie danych, np. metoda najmniejszych kwadratów	Kalibracja, analiza danych	Niskie
Wnioskowanie Bayesowskie	Ujęcie niepewności za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa, aktualizacja wiedzy	Modele probabilistyczne	Średnie – wysokie
Symulacja Monte Carlo	Losowe próbkowanie przestrzeni wejściowej	Propagacja niepewności	Wysokie
Analiza wrażliwości Sobola	Ocena wkładu poszczególnych zmiennych do wariancji wyników	Identyfikacja kluczowych parametrów	Wysokie

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Time series analysis: Forecasting and control*, G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel, G. Ljung, 2015, Hoboken: Wiley; *Why so many published sensitivity analyses are false*, A., Saltelli, G., Bammer, I., Bruno, E. Charters, W. Walker, 2019, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33), s. 16651-16656; *Bayesian data analysis*, A. Gelman, J.B. Carlin, H.S. Stern, D.B. Dunson, A. Vehtari, D.B. Rubin, 2013, Boca Raton: CRC Press.

Globalna analiza wrażliwości pozwala ocenić, które parametry wejściowe w największym stopniu wpływają na zmienność wyników modelu (Saltelli i in., 2008). Popularnym narzędziem są indeksy Sobola, umożliwiające dekompozycję wariancji wyjściowej względem poszczególnych zmiennych oraz ich interakcji. W literaturze odnotowano jednak liczne przypadki nieprawidłowego stosowania tych metod, co podkreśla konieczność ich rzetelnej i świadomej implementacji (Saltelli, Bammer, Bruno, Charters, Walker, 2019).

Kolejnym nieodzownym elementem w projektowaniu jest niezawodność systemów oznaczająca zdolność do spełniania założonych funkcji przez określony czas, w danych warunkach eksploatacji. Podstawowym narzędziem modelowania tej właściwości są funkcje niezawodności $R(t)$, opisujące prawdopodobieństwo bezawaryjnego działania do czasu t , a także powiązane z nimi funkcje intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$, wskazujące na zmienność ryzyka awarii w czasie. Najczęściej wykorzystywane są modele Weibulla, dzięki swojej elastyczności w reprezentowaniu różnych faz zużycia (okres wczesnych awarii, eksploatacji i starzenia), a także modele lognormalne, stosowane tam, gdzie dominują efekty kumulatywne i zmienność materiałowa (Rausand, Høyland, 2019).

W celu oceny ryzyka i identyfikacji newralgicznych elementów systemu stosuje się metody jakościowe i ilościowe. Do najpowszechniejszych należy FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) – systematyczna analiza możliwych scenariuszy awarii wraz z ich skutkami i priorytetyzacją na podstawie wskaźnika RPN. Dla bardziej złożonych układów wykorzystuje się drzewa błędów (FTA – *Fault Tree Analysis*) (rysunek 5), które pozwalają na wizualne i formalne odwzorowanie logicznej struktury awarii prowadzących do zdarzenia krytycznego. Technika ta jest szczególnie przydatna w połączeniu z analizą Monte Carlo, umożliwiającą probabilistyczne oszacowanie niezawodności przez losowe próbkowanie przestrzeni stanów (O'Connor, Kleyner, 2020).



Rysunek 5. Uprozczone drzewo błędów (FTA).

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Practical reliability engineering*, P. O'Connor, A. Kleyner, 2020, Hoboken: Wiley.

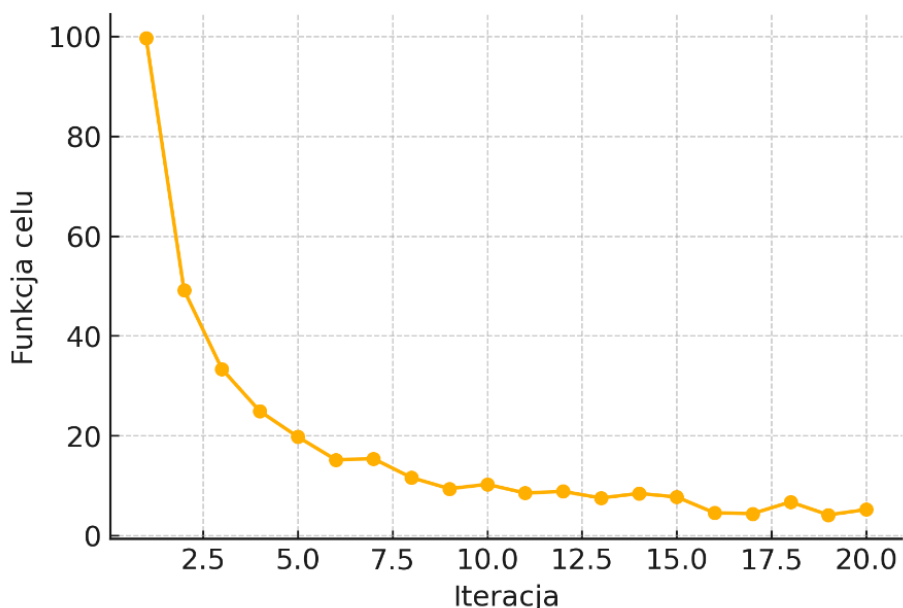
Niezawodność nie powinna być rozpatrywana oddzielnie od projektowania – dlatego coraz częściej stosuje się podejście Design for Reliability, integrujące modele niezawodnościowe bezpośrednio z procesem optymalizacji konstrukcyjnej. Uwzględnia się przy tym nie tylko oczekiwany czas bezawaryjnej pracy, ale też czułość konstrukcji na zmienność parametrów produkcyjnych, środowiskowych czy eksploatacyjnych. Wsparcie zapewniają tu techniki powierzchni odpowiedzi, umożliwiające aproksymację kosztownych analiz numerycznych za pomocą funkcji regresyjnych (Box, Draper, 2007).

Zastosowanie metod matematycznych w inżynierii staje się szczególnie widoczne w analizie konkretnych problemów projektowych i operacyjnych. Poniżej zaprezentowano cztery krótkie studia przypadków, które ilustrują praktyczne wykorzystanie modelowania, optymalizacji, sterowania i analiz niezawodności.

Przykłady:

- Optymalizacja kratownicy – minimalizacja masy przy ograniczeniach ugięcia

Optymalizacja strukturalna kratownicy stanowi klasyczny przykład wykorzystania matematyki w projektowaniu. Celem jest minimalizacja masy konstrukcji przy zachowaniu dopuszczalnych przemieszczeń w węzłach. Problem ten jest zazwyczaj formułowany jako mieszany problem całkowitoliczbowy lub nieliniowy, w zależności od charakteru materiałów i geometrii (Boyd, Vandenberghe, 2004). Proces optymalizacji jest iteracyjny, a przebieg zbieżności algorytmu można przedstawić graficznie, co zaprezentowano na rysunku 6.

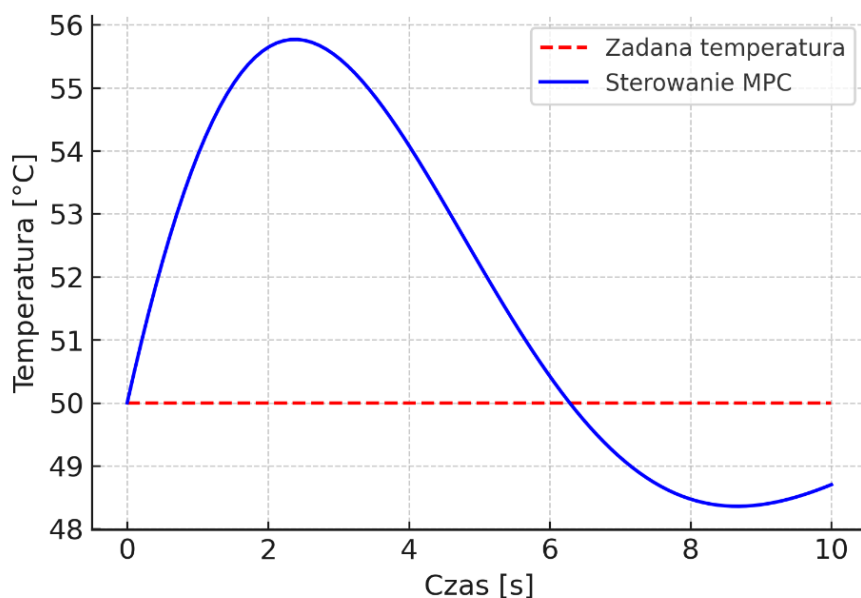


Rysunek 6. Wykres zbieżności optymalizacji.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Convex optimization*, S. Boyd, L. Vandenberghe, 2004, Cambridge: Cambridge University Press.

- Sterowanie temperaturą w reaktorze chemicznym – model ODE + regulator MPC

Precyzyjne sterowanie temperaturą w reaktorze chemicznym wymaga uwzględnienia dynamiki cieplnej opisanej równaniami różniczkowymi zwyczajnymi (ODE). Do tego celu często stosuje się regulator predykcyjny MPC (*Model Predictive Control*), który przy każdym kroku czasowym rozwiązuje zadanie optymalizacyjne minimalizujące odchylenia temperatury od wartości zadanej (Kreyszing, 2011). Przykładowy profil sterowania MPC dla takiego układu ukazano na rysunku 7.



Rysunek 7. Przykładowy profil sterowania MPC.

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Advanced Engineering Mathematics*, E. Kreyszing, 2011, New York: Wiley; *Applied mathematics*, J.D. Logan, 2019, New York: Wiley.

- Analiza niezawodności układu zasilania – symulacja Monte Carlo

W przypadku złożonych układów zasilania, składających się z komponentów połączonych równolegle i szeregowo, oszacowanie niezawodności wymaga uwzględnienia niepewności w pracy każdego elementu. Symulacje Monte Carlo pozwalają na odwzorowanie dużej liczby scenariuszy eksploatacyjnych, a także oszacowanie prawdopodobieństwa awarii całego systemu (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015). Takie podejście jest stosowane m.in. w energetyce i automatyce przemysłowej.

- Surrogate model dla symulacji CFD – redukcja czasu projektowania

Symulacje CFD (*Computational Fluid Dynamics*) są czasochłonne i obliczeniowo kosztowne. Z tego względu w praktyce często stosuje się modele zastępcze (*surrogate models*), np. oparte na procesach Gaussa (GP), które pozwalają znacznie skrócić czas projektowania przy zachowaniu akceptowalnej dokładności (Pozrikidis, 2011). Takie modele umożliwiają szybkie szacowanie parametrów przepływu bez potrzeby wielokrotnego wykonywania pełnych symulacji numerycznych.

Zastosowanie metod matematycznych w inżynierii wymaga znajdowania kompromisów pomiędzy dokładnością a kosztem obliczeń. Zaawansowane metody numeryczne, jak np. metoda dyskretnych Galerkin (Hesthaven, Warburton, 2008), zapewniają dużą precyzję, ale kosztem wysokich nakładów obliczeniowych. W uczeniu maszynowym występuje z kolei kompromis między interpretowalnością a skutecznością modeli – bardziej złożone algorytmy oferują wysoką dokładność, ale są trudniejsze do interpretacji (Boyd, Vandenberghe, 2004).

Granice klasycznych metod pojawiają się w analizach wielkoskalowych lub silnie nieliniowych, gdzie algorytmy optymalizacyjne napotykają trudności skalowalności (Ibidem), a w modelach przepływowych konieczne są metody numeryczne dostosowane do skrajnych nieliniowości (Pozrikidis, 2011). Klasyczne podejścia mają też ograniczoną skuteczność w warunkach danych niepewnych i zmiennych (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015).

Jednym z kierunków rozwoju jest modelowanie hybrydowe, łączące modele fizyczne i metody bazujące na danych, umożliwiające precyzyjniejsze odwzorowanie rzeczywistości przy ograniczonych danych (Kreyszing, 2011; Boyd, Vandenberghe, 2004). Równolegle postępuje automatyzacja pipeline'ów obliczeniowych, integrująca etapy modelowania i analizy w spójnych procesach (Hesthaven, Warburton, 2008).

Jednoznacznie wynika, że matematyczne podejście do projektowania inżynierskiego jest dziś nieodzownym elementem pracy inżyniera – od etapu modelowania, przez analizę i optymalizację, po ocenę niezawodności i zarządzanie niepewnością. Narzędzia matematyczne pozwalają łączyć wysoką dokładność opisu z rosnącymi wymaganiami praktycznymi oraz ograniczeniami obliczeniowymi (Boyd, Vandenberghe, 2004; Hesthaven, Warburton, 2008; Pozrikidis, 2011).

Zastosowanie tych metod wiąże się jednak z koniecznością świadomego zarządzania kompromisami: dokładność kontra koszt obliczeń, interpretowalność modeli kontra ich skuteczność, czy klasyczne algorytmy kontra elastyczność wobec danych niepewnych (Box, Jenkins, Reinsel, Ljung, 2015; Saltelli i in., 2008). Granice stosowalności klasycznych metod analitycznych ujawniają się głównie w obszarach silnej nieliniowości i dużych skali problemów, gdzie coraz większą rolę odgrywają metody numeryczne HPC i elementy uczenia maszynowego (Pozrikidis, 2011; Kreyszing, 2011).

Kierunki rozwoju koncentrują się dziś na hybrydowych podejściach łączących modele fizyczne z danymi empirycznymi, automatyzacji procesów obliczeniowych oraz integracji nowoczesnych technik probabilistycznych i analiz wrażliwości w praktyce inżynierskiej (Saltelli, Bammer, Bruno, Charters, Walker, 2019).

Wymagające dalszych badań i standaryzacji pozostają w szczególności:

- interpretowalne i zaufane modele AI w inżynierii;
- procedury kwantyfikacji niepewności i analiz wrażliwości zgodne z dobrymi praktykami;
- algorytmy numeryczne skalujące się z rosnącą złożonością danych oraz modeli.

Podsumowując, matematyka stosowana nie tylko pozwala zrozumieć złożone systemy inżynierskie, ale także umożliwia ich optymalne projektowanie i analizę, przy czym jej rozwój musi nadążać za rosnącą złożonością rzeczywistych problemów i postępem technologicznym.

ROZDZIAŁ 2

Mikroprocesorowy system sterowania małą obrabiarką CNC

(Wiesław Madej¹)

Na przestrzeni lat postępowała automatyzacja i komputeryzacja linii produkcyjnych, a co za tym idzie – też maszyn CNC. Wszystko po to, by zwiększyć ich produktywność, dokładność i by zredukować wykorzystanie czynnika ludzkiego przy wykonywaniu różnorodnych procesów z wykorzystaniem tych maszyn. Pomógł w tym również rozwój mikroprocesorowych systemów sterowania obrabiarek numerycznych, dzięki czemu wyraźnie zwiększyła się jakość oraz dokładność sterowania maszynami, ich napędami i dokładność ich systemów pomiarowych. Dzięki zastosowaniu obrabiarek sterowanych numerycznie możliwe jest uzyskanie niespotykanej wcześniej dokładności, powtarzalności i automatyzacji linii produkcyjnych. Obrabiarki sterowane numerycznie znajdują zastosowanie zarówno w potężnych firmach jak i małych przedsiębiorstwach różnych sektorów gospodarki, gdzie mogą być wykorzystywane we wszelkiego typu procesach produkcyjnych, tj. frezowanie, toczenie, cięcie, szlifowanie, gięcie itd. (Nikiel, 2004).

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie kompletnego, w pełni użytkowego, mikroprocesorowego systemu sterowania małą maszyną CNC do grawerowania laserowego w drewnie lub metalach miękkich, takich jak aluminium.

Systemy sterowania przemysłowych obrabiarek CNC tworzone są przez duże firmy i nie są dostępne dla przeciętnego użytkownika chcącego zbudować własną maszynę sterowaną numerycznie (Honczarenko, 2008). Rozwiązaniem tego problemu jest stworzenie własnego systemu sterowania, który będzie odpowiadał potrzebom użytkownika. Główne założenia projektu mikroprocesorowego sterowania maszyny CNC do grawerowania laserowego to:

- trzy osie sterowane komputerowo X, Y oraz Z;
- wykorzystanie w projekcie sterownika Arduino UNO wraz z CNC Shield;
- zastosowanie wyłączników krańcowych dla wszystkich osi;
- zastosowanie sterowania do maszyny pracującej w drewnie lub metalach miękkich;
- zastosowanie wśród użytkowników domowych lub małych przedsiębiorstwach;
- stosunkowo niski koszt produkcji.

Bazą projektu będzie płytką mikrokontrolera Arduino UNO Rev. Jej architektura oparta jest na mikroprocesorze AVR ATmega328. Platforma Arduino będzie stanowiła główną jednostkę sterującą (MCU) dla projektowanego układu sterowania maszyną CNC. Platforma Arduino jest publikowana jako narzędzie Open source, co oznacza, że producent daje możliwość bezproblemowego ingerowania, a także modyfikowania oprogramowaniem płytki Arduino. Zwiększa to możliwości samego Arduino i pozwala na dostosowanie mikrokontrolera do własnych potrzeb. Płytką Arduino może być też rozszerzana o dodatkowe moduły pozwalające na tworzenie różnorodnych projektów.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0001-3526-1492.

Do uzyskania dokładności ruchów, jakimi powinien cechować się projektowany laser grawerujący niezbędne, będzie zastosowanie płytki CNC Shield. Jest to nakładka stworzona do współpracy z Arduino i w połączeniu ze sterownikami pozwala na sterowanie czterema silnikami krokowymi. Jeden z silników jest silnikiem, który duplikuje ruchy jednego z trzech pozostałych silników.

Aby umożliwić silnikom krokowym prawidłową pracę oraz wykorzystać ich dokładność i precyzję w projekcie, należy wykorzystać sterowniki silników krokowych. Służą one do generowania sygnałów (STEP i DIR), dzięki którym określana jest liczba kroków, jaką ma wykonać silnik oraz kierunek ruchu. Istotną funkcją sterownika silnika krokowego jest możliwość regulacji prądu, jaki będzie przepływał przez cewki silnika. Pozwala to na uzyskanie większego napięcia, a co za tym idzie – większej prędkości, z jaką poruszać się będzie silnik.

Do wprawienia w ruch osi maszyny niezbędne będą odpowiednio dobrane silniki krokowe. W projekcie sterowania małym laserem grawerującym wykorzystany został silnik krokowy bipolarny, co oznacza, że silnik posiada cztery wyprowadzenia, które zasilają dwie cewki odpowiadające za wykonywanie ruchu obrotowego.

Każda z osi maszyny CNC ma swoje położenia krańcowe, dlatego aby sterownik otrzymywał informację o osiągnięciu przez oś pozycji krańcowej, maszyna musi być wyposażona w czujniki krańcowe (tzw. krańcówki). Po ich aktywacji następuje zatrzymanie silnika napędowego określonej osi. W projekcie wykorzystano czujniki krańcowe z dźwignią wyposażoną w rolkę. Przy dużej ilości ruchów, jakie wykonuje maszyna CNC, rolki zapewnią zmniejszone tarcie między elementami ruchomymi.

Do projektowanej maszyny została wykorzystana kompaktowa i lekka głowica laserowa, która zapewni szybką pracę w materiałach, do których obróbki przystosowana jest projektowana obrabiarka.

Do zasilenia całego systemu sterowania wraz z głowicą laserową wymagane jest zewnętrzne źródło zasilania w postaci zasilacza dostarczającego prąd stały. Płytki CNC Shield wymaga zasilania w przedziale od 12 do 36V, głowica laserowa wymaga zaś napięcia wejściowego w wysokości od 12 do 24V. Zasilacz zastosowany w projekcie posiada moc 200W, a jego napięcie wyjściowe jest w przedziale od 24 do 30V prądu stałego.

Głównymi elementami projektowanego sterowania do lasera CNC są: płytka Arduino oraz nakładka do tej płytki – CNC Shield. Są one ze sobą w pełni zgodne dzięki czemu ich podłączenie nie stanowi problemu. CNC Shield ma wlutowane piny odpowiadające wyprowadzeniom na płytce Arduino Uno, wystarczy więc spiąć je razem odpowiednimi pinami.

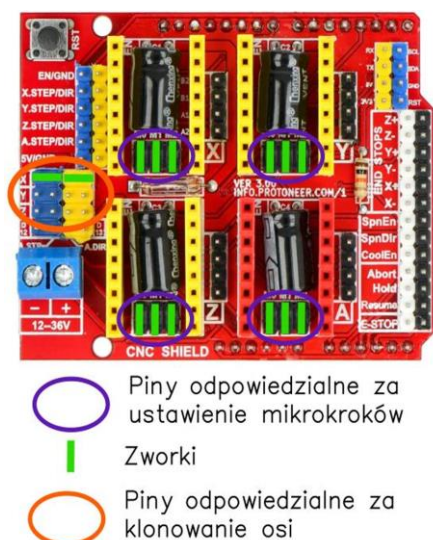
Aby nakładka CNC Shield mogła spełniać swoje funkcje (tj. sterować silnikami krokowymi, obsługiwać sygnały z czujników krańcowych itd.), wymagane jest wgranie oprogramowania GRBL do płytki Arduino UNO za pomocą programu o nazwie xLoader.

Kolejnym etapem podczas tworzenia sterowania maszyny CNC jest określenie tzw. microsteppingu, czyli mikrokroków, które mają wpływ na precyzję, z jaką poruszają się silniki krokowe poszczególnych osi. Sterowanie mikrokrokowe polega na sterowaniu cewkami silnika krokowego w taki sposób, aby wirnik pozycjonował się w pośrednim położeniu między dwoma skrajnymi, sąsiadującymi ze sobą położeniami. Dzięki temu silnik zyskuje większą precyzję ruchów kosztem mniejszego momentu obrotowego i zmniejszonej maksymalnej prędkości obrotowej. W projekcie lasera grawerującego

oczekiwana jest wysoka precyzja ruchów, dlatego do tego systemu sterowniki silników krokowych charakteryzują się możliwością ustawienia mikrokroków w wysokości 1/32-kroku.

Wykorzystując zworki (ang. *jumpers*), na płytce CNC Shield ustawiane są mikrokroki dla poszczególnych silników.

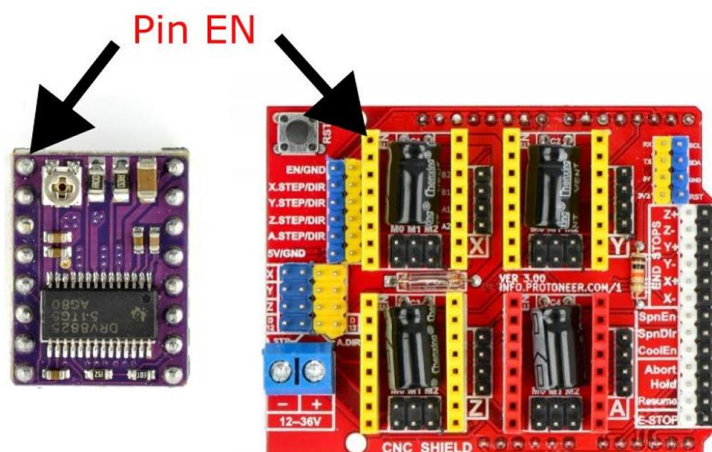
Ponadto zworki należy umieścić na pinach odpowiedzialnych za klonowanie ruchów osi X, gdyż w projekcie został wykorzystany czwarty silnik jako kopia silnika głównego znajdującego się na osi X. Na rysunku 1 ukazano lokalizację pinów i sposób podłączenia zwrotek.



Rysunek 1. Lokalizacja pinów oraz sposób podłączenia zwrotek.

Źródło: opracowanie własne.

W projekcie wykorzystane zostaną cztery silniki krokowe, dlatego też na płytce CNC Shield należy zainstalować cztery sterowniki, po jednym dla każdego silnika. Montowane są one podobnie jak sama płytka CNC Shield do Arduino Uno. Sterowniki posiadają wlotowe piny, które odpowiadają wyprowadzeniom na płytce CNC Shield. Podczas montażu ważne jest, aby pin ENABLE (EN) na sterowniku pokrywał się z pinem ENABLE (EN) na płytce CNC Shield (rysunek 2).



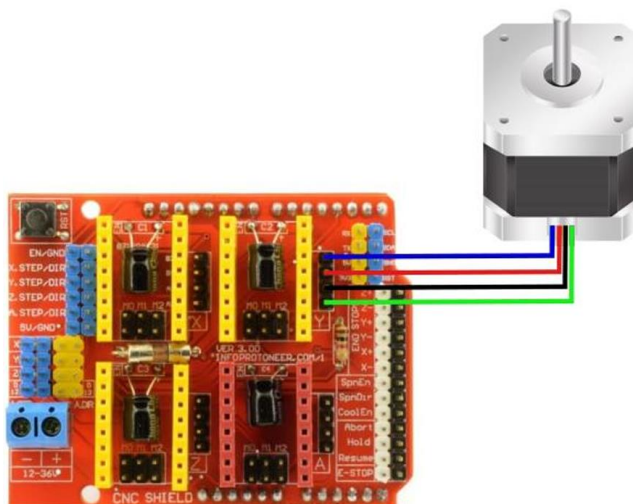
Rysunek 2. Położenie pinu EN na sterowniku oraz płytce CNC Shield.

Źródło: opracowanie własne.

Aby silniki krokowe podłączone do sterowników działały prawidłowo, należy ustawić ograniczenie maksymalnego prądu, jaki przepływa przez cewki silnika krokowego. W tym celu należy wykorzystać potencjometr znajdujący się na sterowniku DRV8825.

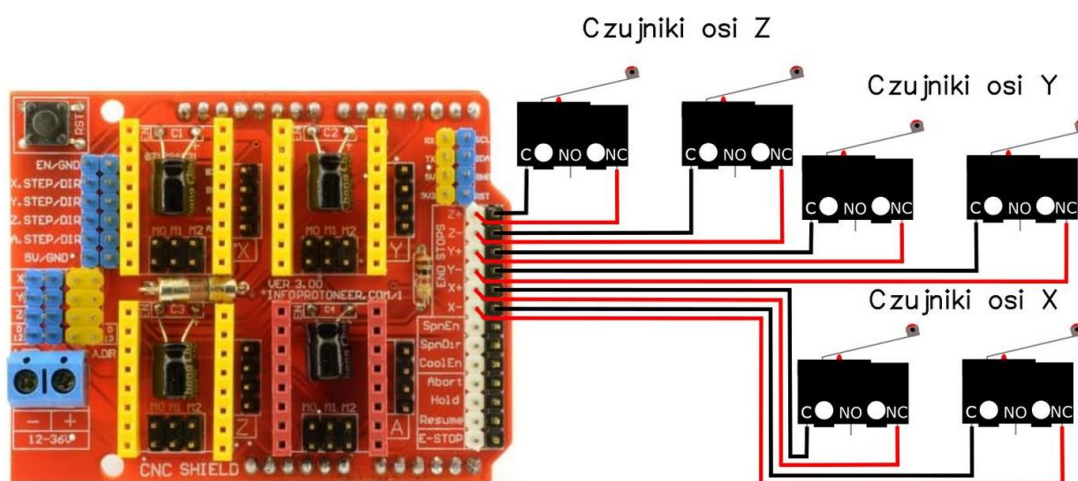
Zastosowane w projekcie silniki krokowe są silnikami bipolarnymi, czteroprzewodowymi.

Płytką CNC Shield obok każdego sterownika posiada 4-pinowe złącze, pozwalające na podłączenie silnika krokowego. Schemat podłączenia dla jednego z silników ukazano na rysunku 3. Pozostałe silniki podłączane są w identyczny sposób.



Rysunek 3. Podłączenie silnika do płytki CNC Shield.
Źródło: opracowanie własne.

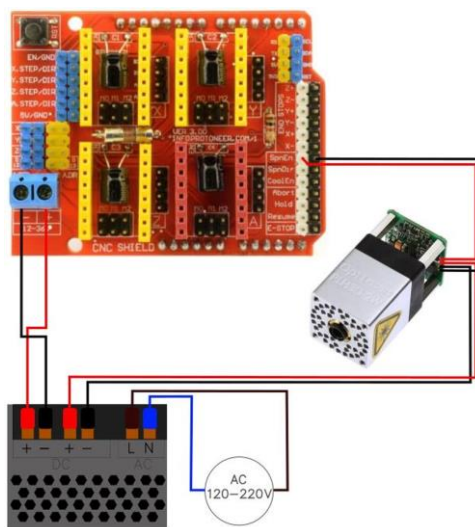
Projektowany system sterowania laserem grawerującym uwzględnia również zastosowanie czujników krańcowych dla każdej z osi maszyny. Kiedy jedna z krańcówek zostanie aktywowana, sygnał o zmianie stanu na pinach krańcówki zostaje przesłany do sterownika, który zatrzymuje silnik na odpowiedniej osi. Podłączenie czujników krańcowych do płytki CNC Shield zostało przedstawione na rysunku 4.



Rysunek 4. Schemat podłączenia czujników krańcowych.
Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym etapem jest podłączenie głowicy laserowej i źródła zasilania do płytki CNC Shield (rysunek 5). Płytkę CNC Shield jest wyposażona tylko w wyprowadzenia dla sygnału sterującego laserem. Z tego również zasilacza sterowana będzie sama płytkę CNC Shield.

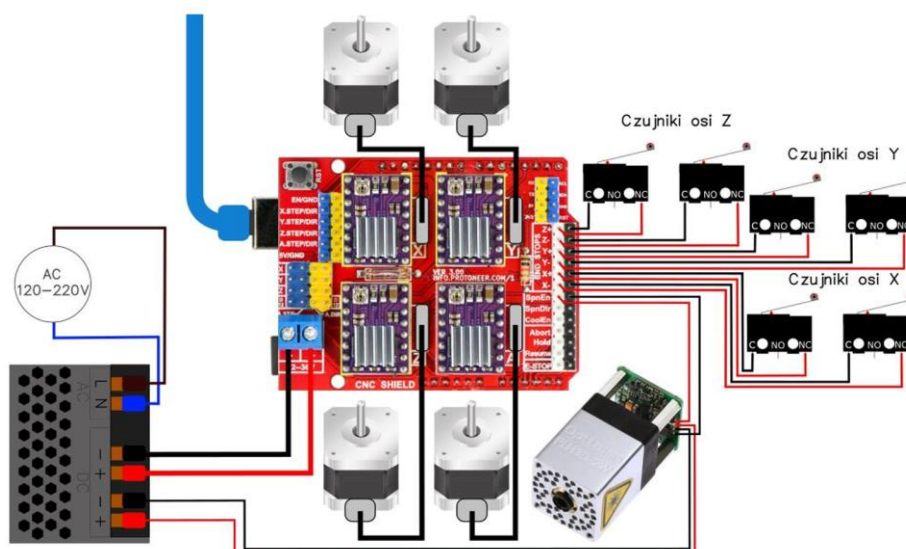
Aby płytkę Arduino UNO oraz CNC Shield mogły być sterowane za pomocą oprogramowania sterującego, należy płytkę Arduino podłączyć do komputera za pomocą kabla USB. Następnie po uruchomieniu program Laser GRBL należy wybrać odpowiedni port COM, do którego podpięte jest Arduino, a następnie połączyć się z urządzeniem (Cervo, Anderson, 2014).



Rysunek 5. Schemat podłączenia głowicy laserowej oraz zasilacza.

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6 ukazany został ogólny schemat podłączenia wszystkich komponentów stanowiących sterowanie małej maszyny CNC do grawerowania laserowego.



Rysunek 6. Ogólny schemat systemu sterowania.

Źródło: opracowanie własne.

Stworzenie własnego sterowania małą obrabiarką CNC na bazie platformy Arduino pozwala na redukcję kosztów, które są o wiele mniejsze niż w przypadku zakupu gotowej maszyny CNC, co dla osób chcących rozpocząć pracę z maszynami sterowanymi numerycznie lub dla małych przedsiębiorstw jest niewątpliwie dużym atutem.

Oparcie całego systemu sterowania obrabiarką na platformie Arduino oraz Oprogramowaniu GRBL daje wiele możliwości pod względem konfiguracji oraz rozbudowy systemu. Poza tym samodzielne projektowanie od podstaw systemu sterowania daje możliwość wyboru silników z odpowiednimi parametrami, rodzaju przenoszenia napędu na osie, rodzaju zastosowanych przewodnic itd. Kolejną korzyścią, jaka płynie z samodzielnego projektowania systemu sterowania, jest jego dobra znajomość, co może szczególnie być przydatne przy wprowadzaniu modyfikacji czy wykonywaniu napraw.

W powyższym projekcie przedstawione zostało sterowanie obrabiarki CNC przeznaczonej do grawerowania laserowego. Sterowanie i wszystkie jego komponenty zostały zaprojektowane oraz dobrane z przeznaczeniem do pracy w drewnie lub metalach miękkich takich jak aluminium. Podczas tworzenia własnego systemu sterowania wymagane jest posiadanie wiedzy z zakresu maszyn CNC, ich kinematyki i zasady działania. Dodatkowo przydatna jest podstawowa wiedza z zakresu elektryki oraz elektroniki. W dzisiejszych czasach zwiększa się zapotrzebowanie na maszyny CNC, ponieważ to właśnie za ich pomocą wytwarzana jest coraz większa ilość produktów trafiających na rynek.

ROZDZIAŁ 3

Urządzenie do pomiaru szczelności osłonek kolagenowych wykorzystywanych w przemyśle spożywczym

(Tadeusz Kantor¹, Sebastian Ulman²)

W dzisiejszym, dynamicznie rozwijającym się, środowisku przemysłowym rosnące znaczenie mają efektywność, elastyczność oraz automatyzacja procesów produkcyjnych. Integracja technologii takich jak PLC (*Programmable Logic Controller*) oraz IPC (*Industrial Personal Computer*) jest kluczowa dla zwiększenia wydajności i optymalnego zarządzania procesami. Coraz większe zbliżenie środowisk IT i OT otwiera nowe możliwości w obszarze analizy danych, predykcji awarii oraz poprawy jakości produkcji. Dzięki temu możliwe jest precyzyjne monitorowanie procesów, zwiększenie wydajności operacyjnej i łatwiejsze wdrażanie innowacji.

Konteneryzacja aplikacji za pomocą narzędzi takich jak Docker umożliwia przenoszenie oraz uruchamianie aplikacji na różnych platformach, niezależnie od infrastruktury. Izolowanie aplikacji w lekkich kontenerach zapewnia większą elastyczność, skalowalność i niezawodność. Ułatwia to też zarządzanie wersjami oprogramowania i przyspiesza wdrażanie zmian, co znacząco skraca czas dostarczania rozwiązań.

Producentów sterowników PLC jest wielu. Oferują oni szeroki zakres sterowników przeznaczonych do różnych zastosowań, od najprostszych sterowników, takich jak seria Siemens LOGO! przeznaczonych raczej do prostych aplikacji, po średnio zaawansowane modele jak Siemens S7-1200, aż po bardzo zaawansowane, takie jak Siemens S7-1500 czy IPC Beckhoff np. z serii C6XXX. Sterowniki PLC mogą się od siebie różnić wieloma aspektami, wśród których wymienić można (Kamel, Kamel, 2009):

- Liczba obsługiwanych wejść/wyjść.
- Obsługiwane magistrale.
- Maksymalna liczba obsługiwanych danych typów komponentów.
- Maksymalna liczba urządzeń podłączona do danej magistrali.
- Wydajność, dostępne zasoby pamięci.
- Obsługiwane obiekty technologiczne (np. SAFETY, motion).
- Obsługiwane funkcje w programach (np. zapis/odczyt pliku).

Celem pracy jest opracowanie oprogramowania na sterownik PLC i towarzyszący mu panel IPC dla urządzenia służącego do pomiaru szczelności osłonek kolagenowych. W opisywanym urządzeniu można będzie wyróżnić dwa elementy: • Sterownik PLC Do niego zostaną podłączone zawory odcinające przepływ cieczy wraz z czujnikiem ciśnienia. Będzie on wymieniał dane z aplikacją na IPC za pośrednictwem protokołu TCP/IP i UDP. Sterownik też będzie kontrolował pomiar na podstawie odczytu ciśnienia i danych wprowadzonych w webowej aplikacji sterującej urządzeniem. • Panel HMI

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0001-5515-3501.

² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

(właściwie panel IPC) Oparty o system Ubuntu 22.04 LTSC. Panel będzie zawierał cztery aplikacje dotyczące urządzenia. Te aplikacje w celu łatwiejszego zarządzania oraz łatwiejszego przenoszenia ze środowiska testowego do produkcyjnego zostaną skonteneryzowane przy użyciu Dockera. Wizualizacja zostanie napisana w formie aplikacji webowej przy użyciu frameworku Angular. Zastosowanie aplikacji webowej zamiast klasycznej ułatwi dostęp do urządzenia pomiarowego z zewnętrznych urządzeń obsługujących przeglądarkę internetową. Backend zostanie napisany w języku JavaScript na platformę Node.js. Dane będą gromadzone w relacyjnej bazie danych MariaDB. Wybrane przez użytkownika pomiary i sesje będą mogły zostać eksportowane do arkusza kalkulacyjnego (.xlsx).

Gotowy produkt, czyli osłonka, poddawany jest procesowi nadziewania farszem, w trakcie którego mogą pojawić się pierwsze problemy związane z jej wytrzymałością i szczelnością. Wadliwa struktura może prowadzić do poważnych strat: utraty osłonki, farszu, energii i czasu, a także narażenia na dalsze ewentualne szkody. Aby zawczasu wykryć problemy związanych ze strukturą, zminimalizować straty i zastosować środki zaradcze, opracowano urządzenie, które pozwala na przetestowanie szczelności, średnicy i wytrzymałości osłonki za pomocą cieczy. Tego rodzaju proces w pewnym stopniu symuluje rzeczywiste warunki podczas nadziewania, co umożliwia wczesne wykrycie potencjalnych wad. Tego rodzaju badanie jest integralną częścią kontroli jakości, redukcji strat i zwiększania efektywności procesu produkcyjnego. W związku z tym zastosowanie takiego urządzenia bezpośrednio podnosi poziom standardów jakości oraz buduje relacje z klientem poprzez dostarczanie produktu o stabilnych parametrach technicznych i wysokiej niezawodności.

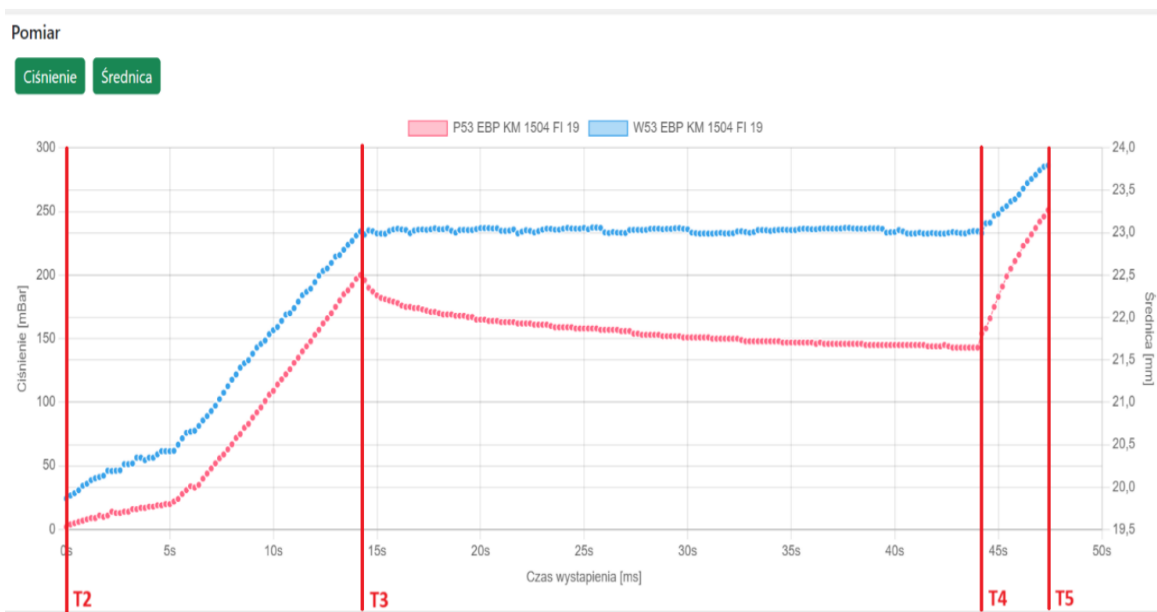
W szafie sterowniczej zastosowano minimalną liczbę komponentów, z których kluczowymi są sterownik PLC, zasilacz 24 V DC, switch sieciowy i panel IPC zamontowany na drzwiach szafy. Wszystkie wejścia i część wyjść sterownika PLC, choć nieużywane, zostały wyprowadzone na złączki szynowe (ZUGi). Taka konfiguracja pozwala na elastyczną rozbudowę systemu w przyszłości bez konieczności większej modyfikacji struktury samej szafy sterowniczej. Do switcha sieciowego podłączono wszystkie urządzenia korzystające z Ethernet, w tym sterownik PLC, panel IPC i czujnik wizyjny. Aby umożliwić dostęp do urządzenia, zdalnie podłączono go też do lokalnej sieci.

W początkowej wersji układu odpowietrzanie badanego materiału realizowano za pomocą dwóch zaworów. Pomimo zastosowania tego rozwiązania, duża ilość powietrza pozostawała uwięziona w materiale, co skutkowało błędnymi wynikami pomiarowymi. Problemem była złożoność systemu oraz niewystarczająca efektywność odpowietrzania. W drugiej, ulepszonej, wersji wprowadzono uproszczony system odpowietrzania z zastosowaniem pojedynczego odpowietrznika. To zmodyfikowane rozwiązanie znacząco poprawiło stabilność pomiarową, eliminując różnice pomiędzy badanymi próbkami i uprościło konstrukcję całego układu, dzięki wyeliminowaniu potrzeby aktywnego sterowania wcześniejszymi zaworami. Dzięki temu nie tylko zwiększono precyzję pomiarów, ale także zredukowano ryzyko błędów operacyjnych wynikających ze złożoności sterowania zaworami. Przed rozpoczęciem procesu pomiarowego, ale z włączonym przepływem cieczy, operator musi ustawić odpowiednie ciśnienie na reduktorze ciśnienia i przepływ cieczy za pomocą rotametu. Wartości te są dostosowane do średnicy i typu osłonki, w celu zapewnienia właściwych oraz jednolitych warunków w trakcie pomiaru.

Podczas pomiaru punkty pomiarowe zbierane są co 200 ms. Zapis ich rozpoczyna się dopiero wtedy, gdy ciśnienie wewnątrz materiału przekroczy wartość 6 mbar i trwa aż do momentu osiągnięcia maksymalnego ciśnienia, które jest rejestrowane jako najwyższy punkt w całym procesie. Proces pomiaru obejmuje dwa główne tryby: ciągły i przerywany. Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru, operator dokonuje wyboru trybu pomiaru: ciągłego lub przerywanego. W przypadku trybu przerywanego, operator musi dodatkowo określić wartość ciśnienia, przy którym pomiar ma zostać zatrzymany i czas trwania przerwy. Dodatkowo, operator musi wybrać kolor testowanego materiału i w przypadku wyboru jednej z opcji wymienić tło. Po uruchomieniu trybu ciągłego, materiał stopniowo wypełnia się wodą. W momencie, gdy ciśnienie wewnątrz materiału przekroczy wartość 6 mbar, rozpoczyna się automatyczne zbieranie danych. Dane te obejmują pomiary ciśnienia i średnicy materiału, rejestrowane co 200 ms. W miarę narastania ciśnienia, materiał zaczyna tracić swoją wytrzymałość, co w rezultacie prowadzi do jego pęknięcia. Pęknięcie materiału następuje bezpośrednio w wyniku przekroczenia jego wytrzymałości na ciśnienie. Pomiar przerywany jest bardziej złożony. Po uruchomieniu, materiał również stopniowo wypełnia się wodą, a po przekroczeniu progu ciśnienia 6 mbar, rozpoczyna się zbieranie danych. Gdy ciśnienie osiągnie wcześniej zdefiniowaną wartość, dopływ wody zostaje automatycznie odcięty na określony przez operatora czas. Po upływie tego czasu, dopływ wody zostaje wznowiony, co prowadzi do dalszego wzrostu ciśnienia i ostatecznego pęknięcia materiału, o ile nie nastąpiło ono wcześniej.

Dla uproszczenia opisu przyjęto pięć charakterystycznych punktów pomiaru:

- T1 – uruchomienie pomiaru.
- T2 – moment, w którym ciśnienie zaczyna narastać.
- T3 – uruchomienie przerwy (pomiar przerywany).
- T4 – zakończenie przerwy (pomiar przerywany).
- T5 – koniec pomiaru, pęknięcie materiału.



Rysunek 1. Pomiar przerywany z oznaczonymi punktami charakterystycznymi.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 1 przedstawia ukończony pomiar przerywany wraz z naniesionymi punktami charakterystycznymi dla pomiarów. Urządzenie po zakończeniu pomiaru zachowuje dane zebrane pomiędzy punktami T2 i T5. Pozostałe punkty od T1 do T2 i kilka punktów pomiarowych zebranych po T5 nie zostaje zachowana stąd brak uiszczenia oznaczenia T1 na rysunku 14. Urządzenie zbiera dane o ciśnieniu cieczy i średnicy osłonki. Na podstawie tych danych obliczane są inne wielkości, takie jak:

- Maksymalne ciśnienie [mbar] – maksymalne ciśnienie odnotowane podczas pomiaru.
- Maksymalna średnica odnotowana podczas pomiaru [mm] 29
- Czas rozmakania [s] – czas pomiędzy T2 i T5.
- Czas trwania [s] – czas pomiędzy T1 i T5.
- ΔYW S-K – różnica średnicy pomiędzy punktami T2 i T5.

Poniższe parametry tyczą się tylko pomiaru przerywanego:

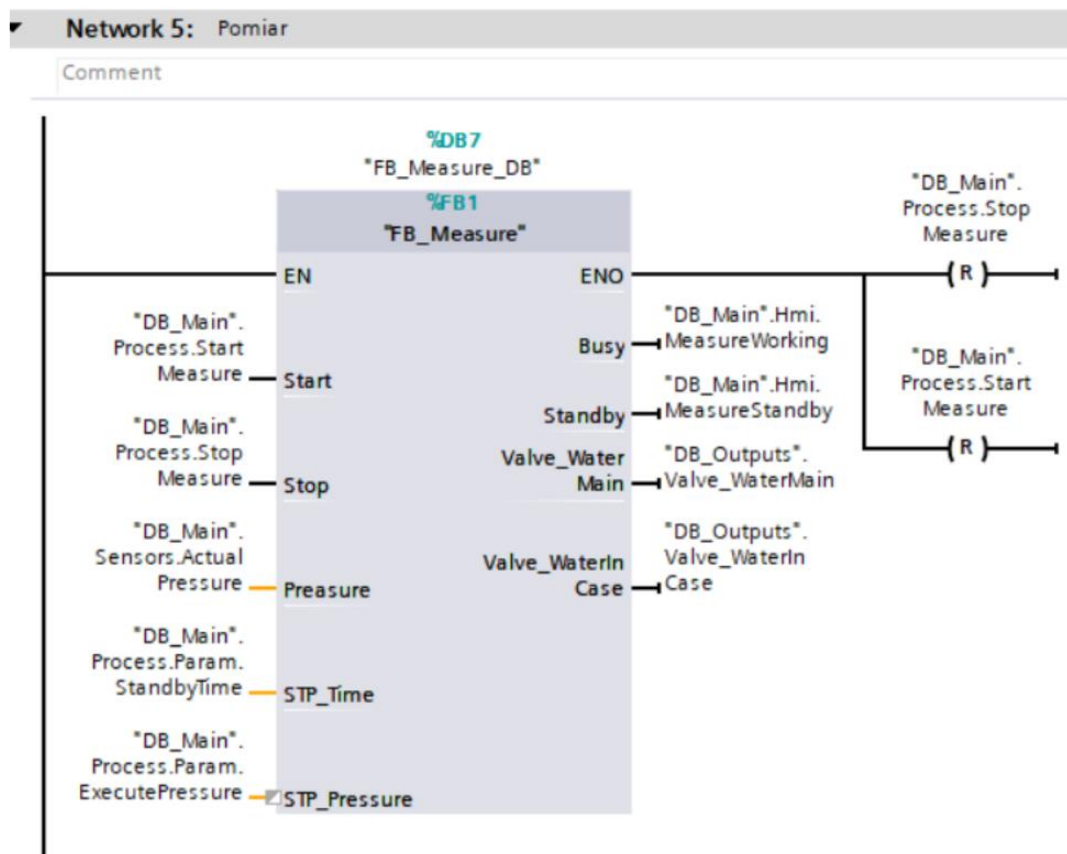
- ΔYP [mbar] – różnica ciśnienia pomiędzy T3 i T4.
- ΔYW [mm] – różnica średnicy pomiędzy T3 i T4.
- Czas przestoju [s] – czas pomiędzy T3 i T4.
- Ciśnienie przestoju [mbar] – ciśnienie, w którym została uruchomiona przerwa.

W pierwszej wersji urządzenia sterownik PLC miał za zadanie przetwarzać dane z czujnika wizyjnego, sygnał z czujnika ciśnienia i sterować czterema zaworami. Miał też odpowiadać za przeprowadzenie, wstępną analizę, gromadzenie danych aktualnie realizowanego pomiaru i komunikację z IPC. W ostatecznej wersji urządzenia część wymienionych operacji została przeniesiona na IPC. Zmienił się też sposób odpowietrzania materiału, co zmniejszyło liczbę potrzebnych elektrozaworów, co z kolei spowodowało zmniejszenie potrzebnych wyjść w sterowniku. Ostatecznie sterownik PLC odpowiada za kontrolę pomiaru (uruchomienie, zakończenie, nadzór nad pomiarem), przetwarzanie danych z czujnika ciśnienia, komunikację z IPC i sterowanie dwoma zaworami.

Z uwagi na brak wbudowanego wejścia analogowego prądowego w sterowniku, czujnik ciśnienia został podłączony do wejścia analogowego napięciowego, co pozwoliło obniżyć koszty związane z zakupem dodatkowego modułu. Elektrozawory zostały bezpośrednio podłączone do wyjść tranzystorowych sterownika. Każdy elektrozawór jest wyposażony w kontrolkę sygnalizującą jego otwarcie i element przeciwprzepięciowy, który redukuje przepięcia mogące uszkodzić wyjścia sterownika. Dioda sygnalizacyjna i element przeciwprzepięciowy są zintegrowane w jednym elemencie.

Implementacja obiektu kontrolującego pomiar FB_Measure została ukazana na rysunku 2. Blok ten został zaimplementowany w bloku Main [OB1] w języku LAD. Sam obiekt został opracowany w języku SCL. Opis wejść i wyjść bloku FB_Measure:

- Start – sygnał uruchomienia pomiaru.
- Stop – sygnał zatrzymania pomiaru.
- Pressure – wartość ciśnienia cieczy [mbar].
- STP_Time – pomiar przerywany, wartość czasu przestoju.
- STP_Pressure – pomiar przerywany, wartość ciśnienia wyzwolenia.
- Busy – sygnał trwania pomiaru.
- Standby – pomiar przerywany, sygnał chwilowego zatrzymania pomiaru.
- Valve_WaterMain – sygnał dla zaworu V1.
- Valve_WaterInCase – sygnał dla zaworu V2.



Rysunek 2. Network zawierający obiekt kontrolujący przebieg pomiaru.

Źródło: opracowanie własne.

System sterowania oparty na komputerze przemysłowym (IPC) z systemem Ubuntu 22.04 LTSC wykorzystuje konteneryzację przez Dockera. Wszystkie elementy systemu zostały skonteneryzowane. Pełnią one następujące funkcje:

1. MariaDB – kontener zawierający relacyjną bazę danych przechowującą dane aplikacji. Do wymiany danych pomiędzy bazą danych a główną aplikacją (Rozmakanie) wykorzystany jest ORM Sequelize.
2. NGINX (LOCAL) – kontener zawierający serwer WWW obsługujący lokalny interfejs użytkownika, dostępny tylko na panelu IPC. Przeglądarka ładuje pliki interfejsu użytkownika (np. HTML, CSS, JavaScript) bezpośrednio z serwera NGINX, który obsługuje je jako statyczne zasoby. Wizualizacja uruchomiona w przeglądarce wykorzystuje do wymiany danych z aplikacją Rozmakanie protokoły takie jak websocket i http.
3. NGINX (REMOTE) – kontener zawierający serwer WWW obsługujący zdalny interfejs użytkownika, dostępny z każdej przeglądarki mającej dostęp do urządzenia. Przeglądarka ładuje pliki interfejsu użytkownika bezpośrednio z serwera NGINX, który obsługuje je jako statyczne zasoby. Wizualizacja uruchomiona w przeglądarce wykorzystuje do wymiany danych z aplikacją Rozmakanie wykorzystuje protokół http.
4. Rozmakanie – kontener zawierający główną aplikację która napisana jest w języku JavaScript na platformę Node.js. Aplikacja zbiera dane bezpośrednio z czujnika wizyjnego przy pomocy protokołu TCP. Dane między aplikacją a PLC przesyłane są przy pomocy protokołów TCP i UDP.

Jako serwer WWW do obsługi wizualizacji zewnętrznej i lokalnej wybrano NGINX, ze względu na jego popularność i łatwość konfiguracji. Warto podkreślić, że wizualizacja to jednostronicowa aplikacja internetowa (SPA, ang. *Single Page Application*). Zasoby statyczne aplikacji, takie jak pliki HTML, CSS i JavaScript, są pobierane z serwera WWW przez przeglądarkę internetową. Pozostałe elementy dynamiczne, jak np. informacje o sesjach i pomiarach, są serwowane przez serwer http, zaimplementowany w aplikacji Rozmaganie.

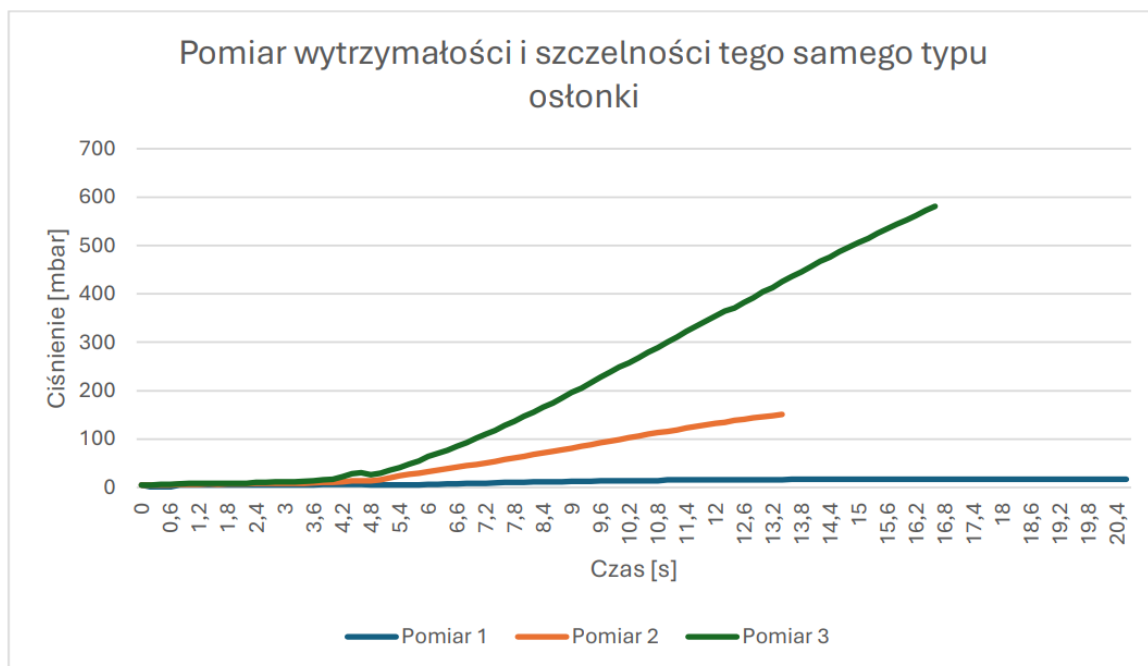
Proces odczytu danych z czujnika wizyjnego odbywa się za pomocą protokołu TCP/IP. Obsługą tego procesu zajmuje się obiekt CameraController, który dziedziczy obiekt CameraConnection. Pozwala on na asynchroniczne wysyłanie i odbieranie zapytań między aplikacją a czujnikiem wizyjnym. Czujnik obsługuje zapytania takie jak uruchomienie wyzwalacza, zmiana aplikacji czy pobranie ostatniego zdjęcia. Podczas cyklu pomiarowego aplikacja cyklicznie wysyła komendy aktywujące wyzwalacz. Po wysłaniu polecenia aplikacja oczekuje odpowiedzi od czujnika. Otrzymany pakiet danych jest następnie weryfikowany i parsowany. Wyodrębnione dane o obszarze pikseli są konwertowane na jednostki rzeczywiste (milimetry) i zwracane do aplikacji w celu dalszej analizy.

W programie istnieje możliwość eksportowania pomiarów i sesji pomiarowych do arkusza kalkulacyjnego (plik z rozszerzeniem .xlsx). Rozszerza to możliwości analizy danych

Na rysunku 3 ukazano wyniki trzech pomiarów, obrazujących różne aspekty funkcjonalności przy zastosowaniu tego pomiaru:

- Pomiar 1 – czas trwania wyniósł 20,6 sekundy, a maksymalne osiągnięte ciśnienie – 17 mbar. Stwierdzono nieszczelność osłonki, co wynikało z niskiego wzrostu ciśnienia w trakcie pomiaru. Dodatkowo podczas napełniania było widać wypływającą wodę z osłonki.
- Pomiar 2 – czas trwania pomiaru wyniósł 13,4 sekundy, a maksymalne osiągnięte ciśnienie to 151 mbar. Wynik ten jest zgodny z wymaganiami dla tego typu osłonki, wskazując na jej prawidłowe właściwości w zakresie trwałości i szczelności.

W oprogramowaniu zastosowano nowoczesne oraz powszechnie używane technologie, które zapewniły efektywność wdrożenia, a także elastyczność systemu w środowisku produkcyjnym. Konteneryzacja aplikacji umożliwiła szybkie i niezawodne uruchamianie oprogramowania w różnych środowiskach, minimalizując problemy związane z konfiguracją. Technologia aplikacji webowych, oparta o Angular i Node.js, pozwoliła na stworzenie aplikacji dostępnej z dowolnego urządzenia obsługującego przeglądarkę internetową. Dzięki wykorzystaniu biblioteki Bootstrap wizualizacja interfejsu jest skalowalna i dostosowuje się automatycznie do rozmiaru wyświetlacza urządzenia, eliminując potrzebę tworzenia dedykowanych komponentów od podstaw. Magazynowanie danych oparte o powszechnie stosowaną technologię bazodanową zapewniło wysoką wydajność, niezawodność i łatwość integracji z innymi systemami. Kluczowym elementem rozwiązania była integracja aplikacji działającej na IPC z kontrolerem PLC. Wykorzystanie protokołów sieciowych, takich jak TCP/IP czy UDP, usprawniło wymianę danych, zapewniając niezawodną komunikację pomiędzy urządzeniami i umożliwiając synchronizację danych.



Rysunek 3. Wykres przedstawiający trzy pomiary tego samego typu osłonki.

Źródło: opracowanie własne.

Oprogramowanie i samo urządzenie pozostawia jeszcze dużo miejsca do przyszłego rozwoju. W dalszej perspektywie można zautomatyzować ocenę wyników poprzez zastosowanie sztucznej inteligencji wytrenowanej na obecnych zbiorach danych. Możliwa jest także integracja z obecnymi systemami zarządzania produkcją i dodanie funkcji automatycznego generowania raportów. Z powodu wymiany czujnika wizyjnego na nowszy model istnieje możliwość zwiększenia rozdzielczości pomiarów. Przeprowadzone testy działania urządzenia pokazały, że urządzenie jest w stanie wykryć nieprawidłowości w badanych partiach osłonki. Poprzez wykrycie ciśnienia, przy którym osłonka pękła lub pojawiły się w niej dziury, da się określić, czy osłonka będzie w stanie przetrwać etap nadziewania i obróbki termicznej. Dzięki określeniu minimalnej oraz maksymalnej średnicy oraz ich różnic można określić również, czy dana partia spełnia wymogi w zakresie kalibru.

ROZDZIAŁ 4

Głowica urabiająca do wierceń płuczkowych

(*David Kotlarski¹, Marcin Dudek²*)

Prężnie postępująca urbanizacja miast jest przyczyną modernizacji i budowy nowych struktur wszelkiego rodzaju instalacji. W znacznym stopniu przyczyniła się do zwiększonej popularności techniki bezwykopowej, która stała się alternatywą dla tradycyjnych wykopów. Bardzo często prace budowlane lub modernizacyjne muszą zostać wykonane na ruchliwych skrzyżowaniach drogowych, objętych ochroną terenów zielonych, pod ciekami wodnymi, w centrach miast niejednokrotnie podlegających pod konserwację zabytków i strategicznych obszarach, których wyłączenie z użytku mogłoby doprowadzić do paraliżu znacznych obszarów miasta. Wykorzystanie metody odwiertów sterowanych w tych obszarach jest zdecydowanie najsensowniejsze. Wykonanie odwiertu jest możliwe dzięki wbudowanemu nadajnikowi umiejscowionemu za częścią roboczą głowicy urabiającej, który pozwala na precyzyjne sterowanie oraz naprowadzanie podczas wiercenia. Zaletą tej techniki jest także stosunkowo krótki czas realizacji wykonania instalacji w porównaniu do metod tradycyjnych. Pozwala także uniknąć ingerencji w wierzchnie warstwy infrastruktury, co przyczynia się do ograniczenia kosztów całej inwestycji. Wykonanie odwiertu tą innowacyjną metodą polega na wprowadzeniu przez wykop punktowy pod powierzchnię ziemi głowicy urabiającej. Bezwykopowa metoda odwiertów jest wykorzystywana przy realizacji instalacji hydraulicznych, elektrycznych, gazowych oraz teleinformatycznych.

Podstawowym elementem używanym podczas zwiercania skały jest narzędzie wierzące, świder lub koronka rdzeniowa. W zależności od struktury podłoża i używanej technologii dobierane są odpowiednie narzędzia zapewniające optymalną efektywność pracy. Ciągły rozwój technologii, wykorzystywanie nowych materiałów i poprawa jakości produkcji spowodowały zmianę konstrukcji świdrow. Przełożyło się to na poprawę wydajności i wzrostu prędkości wiercenia. Jest to szczególnie ważne podczas wykonywania głębokich odwiertów kierunkowych. Odpowiednia konstrukcja oraz przeznaczenie do określonego typu skały zapewnia zmniejszenie całkowitych kosztów i komplikacji podczas odwiertu. Świdry i koronki rdzeniowe różniące się ze względu na sposób zwiercania skały.

W ramach niniejszego rozdziału zaproponowano projekt koncepcyjny głowicy urabiającej do wierceń płuczkowych z wymiennymi ostrzami osadzonymi w korpusie. Głównym założeniem jest opracowanie wiertła wielokrotnego użytku z możliwością regeneracji, bez posiadania specjalistycznych narzędzi i urządzeń. Wymiana podzespołów koncepcyjnej głowicy nie będzie skomplikowaną czynnością, operator z łatwością będzie mógł dokonać wymiany zużytych podzespołów. Generalnie zaletą projektowanej konstrukcji będzie szybka i intuicyjna zamiana modułowych ostrzy. Możliwość wymiany standardowych elementów urabiających przez personel obsługujący urządzenie wierzące pozwoli na skrócenie czasu wykonania odwiertu, a zarazem obniży koszty projektu.

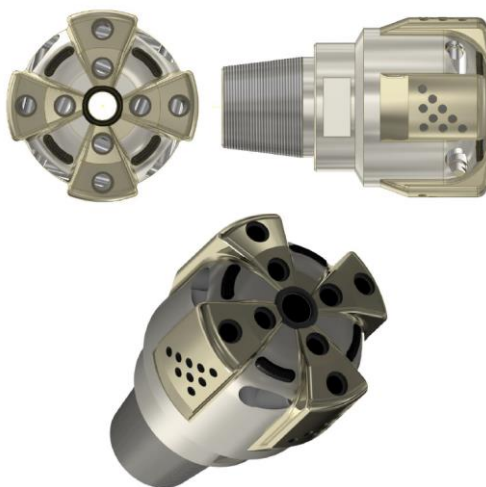
¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0002-2664-6075.

² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

Projektowana głowica przewidziana jest do odwiertów pod pionowe kolektory do gruntowych pomp ciepła oraz do odwiertów studni głębinowych w miękkich i średnich formacjach. Będzie posiadać średnicę nominalną $\varnothing 203.2\text{mm}$ (8"). Głównym elementem jest jednolity korpus z odkuwki ze stali chromowo-niklowo-molibdenowej 34CrNiMo6 poddany obróbce mechanicznej. Budowa korpusu koncepcyjnej głowicy zbliżona jest konstrukcyjnie do świdra PDC. Zapewnia to zwiększenie wytrzymałości konstrukcji podczas zwiercania gruntu. O wyborze stali na korpus zdecydowały jej własności materiałowe. Charakteryzuje się większą wytrzymałością od stali konstrukcyjnych wyższej jakości, a także posiada większą odporność na korozję, co jest atutem przy budowie konstrukcji mających kontakt z cieczą. W korpusie będą osadzone wymienne ostrza z stali NC10 zakończone węglikiem wolframu, które po zużyciu lub uszkodzeniu będzie można z powodzeniem wymieniać na stanowisku operatorskim bez użycia skomplikowanych narzędzi. Ostrza te będą miały możliwość swobodnie obracać się wokół własnej osi co zapewni im równomierne zużycie podczas pracy. Mocowanie ostrzy będzie możliwe przy pomocy wyprofilowanych kołków zabezpieczonych przed wysunięciem pierścieniami Segera. Wstępnie zabezpieczenie miało zostać wykonane w formie gwintowanego trzpienia osadzonego w otworze gwintowanym. Po analizie Autor zrezygnował z takiego rozwiązania, gdyż na skutek wymiany ostrzy i zabrudzeń materiałem urabiającym gwinty mogą ulec deformacji. Zdeformowany gwint nie będzie spełniał swojego zadania. W przypadku zabezpieczenia pierścieniem rozprężnym uszkodzenie kanałka pod Seger można w prosty sposób zregenerować lub zabezpieczenie wykonać w innej pozycji. Założonym materiałem na kołki zabezpieczające ostrza jest stal S355, cechująca się wysoką wytrzymałością i podatnością na obróbkę skrawaniem. Korpus będzie posiadał elementy zmniejszające tendencje na ścieranie. Na zewnętrznej stronie korpusu wykonane zostaną zbrojenia w formie słupków węglkowych. Zapewni to utrzymywanie średnicy nominalnej otworu. Powierzchnia korpusu szczególnie narażona na erozję wzmocniona będzie napoiną z domieszką węglków wolframu. Połączenie głowicy z urządzeniem wiercącym będzie możliwe przy pomocy standardu Amerykańskiego Instytutu Naftowego API 4 1/2 REG (American Petroleum Institute). Elementami dodatkowymi będą wymienne ostrza, zabezpieczenia ostrzy oraz słupki z węgla wolframu.

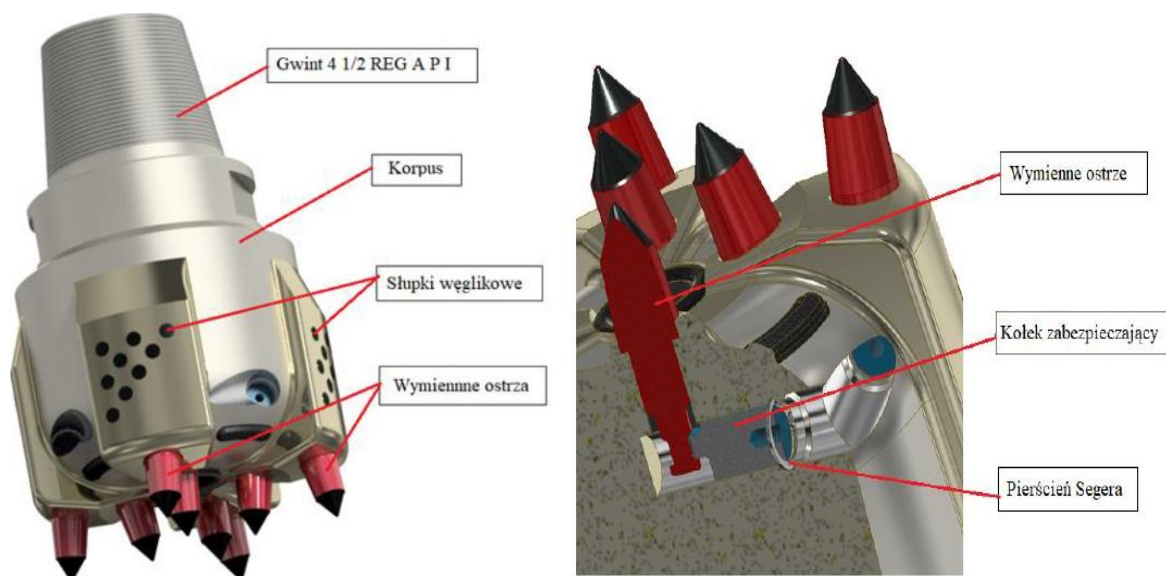
Korpus jest głównym elementem konstrukcyjnym głowicy urabiającej, dlatego musi być odporny na wszelkie obciążenia. Wybrany materiał na korpus jest stal chromowo-niklowo-molibdenowa 34CrNiMo6. Jest to stal konstrukcyjna stosowana w przemyśle na wykonanie bardzo obciążonych części maszyn narażonych na skręcanie, drgania mechaniczne i uderzenia. Posiada większą wytrzymałość w porównaniu z stalami konstrukcyjnymi. Wadą tego gatunku stali jest słaba spawalność. Korpus koncepcyjnej głowicy zostanie wykonany z jednolitego materiału, więc słaba spawalność nie będzie miała znaczenia. Natomiast istnieje możliwość spawania po zastosowaniu operacji wyżarzania normalizującego w celu uzyskania jednolitej i drobnoziarnistej struktury metalu. Zalecane jest również wyżarzanie odprężające po spawaniu w temperaturze $680-720^{\circ}\text{C}$ w celu zredukowania naprężeń spawalniczych wewnątrz detalu. Kucie odkuwek ze stali 34HNM powinno być wykonywane w temperaturze $850-1050^{\circ}\text{C}$. Aby zwiększyć odporność na ścieranie, wytrzymałość i sprężystość wyrobu, korpus należy poddać obróbce cieplnej, a dokładnie hartowaniu w temperaturze $830-860^{\circ}\text{C}$.

Do obliczeń wytrzymałościowych przyjęto: granicę plastyczności $Re = 980 \text{ MPa}$, wytrzymałość na rozciąganie $Rm = 820 \text{ MPa}$ i Moduł Younga $E = 200 \text{ GPa}$. Wygląd korpusu przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Model korpusu koncepcyjnej głowicy urabiającej.
Źródło: opracowanie własne.

Głównym elementem głowicy urabiającej jest monolityczny korpus z gwintem $4 \frac{1}{2} \text{ REG}$. Na zewnętrznej średnicy płetw osadzone są słupki węglkowe służące do kalibracji wierzonego otworu. Wymienne ostrza posiadają zakończenia w postaci węgliku spiekanego. Osadzone są w otworach korpusu z pogłębieniem walcowym. Ostrza są zabezpieczone przed wysunięciem przy pomocy wyprofilowanych kołków, unieruchomionych pierścieniami rozprężnymi. Dobrane zostały Pierścienie Segera W21x1, według normy DIN 472. Na rysunku 2 ukazano kompletną wizualizację głowicy urabiającej wraz z metodą mocowania wymiennego ostrza w gnieździe korpusu.



Rysunek 2. Model korpusu koncepcyjnej głowicy urabiającej.
Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie elementów wchodzących w skład głowicy urabiającej ukazano na rysunku 3. W skład dodatkowych podzespołów wchodzi wymienne ostrza, zabezpieczenia ostrzy, słupki węglkowe i pierścienie Segera. Od każdego z elementów wymagane są inne właściwości, dlatego wykonane zostały z różnych materiałów. Wymienne ostrza wykonano z stali odpornej na ścieranie NC10 z zakończeniem kompozytowym WC-Co, składającym się z twardych ziaren węgla wolframu i kobaltu pełniącego funkcję spoiwa. Na zabezpieczenie ostrza dobrano stal S355 o wysokiej wytrzymałości. Słupki zbudowane są z węglków spiekanych WC-Co. Seger wykonany jest z stali sprężynowej.

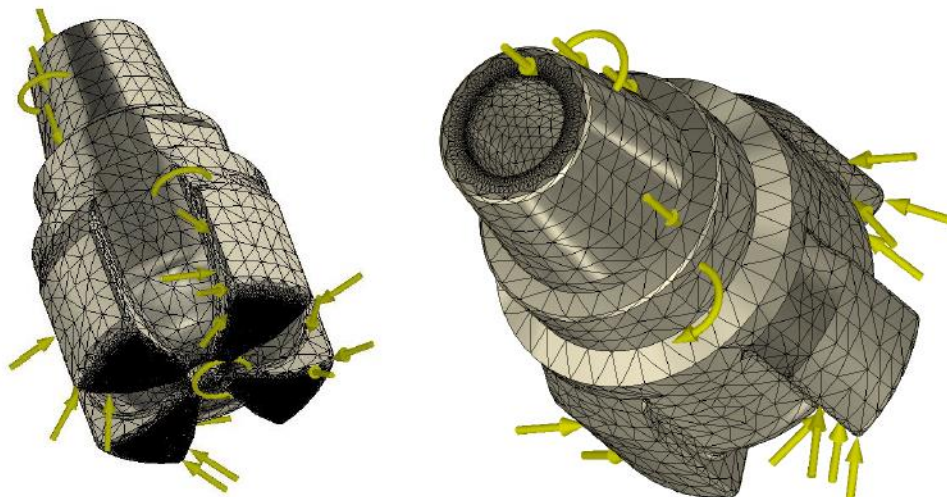


Rysunek 3. Model korpusu koncepcyjnej głowicy urabiającej.
Źródło: opracowanie własne.

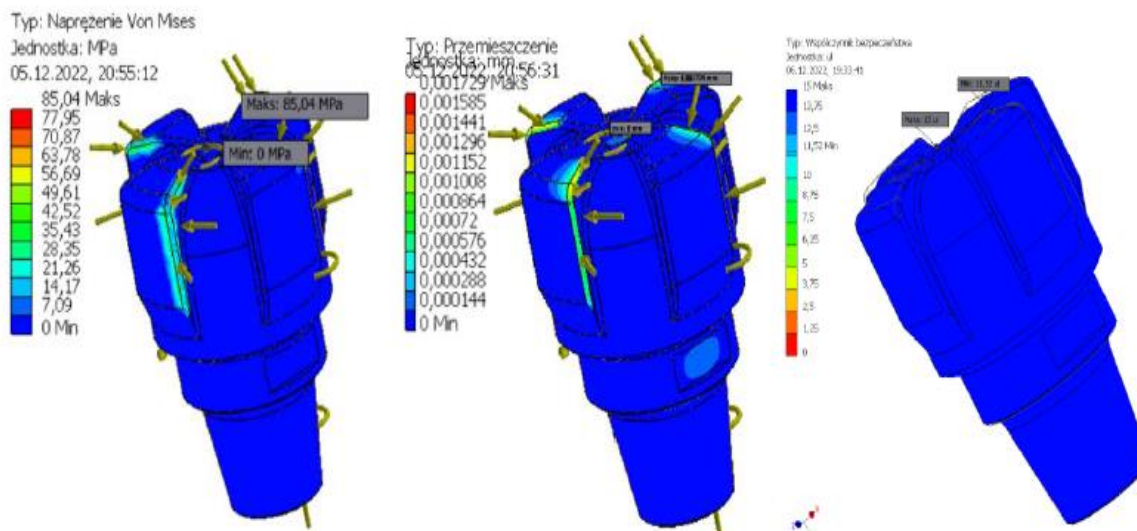
Analiza MES (Metoda Elementów Skończonych) została przeprowadzona w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional 2020, w celu ustalania naprężeń dopuszczalnych. Do wykonania symulacji wykorzystano uproszczony model korpusu głowicy urabiającej. W pierwszej fazie przypisano cechy materiałowe badanego modelu. Do statycznej analizy wykorzystane zostały główne właściwości fizyczne stali 34CrNiMo6. Granica plastyczności wynosząca 980 MPa, wytrzymałość na rozciąganie równa 820 MPa i Moduł Younga, którego wartość wynosi 200 GPa. Następnym etapem było nadanie wiązań pomiędzy elementami korpusu i wyznaczono układ oddziaływujących sił. Na połączenie gwintowe oddziałuje główna osiowa siła nacisku wynosząca 63,743 kN. Moment obrotowy przekazywany przez urządzenie wiertnicze wynosi 1560 Nm. Otwór centralny narażony będzie na ciśnienie przepływającej płuczki wynoszące 2,6 MPa. Na płetwy korpusu oddziałują siły wynoszące 30kN.

Średnia wielkość elementu skończonego została ustalona na 0,05mm, zaś minimalna wielkość elementu skończonego została zdefiniowana na 0,02mm. W celu podwyższenia jakości wyników dla naprężeń w obszarze lokalnym został ręcznie dopasowany rozmiar siatki wynoszący 0,01 mm, wykorzystując funkcje „Kontrola siatki lokalnej”. Po odświeżeniu struktury siatki liczba węzłów wyniosła 541014, a liczba wszystkich elementów skończonych 325948. Program Inventor zawiera tylko jeden rodzaj elementów skończonych opisujących model bryłowy z możliwością edycji rozmiaru elementów. Rysunek 4 przedstawia model korpusu z nałożoną siatką numeryczną.

Według Hipotezy Hubera – Misesa – Hencky’ego naprężenia zredukowane wynosiły 85,04 MPa. Granica plastyczności dla stali 34CrNiMo6 wynosiła 980 MPa, więc z punktu widzenia naprężeń mieści się w założeniach. Maksymalne przemieszczenie pod wpływem działających sił wyniosło 0,0017 mm. Minimalny współczynnik bezpieczeństwa wyniósł 11,52 – jest to wartość akceptowalna. Na rysunku 5 zwizualizowano wyniki analizy MES.



Rysunek 4. Model korpusu koncepcyjnej z nałożoną siatką numeryczną.
Źródło: opracowanie własne.

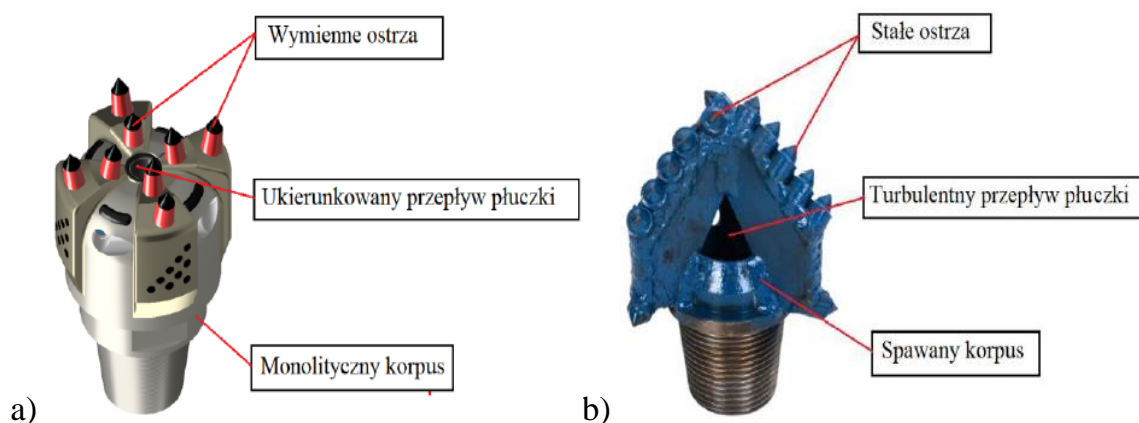


Rysunek 5. Wyniki analizy MES.
Źródło: opracowanie własne.

Koncepcyjna głowica została opracowana do wykonywania odwiertów studni głębinowych i otworów pod pionowe kolektory do gruntowych pomp ciepła w miękkich i średnich formacjach skalnych. W porównaniu została ujęta handlowa głowica firmy MP – TECHNIK, służąca do wykonywania aplikacji wymienionych powyżej. Na rysunku 6 przedstawiono główne różnice konstrukcyjne porównywanych głowic.

Zaletą koncepcyjnej głowicy do wierceń płuczkowych jest jednolity korpus wykonany z odkuwki. Zwarta konstrukcja przyczyni się do większych osiągnięć oraz mniejszego zużycia podczas odwiertu. W proponowanym rozwiązaniu występuje możliwość szybkiej wymiany ostrzy w roboczych lub warsztatowych warunkach. Wymiana części skrawających pozwala na przetestowanie innych ostrzy posiadających odmienną geometrie.

Posiadając jeden korpus, można eksperymentować z parametrami wiercenia w różnych typach formacji skalnych, nieuwzględnionych w założeniu. Istnieje też możliwość ustalenia przepływu strugi cieczy przez zastosowanie odpowiedniej końcówki dyszy w celu optymalnego wypłukiwania urobku.



Rysunek 6. Główne różnice konstrukcyjne głowic, a) koncepcyjna, b) handlowa.
Źródło: opracowanie własne.

Standardowe głowice używane do wymienionych aplikacji są przeważnie spawane z kilku elementów. Jeżeli występują wady w spoinie, istnieje podwyższone ryzyko wystąpienia pęknięć na połączeniach spawanych, co może przyczynić się do utracenia świdra w wierconym otworze. Wadą takiej konstrukcji jest też turbulentny przepływ płuczki przez kanał doprowadzający ciecz. Skutkiem tego jest powstawanie erozji na korpusie głowicy. W ogólnodostępnym typie świdra ostrza zużywają się znacznie szybciej, gdyż zamocowane są sztywno do korpusu i nie mogą obracać się wokół własnej osi. W przypadku proponowanego rozwiązania ostrza mogą się swobodnie obracać wokół własnej osi, równomiernie się zużywając. W koncepcyjnej głowicy zastosowano zbrojenie korpusu w formie węglików spiekanych, pozwalających na utrzymywanie średnicy otworu podczas wykonywania odwiertu. Wersja tradycyjna nie posiada takiego wzmocnienia. Wyposażona jest natomiast w dodatkowe ostrza kalibrujące. Jeżeli końcówki ostrzy kalibrujących zostaną przytępione, średnica wierconego otworu niekorzystnie zacznie się zmniejszać.

Do wad koncepcyjnej głowicy można zaliczyć gorsze prowadzenie wiertła podczas rozpoczynania odwiertu w porównaniu z handlowym świdrem. Wiąże się to z profilem korpusu. Handlowa głowica jest w kształcie stożka, więc rozpoczęcie odwiertu jest ułatwione. Wadą koncepcyjnego rozwiązania na tle handlowej głowicy jest również cena, która będzie znacznie wyższa niż w przypadku standardowej głowicy. Odmienna technologia wykonania, złożoność procesu produkcyjnego i zastosowane komponenty lepszej jakości zdecydowanie wpływają na wyższe koszty wyprodukowania koncepcyjnej głowicy urabiającej. Na rysunku 7 ukazano porównanie handlowej głowicy urabiającej z projektową głowicą.

<p>Koncepcyjna głowica</p> 	<p>VS</p>	<p>Handlowa głowica</p> 
<p>Jednolity korpus - wyższa wytrzymałość</p>	<p>Wytrzymałość zmęczeniowa</p>	<p>Spawany korpus - niższa wytrzymałość</p>
<p>Wymiana jednego ostrza około 5 minut</p>	<p>Czas wymiany ostrzy urabiających</p>	<p>Brak możliwości wymiany lub wymiana u producenta</p>
<p>Wymiana uszkodzonego ostrza, sprawdzenie pozostałych. Krótki czas przestoju urządzenia</p>	<p>Utracenie ostrza urabiającego. Czas przestoju urządzenia wiertniczego</p>	<p>Wymiana całej głowicy urabiającej. Demontaż głowicy zwiększa czas przestoju urządzenia.</p>
<p>Wyższa</p>	<p>Cena jednostkowa</p>	<p>Niższa</p>
<p>Niższa</p>	<p>Liczba zużytych głowic urabiających podczas odwiertu</p>	<p>Wyższa</p>
<p>Niższa</p>	<p>Składowa kosztów projektu, przeznaczona na głowice urabiające</p>	<p>Wyższa</p>

Rysunek 7. Porównanie cech handlowej głowicy urabiającej z głowicą projektowaną.
Źródło: opracowanie własne.

ROZDZIAŁ 5

Urządzenie stolarskie do strugania i nadawania grubości materiałom drewnianym (*Dariusz Smolarski, Przemysław Ogorzałek*)¹

Wyrówniarko-grubościówka to uniwersalne urządzenie łączące w sobie dwa typy maszyn stolarskich: strugarkę wyrówniarkę oraz strugarkę grubościówkę, które są podstawowym wyposażeniem warsztatu stolarskiego. Strugarki zastąpiły tradycyjne strugi ręczne i pozwoliły na znaczne zwiększenie wydajności pracy oraz zwiększenie jej precyzji. Strugarka wyrówniarka służy do wyrównania i wygładzenia nierównych, chropowatych oraz zwichrowanych powierzchni drewna litego bądź też materiału drewnopodobnego. Strugarka grubościówka umożliwia obróbkę wcześniej jednostronnie wyrównanego materiału na dokładną grubość. Połączenie dwóch urządzeń w jedno pozwala na wykonanie dwóch typów operacji obróbki drewna przy użyciu jednej obrabiarki i w związku z tym znaczną oszczędność miejsca w warsztacie. Budowa wyrówniarko-grubościówki jest mniej kosztowna niż budowa dwóch osobnych maszyn, ale zaprojektowanie jej może być o wiele bardziej skomplikowane ze względu na złożoność konstrukcji.

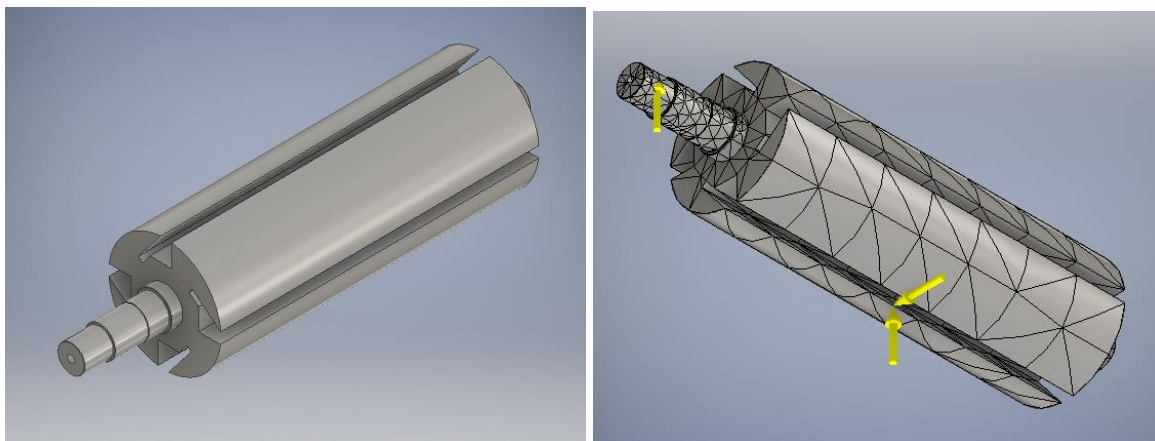
W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostanie autorskie urządzenie stolarskie do strugania i nadawania grubości drewnu, popularnie nazywane strugarko-grubościówką.

Konstrukcja została zaprojektowana i wykonana według następujących założeń:

- wykorzystanie istniejących podzespołów i materiałów z rynku wtórnego w celu minimalizacji ceny;
- wyposażenie strugarko-grubościówki w osłony i zabezpieczenia elektryczne, aby zapewnić bezpieczeństwo użytkownika;
- możliwie niski czas zmiany rodzaju obróbki pomiędzy wyrównywaniem a nadawaniem grubości;
- wykorzystanie osobnych silników do napędu wału nożowego i wałków posuwu;
- wał nożowy napędzany silnikiem trójfazowym asynchronicznym za pośrednictwem przekładni pasowej;
- wałki posuwu napędzane silnikiem jednofazowym sprzęgniętym z reduktorem ślimakowym oraz przekładnią łańcuchową;
- blat odbiorczy wyrówniarki regulowany za pomocą śrub mocujących;
- blat podawczy wyrówniarki regulowany poprzez mechanizm dźwigniowy;
- wysokość blatu grubościówki regulowana przy pomocy pionowo osadzonych śrub trapezowych napędzanych ręcznie.

W programie Autodesk Inventor wykonany został model wału nożowego (rysunek 1), który posłużył do analizy wytrzymałościowej.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

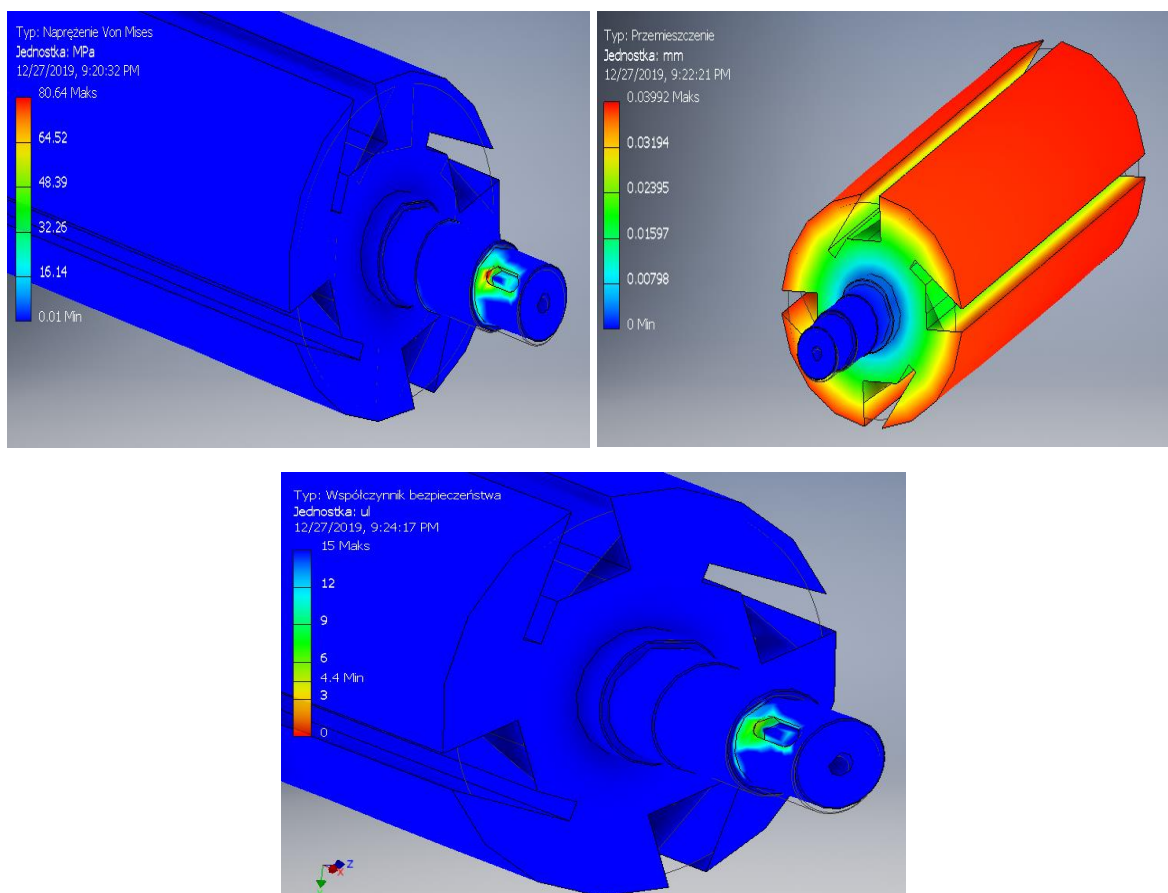


Rysunek 1. Model wału nożowego wraz siatką numeryczną.
Źródło: opracowanie własne.

Wyniki analizy wytrzymałościowej (rysunek 2) wykazały, że:

- maksymalna wartość naprężenia Von Mises wynosi 80,64 [MPa];
- maksymalne przemieszczenie wynosi 0,03992 [mm];
- minimalny współczynnik bezpieczeństwa wynosi 4,4.

Współczynnik bezpieczeństwa, który musi osiągnąć wał, powinien wynosić co najmniej 2, co zostało spełnione.



Rysunek 2. Wyniki analizy wytrzymałościowej.
Źródło: opracowanie własne.

Rama obrabiarki została wykonana według modelu wykonanego w programie Autodesk Inventor. Górna powierzchnia ramy została splanowana w celu zapewnienia poprawnego osadzenia łożysk wału nożowego. Stół grubościówki osadzony został na czterech śrubach trapezowych Tr30, z możliwością dokładnej regulacji jego wysokości. Śruby napędzane są pokrętelem za pośrednictwem przekładni łańcuchowej. Stół grubościówki wyposażony został we wskaźnik grubości strugania z możliwością jego kalibracji.

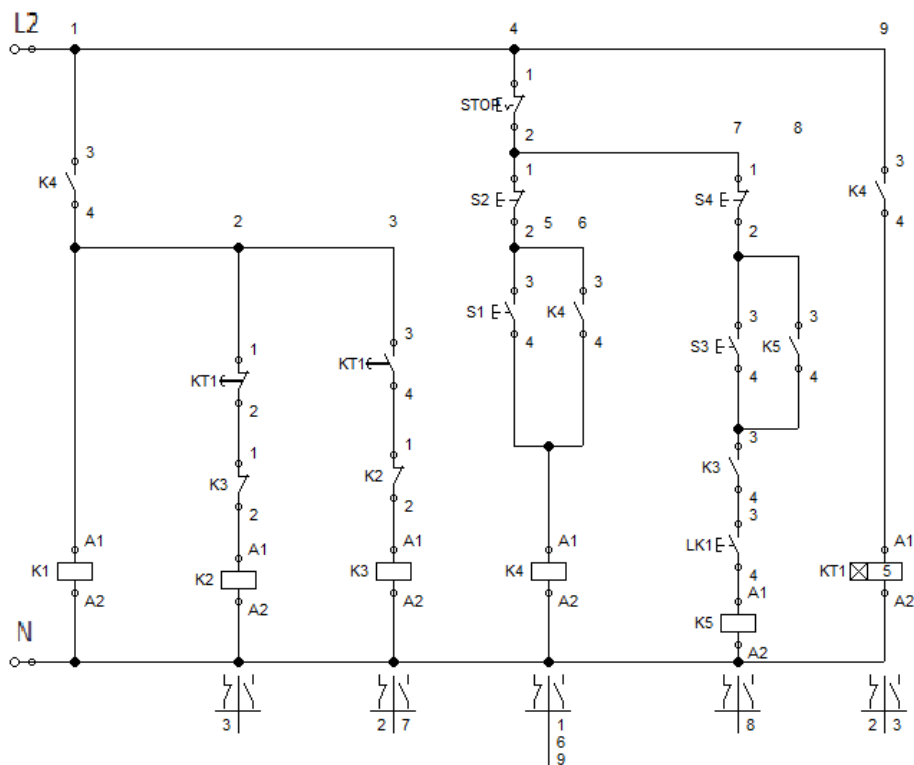
Na górnej powierzchni ramy zamontowany został wał nożowy i wałki posuwu. Wałki posuwu mają możliwość regulacji wysokości i siły docisku sprężyn. Wałek wejściowy posiada dodatkowe nacięcia, w celu zwiększenia przyczepności między jego powierzchnią a obrabianym materiałem.

Blat odbiorczy strugarki wyrówniarki przymocowany został do ramy w taki sposób, aby była możliwość jego podniesienia podczas pracy w trybie strugania na grubość. Ma to za zadanie ułatwić pracę na grubościówce i płynne przejście między pracą na strugarce w trybie wyrówniarki a grubościówki. Wysokość blatu odbiorczego regulowana jest przy pomocy śrub. Blat odbiorczy posiada zabezpieczenie przed niepożądanym zamknięciem podczas pracy, wraz z łącznikiem krańcowym, który sygnalizuje położenie blatu do układu sterowania. Blat podawczy wyrówniarki regulowany jest za pomocą mechanizmu dźwigniowego i ma możliwość regulacji grubości warstwy zestrugiwanej w zakresie 0-4 [mm] oraz blokadę położenia. Na powierzchni blatów wyrówniarki zamontowana została prowadnica z możliwością regulacji kąta prowadzenia materiału. Pozwala ona operatorowi na precyzyjne ustalenie kątów podczas obróbki.

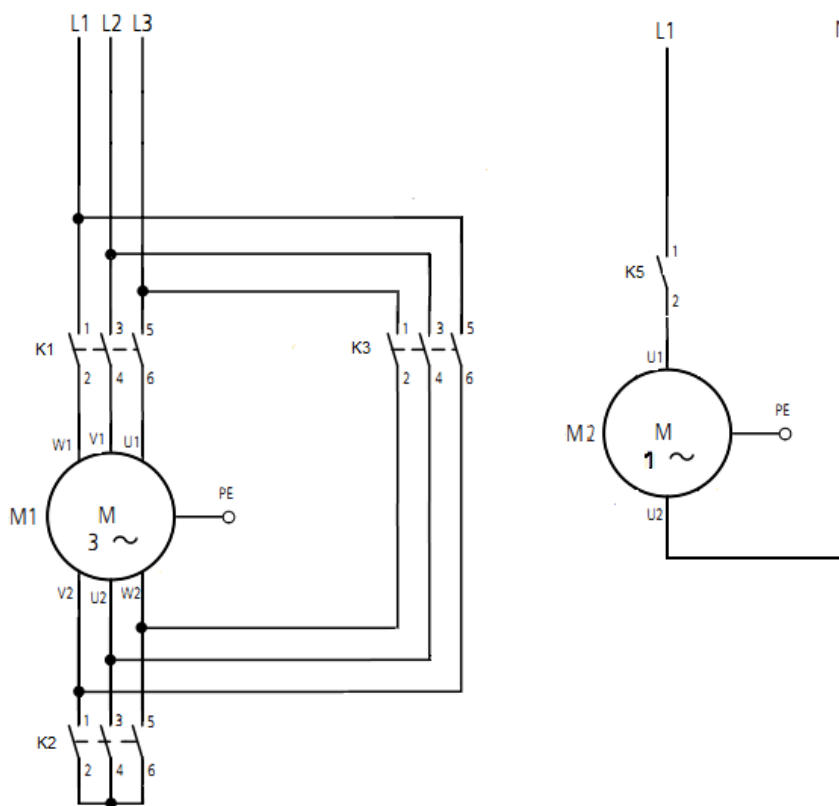
Układ sterowania strugarko-grubościówką ma za zadanie załączanie silników elektrycznych. Operator ma możliwość uruchamiania silnika wału głównego i zespołu posuwowego osobno, przy czym silnik posuwu może zostać uruchomiony tylko wtedy, gdy silnik wału nożowego osiągnie prędkość roboczą i kiedy blat odbiorczy wyrówniarki jest w pozycji otwartej. Rozruch silnika wału głównego odbywa się przez automatyczną zmianę konfiguracji uzwojeń gwiazda – trójkąt.

Na podstawie założeń opracowany został schemat układu sterowania ukazany na rysunku 3. Na rysunku 4 przedstawiono schemat podłączenia silnika wału nożowego i silnika zespołu posuwowego.

Po wciśnięciu przycisku S1, następuje rozruch silnika wału nożowego M1 w konfiguracji uzwojeń w trójkąt. Stycznik K1 doprowadza zasilanie na końce uzwojeń W1, V1 oraz U1, a stycznik K2 łączy końce uzwojeń V2, U2 i W2 w trójkąt. Po upływie czasu zadanego przez przekaźnik czasowy KT1 (domyślnie 5 [s]) następuje zmiana konfiguracji uzwojeń w trójkąt. Stycznik K2 nie jest już zasilany, a stycznik K3 łączy ze sobą wyprowadzenia uzwojeń W1 z V2, V1 z U2 oraz U1 z W2. Wyłączenie silnika następuje po wciśnięciu przycisku S2 lub przycisku awaryjnego STOP. Silnik zespołu posuwowego uruchamiany jest poprzez wciśnięcie przycisku S3. Uruchomienie nastąpi, gdy silnik wału nożowego osiągnie pełną prędkość (stycznik K3 zasilony) i gdy blat odbiorczy wyrówniarki jest podniesiony (zwarty łącznik krańcowy LK1). Wyłączenie silnika zespołu posuwowego może być przeprowadzone przez wciśnięcie przycisku S4 lub przez jednoczesne wyłączenie dwóch silników wciśnięciem przycisku S2 lub przycisku awaryjnego STOP.

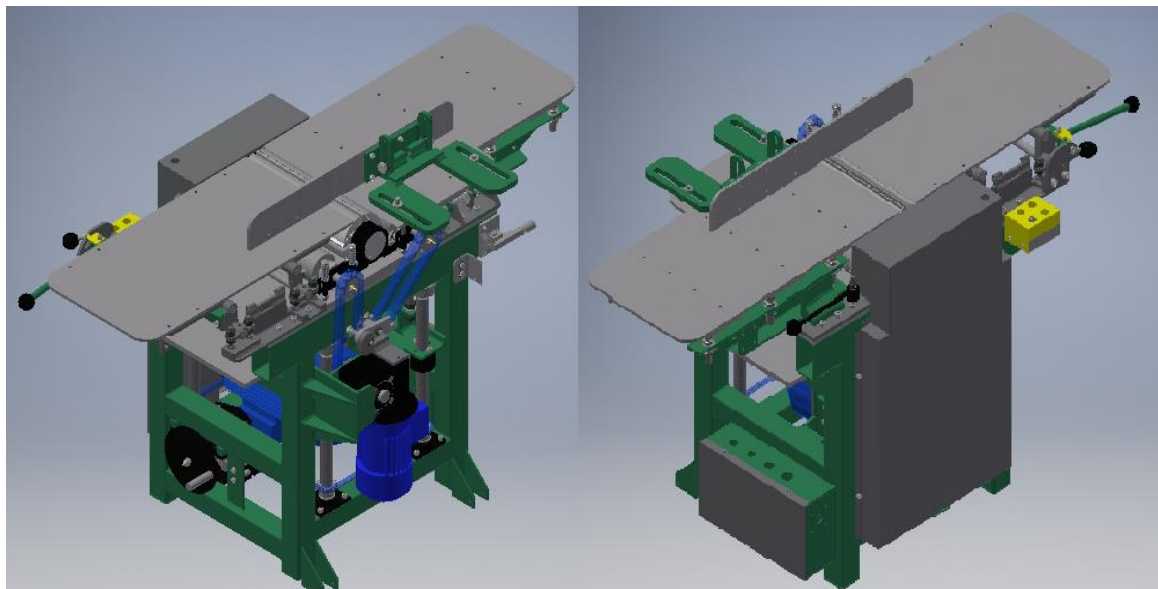


Rysunek 3. Schemat ideowy układu sterowania.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4. Schemat podłączenia silników elektrycznych.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 5 przedstawiono wizualizację obrabiarki wykonaną w programie Autodesk Inventor, a na rysunku 6 wykonane urządzenie.



Rysunek 5. Model obrabiarki w programie Autodesk Inventor.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 6. Strugarko-grubościówka wykonana na podstawie modelu.

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z założeniami, możliwie wiele części i materiałów pochodzą z rynku wtórnego. Maksymalna szerokość robocza wynosi 355 [mm], a maksymalna grubość materiału obrabianego na grubościówce to 200 [mm]. Wadą konstrukcji okazała się zbyt mała grubość blatów wyrówniarki, wnosząca 8 [mm]. Zbyt duży nacisk podczas obróbki na wyrówniarce może powodować niewielkie odkształcenia blatów i co za tym idzie – spadek dokładności wyrównania powierzchni drewna. Konstrukcja przystosowana jest jednak do montażu blatów większej grubości.

ROZDZIAŁ 6

Elektronicznie wspomagana przekładnia w układzie napędowym roweru (*Zbigniew Smajdor¹, Sebastian Gondek²*)

Współcześnie dostępnych jest wiele rodzajów rowerów, różniących się między sobą budową, kształtem, specyfikacją i przystosowaniem do konkretnych warunków jazdy. Podział ten jest szeroki, lecz wystarczy wymienić te najbardziej popularne, stosowane przez większość użytkowników:

- Trekkingowe – przystosowane do zróżnicowanego terenu, asfaltu, dróg szutrowych lub gruntowych. Umożliwiają komfortową pozycję i względnie wysoką prędkość.
- MTB – przeznaczone do trudnego terenu i sztucznych tras. Duże opory toczenia i niezbyt aerodynamiczna pozycja nie sprawdzają się na szosie lub w mieście.
- Szosowe – przystosowane do szybkiego przemieszczania po gładkich nawierzchniach. Jazda po bruku, szutrze i w terenie jest mocno utrudniona lub niemożliwa.
- Cross – przystosowany do zróżnicowanej nawierzchni. Lekki i pozwalający na szybką jazdę.
- Miejskie – zapewnia przyjęcie komfortowej pozycji i jazdę w miejskich warunkach. Duża masa i osprzęt powodują, że te jednoślady są stosunkowo wolne.

Budowa roweru może wydawać się prosta. Współczesne konstrukcje to jednak coś więcej niż dwa koła zamocowane do ramy i kierownica umożliwiająca sterowanie. Wysokiej jakości materiały i zaawansowany osprzęt wykorzystywany jest najczęściej przez sportowców. Z biegiem czasu, takie rozwiązania stają się popularne również dla przeciętnych użytkowników. Obecnie duży nacisk kładzie się na konstrukcję układu napędowego roweru.

Przez wiele lat napęd w rowerze był stosunkowo prostym mechanizmem. Pierwsze układy korzystały z przekładni jednobiegowych. Z czasem pojawiały się przerzutki pięciobiegowe lub co najwyżej sześciobiegowe sterowane cierną manetką. Większość komponentów różnych producentów pasowała do siebie wzajemnie, dlatego też nie było problemów ze złożeniem kompletnego roweru na miarę oczekiwań klienta. Narodziny rowerów górskich, rozwój nowych technologii oraz masowej produkcji spowodował pojawienie się wielu nowych standardów i ich wzajemne zróżnicowanie. Obecnie na rynku w produkcji napędów rowerowych dominują trzy najbardziej popularne firmy: Shimano, Sram i Campagnolo. Mieszając komponenty różnych marek, należy upewnić się, że będą ze sobą współpracować, gdyż w zależności od strategii marketingowej niektóre rozwiązania kompatybilne są tylko z produktami w obrębie własnej firmy.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0007-8147-5997.

² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

Campagnolo to przedsiębiorstwo produkujące osprzęt szosowy najwyższej klasy. Przerzutki tej marki współpracują tylko z kompletnymi napędami Campagnolo. Shimano to japońska firma i zarazem największy producent osprzętu rowerowego, który produkuje szeroką gamę przerzutek do wszystkich typów rowerów w zależności od przeznaczenia i ceny. SRAM to druga na świecie, po Shimano, amerykańska firma produkująca osprzęt rowerowy. Posiada w swojej ofercie wiele modeli przerzutek, lecz tylko niektóre z nich są kompatybilne z systemem Shimano (Witts, Storey, 2015).

Czołowi producenci osprzętu rowerowego wprowadzają na rynek coraz bardziej zaawansowane rozwiązania. Przykładem może być tu niewątpliwie wykorzystanie elektroniki do wspomaganie pracy przerzutek.

Zalety elektronicznego sterowania względem mechanicznego (Shimano, 2020; sram, 2020):

- pozwala na dokładną i bezwysiłkową zmianę przełożeń (np. zimne dłonie, zmęczenie);
- zanieczyszczone, rozciągnięte lub zużyte linki nie wpływają na wydajność zmiany biegów;
- przerzutki nie wymagają regulacji i okresowych przeglądów, są praktycznie bezobsługowe;
- programowalność systemu umożliwia dostosowanie zmiany przełożeń do własnego stylu;
- automatyczne trymowanie zmniejsza ocieranie łańcucha i zwiększa jego żywotność;
- elektroniczne sterowanie wybiera najlepszą kombinację przednich i tylnych tarcz i unika podwójnych przełożeń.

W rozdziale tym ukazano propozycję elektronicznego systemu wspomaganie dla rowerów wyposażonych w układ napędowy sterowany przerzutką mechaniczną. System automatycznych przerzutek jest dostępny już wiele lat, lecz ich „zaporowa” cena odstrasza niejednego rowerzystę. Zaproponowane rozwiązanie będzie wykorzystywać standardowe przerzutki mechaniczne, a dzięki ich modyfikacji zostanie przedstawiony sposób adaptacji do sterowania elektronicznego. Poza zautomatyzowaniem pracy oraz sterowania przerzutkami rowerowymi projekt skupia się na ujęciu systemowym danego rozwiązania. Projekt składa się z przerzutek sterowanych elektronicznie, zasilania bateryjnego, wyświetlaczy sygnalizujących, sterującego komputera pokładowego oraz czujników do obsługi i przetwarzania parametrów jazdy. Wszystko razem ukazywać ma podstawową koncepcję gotowego układu usprawniającego podróżowanie jednośladem. Przez swoją uniwersalność i niskie koszty rozwiązanie będzie można uzasadnić, jako alternatywę dla komercyjnych systemów.

Projekt został podzielony na zakresy, w skład których wchodzi:

- Część mechaniczna: adaptacja standardowych przerzutek w celu montażu serwomechanizmu.
- Część elektroniczna: podłączenie układów sterującego, czujnikowego, wykonawczego, organizacja zasilania oraz okablowania.
- Część programistyczna: napisanie programu na mikrokontroler, sterującego całym systemem.

Założenia funkcjonalne można podzielić na sprzętowe oraz programowe, czyli takie, które mają zostać dostarczone użytkownikowi, jako interfejs obsługi systemu.

Do realizacji projektu wykorzystane zostaną mikrokontrolery AVR. Niska cena, stosunkowo łatwa implementacja programowa i sprzętowa, a także grono entuzjastów sprawiły, że układy AVR są często wybieraną podstawą sprzętową do koncepcyjnych czy hobbystycznych projektów elektronicznych. W ten sposób, aby jeszcze bardziej usprawnić pracę z mikrokontrolerami, powstała platforma Arduino. Jego celem było stworzenie uniwersalnego narzędzia, które ułatwi, przyspieszy i ustandaryzuje pracę z mikrokontrolerami.

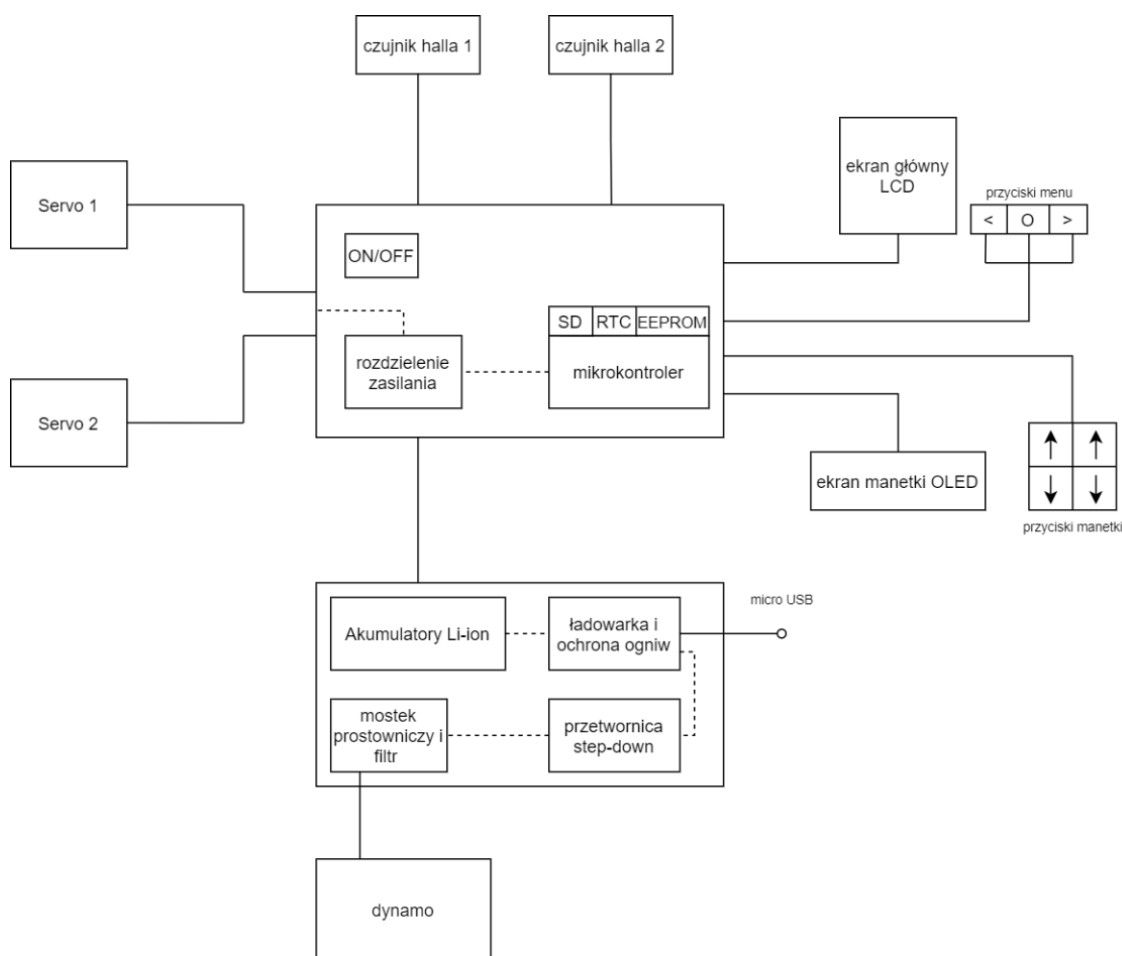
Najważniejszym elementem wykonawczym w projekcie będzie serwomechanizm. Zostanie on wykorzystany do zmiany przełożeń w układzie napędowym roweru. Przerzutka wyposażona w serwo będzie w stanie poruszyć pantografem, aby wrzucać lub zrzucić łańcuch na wyższy lub niższy bieg w przekładni rowerowej. Wykorzystane w projekcie serwomechanizmy to Serwo TowerPro MG-995 o wadze 55 gram, z metalowymi trybami oraz Serwo PowerHD – HD1250MG o wadze 25 g również z metalowymi trybami. Obydwa rodzaje zasilane będą napięciem od 4,8 do 6 V.

Zastosowane zostaną dwa rodzaje wyświetlaczy w technologii LCD i OLED. Wyświetlacz LCD będzie pełnił funkcję ekranu komputera głównego. Do tego celu wybrany został popularny układ wykorzystujący sterownik PCD8544 stosowany dawniej w telefonach Nokia. Posiada on matrycę 84 x 48 px. Komunikuje się z mikrokontrolerem za pomocą interfejsu szeregowego SPI. Wyświetlane znaki są wyraźne podczas mocnego światła słonecznego i po zmierzchu dzięki zewnętrznemu podświetleniu.

Aby zrealizować pomiar prędkości jazdy oraz kadencji należy posłużyć się elementami czujnikowymi. Do realizacji tego zadania potrzebną informacją będzie wykrycie impulsu elektrycznego, który został wygenerowany podczas jednego pełnego obrotu koła lub korby. W tym celu wykorzystane zostaną czujniki magnetyczne. Czujnik efektu Halla reaguje na zmianę pola magnetycznego, co umożliwi reagowanie i zliczanie impulsów magnetycznych. Element sensoryczny zamontowany na stałe reagować będzie na poruszający się magnes wirujący wraz z kołem lub korbą. Ten rodzaj czujników stosowany jest przede wszystkim do pomiaru prędkości elementów obrotowych lub wykrywania położenia przedmiotów. Wykorzystany w projekcie moduł to obwód elektroniczny zawierający hallotron 3144E oraz komparator LM393.

Do zasilania całego układu wspomaganie elektronicznego roweru wykorzystane zostaną źródła przetwarzające energię chemiczną oraz źródła przetwarzające energię mechaniczną. Pierwsze z nich to ogniwa chemiczne. Siła elektromotoryczna powstaje pod wpływem reakcji chemicznych, które zachodzą pomiędzy elementami układu zasilającego, czyli elektrodami i elektrolitem. Ogniwa w zależności od zastosowanej technologii służą do budowy baterii i akumulatorów. Wykorzystywane są w urządzeniach kompaktowych i przenośnych. Do najbardziej popularnych rodzajów produkowanych na szeroką skalę należą akumulatory ołowiowo-kwasowe (SLA), niklowo-kadmowe (Ni-Cd), niklowo-wodorkowe (Ni-MH) i litowo-jonowe (Li-Ion) lub litowo-polimerowe (Li-Po). Każdy typ ogniwa ma swoje unikatowe właściwości, takie jak parametry znamionowe, charakterystyki ładowania, rozładowania bądź też rodzaj czy sposób przechowywania. Spośród wymienionych rodzajów akumulatorów, godnym uwagi rozwiązaniem są stale rozwijające się ogniwa litowo-jonowe. Li-ion jest technologią stosowaną w większości urządzeń mobilnych zaczynając od telefonów komórkowych

a kończąc na samochodach elektrycznych. Umożliwiają one uzyskanie wysokich pojemności w stosunku do ich wagi oraz rozmiarów. Są pozbawione tzw. efektu pamięciowego i mogą być ładowane w dowolnym momencie. W czasie pracy ogniwo przyjmuje wartości napięć od 4,2 V (naładowanie) do 2,5 V (rozładowanie). Napięcie znamionowe waha się w granicach od 3,6 do 3,7 V. Źródło energii złożone z takich akumulatorów można dowolnie konfigurować i dostosowywać do własnych potrzeb. Jest to możliwe przez łączenie ogniw w baterie, zwane inaczej pakietami. Dzięki połączeniom szeregowym (s) (ang. *Serial*) wartość napięcia wzrasta wraz z wielokrotnością użytych ogniw. Połączenie równoległe (p) (ang. *Parallel*), pozwala na zwiększenie pojemności i wydajności prądowej pakietu. W projekcie zostaną wykorzystane dwa ogniwa o pojemności 2900 mAh połączone w pakiet o oznaczeniu 1s2p, które określa baterię złożoną z dwóch ogniw połączonych równoległe o zwielokrotnionej pojemności i napięciu znamionowym. Ostatecznie otrzymano akumulator o całkowitej pojemności 5800 mAh i napięciu zasilania od 4,2 do 3,7 V. W celu ładowania i ochrony ogniw przed nadmiernym przeładowaniem i rozładowaniem skorzystano z modułu zasilacza buforowego Li-Ion. Moduł działa w oparciu o układ TP4056, który umożliwia ładowanie ogniw 1 s maksymalnym prądem o natężeniu do 1 A. Wyposażony jest dodatkowo w złącza na konektory wejściowe i złącze micro USB.

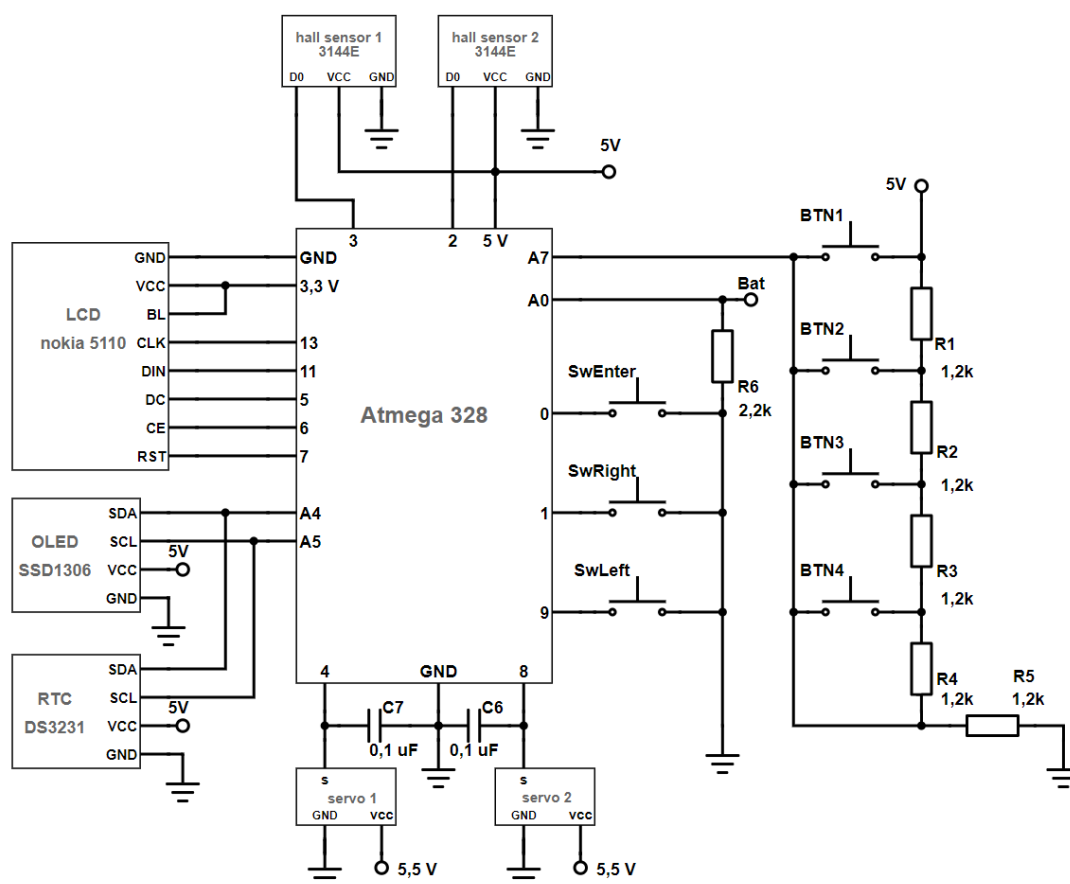


Rysunek 1. Schemat blokowy elektronicznego wspomaganie jednoślada.

Źródło: opracowanie własne.

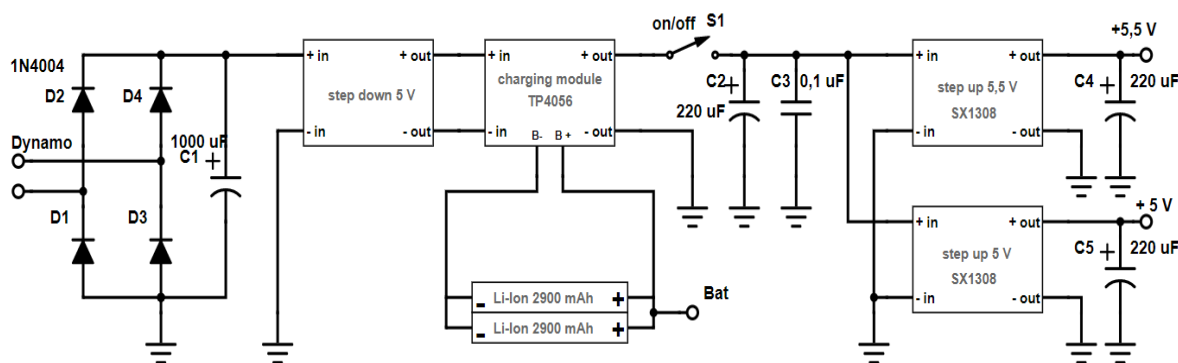
Pierwszym krokiem przy projektowaniu systemu był wybór odpowiednich komponentów. Kolejny etap to przedstawienie zarysu i koncepcji układu w postaci uproszczonej. W tym celu utworzono tzw. schematy blokowe. Opisywać one będą zbiór głównych składowych systemu i relacji pomiędzy nimi. Schemat na rysunku 1 ukazuje kompletny układ wspomagania elektronicznego roweru w postaci uproszczonych bloków funkcyjnych.

W centralnym punkcie znajduje się główny sterownik, czyli mikrokontroler obsługujący oraz zarządzający wszystkimi podłączonymi do niego urządzeniami. W przypadku projektu mikrokontroler może być wyposażony w dodatkowe peryferia, takie jak karta pamięci SD do zapisu informacji o podróży, zegar czasu rzeczywistego RTC czy zewnętrzny układ pamięci EEPROM do zapisu niezbędnych informacji ustawień użytkownika. Dodatkowo w tym samym bloku znajduje się rozdzielanie zasilania, a więc dopasowanie napięcia wyjściowego z akumulatorów do napięcia mikrokontrolera oraz zasilania serwomechanizmów. W dalszej części w osobnym bloku przewidziano umieszczenie sekcji zasilania. W jej skład wchodzi elementy umożliwiające przetworzenie napięcia z prądnicy i ładowanie akumulatorów litowo-jonowych. Następnie bloki dzielą się na elementy wykonawcze (dwa serwomechanizmy), elementy sensoryczne (dwa czujniki hallotronowe), a także ekrany sygnalizacyjne i przyciski sterujące systemem. Przyciski obsługi menu podłączone zostaną do wejść cyfrowych mikrokontrolera, wykorzystując tym samym trzy porty wejścia/wyjścia.



Rysunek 2. Schemat ideowy części sterującej elektroniki.

Źródło: opracowanie własne.

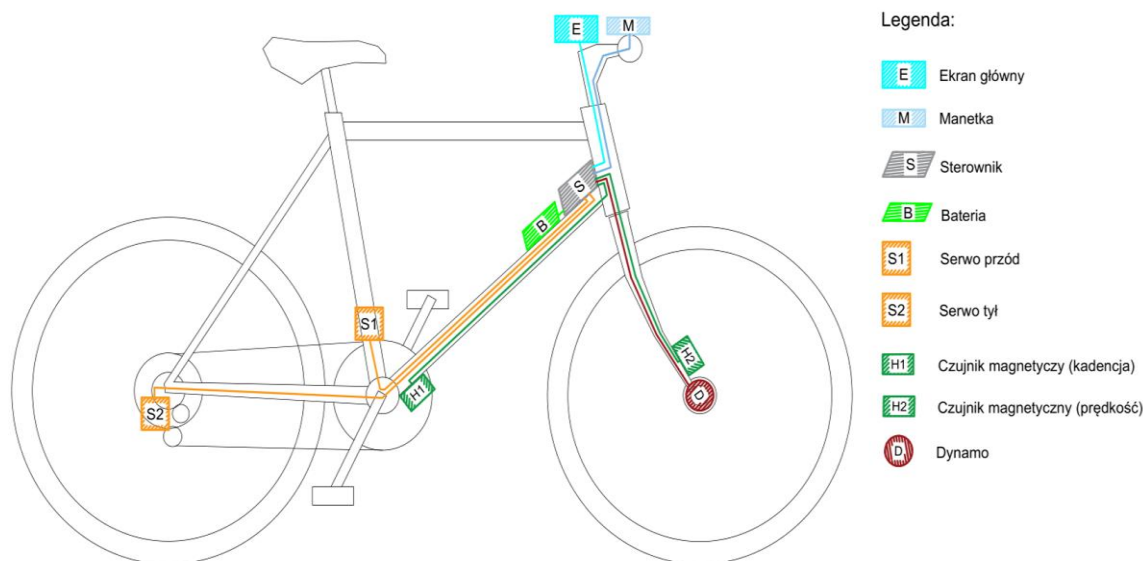


Rysunek 3. Schemat ideowy części zasilania elektroniki.

Źródło: opracowanie własne.

Szczegółowe połączenia, wykorzystane moduły i wartości elementów przedstawia elektryczny schemat ideowy. Na jego podstawie możliwy jest dokładny wybór części i utworzenie prototypowego obwodu elektronicznego. Schemat ideowy na rysunku 2 przedstawia obwód sterujący, a schemat z rysunku 3 obwód zasilania systemu.

Istotnym zagadnieniem jest też rozmieszczenie poszczególnych elementów na konstrukcji roweru, co zostało przedstawione na rysunku 4.



Rysunek 4. Rozmieszczenie instalacji elektronicznego systemu wspomagania.

Źródło: opracowanie własne.

Układ składa z ośmiu elementów plus dynamo, które może być fabrycznie wbudowane w piastę koła przedniego. Odpowiednie zaprojektowanie obudowy takich elementów jak ekran główny, manetka wraz z uchwytami na kierownicę oraz koszyk na akumulatory i obudowa ochronna sterownika jest bardzo ważnym elementem całego projektu. W pracy uwzględniony został jedynie fakt rozmieszczenia poszczególnych części wraz z okablowaniem. Zaprojektowane uchwyty będą łączyć serwomechanizm S1 i S2 odpowiednio z przerzutką przednią i tylną. Czujnik magnetyczny H1 powinien

być zainstalowany w obrębie promienia obrotu korby, do której z kolei zamocowany zostanie element magnetyczny. Czujnik H2 do pomiaru prędkości jazdy musi znajdować się na ramie widelca w części goleni dolnej pod amortyzatorami przednimi. Umieszczenie baterii i sterownika na dolnej rurze rowerowej umożliwia skuteczne rozprowadzenie okablowania. W zależności od specyfikacji i rodzaju konstrukcji ramy poszczególne przewody mogą zostać ukryte wewnątrz rur, a w niektórych odcinkach poprowadzone na zewnątrz. Dokładne rozłożenie przewodów zależy jednak od konstrukcji roweru, lecz adaptacja cienkich przewodów sygnałowych i zasilających jest znacząco ułatwiona w stosunku do grubych pancerzy i stalowych linek mechanicznych manetek.

Algorytm działania systemu zawiera informacje o wszystkich funkcjach dostępnych dla użytkownika oraz sposobie i kolejności wykonywania zadań przez mikrokontroler. Ogólną zasadę długiego i skomplikowanego kodu programu można przedstawić za pomocą bloków opisujących kolejne instrukcje i decyzje podejmowane podczas wykonywania algorytmu. Algorytm podzielony został na dwie części. Część pierwsza to etap inicjalizacji systemu. Odpowiada ona za kod wykonujący się w funkcji „setup()” w środowisku Arduino IDE. Po uruchomieniu układu system rozpoznaje, czy biegi zostały wcześniej skonfigurowane. Jeżeli okaże się, że jest to pierwsze uruchomienie lub użytkownik przywrócił ustawienia fabryczne, to zostanie wymuszony początkowy tryb inicjalizacji każdego biegu do odpowiadającego mu wychylenia serwa. Proces ten przeprowadza się za pomocą interfejsu i przycisków menu. Ustawienia zostaną zapisane w pamięci nieulotnej. Po każdym nowym uruchomieniu biegi będą wczytywane wraz z odczytem ostatniego biegu przed wyłączeniem zasilania. Użytkownik za każdym razem będzie mógł wybrać, czy wykalibrować któreś przełożenie czy przejść do głównej części programu.

Kod programu został napisany w środowisku Arduino IDE. Jest on podzielony na część ukazującą deklarację zmiennych i bibliotek wykorzystanych do obsługi urządzeń oraz część przedstawiającą wszystkie nagłówki utworzonych funkcji. Kod zawiera niezbędne komentarze opisujące najistotniejsze linie programu.

Ostatnim krokiem do zamontowania elektronicznego układu wspomagania jest prawidłowa adaptacja przerzutki przedniej i tylnej. Dopasowanie serwomechanizmu do konstrukcji pantografu zależne jest od zastosowanego kształtu oraz rozmiarów serwa i konkretnego modelu przerzutki. Do testów użyty zostanie standardowy osprzęt Shimano w celu przedstawienia ogólnej metodyki instalacji elektronicznego wspomagania.

ROZDZIAŁ 7

Projekt koncepcyjny pojazdu terenowego typu buggy

(Krzysztof Sulkowski, Jacek Klimek)¹

Warunki panujące na drogach i ich stan w XIX wieku sprawiły, że w zasadzie historia pojazdów terenowych zaczyna się wraz z początkiem motoryzacji. Przez lata późniejsze – gdy warunki ulegały poprawie, powstawało coraz więcej utwardzonych dróg, a samochody uzyskiwały coraz lepsze osiągi – skupiono się głównie na pojazdach szosowych. Dopiero działania wojenne XX wieku i ich ulokowanie często w ciężkim terenie doprowadziły do powstania wielu rozwiązań zwiększających możliwości terenowe pojazdów.

Dziś pojazdy terenowe przeznaczone są głównie do jazdy po bezdrożach i drogach nieutwardzonych. Często można spotkać małe samochody terenowe w rodzinach mieszkających na wsiach, głównie w górzystym terenie. Bardzo pręźnie rozwija się też sport offroadowy, głównie dzięki stosunkowo niskim nakładom koniecznym do startów w stosunku do motorsportu drogowego.

Pojazdy terenowe zazwyczaj budowane są na sztywnej ramie, co gwarantuje dużą wytrzymałość konstrukcji i dobre własności terenowe, lecz odbija się niestety na ekonomii oraz osiągach samochodu na drogach utwardzonych. Wśród pojazdów terenowych, dzięki swym zaletom, zyskał popularność pojazd typu buggy.

Buggy jest to lekki pojazd rekreacyjny, wyposażony w otwarte nadwozie, wytrzymałe zawieszenie o dużym skoku, duże koła z terenowymi oponami i stosunkowo mocny silnik umieszczony zazwyczaj z tyłu. Samochody początkowo projektowane i budowane były do jazdy w umiarkowanie ciężkim terenie. Miały zapewniać jak najwięcej emocji oraz dobrze chronić kierowcę w razie wypadku. Obecnie buggy stosowane są też w wielu dyscyplinach sportowych (np. Rajd Dakar).

Pojazdy typu buggy podzielić można na dwa rodzaje:

- pojazdy budowane na bazie innych samochodów (zazwyczaj posiadających silnik umieszczony z tyłu i napęd na tylną oś, co zmniejsza ilość przeróbek koniecznych do wykonania pojazdu). W Polsce często stosowanymi modelami jako baza do takiego typu pojazdu są: Fiat 126p i VW „Garbus”, a to głównie dzięki niskiemu kosztowi i dobrej dostępności części;
- konstrukcje, których nadwozie budowane jest całkowicie od nowa poprzez spawanie ze sobą stalowych rur i profili zamkniętych. Stosuje się w nich często silniki pochodzące z motocykli, głównie dzięki ich dużej mocy i stosunkowo niskiej wadze w porównaniu do silnika samochodowego. Taki pojazd budowany jest od podstaw, często z wykorzystaniem istniejących części z innych samochodów, takich jak: osie, amortyzatory, piasty czy przeguby.

Celem projektu było zaproponowanie modernizacji pojazdu typu buggy przy wykorzystaniu istniejącej ramy, elementów zawieszenia i sterowania pochodzących z różnorodnych pojazdów samochodowych, a także dostępnych narzędzi i urządzeń

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

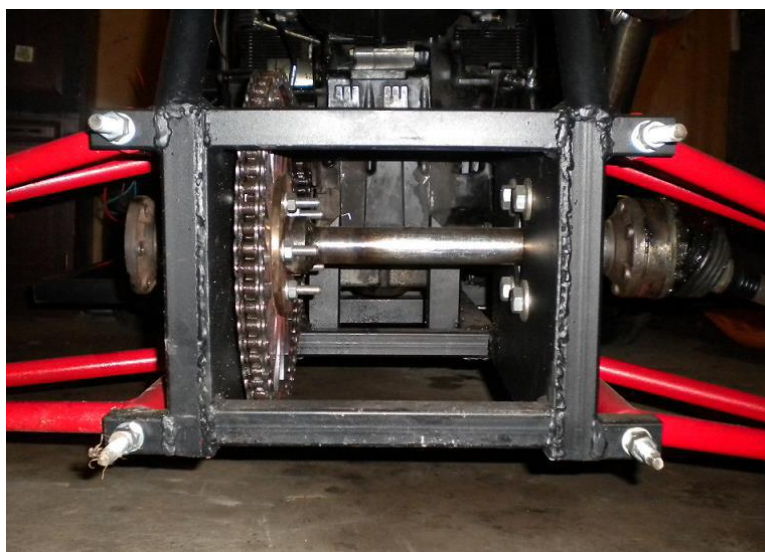
warsztatowych niezbędnych do jego wykonania. Rama do projektu przejęta została z pojazdu typu piranha wraz ze zmianą jej przystosowania z silnika samochodowego na silnik pochodzący z motocykla sportowego. Podzespoły składowe takie jak zwrotnice, układ kierowniczy, półosie bądź też amortyzatory pozyskane zostały z dostępnych samochodów przeznaczonych do rozbiórki. Dodatkowo wykonano projekt trakcyjny opracowywanego pojazdu i dokonano obliczeń przekładni głównej redukcyjnej, która niezbędna jest do zmniejszenia prędkości maksymalnej pojazdu tak, by spełniał on założenia konstrukcyjne oraz dla zwiększenia momentu obrotowego dostępnego na kołach pojazdu.

Stawiane przed pojazdem wymagania spowodowały, że konieczne było znalezienie silnika o dużej mocy, odpowiedniej trwałości, niskiej masie i dużej zwartości konstrukcji.

Dzięki zastosowaniu silnika z motocykla szosowo-turystycznego udało się w znacznej części uzyskać zamierzone efekty. Jednostka napędowa dysponuje mocą 90 KM i momentem na poziomie 60 Nm, przy czym stosowana była w motocyklu o dopuszczalnej masie całkowitej nieznacznie niższej od masy projektowanego buggy wraz z kierowcą, co z kolei przekłada się na odpowiednio dobraną siłę docisku tarczy sprzęgła i żywotność samego silnika.

Głównym problemem podczas zmiany przystosowania ramy z samochodowego silnika na silnik motocyklowy stał się układ przeniesienia napędu z silnika na koła napędowe. W tym celu zastosowana została przekładnia łańcuchowa, działająca w sposób zbliżony do tych działających w sportowych quadach, np. Suzuki LTZ. Zbędnym elementem stał się występujący w samochodach osobowych układ różnicowy. Stały podział momentu obrotowego pomiędzy kołami napędowymi pojazdu zwiększa trakcję na luźnej nawierzchni i zapewnia mocniejsze doznania podczas jazdy, dając łatwiejszą możliwość „ślizgania” się pojazdem podczas pokonywania zakrętów.

Mechanizm różnicowy został zastąpiony sztywną osią tylną według własnego projektu (rysunek 1). Na osi sztywnej zamocowana jest zębátka o 62 zębách. Oś osadzona jest w dwóch łożyskach w oprawie przykręcony do blach, które wstawane zostały w miejsce, w którym oryginalnie półosie łączą skrzynię biegów samochodu z piastami kół.



Rysunek 1. Sztywna oś tylna według własnego projektu.
Źródło: opracowanie własne.

Okresowa regulacja naciągu łańcucha (rysunek 2) odbywa się poprzez ruch liniowy całej sztywnej osi wraz z łożyskami.



Rysunek 2. Regulacja naciągu łańcucha.
Źródło: opracowanie własne.

Na obydwu końcach wału zamontowane są kryzy z samochodu VW Golf III, zabezpieczone przed przemieszczeniem poprzecznym za pomocą śruby, do których przykręcane są półosie łączące wał napędowy z piastami. Rozwiązanie takie daje możliwość wymiany w razie potrzeby któregośkolwiek składowego elementu przeniesienia napędu, dając zarazem możliwość zastosowania zawieszenia niezależnego z tyłu pojazdu, zwiększając komfort oraz dając większą powierzchnię styku opony z nawierzchnią w ciężkich warunkach.

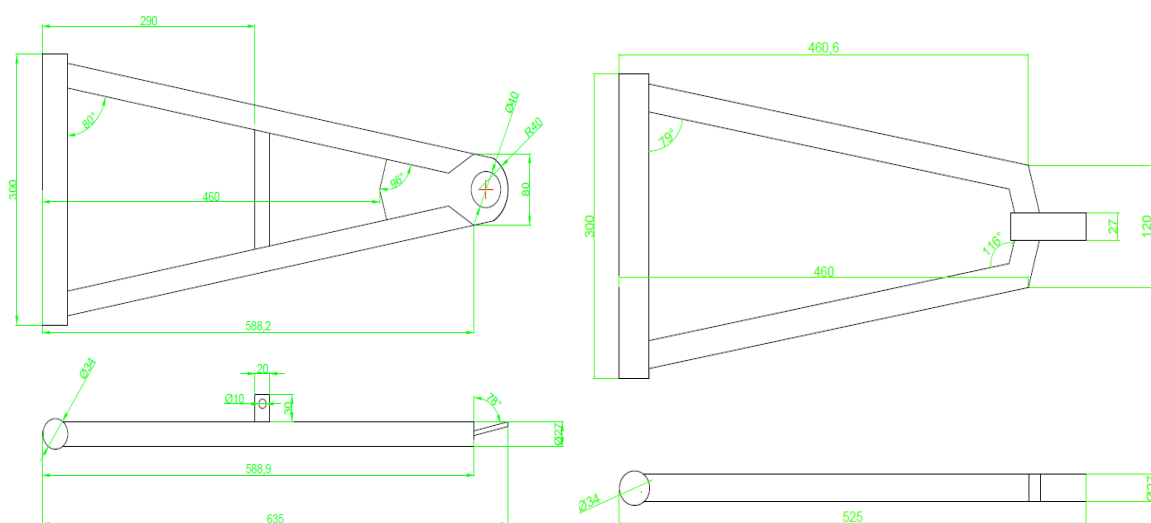
Trudnym wyzwaniem było zaprojektowanie odpowiedniej ramy nośnej pojazdu. Rama pojazdu stanowi konstrukcję kratownicową, która została wykonana ze stalowych profili zamkniętych i rur metodą spawania łukiem elektrycznym. Główne elementy ramy wykonane zostały z profili 40x40x3, a wzmocnienia oraz mocowanie silnika z zamkniętego profilu o wymiarach 30x30x2. Górny pałąk chroniący kierowcę podczas ewentualnego dachowania i element tylny stanowiący podporę dla mocowania tylnych amortyzatorów oraz zapewniający sztywność tylnej części ramy zostały wykonane z rury stalowej o średnicy 1 cala. Taka budowa ramy zapewnia jej sztywność przy zachowaniu niewielkiej masy pojazdu.

Głównym zmianom uległ element mocowania silnika, który został przystosowany pod silnik motocykla Suzuki GSX600F. Konieczne było przerobienie tylnej sekcji pod mocowanie łożysk, w których osadzony jest sztywny wał napędowy.

Jednym z ważniejszych parametrów pojazdu terenowego jest skok jego zawieszenia, czyli wysokość, na jaką można unieść jedno koło, nie odrywając od podłoża reszty kół. Aby uzyskać jak największą równomierność nacisku na podłoże, podczas projektowania pojazdu podjęta została decyzja, by zastosować w nim zawieszenie niezależne o dwóch wahaczach poprzecznych, a jako element sprężysty sprężyny śrubowe. Poprzez takie zastosowanie wzrasta stopień komplikacji wykonania układu, lecz zyskujemy znaczne zmniejszenie nieresorowanych mas pojazdu, a dodatkowo – dzięki zastosowaniu dwóch wahaczy w układzie równoległym – kąt pochylenia kół

względem pojazdu oraz powierzchnia styku kół jezdnych z nawierzchnią podczas pokonywania przeszkód nie zmieniają się, co z kolei przekłada się na większą kontrolę nad pojazdem, a dzięki braku przechylenia ramy znacząco wpływa na własności terenowe pojazdu.

Wahacze przednie (rysunek 3) wykonane zostały z rur stalowych o średnicy 3/4 cala, ich ruch umożliwiają wykonane specjalnie tuleje ślizgowe wykonane z teflonu wtłoczone w środek rury, która łączy je z ramą przy pomocy pręta nierdzynowego zakończonego gwintami i zabezpieczonego śrubami samoblokującymi. Zostały one zaprojektowane tak, żeby wysokość dolnej części ramy od podłoża wynosiła 30 cm – odległość ta dobrana jest tak, aby uniknąć kontaktu z wystającymi z drogi przeszkodami, a zarazem nie powodować zbyt dużej wysokości pojazdu względem jego szerokości, co zwiększyłoby jego skłonność do dachowania.



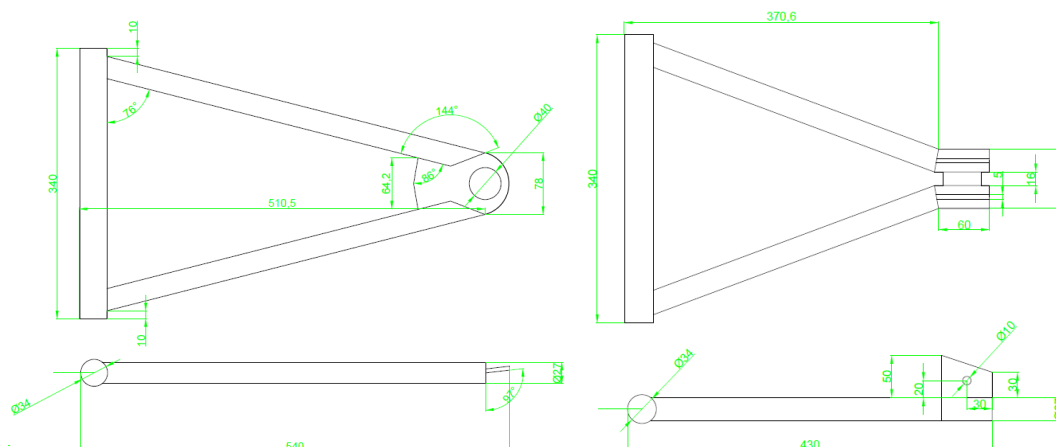
Rysunek 3. Wahacz przedni dolny i górny.

Źródło: opracowanie własne.

Do dolnego wahacza przymocowany jest amortyzator pochodzący z motocykla Kawasaki ZX6r. Posiada on możliwość regulacji wstępnego napięcia sprężyny, dzięki czemu istnieje możliwość przystosowania jego twardości do różnych warunków terenowych.

Górny wahacz, dzięki zastosowaniu na jego końcu wahliwego drążka z regulacją, daje dużą możliwość regulacji kąta pochylenia koła względem podłoża. Takie zastosowanie niezbędne jest do odpowiedniego wyregulowania zawieszenia.

Tylne wahacze (rysunek 4) wykonane zostały w sposób analogiczny do przednich. Najważniejszym zadaniem konstrukcyjnym było tutaj dobranie długości wahaczy w ten sposób, by w położeniu neutralnym zawieszenia półoś znajdowała się w połowie długości swojego zakresu pracy bądź z kilku mm wydłużeniem. Ustawienie takie jest niezbędne do prawidłowego działania układu napędowego i zawieszenia. Pozwala to na ugięcie amortyzatora i jego rozciągnięcie. W przypadku, gdyby półoś w neutralnym położeniu zawieszenia była zbyt blisko skrajnych położenia, w trakcie pracy zawieszenia mogło by dojść do uszkodzenia półosi na skutek uderzenia w wał napędowy bądź jej rozerwanie przez nadmierne rozciągnięcie.



Rysunek 4. Wahacz tylni dolny i górny.
Źródło: opracowanie własne.

W odróżnieniu od przedniego zawieszenia w tym przypadku amortyzator pochodzący z samochodu Skoda Felicia montowany jest do górnego wahacza. Wahacz ten zakończony jest dwoma gwintami M12, w które wkręcone są główne cięgła, do których przykręcona jest piasta. Zastosowanie takich końcówek daje możliwość regulacji kąta odchylenia koła w pionie i poziomie. Jest to element niewystępujący w samochodach produkowanych seryjnie, jednak sposób produkcji warsztatowej, niedokładność wykonania i pomiaru wymuszają zastosowanie elementów dających możliwość ingerencji w te ustawienia po końcowym złożeniu pojazdu.

Jednocześnie konstrukcja półosi napędowej pozwala na maksymalne jej wychylenie pod kątem 40 stopni, co przy takiej długości powoduje, że dopuszczalna różnica między osią wału a osią piasty nie może być większa niż 20 mm. Po przekroczeniu tej granicy następuje blokada, a następnie uszkodzenie elementu. Kluczowe jest tutaj dobranie długości amortyzatora i kąta pochylenia dolnego mocowania piasty tak, by nie dopuściły one do przekroczenia 40 stopni wychylenia półosi.

Mechanizm zwrotniczy zastosowany w tym pojeździe jest mechanizmem trapezowym. Oznacza to, że składa się z dwóch symetrycznych dźwigni, zamocowanych na stałe w zwrotnicach i połączonych ze sobą poprzez poprzeczny drążek zwrotniczy.

Nadanie kierunku jazdy pojazdu wymaga dokładnej oraz nieskomplikowanej przekładni kierowniczej. Jako że pojazd ma niską masę własną, nie ma potrzeby montowania w nim skomplikowanego układu kierowniczego ze wspomaganiem hydraulicznym czy elektrycznym. Z tego też względu zastosowana została kompletna przekładnia z samochodu Fiat Seicento.

Rozstaw kół buggy w porównaniu do oryginalnego jest szerszy o ok. 20 cm, co spowodowało konieczność przedłużenia przekładni. Zmianom ulec musiały także końcówki drążków kierowniczych, ponieważ zastosowane w pojeździe piasty przednie pochodzą z Poloneza Caro.

Przedłużenie przekładni i zmiana końcówek drążków dokonane zostały przez jedną operację. Do obciętych końcówek drążka pochodzących z Fiata wkręcone zostały śruby i nakrętki przedłużające, które z kolei przymocowane są do końcówek pasujących do piast. Całość została następnie w miejscach łączenia zabezpieczona przed rozkręcaniem się poprzez zespawanie.

Zastosowany w pojeździe układ hamulcowy jest prostym układem hydraulicznym, składającym się z pompy hamulcowej, przewodów miedzianych, przewodów miękkich i zacisków. Cały układ hamulcowy pochodzi z samochodu Polonez. Uruchomienie hamulca odbywa się więc bezpośrednio przez naciśnięcie na pedał hamulca połączony z pompą hydrauliczną, której przesunięcie tłoka powoduje wzrost ciśnienia wewnątrz układu, co z kolei doprowadza do ruchu klocków hamulcowych, dociśnięcia ich do tarczy hamulcowej i w efekcie uzyskania tarcia, czyli siły hamującej. Z uwagi na niską masę pojazdu zrezygnowano tutaj z wspomagania hamulca. Cała siła hamowania przekazywana jest na przednią oś.

Do obsługi pojazdu niezbędna jest możliwość regulacji dawki paliwa, siły hamowania czy obsługa sprzęgła. Standardowym sposobem obsługi tych trzech funkcji w pojazdach samochodowych są pedały połączone z odpowiednimi systemami zazwyczaj poprzez cięgna lub przez bezpośrednie oddziaływanie.

Pedały wykonane zostały z blachy stalowej o grubości 4 mm, pospawane łukiem elektrycznym. Następnie do każdego z nich indywidualnie dorobione zostały specjalne mocowania, w przypadku sprzęgła i hamulca – mocowanie linki, a przy pedale hamulca dorobione zostało bezpośrednio mocowanie do pompy.

Układ wydechowy motocykla Suzuki GSX600F poprowadzony był bezpośrednio pod silnikiem, co w przypadku pojazdu buggy nie było możliwe do uzyskania, gdyż aby uzyskać jak najlepsze efekty, należało maksymalnie obniżyć środek ciężkości pojazdu. Układ ten został więc przeprojektowany w ten sposób, by jedynie nieznacznie zmieniając długość kolektorów wydechowych, przenieść go na prawą stronę pojazdu, uważając przy tym, by nie przeszkadzał on w pracy zawieszenia i był możliwie osłonięty klatką podczas przewrotu pojazdu na bok.

Chłodzenie silnika odbywa się za pośrednictwem powietrza atmosferycznego opływającego jednostkę oraz oleju silnikowego przepływającego przez specjalnie wydrążone w korpusie kanały, którego wymiennikiem z otoczeniem jest chłodnica olejowa.

Mocowanie chłodnicy znajduje się bezpośrednio przed silnikiem, czyli w miejscu, gdzie w motocyklu napotykamy największy napór powietrza. W buggy przed silnikiem umiejscowione jest siedzenie kierowcy, które blokowałoby w sposób oczywisty przepływ powietrza przez układ, co w efekcie grozi przegrzaniem jednostki napędowej. Konieczne jest więc przeniesienie chłodnicy poza elementy blokujące dopływ powietrza jednocześnie w takie miejsce, aby w razie kolizji nie uległa ona zniszczeniu. W tym celu została ona obrócona o 90 stopni i przeniesiona na lewą stronę pojazdu tak, by nie przeszkadzała kierowcy podczas wsiadania.

Zmiana biegów w motocyklach odbywa się całkiem inaczej niż w samochodach. Występuje tutaj skrzynia biegów sterowana sekwencyjnie, co oznacza, że zmiana biegów musi odbywać się po kolei bez możliwości ominięcia jakiegoś przełożenia i załączenia od razu następnego. Dźwignia zmiany biegów znajduje się po lewej stronie silnika, a sterowanie skrzynią odbywa się poprzez przesunięcie jej w górę lub w dół.

Chcąc uzyskać możliwość zmiany biegów przy pomocy dźwigni obsługiwanej ręką, zastosowany został system dźwigni, dzięki czemu zmiana biegów odbywa się w podobny sposób jak w starszych typach samochodów rajdowych. Poprzez pociągnięcie dźwigni do siebie następuje redukcja biegu, analogicznie odpychając dźwignię od siebie, załączamy wyższy bieg.

Na rysunku 5 zaprezentowano pojazd terenowy typu buggy wykonany według autorskiej koncepcji.



Rysunek 5. Wahacz tylni dolny i górny.
Źródło: opracowanie własne.

Podczas wykonywania elementów łączonych poprzez spawanie największym problemem było ustawienie i spojenie ich w ten sposób, aby podczas ich wykonywania nie nastąpiło zbyt duże odkształcenie cieplne spowodowane znacznym wzrostem temperatury w miejscach spawanych.

Dzięki wykorzystaniu gotowej ramy, która wymagała jedynie dorobienia mocowań podzespołów, w znacznym stopniu uproszczono prace projektowe oraz konstrukcyjne związane z obliczaniem wytrzymałościowym.

Elementy zaprojektowane charakteryzuje się dużą łatwością wykonania, co daje możliwość wykonania ich własnoręcznie w warsztacie, a zastosowane elementy pochodzące z rozbiórki samochodów używanych w znacznym stopniu obniżają koszty produkcji pojazdu i ewentualnych późniejszych wymian.

Gotowy pojazd posiada niewielką masę na poziomie 350 kg, która w połączeniu z motocyklowym silnikiem daje sportowe wręcz osiągi, a dzięki prostemu wykonaniu zastosowane rozwiązania wykazują dużą odporność na uszkodzenia. Miękkie zawieszenie o regulowanej twardości z dwoma wahaczami poprzecznymi sprawia, że pojazd płynnie i stabilnie pokonuje nierówności czy zakręty.

Największą zaletą wykonanego własnoręcznie buggy są jego koszty budowy, które kształtują się na poziomie 4000 zł, nie licząc własnej pracy, co w porównaniu do pojazdów gotowych znanych producentów jest ceną kilka, a nawet kilkanaście razy mniejszą.

Wykonany pojazd obarczony jest oczywiście problemami, które wymagają rozpoznania i poprawy. Spowodowane jest to zbyt małą ilością przejeżdżonych kilometrów podczas testów, a rozwiązania konstrukcyjne, które w teorii wydają się odpowiednie, w rzeczywistości często okazują się niewystarczalne bądź czasem nawet błędne. Dzięki konstrukcji stalowej i łatwemu dostępowi do części, pojazd można w trakcie eksploatacji niemal dowolnie modyfikować aż do uzyskania zamierzonych efektów.

ROZDZIAŁ 8

Rekonstrukcja cyfrowa obiektu sakralnego z wykorzystaniem fotogrametrii BSP – na przykładzie ołtarza papieskiego w Starym Sączu *(Piotr Lachowski¹)*

Na przestrzeni ostatnich dwóch dekad obserwuje się dynamiczny rozwój technologii bezałogowych statków powietrznych (BSP), potocznie zwanych dronami, które stają się coraz bardziej dostępne dla szerokiego grona użytkowników. Zjawisko to wywiera istotny wpływ na wiele dziedzin nauki i inżynierii, w tym również na fotogrametrię, a konkretniej na jej poddziedzinę – fotogrametrię lotniczą. Dzięki miniaturyzacji precyzyjnych komponentów mechatronicznych, a także dostępności zaawansowanych systemów informatycznych, w tym planowania lotów i przetwarzania danych, możliwe stało się wykonywanie dokładnych pomiarów oraz generowanie modeli 3D w sposób szybki, ekonomiczny i bezpieczny.

W kontekście dokumentowania obiektów architektonicznych fotogrametria lotnicza znajduje dziś szerokie zastosowanie – w inwentaryzacji zabytków, inspekcji stanu technicznego budynków i w cyfrowych rekonstrukcjach. Szczególnie przydatna okazuje się w trudno dostępnych lokalizacjach i przy obiektach o złożonej geometrii, gdzie klasyczne metody pomiarowe mogą być niewystarczające lub nieopłacalne.

Rozdział przedstawia kompleksowy proces wykonania fotogrametrycznego skanu wybranego obiektu architektonicznego (rysunek 1) z wykorzystaniem BSP. Omówiono w nim zarówno fazę przygotowawczą – planowanie misji lotniczej, jak i praktyczną realizację nalotu fotogrametrycznego, przetwarzanie zdjęć w dedykowanym oprogramowaniu i ocenę uzyskanego modelu 3D pod kątem jego dalszej użyteczności. Celem opracowania jest nie tylko przedstawienie możliwości technologicznych, lecz także wskazanie praktycznych aspektów, na które należy zwrócić uwagę podczas realizacji tego typu projektów.



Rysunek 1. Ołtarz Papieski w Starym Sączu.
Źródło: opracowanie własne.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

Obiektem poddanym opracowaniu fotogrametrycznemu był obiekt architektury sakralnej – Ołtarz Papięski zlokalizowany w Starym Sączu, stanowiący istotny element dziedzictwa kulturowego regionu. Konstrukcja ta została wzniesiona z okazji wizyty papieża Jana Pawła II w 1999 roku i od tamtej pory pełni zarówno funkcję sakralną, jak też symboliczną. Ołtarz, zlokalizowany jest na przestrzeni otwartej w pobliżu klasztoru Klarysek, odznacza się złożoną geometrią: licznymi detalami architektonicznymi, drewnianą strukturą nośną i elementami dekoracyjnymi, które czynią go wymagającym obiektem do odwzorowania przestrzennego. Obiekt składa się z zadaszanej centralnej części ołtarza wraz z dwoma nawami bocznymi, zaś część sakralna znajduje się na podwyższeniu, z którego odchodzą schody i sztuczny strumyk. W niższej kondygnacji funkcjonuje muzeum zawierające pamiątki z wizyty papieża.

Głównym założeniem projektu było uzyskanie możliwie szczegółowego i wiernego modelu 3D, który może służyć jako podstawa do dalszych działań projektowych – zarówno rekonstrukcyjnych, jak i stanowić potencjał w działaniach konserwacyjnych. Model docelowo ma być również wykorzystany do rekonstrukcji z wykorzystaniem technologii wytwarzania addytywnego – druku 3D, co wymaga szczególnej dbałości o kompletność danych, dokładność odwzorowania detali i optymalną gęstość uzyskanej siatki geometrycznej.

W związku z tym przyjęto wysokie standardy jakościowe dotyczące planowania misji lotniczej i doboru parametrów pozyskania danych. Do realizacji nalotu wykorzystano BSP (DJI Mavic Air 2). Dron ten umożliwia uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości przy stosunkowo dużej mobilności i łatwości operacyjnej w przestrzeni powietrznej.

W celu zapewnienia kompleksowego pokrycia obiektu zaplanowano autonomiczną operację lotniczą. Zdjęcia wykonywano w trybie interwałowym (co 2 sekundy), co umożliwiło uzyskanie odpowiedniego pokrycia i wielokątowych ujęć, niezbędnych do dokładnej rekonstrukcji geometrii obiektu. Tak zaprojektowana misja pozwoliła na zebranie wysokiej jakości danych fotogrametrycznych, przy zachowaniu prostoty operacyjnej i bezpieczeństwa lotu w pobliżu infrastruktury użytkowej. W ramach działań z użyciem BSP wykonano łącznie 348 zdjęć, wraz z zapisem trajektorii lotu oraz metadanymi EXIF (m.in. Geotagowanie, ustawienia aparatu).

Należyte zaplanowanie operacji lotniczej stanowiło kluczowy etap w procesie pozyskiwania danych fotogrametrycznych, wpływając bezpośrednio na jakość końcowego modelu 3D. W przypadku realizacji dokumentacji ołtarza papięskiego w Starym Sączu, planowanie misji zostało przeprowadzone z wykorzystaniem platformy Dronelink, umożliwiającej precyzyjne definiowanie trajektorii autonomicznego lotu, a w tym ustawień kamery, układu stabilizacji obrazu, jak również kąta kadru względem poziomu referencyjnego oraz logiki aktywacji funkcji wykonywania zdjęć seryjnych.

Z uwagi na złożoną geometrię obiektu i obecność licznych detali architektonicznych, w tym zadaszania oraz nawisy, zdecydowano się na zastosowanie trajektorii czterech orbit koncentrycznych wokół ołtarza. Takie podejście umożliwiło rejestrację obiektu z różnych wysokości i perspektyw, minimalizując ryzyko wystąpienia martwych stref w strukturze modelu 3D. Trajektorie zaplanowano na pułapach AGL 30 m, 25 m, 20 m i 15 m AGL (z ang. *Above Ground Level*, czyli powyżej poziomu gruntu), co zapewniło zarówno widok z góry, jak i zbliżone do poziomu gruntu ujęcia boczne. Każda orbita została wykonana w pełnym zakresie 360°, zgodnie z ruchem wskazówek zegara, przy

stałej odległości 45 m od środka obiektu. Dodatkowo, ustalono, że BSP w czasie wykonywania lotu, musi być obrócony o 90° względem stycznej do kierunku określonego przez trajektorię orbity.

Parametry lotu oraz ustawienia kamery (rysunek 2) zostały tak dobrane, żeby osiągnąć możliwie największe pokrycie zdjęciowe oraz jakość danych z zachowaniem skupienia kadru na części centralnej obiektu na wysokości ok. 5m AGL (POI – z ang. *Point Of Interest*, czyli Punkt Zainteresowania). Zdjęcia rejestrowano w trybie interwałowym, co przy prędkości obiegu drona pozwoliło na uzyskanie dużego pokrycia podłużnego i poprzecznego (ang. *overlap* i *sidelap*), niezbędnego do prawidłowego przebiegu procesu identyfikacji chmury punktów, triangulacji oraz generowania siatki fotogrametrycznej. Dodatkowym czynnikiem wspierającym jakość danych, które można brać pod uwagę przy planowaniu misji, jest zapewnienie względnej stabilności warunków pogodowych, oświetleniowych oraz brak istotnych zakłóceń w otoczeniu obiektu, np. ruchu osób zwiedzających obiekt.



Pułap (AGL)	Wysokość nad POI	Kąt gimbała ($^\circ$)	Prędkość obiegu (km/h)
30 m	25 m	-29 $^\circ$	6
25 m	20 m	-24 $^\circ$	6
20 m	15 m	-18 $^\circ$	6
15 m	10 m	-13 $^\circ$	6

Rysunek 2. Projekcja trajektorii operacji narzucona na ortofotomapę wraz z podsumowaniem (DroneLink) i parametrami operacji lotniczej.

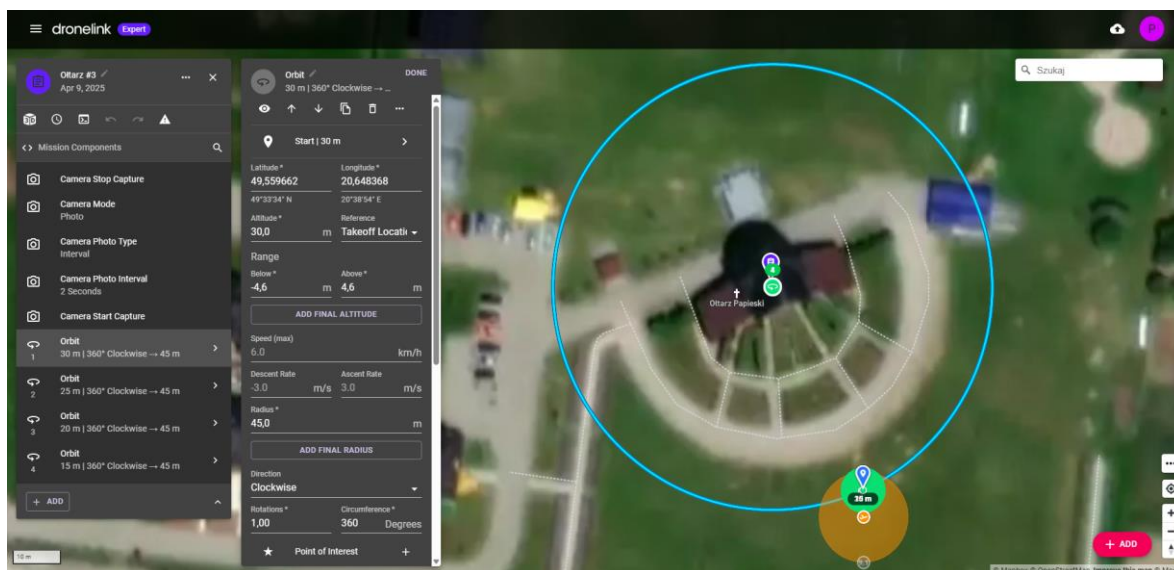
Źródło: opracowanie własne.

W trakcie planowania uwzględniono także czynniki bezpieczeństwa operacji, takie jak m.in. lokalizacja ewentualnych osób postronnych, przeszkody naziemne, obecność zabudowań, linii energetycznych i zgodność z obowiązującymi przepisami lotniczymi. Dzięki funkcjom automatyzacji i dokładnemu odwzorowaniu planu lotu

na ortofotomapie, a także w przestrzeni 3D, operator mógł przeanalizować poprawność wygenerowanego planu misji, a w czasie realizacji lotu skupić się na bieżącej obserwacji parametrów misji i reagowaniu na ewentualne nieprzewidziane zdarzenia.

Etap realizacji nalotu został przeprowadzony zgodnie z zaprojektowaną wcześniej misją w aplikacji Dronelink. Operację wykonano z użyciem drona DJI Mavic Air 2, wyposażonego w kamerę o matrycy 1/2 cala i rozdzielczości 48 MP, co umożliwiło rejestrację obrazów wysokiej rozdzielczości i szczegółowości. Przed przystąpieniem do startu dokonano kontroli stanu technicznego sprzętu, poziomu naładowania akumulatorów, stabilności i dokładności pozycjonowania systemu GPS, dostępności przestrzeni powietrznej w danym sektorze i zgłoszenia operacji w systemie DroneTower, administrowanego przez Polską Agencję Żeglugi Powietrznej.

Misja została wykonana w warunkach umiarkowanego nasłonecznienia, przy niewielkim zachmurzeniu oraz braku istotnych podmuchów wiatru, które mogłyby wprowadzić zakłócenia w zaplanowanej trajektorii lotu. Takie warunki atmosferyczne wraz z zaawansowanym systemem 3-osiowej stabilizacji kamery sprzyjały uzyskaniu stabilnych, nieporuszonych zdjęć, a jednocześnie umożliwiły zachowanie równomiernego oświetlenia obiektu na wszystkich ujęciach. Ołtarz jako konstrukcja częściowo drewniana, o złożonej strukturze przestrzennej, wymagał rejestracji obrazów z wielu kierunków i wysokości, co udało się osiągnąć poprzez zaprogramowane wcześniej cztery orbity koncentryczne o zmiennych pułapach lotu. Na rysunku 3 przedstawiono szczegóły ustawień etapu misji w DroneLink z ortofotomapą sytuacyjną.

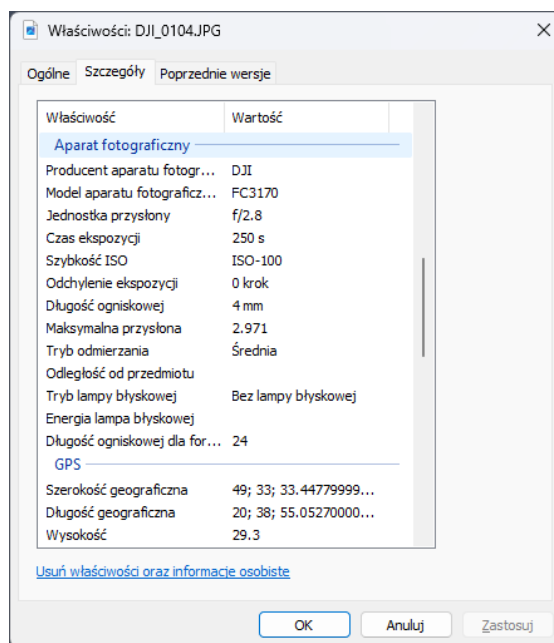


Rysunek 3. Szczegóły ustawień etapu misji w DroneLink z ortofotomapą sytuacyjną.

Źródło: opracowanie własne.

Fotografie wykonywano w trybie interwałowym (interwał: 2 sekundy), co pozwoliło uzyskać odpowiednie pokrycie podłużne i poprzeczne między zdjęciami, minimalizując ryzyko luk w danych. Operator nadzorował przebieg misji z zachowaniem wizualnego kontaktu z BSP (VLOS z ang. *Visual Line Of Sight*), monitorując na bieżąco parametry systemowe, takie jak pozycja drona, wysokość, liczba dostępnych satelitów GPS i stan transmisji danych telemetrycznych.

Cała misja przebiegła bez zakłóceń, a w jej efekcie uzyskano 348 zdjęć wysokiej rozdzielczości, obejmujących obiekt z każdej istotnej perspektywy. Wszystkie zdjęcia zostały zapisane w formacie JPEG, z pełnym zapisem metadanych EXIF, zawierającymi informacje o czasie wykonania, lokalizacji geograficznej oraz ustawieniach kamery. Dodatkowo zarejestrowano trajektorię lotu, co umożliwiło precyzyjne odwzorowanie pozycji każdej fotografii w przestrzeni 3D (rysunek 4).



Rysunek 4. Metadane ze specyfikacją sprzętową oraz geolokalizacją, zapisane w pliku JPEG. Źródło: opracowanie własne.

Dzięki prawidłowemu przygotowaniu operacji oraz sprzyjającym warunkom terenowym i atmosferycznym, pozyskane dane cyfrowe charakteryzowały się wysoką jakością, co przekłada się bezpośrednio na skuteczność dalszych etapów opracowania fotogrametrycznego.

Proces przetwarzania danych fotogrametrycznych przeprowadzony został z wykorzystaniem oprogramowania 3DF Zephyr, które umożliwia kompleksową obróbkę zdjęć i generowanie modeli przestrzennych w oparciu o algorytmy Structure from Motion (SfM) i Multi View Stereo (MVS). Po zaimportowaniu 348 zdjęć wykonanych podczas misji, uruchomiono proces automatycznego wyrównania zdjęć (z ang. *image alignment*), którego celem było ustalenie pozycji i orientacji zdjęć względem siebie w przestrzeni trójwymiarowej. Proces ten jest w pełni automatyczny i wykorzystuje metadane EXIF.

Kolejnym etapem było wygenerowanie chmury punktów, która stanowiła podstawę do triangulacji i w efekcie rekonstrukcji siatki trójwymiarowej (mesh). W procesie tym zastosowano ustawienia wysokiej dokładności, przy zachowaniu optymalnego balansu pomiędzy szczegółowością a czasem obliczeń. Wygenerowana siatka została następnie oteksturowana, a model końcowy poddano ręcznej weryfikacji w celu wykrycia ewentualnych błędów rekonstrukcyjnych, takich jak rozciągnięcia czy zniekształcenia wynikające z niewystarczającego pokrycia zdjęciowego niektórych fragmentów.

Model finalny został wyeksportowany do formatu STL, umożliwiającego jego dalsze wykorzystanie w środowiskach CAD.

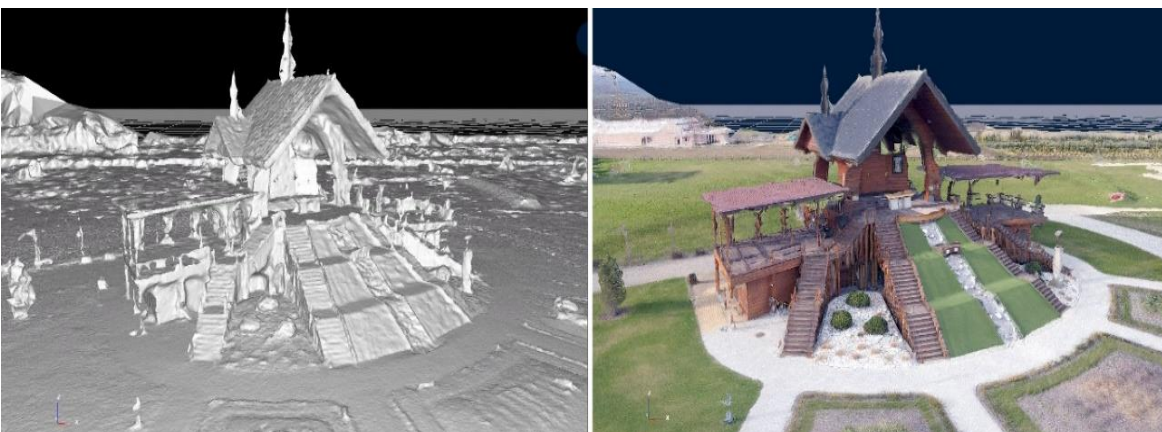
Zastosowanie 3DF Zephyr pozwoliło na uzyskanie modelu, który spełnia wymagania stawiane zarówno pod kątem dokumentacyjnym, inspekcyjnym, jak i jako referencja do projektowania rekonstrukcyjnego. Co istotne, model ten może zostać przekształcony i zoptymalizowany pod kątem dalszego procesowania, np. segmentacji, reteksturowania czy konwersji i obróbki do formatu nadającego się bezpośrednio do druku 3D.



Rysunek 5. Porównanie siatki nieteksturowanej oraz siatki z nałożonymi teksturami.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 6. Porównanie siatki nieteksturowanej oraz siatki z nałożonymi teksturami.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7. Porównanie siatki nieteksturowanej oraz siatki z nałożonymi teksturami.
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1

Parametry uzyskanej siatki z programu 3DF Zephyr

Parametry siatki	Wartość	Jednostka
Punkty	1 005 627	szt.
Trójkąty	2 011 808	szt.
Czas generowania siatki	163	min.

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskana siatka trójwymiarowa składa się z ok. 1 mln punktów i obejmuje nie tylko sam obiekt, ale też znaczną część jego otoczenia. Model 3D wiernie odwzorowuje bryłę architektoniczną obiektu, łącznie z jego złożonymi detalami, takimi jak schody, dachy, elementy konstrukcji drewnianej czy przestrzenie ażurowe. Analiza modelu wskazuje na wysoką jakość rekonstrukcji geometrycznej w obszarach dobrze pokrytych zdjęciami – szczególnie w strefach frontalnych i górnych, gdzie rejestrowano wiele ujęć z różnych pułapów oraz kątów.

Widoczne są też elementy otoczenia, m.in. nawierzchnia placu, rabaty kwiatowe i latarnie. Ich obecność może być dodatkowym atutem w kontekście dokumentacyjnym, ale w przypadku potrzeby wydzielenia samego obiektu, możliwe jest łatwe wykonanie operacji separacji siatki w środowiskach CAD lub DCC (*Digital Content Creation*).

Pomimo ogólnie wysokiej jakości, zauważalne są pewne ograniczenia typowe dla modeli opartych na obrazach, w szczególności w mniej dostępnych partiach obiektu (np. pod zadaszeniami), gdzie warunki oświetleniowe i ograniczone kąty obserwacji mogły wpłynąć na lokalną utratę szczegółowości lub niepełne pokrycie. Artefakty tego typu można zidentyfikować wizualnie lub zredukować w dalszej obróbce edycyjnej.

Model został oceniony jako wysoko użyteczny dla celów dokumentacyjnych, jak też w kontekście dalszego przetwarzania – w tym zastosowań rekonstrukcyjnych, wirtualnych wizualizacji i przygotowania danych do wykonania fizycznego wydruku 3D z zastosowaniem technologii FDM lub DLP. Zachowany poziom szczegółowości, zgodność proporcji i pełna ciągłość geometryczna siatki umożliwiają jego wykorzystanie jako precyzyjnej referencji w środowiskach BIM lub konserwatorskich systemach planowania.

ROZDZIAŁ 9

Projekt koncepcyjny napędu hydrostatycznego przenośnika taśmowego pracującego z programowalną prędkością

(Piotr Obrzut¹)

Przenośniki transportowe są kluczowym elementem infrastruktury logistycznej i przemysłowej. Ich odpowiedni dobór, eksploatacja i modernizacja mają bezpośredni wpływ na wydajność zakładów oraz bezpieczeństwo pracy. W dobie automatyzacji i cyfryzacji rola przenośników będzie nadal rosła, a ich konstrukcje będą ewoluować w kierunku większej inteligencji, elastyczności i zrównoważonego rozwoju.

Tak jak w przypadku innych systemów technicznych, tak też w odniesieniu do przenośników wydaje się rzeczą naturalną ich mechatronizacja. Cechą układów mechatronicznych jest bowiem nie tylko synergia mechaniki, elektroniki i informatyki, ale też podejście do zagadnień projektowania w sposób kompleksowy. W tym przypadku celem samym w sobie jest otrzymanie produktu o znacznie lepszych parametrach eksploatacyjnych. Lepsze parametry eksploatacyjne pozwalają m.in. na optymalizację pracy urządzenia, zwiększenie jego niezawodności, co w efekcie prowadzi do zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych.

Celem pracy jest zaprojektowanie napędu hydrostatycznego dla dozującego przenośnika taśmowego transportującego materiał z programowalną prędkością.

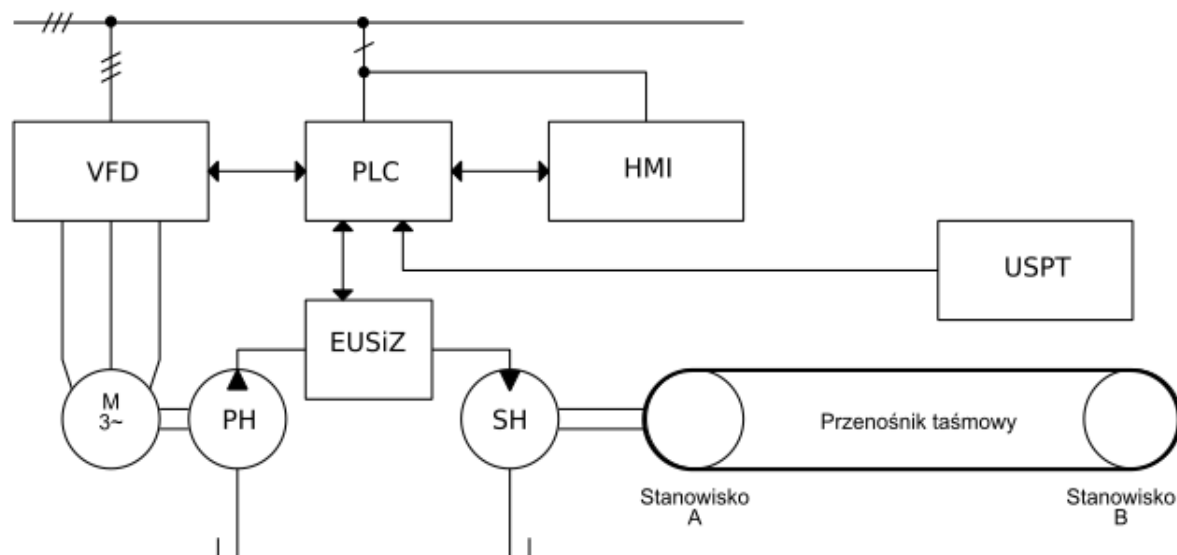
Ponieważ zadaniem takiego przenośnika będzie przede wszystkim precyzyjne dozowanie materiału transportowego, najważniejszym założeniem w projekcie będzie opracowanie takiego napędu, który pozwoliłby na odpowiednie kształtowanie charakterystyki prędkości transportowanego materiału w funkcji np. ilości, wagi lub innego parametru procesorowego.

Aby uniknąć konieczności budowy złożonego systemu sterowania pompą o zmiennej wydajności i silnika o zmiennej chłonności, o którym wspominają autorzy (Jędrzykiewicz, Pluta, Stojek, 2004), w zaprezentowanej koncepcji układ napędowy będzie złożony z następujących elementów:

- pompy tłokowej o stałej wydajności napędzanej silnikiem indukcyjnym 3-fazowym zasilanym z przemiennika częstotliwości;
- silnika tłokowego o stałej chłonności bezpośrednio sprzęgniętego z bębnum napędowym przenośnika;
- sterownika PLC z wejściami i wyjściami dyskretnymi oraz analogowymi sterujący całym procesem transportu;
- elementów operatorskich i sygnalizacyjnych umożliwiających sterowanie pracą przenośnika.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0006-3675-368X.

Aby lepiej zobrazować działanie przenośnika, na rysunku 1 został przedstawiony schemat funkcjonalny przenośnika taśmowego, bez podania szczegółów technicznych dotyczących poszczególnych elementów tworzących działanie tego systemu technicznego. Dobór komponentów systemu na tym poziomie został pominięty, by lepiej uwidocznić ideę koncepcji przyświecającej projektowi.



Rysunek 1. Schemat funkcjonalny przenośnika: PH – pompa hydrauliczna, SH – silnik hydrauliczny, VFD – przebiegacz częstotliwości, PLC – sterownik programowalny, HMI – panel operatorski, EUSiZ – elektrohydrauliczny układ sterowania i zabezpieczenia, USPT – układ sensoryczny przenośnika taśmowego.

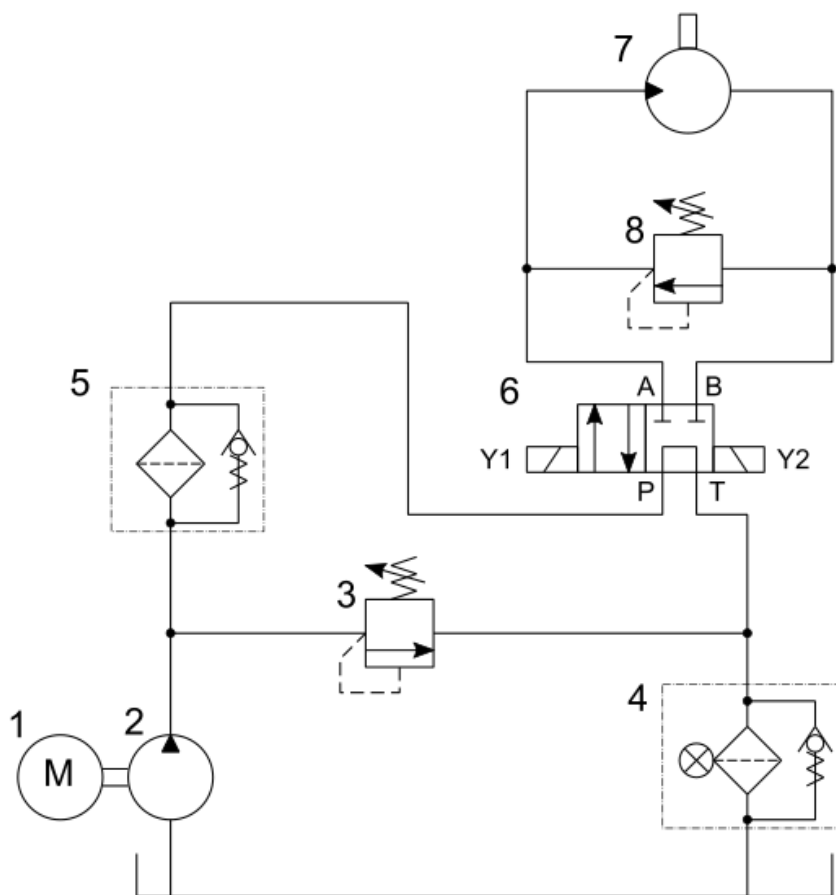
Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z rysunku 1, przenośnik taśmowy napędzany jest za pomocą silnika hydraulicznego SH bezpośrednio sprzęgniętego z bębnum napędowym. Prędkość rozwijana przez ten silnik zależy od natężenia przepływu cieczy pod ciśnieniem wytwarzanego przez pompę hydrauliczną PH. To, ile cieczy w jednostce czasu zostanie dostarczone do silnika napędowego przenośnika, zależy jest od prędkości obrotowej silnika indukcyjnego M sprzęgniętego z pompą hydrauliczną. Tego typu sterowanie, określane mianem sterowania objętościowego, podnosi sprawność takiego napędu (Stefański, Zawarczyński, Zawarczyński, Wikarek, Dmochowski, 2023).

Silnik napędzający pompę hydrauliczną zasilany jest z przebiegacza częstotliwości. Pozwala to zmieniać wartość prędkości silnika w płynny sposób w szerokim zakresie. To, jaka wartość prędkości obrotowej silnika indukcyjnego powinna być rozwijana, jest z kolei uzależnione od prądowego sygnału sterującego wyliczanego i generowanego przez sterownik programowalny PLC. W koncepcji przyjęto, że obliczenia będą wykonywane na podstawie danych pochodzących od czujnika obecności, którego zadaniem będzie zliczanie elementów transportowanych przez przenośnik.

Elementem układu służącym do kontroli pracy systemu transportowego bazującego na przenośniku taśmowym będzie panel sterujący HMI.

Schemat ideowy podsystemu elektrohydraulicznego ukazuje rysunek 2. Silnik indukcyjny zasilany z przemiennika częstotliwości napędza poprzez sprzęgło pompę zębatą 2. Zmiana prędkości obrotowej silnika indukcyjnego ustala określone natężenie przepływu cieczy pod ciśnieniem wytwarzanym przez pompę hydrauliczną. Działanie silnika hydraulicznego 7 uzależnione jest od położenia elektrozaworu 4/2 sterującego kierunkiem przepływu cieczy roboczej.



Rysunek 2. Schemat ideowy podsystemu hydraulicznego.

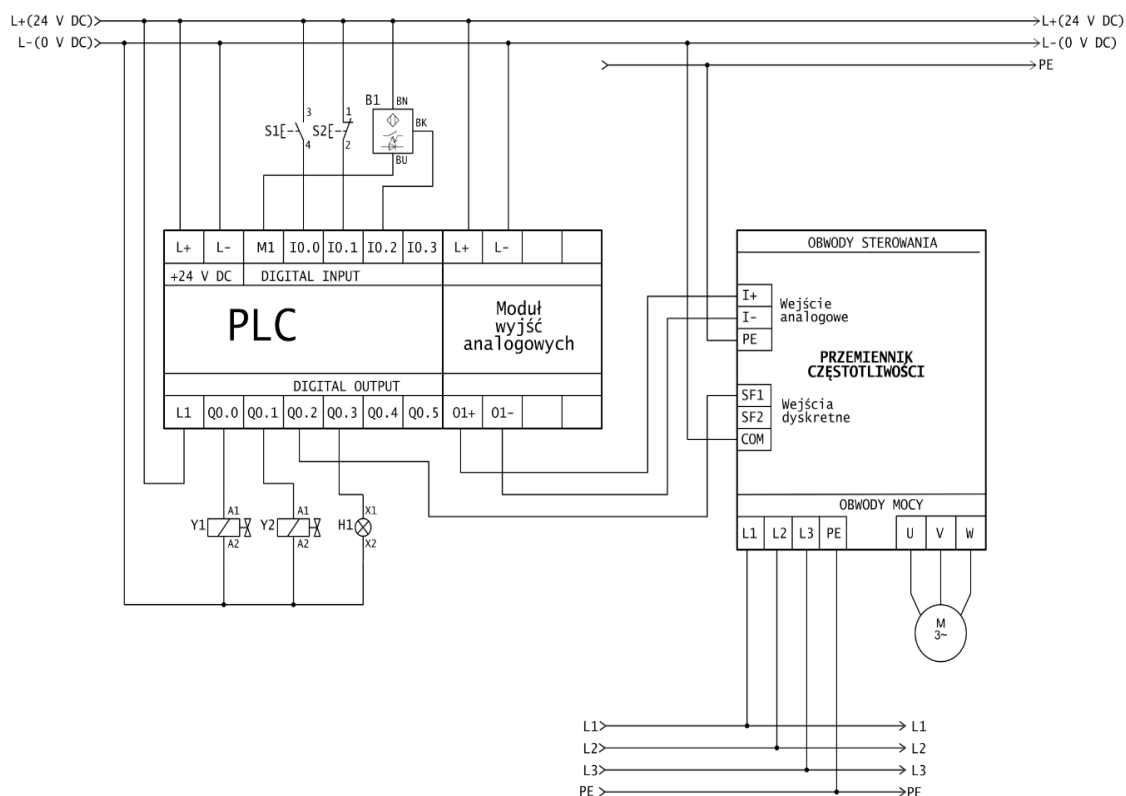
Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli przesterowana jest cewka Y1 elektrozaworu, silnik hydrauliczny wiruje w kierunku umożliwiającym transport obiektów ze stanowiska A do stanowiska B (rysunek 2). Przesterowanie cewki Y2 sprawia, że transport obiektów zostaje zatrzymany.

Dodatkowo w układzie znajduje się zawór przelewowy 3, filtr tłoczny 5 i filtr sphywowy 6, których zadaniem zabezpieczenie elementów roboczych i całej instalacji hydraulicznej.

W projekcie przewidziano również zabezpieczenie bezwładnościowe, które jest konieczne w przypadku, gdy ma miejsce sytuacja występująca po nagłym zatrzymaniu silnika roboczego (Jędrzykiewicz, Pluta, Stojek, 2004). W tej sytuacji dochodzi do wzrostu ciśnienia w przewodzie B i spadku ciśnienia cieczy roboczej w przewodzie A. Ma to miejsce w chwili, gdy rozdzielacz zostaje przesterowany z pozycji „a” do pozycji „b”. Funkcję zabezpieczenia bezwładnościowego pełni w układzie przedstawionym na rysunku 2 zawór maksymalny 8. Otwarcie zaworu maksymalnego skutkuje wyrównaniem ciśnień w obu przewodach.

Schemat ideowy podsystemu elektrycznego przenośnika taśmowego ukazuje rysunek 3.



Rysunek 3. Schemat ideowy podsystemu elektrycznego.

Źródło: opracowanie własne.

Podsystem elektryczny jest sterowanym źródłem energii dla pompy hydraulicznej. Algorytm sterujący realizowany jest przez sterownik programowalny. Do jego wejść podłączone są dwa przyciski sterujące S1 i S2. Przycisk monostabilny zwrotny S1 pełni funkcję załączającą pracę przenośnika, a rozwierny przycisk S2 wyłącza ruch przenośnika. Ostatnim elementem podłączonym do wejścia dyskretnego PLC jest czujnik optyczny odbiciowy B1, którego zadaniem jest zliczanie transportowanych elementów.

Do wyjść cyfrowych sterownika programowalnego podłączone są dwie cewki elektrozaworu Y1 i Y2, dzięki którym możliwe jest przesterowanie rozdzielacza hydraulicznego w podsystemie elektrohydraulicznym. Załączenie cewki Y1 przesterowuje zawór do pozycji „a”. Gdy zasilana jest cewka Y2, zawór hydrauliczny powraca pozycji „b”. Jedno z wyjść dyskretnych jest podłączone do wejścia dyskretnego przemiennika częstotliwości. Sygnał z tego wyjścia ma za zadanie uruchomić silnik indukcyjny napędzający pompę. Dodatkowym elementem podłączonym do wyjścia dyskretnego PLC jest sygnalizator świetlny, który sygnalizuje pracę taśmociągu.

Sterownik programowalny oprócz wejść i wyjść dyskretnych posiada moduł dodatkowy z wyjściami analogowymi. Jedno z tych wyjść analogowych podłączone do wejścia analogowego przemiennika częstotliwości generuje sygnał prądowy z przedziału 4-20 mA. Za jego pomocą ustalana jest prędkość, z jaką wiruje silnik elektryczny.

Rolę elementu nastawczego w podsystemie elektrycznym pełni przemiennik częstotliwości zasilany z instalacji trójfazowej, zaś elementem wykonawczym w podsystemie jest trójfazowy silnik indukcyjny.

Jednym z głównych założeń projektu było opracowanie pewnych mechanizmów umożliwiających w sposób dowolny kształtowanie charakterystyki prędkości przenośnika. Opracowanie to przebiegało dwuetapowo. Pierwszy etap polegał na stworzeniu ogólnego algorytmu sterowania pracą przenośnika, który uwzględniałby sygnały pochodzące od elementów zadających, w tym wypadku przycisków sterowniczych S1 i S2 oraz czujnika optycznego B1.

Drugi etap dotyczył opracowania sposobu kształtowania charakterystyki prędkości w funkcji zliczanych elementów na podstawie podanych punktów wejściowych, przez które charakterystyka miałaby przebiegać. W tym zakresie działań wykorzystano sieci neuronowe do aproksymowania funkcji. Cały algorytm został opracowany w oprogramowaniu Octave.

Ogólny algorytm sterowania w postaci grafu sekwencji przedstawia rysunek 4. Poszczególne kroki w algorytmie reprezentują działania sterownicze wykonywane przez sterownik programowalny.

Po wciśnięciu przycisku S1 przy niewciśniętym przycisku S2, załączana jest lampka sygnalizacyjna H1 oraz odliczane jest 5-sekundowa zwłoka czasowa. Jeżeli w tym czasie nie zostanie wciśnięty przycisk S2, to po odliczeniu czasu przenośnik zostaje uruchomiony z minimalną prędkością, bezpieczną z punktu widzenia eksploatacyjnego dla pompy oraz silnika hydraulicznego. Tej minimalnej prędkości z założenia przypisana jest wartość 4 mA sygnału prądowego, wygenerowanego na wyjściu analogowym sterownika programowalnego.

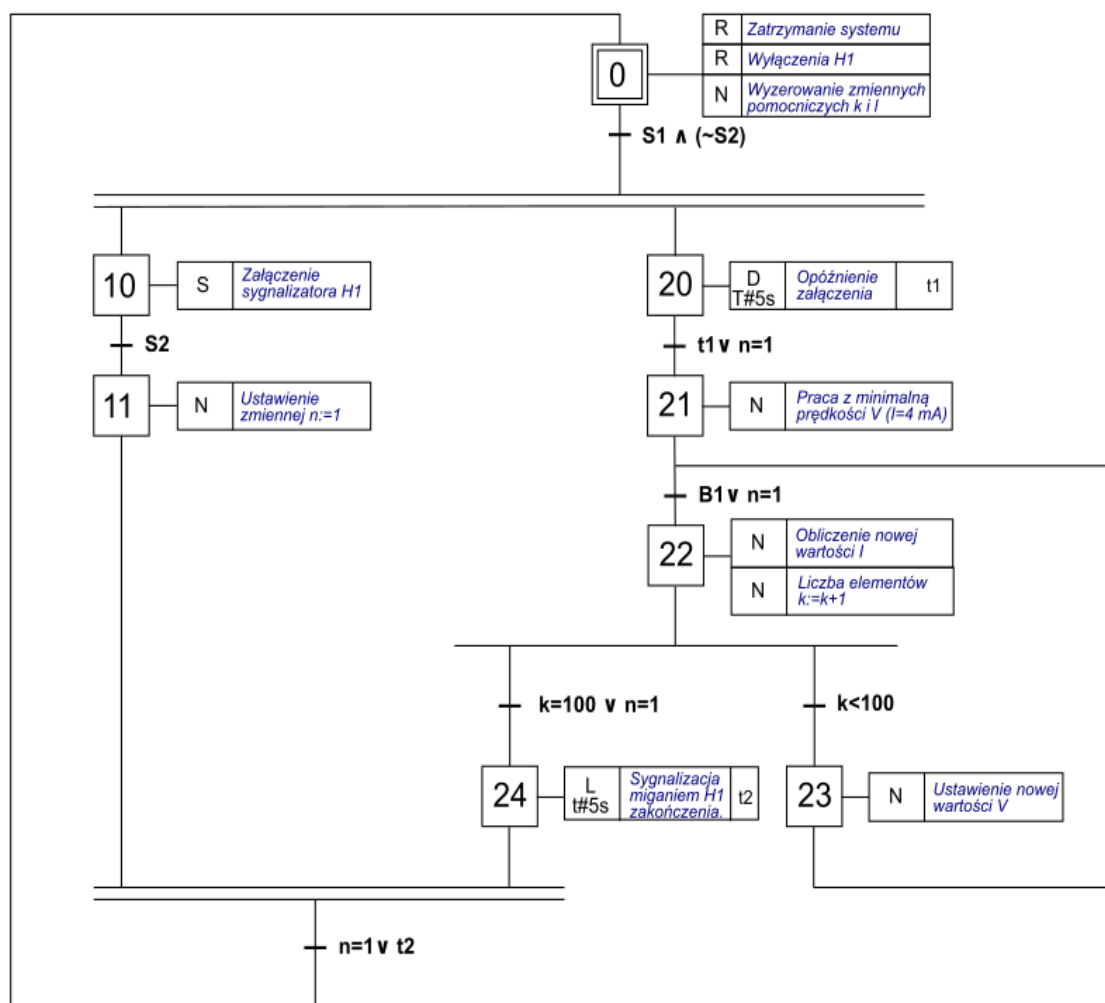
Po wykryciu przez czujnik B1 obiektu na przenośniku, wartość prędkości zostanie wyliczona przez sterownik i jeżeli ilość transportowanych obiektów będzie mniejsza od założonej wartości 100, to przenośnik zacznie zmieniać każdorazowo prędkość transportową w zależności od przyjętej charakterystyki $I=f(k)$, gdzie k to liczba wykrytych obiektów na taśmociągu, a I to wartość prądu sterującego, jaką powinien wygenerować sterownik PLC i przesłać do przemiennika częstotliwości.

Po osiągnięciu ustalonej ilości przetransportowanych obiektów najpierw wyłączy się sygnalizator świetlny i przenośnik. Operację ponownego uruchomienia będzie można powtórzyć, ponownie wciskając przycisk sterowniczy S1.

W algorytmie uwzględniono również reakcję układu sterującego na wciśnięcie przycisku S2 podczas pracy przenośnika. Jeżeli taka sytuacja będzie miała miejsce, to bez względu na to, na jakim etapie wykonywania algorytmu będzie układ sterujący, wszystkie działania w krokach 21, 22 oraz 23 zostaną zaniechane i system przejdzie do stanu zapisanego w kroku początkowym 0.

Celem uniknięcia zawłości, w algorytmie przedstawionym na rysunku 4, nie uwzględniono możliwych do zrealizowania różnych procedur diagnozujących pracę przenośnika takich jak zbyt długa aktywność czujnika B1, świadcząca np. o wykrywaniu obiektu pomimo jego nieobecności na przenośniku.

Wiele takich programowych procedur zabezpieczających możliwych jest do wdrożenia. Jest to tym łatwiejsze, jeżeli zwiększa się ilość zastosowanych sensorów procesowych w systemie. Mogą to być czujniki mierzące np. poziom napięcia taśmy, ciężar transportowanych obiektów, różnicę w prędkości zadanej i rzeczywistej przenośnika.



Rysunek 4. Algorytm sterowania pracą przenośnika.

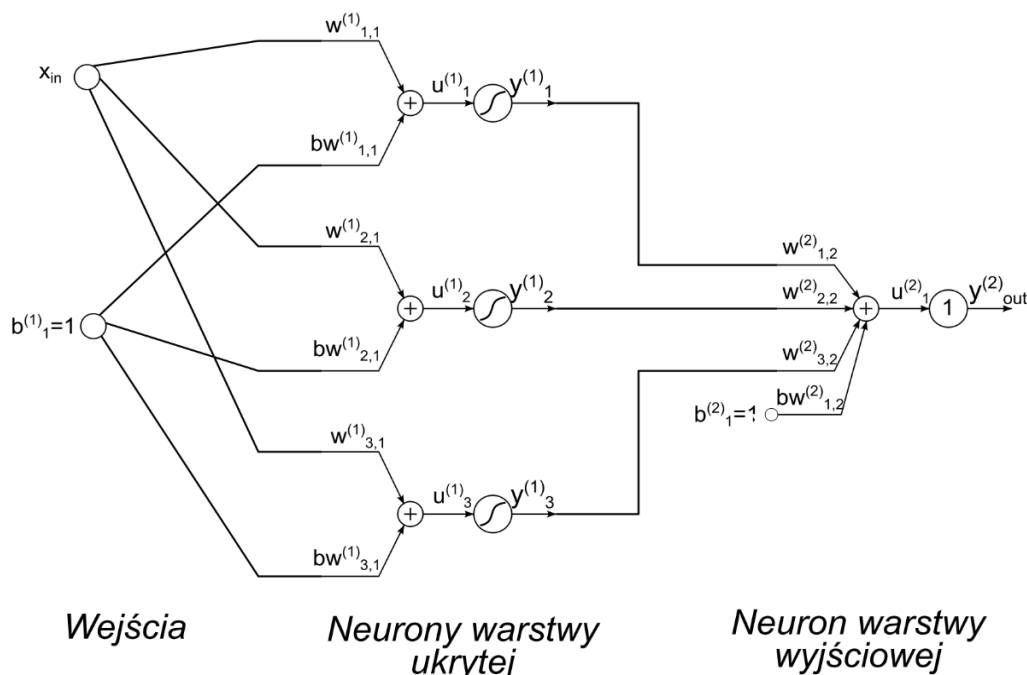
Źródło: opracowanie własne.

Przebiegi częstotliwości należą do urządzeń w których istnieje możliwość zadawania określonego przebiegu prędkości w funkcji czasu lub w funkcji innych parametrów procesowych. Są to jednak często przebiegi o charakterze skokowym.

Aby tego typu ograniczenie ominąć, w tym koncepcyjnym projekcie uznano, że funkcja prędkości, a dokładniej sygnału prądowego pochodzącego od PLC, ustalającego określoną prędkość napędzanego silnika, będzie aproksymowana za pomocą sieci neuronowej.

Wyniki tej aproksymacji będą następnie wprowadzane do programowalnego sterownika jako parametry sterowania, uzyskując tym samym swobodę kształtowania przebiegów prędkości transportowania obiektów przez przenośnik.

W tym celu w programie Octave został opracowany prosty algorytm, dzięki któremu taką aproksymację można wykonać. Model sieci neuronowej zaimplementowanej w algorytmie przedstawia rysunek 5.



Rysunek 5. Model sieci neuronowej zaimplementowany do aproksymacji funkcji prędkości w zależności od liczby zliczonych elementów na taśmieciągu
 Źródło: opracowanie własne.

Neurony sieci ukrytej należą do grupy neuronów z nieliniową funkcją aktywacji. Użyty w algorytmie model neuronów warstwy ukrytej posiada sigmoidalną funkcję aktywacji, która wiąże sygnał pobudzenia u z wyjściem za pomocą następującej zależności (1).

$$y_i^{(1)} = \frac{1}{1 + e^{-\beta u_i^{(1)}}} \quad (1)$$

gdzie:

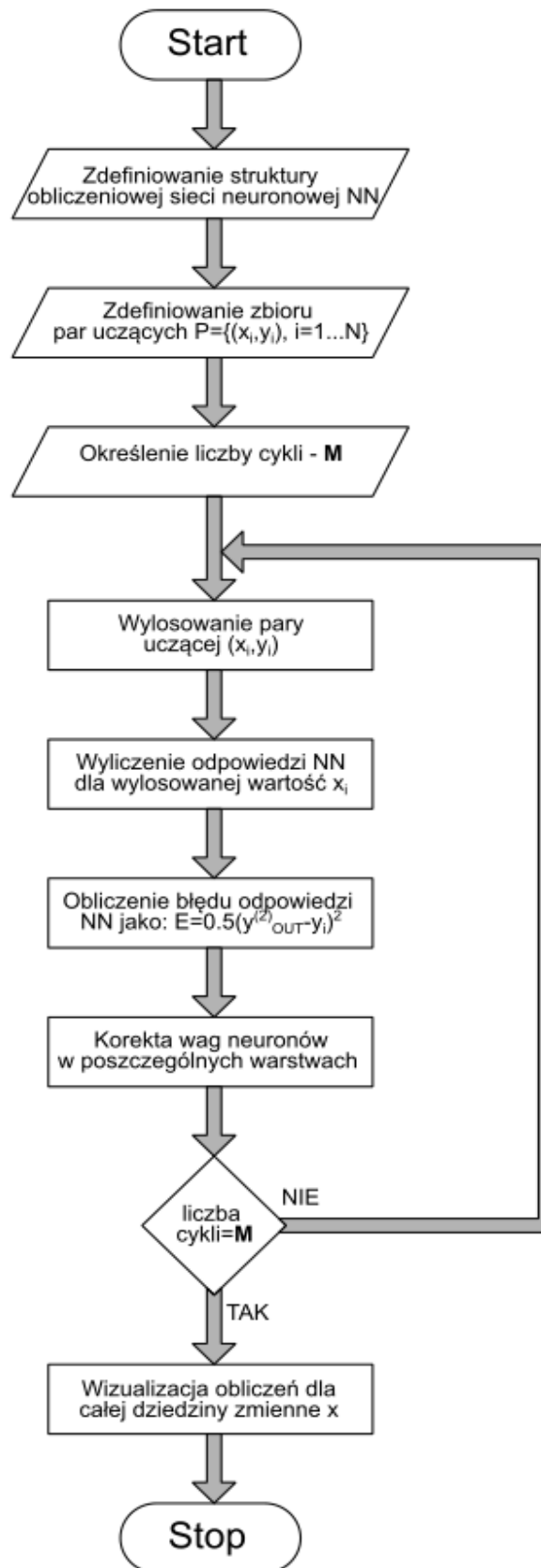
$u_i^{(1)} = x_{in} w_{i,1}^{(1)} + b w_{i,1}^{(1)}$ – jest łącznym pobudzeniem neuronu (Tadeusiewicz, 1993).
 $i = 1, 2, 3$ numery kolejnych neuronów

Neuron warstwy wyjściowej jest neuronem liniowym opisany równaniem (2):

$$y_{OUT}^{(2)} = w_{1,2}^{(2)} y_1^{(1)} + w_{2,2}^{(2)} y_2^{(1)} + w_{3,2}^{(2)} y_3^{(1)} + b w_{1,2}^{(2)} \quad (2)$$

Wykorzystanie sieci neuronowych do aproksymacji funkcji zadanej przy pomocy liczby par punktów (danych uczących) $p_i = (x_i, y_i)$ dla $i = 1, 2, \dots, N$ polega na wyszukaniu odpowiednich wag dla neuronów w całej sieci, tak aby funkcja kosztów dążyła do minimum. Stworzony skrypt obliczeniowy opiera się na działaniach, które przedstawia algorytm blokowy ukazany na rysunku 6.

W koncepcji projektu zdefiniowano przykładowy przebieg na podstawie podanych punktów zapisanych w tabeli 1.



Rysunek 6. Algorytm obliczeniowy wyznaczający wagi aproksymującej sieci neuronowej.
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1

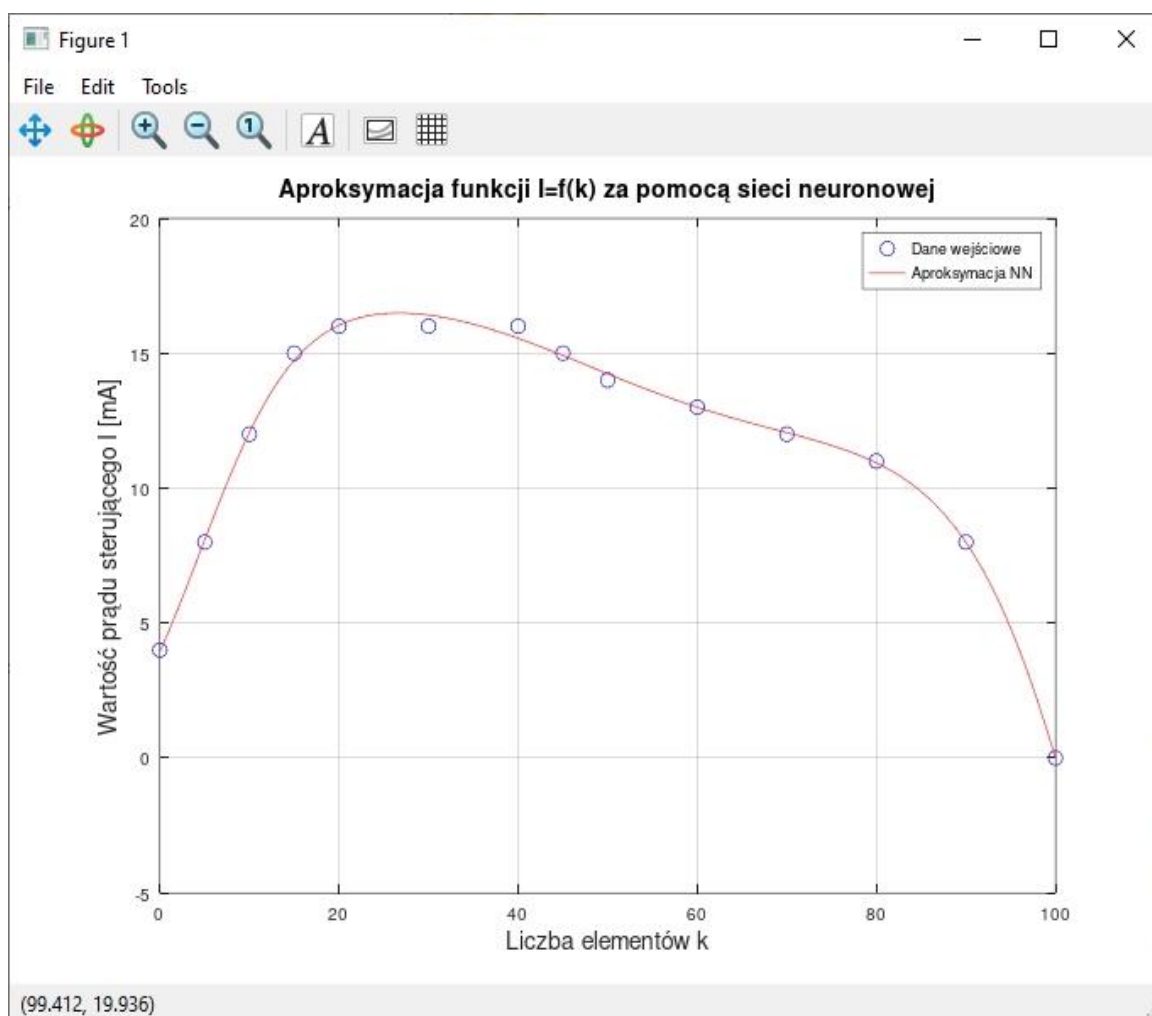
Pary danych wykorzystanych w uczeniu sieci neuronowej

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
k	0	5	10	15	20	30	40	45	50	60	70	80	90	100
I	4	8	12	15	16	16	16	15	14	13	12	11	8	0

Źródło: opracowanie własne.

Podane dane w tabeli 1 reprezentują zależność funkcyjną pomiędzy liczbą przetransportowanych obiektów k na przenośniku a wartością sygnału prądowego I podawanego na wejście analogowe przemiennika częstotliwości przez sterownik programowalny.

Wizualizację wyników obliczeń wykonanych przez skrypt zapisany w programie Octave przedstawia rysunek 7.



Rysunek 7. Wizualizacja obliczeń aproksymujących.

Źródło: opracowanie własne.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano następujące wartości wag dla neuronów poszczególnych warstw (tabela 2).

Tabela 2

Wartości obliczonych wag

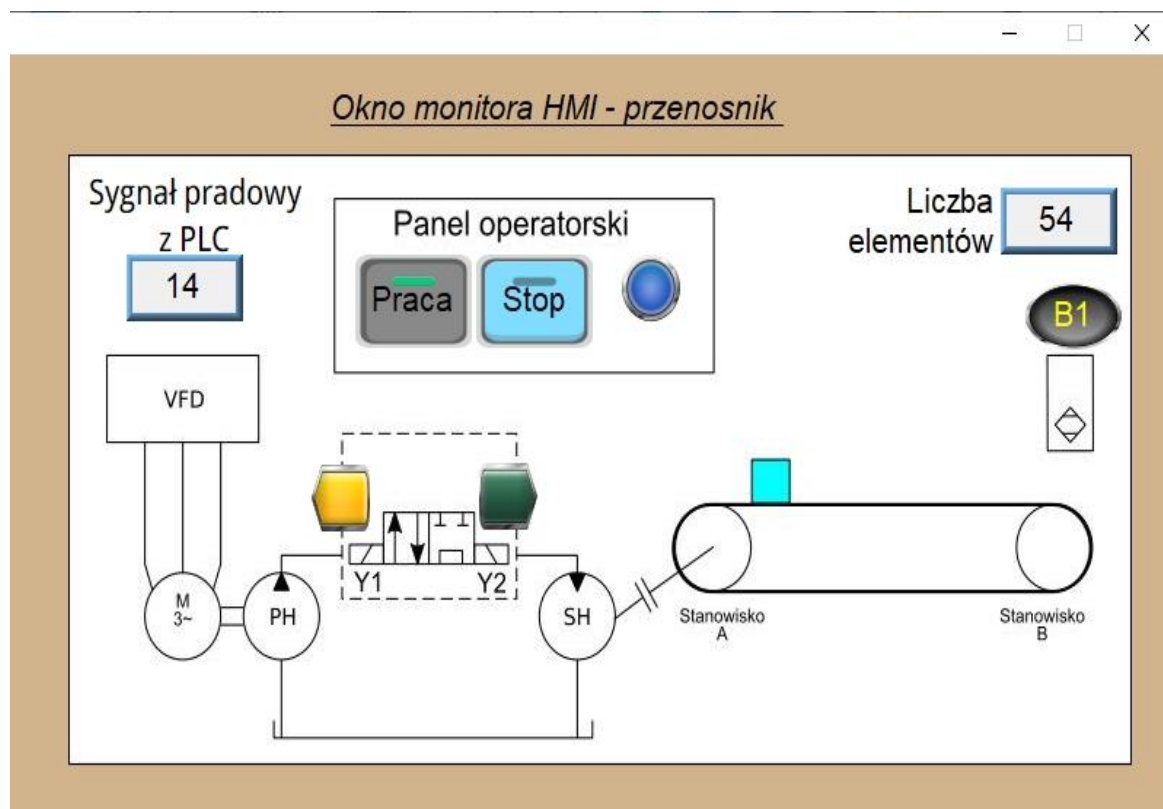
Element NN	Wartości obliczonych wag dla neuronów sieci			
Neuron N11	$w_{11}= 4.6894$	$bw_{11}= -8.7423$		
Neuron N21	$w_{21}= -5.8356$	$bw_{21}= -7.0488$		
Neuron N31	$w_{31}= 2.9163$	$bw_{31}= -0.2841$		
Neuron N12	$w_{12}= -7.0285$	$w_{22}= -4.0346$	$w_{32}= -1.2568$	$bw_{12}= 1.2906$

Źródło: opracowanie własne.

Wykorzystując środowisko symulacyjne złożone z dwóch programów komputerowych, przeprowadzono symulację działania algorytmu.

Do zaprogramowania wirtualnego sterownika programowalnego wykorzystano WinProLadder. W środowisku tym w języku LD stworzony został program dla sterownika Fatek, który za pośrednictwem wyjść dyskretnych i analogowych steruje cewkami elektrohydraulicznego rozdzielacza, przemiennikiem częstotliwości zasilającym silnik pompy i sygnalizatorem H1.

Drugim programem wykorzystanym do celów symulacji, był EasyBulder Pro. W programie tym został opracowany panel wizualizacyjny pokazany na rysunku 8.



Rysunek 8. Symulacyjny panel wizualizujący pracę przenośnika.

Źródło: opracowanie własne.

Dzięki wirtualnemu połączeniu tych dwóch programów możliwe stało się przeprowadzenie symulacji mającej na celu sprawdzenie działania systemu napędzającego przenośnik taśmowy.

Współczesne systemy techniczne klasyfikowane jako systemy mechatroniczne w większości przypadków są obiektami o dużej złożoności. Integracja podsystemu mechanicznego z elektronicznym i informatycznym sprawia (zob. Gawrysiak, 1997; Gawrysiak, 2023), że taki obiekt techniczny staje się bardziej efektywny i niezawodny. Uzyskuje się to na drodze uproszczenia złożonych mechanizmów na rzecz układów elektronicznych mniej lub bardziej swobodnie programowalnych.

W przypadku tej koncepcji autor dokonał analizy i syntezy takiego rozwiązania, które umożliwi swobodne kształtowanie charakterystyki prędkości w funkcji ilości transportowanych obiektów przez przenośnik taśmowy napędzany hydraulicznym silnikiem.

Ponieważ zmiana charakterystyk ruchu takich przenośników nie jest czynnością wykonywaną często, odciążenie sterownika PLC od wykonywania aproksymacyjnych obliczeń wydaje się uzasadnione.

Zdaniem autora, ta koncepcja wydaje się słuszna i warta dalszych badań już na poziomie układu połączonych ze sobą rzeczywistych elementów składowych takiego napędu.

ROZDZIAŁ 10

Projekt koncepcyjny humanitarnej łąpki na kuny

(Mariusz Mikulski¹)

Sąsiedztwo kuny domowej wiąże się z licznymi niedogodnościami. Te małe łasicowate zwierzęta nocami przemierzają garaże i strychy w poszukiwaniu pożywienia. Kuny domowe zamieszkujące poddasza domów często niszczą ocieplenie. Zdarza się, że przynoszą do swoich kryjówek upolowane wcześniej ofiary, co wiąże się z nieprzyjemnym zapachem i uciążliwymi owadami. Często zwierzęta te są również podejrzewane o przegryzanie kabli znajdujących się pod pokrywami samochodów. Niebezpieczne są także odchody kun, zwłaszcza jeśli mają kontakt z żywnością, np. w fabrykach produkujących żywność.

Na polskim rynku dostępne są różne rodzaje pułapek, pozwalających schwytać lub odstraszyć kuny od gospodarstw domowych i przedsiębiorstw. Niestety nie wszystkie z nich są humanitarne. Przykładowe rozwiązanie pokazano na rysunku 1. Powszechnie w tym celu wykorzystywane są np. trutki na gryzonie lub pułapki wykorzystujące klej. Wiąże się to z ogromnym cierpieniem kun, ich okaleczeniem, a najczęściej ze śmiercią.



Rysunek 1. Widok przykładowej dostępnej na rynku żywołapki.

Źródło: opracowanie własne.

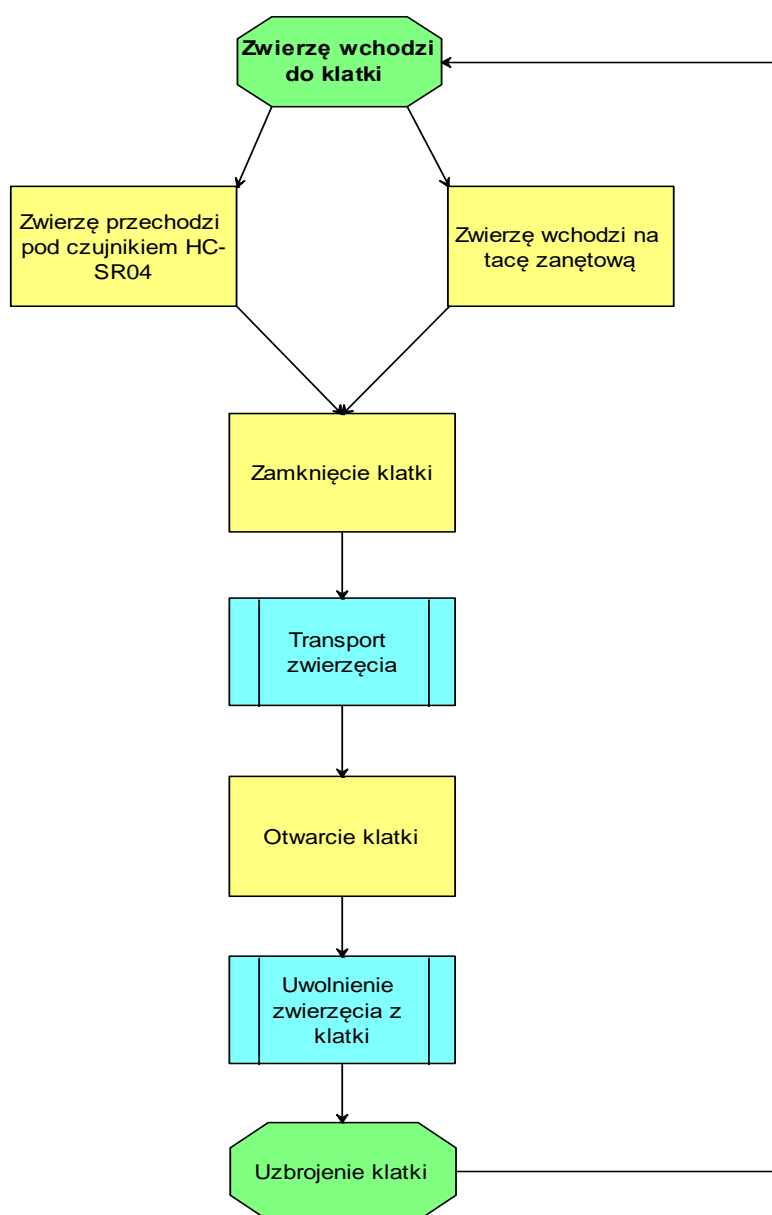
Celem rozwiązania zaprezentowanego w rozdziale jest zaprojektowanie oraz wykonanie humanitarnej, żywochwytnej pułapki na kuny, będącej synergicznym połączeniem mechaniki, elektroniki oraz programowania komputerowego. W pracy wykorzystano treści pracy inżynierskiej (Ryś, 2020). Klatka ta będzie działać z wykorzystaniem układu mechatronicznego (serwonapędu), który sterowany będzie przez płytke rozwojową (Arduino UNO), dzięki informacjom pobieranym z czujnika ultradźwiękowego oraz czujnika nacisku. Tak skonstruowana łąpka będzie cechowała się większą niezawodnością i skutecznością niż tradycyjna żywołapka działająca mechanicznie.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0003-3564-4327.

Humanitarna klatka na kunę powinna spełniać następujące założenia:

- powinna być odporna na uszkodzenia mechaniczne;
- oprzyrządowanie sterujące i elektronika wewnątrz klatki powinny być odpowiednio zabezpieczone przed uszkodzeniem i zniszczeniem;
- praca na źródle zasilania (baterii o napięciu wyjściowym 6V) / przez min. 12 godz.;
- minimalne ryzyko zranienia złapanego zwierzęcia;
- budowa, która umożliwi szybki demontaż oraz wymianę uszkodzonych elementów.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy działania klatki do chwytania kun. Głównymi kryteriami, jakimi kierowano się, dobierając części systemu, była ich cena, kompatybilność, rozmiar i jakość wykonania.



Rysunek 2. Schemat blokowy działania klatki.

Źródło: Projekt i wykonanie humanitarnej łapki na kunę. Praca inżynierska, M. Ryś, 2020, Nowy Sącz: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu.

Mikrokontroler Arduino UNO (rysunek 3) został zaprojektowany z myślą o ułatwieniu użytkownikom tworzenia aplikacji interaktywnych obiektów bądź środowisk. Jest to mikrokontroler zawarty na pojedynczej płytce drukowanej, który pozwala na łatwe wczytywanie programów do swojej pamięci bez konieczności używania zaawansowanego układu programującego. Arduino oparte jest o projekt typu open source, obejmujący 8-bitowy procesor Atmel AVR lub 32-bitowy Atmel ARM.



Rysunek 3. Mikrokontroler Arduino UNO.

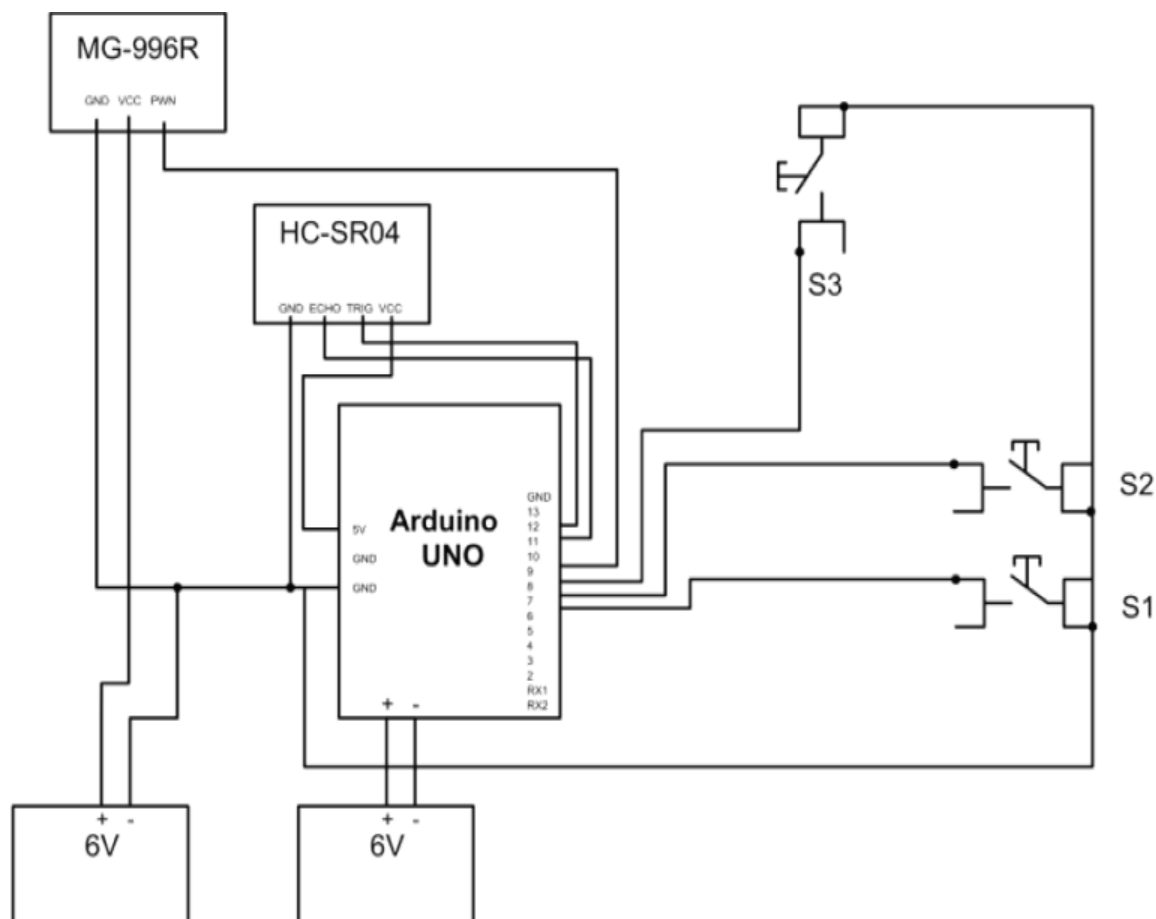
Źródło: *Projekt i wykonanie humanitarnej łapki na kunę. Praca inżynierska*, M. Ryś, 2020, Nowy Sącz: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu.

Czujnik ultradźwiękowy HC-SR04 to sensor odległości, który ma zakres pomiarowy od 2 do 500 cm, z rozdzielczością 0,3 cm. Posiada 4 wyprowadzenia: GND, ECHO, TRIG i VCC. Aby czujnik mógł wykonać pomiar, należy podać na pin TRIG stan wysoki przez $10\mu\text{S}$, następnie sensor wysyła grupę impulsów o częstotliwości 40kHz. Kiedy fale dotrą do przeszkody, zostają odbite w stronę czujnika, który odczytuje je jako informację. Czujnik oszacowuje czas pomiędzy wysłaniem i odebraniem impulsów, wtedy na pinie ECHO wygenerowany zostanie wysoki stan o czasie trwania analogicznym do odległości od przeszkody (krzysztofjelonek.net).

Serwo TowerPro MG-996R cechuje się wysoką mocą wyjściową i lekkością. W jednej obudowie znajduje się silnik, przekładnia oraz dedykowany sterownik. Serwomechanizm może obracać się w zakresie od 0° do 180° (90° w każdym kierunku). Do kontrolowania mechanizmu potrzebna jest informacja z portu PWM. W działaniu klatki wykorzystano serwomechanizm do podnoszenia i opuszczania drzwiczek (botland.com.pl.)

Do zasilenia podzespołów użyto dwóch koszyków na baterie AA. Każda bateria posiada napięcie wyjściowe 1,5V. Dzięki połączeniu szeregowemu baterii uzyskano napięcie wyjściowe 6V. Żywołapkę zaopatrzone w dwa koszyki z bateriami: pierwszy z nich będzie zasiliał sensor oraz mikrokontroler, a drugi będzie zasiliał serwonapęd. Zasilanie zostało wybrane sugerując się założeniami projektowymi.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat elektryczny sterowania łapką na kuny.



Rysunek 4. Schemat elektryczny sterowania łąpką.

Źródło: *Projekt i wykonanie humanitarnej łapki na kunę. Praca inżynierska*, M. Ryś, 2020, Nowy Sącz: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu.

gdzie:

- MG-996R – Serwomechanizm
- HC-SR04 – Czujnik ultradźwiękowy
- Arduino UNO – Mikrokontroler
- S1 – Przycisk otwierający klatkę
- S2 – Przycisk uzbrajający klatkę
- S3 – Przycisk służący do zamknięcia klatki
- 6V – Źródło zasilania.

Do programowania mikrokontrolera ATmega 328-AU użyto programu „Arduino IDE 1.8.1”, który przeznaczony jest do pisania programów na mikrokontrolery jednokładowe otwartego projektu Arduino. Poniżej zamieszczono gotowy program do skompilowania.

```

#include<Servo.h>

Servo myservo;
int S1 = 6;
int S2 = 7;
int S3 = 8;
int trig = 12;
int echo = 11;
int t, d;
bool closed = false;
bool armed = false;
void setup() {
  pinMode(S1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(S2, INPUT_PULLUP);
  pinMode(S3, INPUT_PULLUP);
  myservo.attach(9);
  pinMode(trig, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);
  digitalWrite(echo, LOW);
  myservo.write(0);
}
void loop() {
  if(!digitalRead(S2) && !armed){
    delay(20);
    while(!digitalRead(S2));
    armed = true;
  }
  if(armed){
    delay(200);
    digitalWrite(trig, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trig, LOW);
    t = pulseIn(echo, HIGH);
    d = t/58;
    if((d <= 20 || !digitalRead(S3)) && !closed){
      closed = true;
    }
    if(closed) myservo.write(90);
    if(!digitalRead(S1) && closed){
      delay(20);
      while(!digitalRead(S1));
      myservo.write(-90);
      closed = false;
      armed = false;
    }
  }
}

```

Po zakończeniu prac związanych projektowaniem systemu sterującego łapką rozpoczęto prace mechaniczne polegające na wytworzeniu klatki. Na rysunku 5 ukazano gotową łapkę na kuny.



Rysunek 5. Gotowa klatka do chwytania kun.

Źródło: *Projekt i wykonanie humanitarnej łapki na kunę. Praca inżynierska*, M. Ryś, 2020, Nowy Sącz: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu.

W swoim działaniu klatka wykorzystuje układ mechatroniczny, mający na celu otwieranie i zamykanie drzwiczek. Serwonapęd sterowany jest przez płytke Arduino UNO, która dzięki informacjom pobieranym z czujnika ultradźwiękowego oraz przez przycisk S3 umożliwia prawidłowe działanie klatki. Jako źródło zasilania urządzenia użyto baterii AA o mocy 1,5V, które są łatwo dostępne i proste w wymianie. Dzięki umieszczeniu baterii w dwóch koszykach (pierwszy koszyk zasila ARDUINO i czujnik ultradźwiękowy, drugi akuator) uzyskano stabilną pracę serwonapędu. Ponadto dzięki doprowadzeniu większego napięcia do akuatora otrzymano większą moc i szybkość działania.

Projektując klatkę, wzięto pod uwagę konieczność wysokiej wytrzymałości konstrukcji i zapewnienie bezpieczeństwa chwytanego zwierzęcia. Do zbudowania klatki wykorzystano m.in. naturalne materiały, a konstrukcję klatki stanowi drewniana obudowa z osadzonymi w niej metalowymi prętami. Serwomechanizm i płytka Arduino zostały umieszczone w miejscach niedostępnych dla zwierzęcia, dzięki czemu wyeliminowano ryzyko uszkodzenia ich przez schwyte zwierzę. Całość pomalowano na neutralny zielony kolor.

Zastosowanie mechatronicznego sterowania wyróżnia zaprojektowane urządzenie od tradycyjnych, dostępnych na rynku rozwiązań, które wykorzystują wyłącznie rozwiązania mechaniczne. Rozwiązanie takie pozwala na realizację żywołapki o znacznie wyższej skuteczności i pewności działania. Nie bez znaczenia jest też możliwość zdalnego otwierania urządzenia. W szczególności, gdy znajduje się w nim schwyte dzikie zwierzę. Takie podejście zwiększa bezpieczeństwo osób obsługujących urządzenie. Nie naraża na bezpośredni kontakt ze schwytanym intruzem, a dla zwierzęcia może być czynnikiem znacznie ograniczającym stres.

Przedstawione rozwiązanie może mieć też zastosowanie do walki z ssakami należącymi do inwazyjnych gatunków obcych (IGO). Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 grudnia 2022 r. w sprawie listy inwazyjnych gatunków obcych stwarzających zagrożenie dla Unii i listy inwazyjnych gatunków obcych stwarzających zagrożenie dla Polski, działań zaradczych i środków mających na celu przywrócenie naturalnego stanu ekosystemów, wymienia inwazyjne gatunki obce stwarzające zagrożenie dla Unii rozprzestrzenione na szeroką skalę, którymi są: jenot (*nyctereutes procyonoides*), piżmak (*ondata zibethicus*) i szop pracz (*procyon lotor*).

W skali globalnej inwazyjne gatunki obce są uznawane za jedną z pięciu głównych przyczyn utraty bioróżnorodności (CBD, 2011). Gatunki te często nie mają naturalnych wrogów w nowych środowiskach, co pozwala im szybko się rozmnażać i wypierać gatunki rodzime. W przypadku Europy Środkowej szczególnym problemem są introdukowane ssaki północnoamerykańskie i azjatyckie, które kolonizują nowe siedliska ze szkodą dla lokalnych ekosystemów.

Przedmiotowa łapka może służyć do odłowu każdego z wymienionych gatunków, oczywiście po dostosowaniu wymiarów gabarytowych do każdego z tych intruzów.

Osobną kwestią, do dalszej analizy, jest wyposażenie urządzenia w elementy wabiące zwierzę może to być wyposażenie zapachowe, feromonowe lub pokarmowe. Ponadto w celu eliminacji przypadkowego odłowienia (osobnika innego gatunku), warto dokonać modyfikacji układu elektroniki tak, by wyposażyć go w mechanizmy analizujące obraz z żywołapki, tak by mechanizm zamykający aktywowany był po identyfikacji i nabraniu pewności co do obecności właściwego gatunku.

ROZDZIAŁ 11

Dozownik wagowy do materiałów sypkich ze sterowaniem elektronicznym (*Adam Ruszaj¹, Michał Pieszczyk²*)

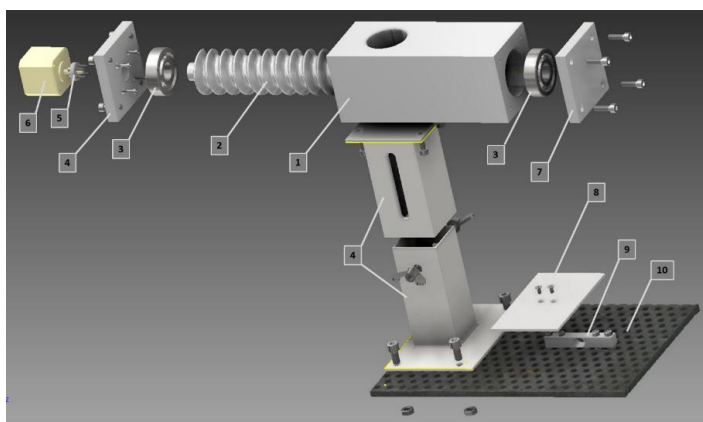
Celem pracy zamieszczonej w niniejszym rozdziale jest zaprojektowanie oraz wykonanie prototypu dozownika wagowego sterowanego za pomocą mikrokontrolera. Projektowane urządzenie oraz jego oprogramowanie ma umożliwiać automatyczne odważenie zadanej masy wybranego materiału sypkiego. Materiał wsypany od góry do zbiornika będzie trafiał do podajnika ślimakowego, który przemieści go na wagę. Podajnik napędzany będzie silnikiem krokowym. Sterowanie napędem i odczyt wartości wagi realizowane będą przez popularny mikrokontroler Arduino UNO.

Podczas projektowania dozownika wagowego przyjęto następujące założenia:

- niski koszt urządzenia;
- prosta konstrukcja;
- sterowanie realizowane za pomocą mikrokontrolera;
- dokładność dozowania do 5 g;
- odczyt wagi wyświetlany na bieżąco na ekranie LCD.

Podczas projektowania konstrukcji dozownika wagowego w głównej mierze kierowano się niskim kosztem wytworzenia urządzenia oraz możliwością wykonania przeważającej części prac za pomocą narzędzi dostępnych w przydomowym warsztacie. Założono, że konstrukcja ma charakteryzować się niewielkim ciężarem, tak by zapewnić urządzeniu mobilność, a przy tym być nieskomplikowana i prosta w obsłudze. W związku z powyższym, postanowiono użyć połączeń śrubowych do połączenia poszczególnych części dozownika, by uniknąć konieczności ich spawania.

Część wykonawcza urządzenia składa się głównie z korpusu, poruszającego się w nim podajnika śrubowego, regulowanego wysięgnika oraz podstawy, do której zamocowano wszystkie wymienione elementy wraz z wagą, która razem z podajnikiem będzie stanowić kompletne urządzenie. Model 3D dozownika widoczny jest na rysunku 1.



Rysunek 1. Model 3D dozownika wagowego.

Źródło: opracowanie własne.

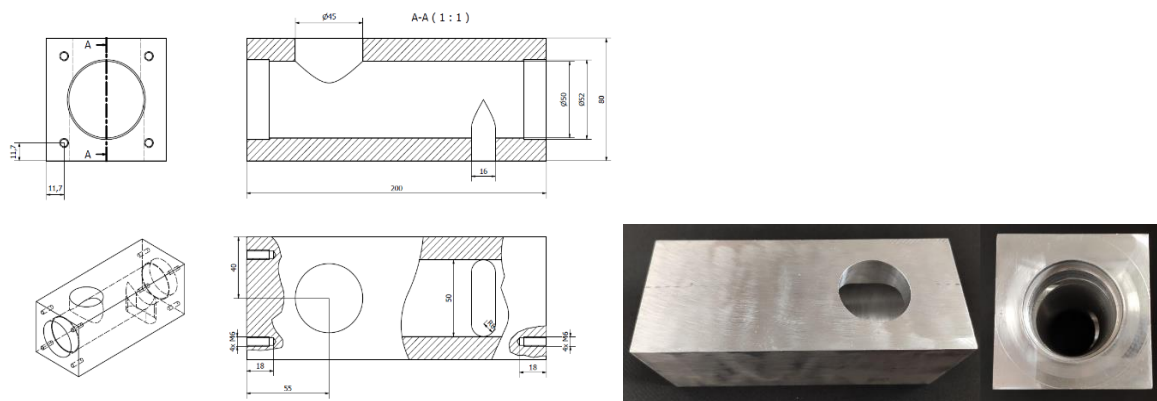
¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0002-1809-3271.

² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

1. Korpus urządzenia
2. Podajnik ślimakowy
3. Łożyska
4. Adapter silnika
5. Hub mocujący do przekazania napędu
6. Silnik krokowy
7. Osłona łożyska
8. Szala wagi
9. Belka tensometryczna
10. Podstawa urządzenia

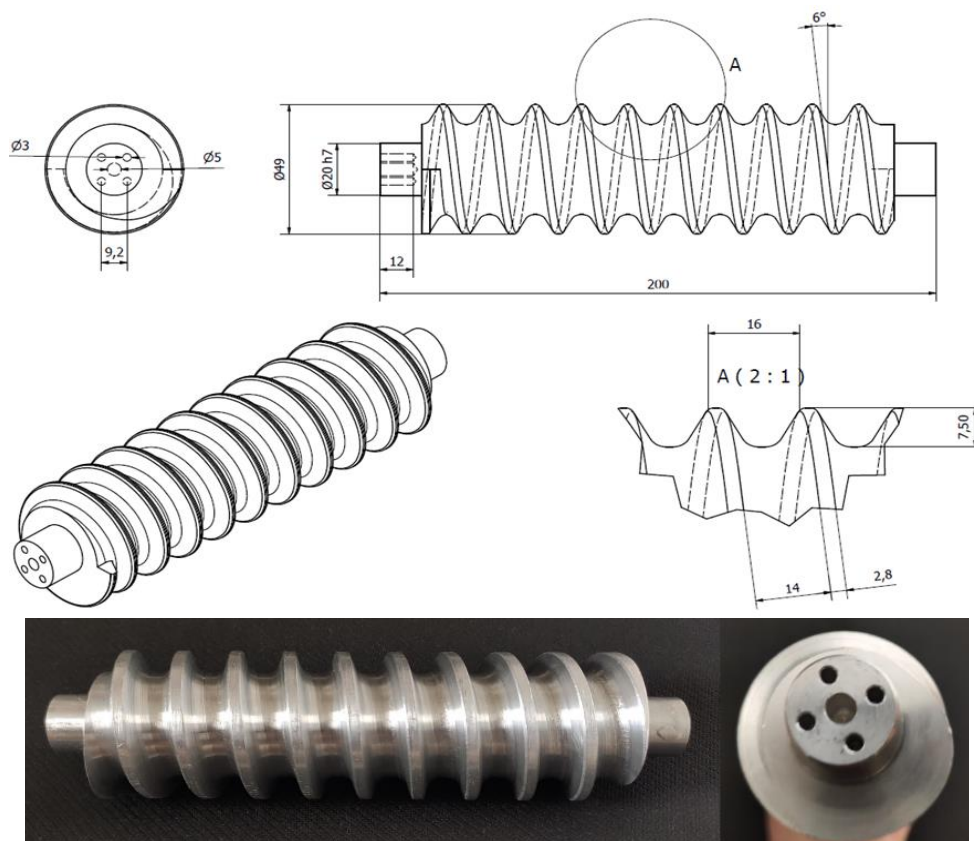
Korpus urządzenia dozującego (rysunek 2) został wykonany z jednej bryły aluminium, która została sfrezowana na kształt prostopadłościanu o wymiarach 80x80x200 mm. W środku bryły wytoczono otwór o średnicy 50 mm i wykonano gniazda na łożyska o oznaczeniu 6304.

W korpusie, na płaszczyznach, w których mają zostać zamontowane łożyska, wykonano po cztery gwintowane otwory przystosowane pod śruby M6, w których z jednej strony zamontowana jest osłona łożyska, zaś z drugiej adapter pod silnik krokowy. W korpusie wyfrezowano też otwór o średnicy $\varnothing 45$ mm, za pomocą którego podawany będzie materiał, a także szczelinę na przeciwległej płaszczyźnie o grubości 16 mm, w miejscu, gdzie materiał ten będzie dozowany na wagę. Na tej samej płaszczyźnie znajdują się również otwory montażowe, wykonane pod regulowany w pionie uchwyt służący do mocowania korpusu.



Rysunek 2. Korpus dozownika wagowego.
Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym elementem projektu jest podajnik ślimakowy (rysunek 3), który też wykonano metodą toczenia. Dodatkowo jego średnicę pomniejszono o 1 mm w stosunku do korpusu dozownika, aby podczas pracy urządzenia nie ocierał o niego. Końce podajnika na długości 15 mm stoczono na wymiar $\varnothing 20$ mm z pasowaniem h7 pod łożysko 6304. W bocznej części urządzenia, od strony montażu silnika, wywiercono 5 otworów: jeden centrycznie o rozmiarze $\varnothing 5$ mm, w który będzie wchodzić oś silnika krokowego i 4 otwory $\varnothing 3$ mm, w które będą włożone bolce przekazujące napęd z silnika do podajnika. W celu zmniejszenia masy urządzenia, tak jak poprzednie elementy, podajnik ślimakowy również został wytoczony z aluminium.



Rysunek 3. Podajnik ślimakowy dozownika wagowego.

Źródło: opracowanie własne.

Mając na uwadze, że dozownik wagowy ma służyć do odważania materiałów sypkich, należało zabezpieczyć elementy urządzenia przed przedostawaniem się zabrudzeń do urządzenia. W tym celu, za pomocą śrub z łbem walcowym M6, do korpusu dozownika przykręcono kwadratową osłonę o wymiarze 80x80. Ma ona też za zadanie osłonięcie obracającego się łożyska. Po przeciwnej stronie, w miejscu montażu silnika krokowego, z uwagi na to, że rozstaw jego otworów montażowych jest mniejszy niż otwór, w którym porusza się podajnik ślimakowy, konieczne było zastosowanie adaptera. Podłączenie tego elementu umożliwiło montaż silnika oraz osłonięcie obracającego łącznika przekazującego napęd na wał ślimaka.

Podstawę całego urządzenia stanowi docięty na wymiar 300x200 mm element z metalowej blachy perforowanej o grubości 8 mm, pod którą w celu redukcji drgań i dla zabezpieczenia powierzchni, na której stawiany będzie dozownik przykręcono gumowe nóżki. Do podstawy zamontowano za pomocą 4 śrub M8 regulowany wspornik podtrzymujący korpus. Został on wykonany z 2 skręcanych ze sobą profili, dzięki czemu zapewniono możliwość zmiany wysokości korpusu nad wagą. Rozwiązanie to pozwala na dozowanie materiału do różnej wysokości pojemników.

Do napędu urządzenia, z uwagi na łatwość oraz precyzję jego sterowania, zdecydowano się użyć silnika krokowego. Silnik krokowy jest to rodzaj silnika elektrycznego, który przesunięcie kątowe wirnika osiąga za pomocą przekształcania impulsów elektrycznych. Kierunek obrotu silnika jest zależny od kolejności impulsów sterujących jego uzwojeniami, a jego prędkość jest wprost proporcjonalna do częstotliwości podawanych impulsów.

Precyzja sterowania silnikiem krokowym jest wysoka dzięki temu, że silnik, otrzymując jeden impuls, wykonuje jeden krok, a tym samym droga kątowa, którą przebywa wirnik, jest zależna od liczby impulsów.

Z uwagi na to, że sterowanie bipolarne charakteryzuje się o połowę większym momentem obrotowym, zdecydowano się na wybór właśnie takiego silnika. Jeśli chodzi o możliwość sterowania pełno, pół lub mikro-krokowego zależne jest ono od doboru sterownika silnika. W dobranym do silnika sterowniku istnieje możliwość wyboru wszystkich trzech trybów sterowania.

Dozownik dostosowany będzie do montażu silników krokowych w standardzie wymiarowym NEMA 17. Standard opisu parametrów silników został ustalony przez stowarzyszenie producentów sprzętu elektronicznego (ang. *National Electrical Manufacturers Association*). Numer w nazwie oznacza wymiar boczny kwadratowego przekroju obudowy podany w calach. W przypadku zastosowanego silnika jest to 1,7 cala. Silniki w tym standardzie są szeroko stosowane w wielu maszynach, takich jak: drukarki 3D, roboty mobilne, maszyny CNC lub maszyny grawerujące.

W celu określenia minimalnego momentu obrotowego silnika potrzebnego do obrócenia podajnikiem ślimakowym wykonano eksperyment doświadczalny. Na wale w miejsce, w które montowany jest „HUB” przekazujący napęd, zamontowano identyczny HUB z przykręconym ramieniem wykonanym z cienkiej, lekkiej blachy nierdzewnej o wymiarach 200x20 mm i grubości 0,5 mm. Na końcu blachy umieszczony został plastikowy pojemnik. Eksperyment przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Przygotowanie eksperymentu wyznaczania minimalnego momentu obrotowego.
Źródło: opracowanie własne.

W celu przeprowadzenia eksperymentu dozownik zasypano cukrem, który może być potencjalną nadawą. Następnie obracano podajnikiem tak, aby wypełnił on urządzenie w całej jego długości, stawiając jak największy opór. Ramię ustawiono równoległe do płaszczyzny, na której stało urządzenie. Następnie do plastikowego pojemnika, zawieszzonego na jego końcu, wsypywano powoli cukier w celu ustalenia, jaka masa zamocowana na tym ramieniu jest potrzebna do obrócenia wałem. Kiedy podczas zasypywania pojemnika wał obrócił się, pojemnik zdjęto i zważono. Przy obliczeniach uwzględniono również wagę samego ramienia, na którym zawieszono pojemnik. Przebieg doświadczenia przedstawiono na rysunku 5.

Z uwagi na fakt, że do obrotu wału dozownika nie jest konieczny duży moment obrotowy, zdecydowano się zastosować silnik 12V o maksymalnym momencie trzymającym 0,43Nm o oznaczeniu JK42HS40-0504. Dwukrotnie większa wartość momentu trzymającego zastosowanego silnika, względem wykonanych obliczeń, wynika ze spadku jego momentu obrotowego wraz ze zwiększeniem obrotów. Silnik o momencie trzymającym 0,43Nm jest dobrym kompromisem pomiędzy wydajnością a ceną, choć dozowanie cięższych proszków metali, np. wolframu, będzie musiało być wykonywane z mniejszą prędkością obrotową silnika, gdyż zasypanie całego podajnika tak ciężkim proszkiem może stawiać zbyt duży opór.



Rysunek 5. Przebieg eksperymentu.

Źródło: opracowanie własne.

Zastosowanie silnika o dość dużym napięciu zasilającym cewkę wiąże się z niższym prądem znamionowym urządzenia, dzięki czemu można było zastosować tańszy sterownik, który nie jest przystosowany do pracy z wyższym natężeniem prądu, a doskonale spełni swoje zadanie przy pracy urządzenia.

Układ elektroniczny urządzenia opiera się na platformie Arduino UNO, do którego podłączony jest ekran LCD wyświetlający aktualne wskazanie wagi i dane odnośnie do zadanej naważki, wprowadzanej za pomocą dwóch przycisków. Pozostałe dwa przyciski odpowiadają za uruchamianie silnika i tarowanie wagi. Całość zasilana jest zasilaczem transformatorowym.

Głównym elementem układu elektronicznego dozownika wagowego – odpowiedzialnym za jego sterowanie – jest platforma programistyczna Arduino UNO, oparta na projekcie Open Hardware. Otwarty projekt oznacza możliwość wykonywania układów kompatybilnych z Arduino przez każdego, dzięki temu platforma jest bardzo tania. Możemy do niej podłączyć elementy elektroniczne, takie jak silniki, przekaźniki, diody czy różnego rodzaju czujniki.

W urządzeniu do pomiaru masy dozowanego proszku zastosowano czujnik tensometryczny w postaci belki. Pomiar masy opiera się na zmianie rezystancji drutu w odpowiedni sposób przyklejonego do belki pod wpływem przyłożonej do niej siły lub momentu. Zmiana rezystancji tensometru jest proporcjonalna do mechanicznego naprężenia.

W celu przetworzenia sygnału analogowego wysyłanego przez tensometryczną belkę na jego reprezentację cyfrową konieczne było zastosowanie konwertera opartego na module HX711. Układ ten przetwarza sygnał z rozdzielczością 24bit i potrzebuje napięcia w zakresie od 2,7 do 5,5V.

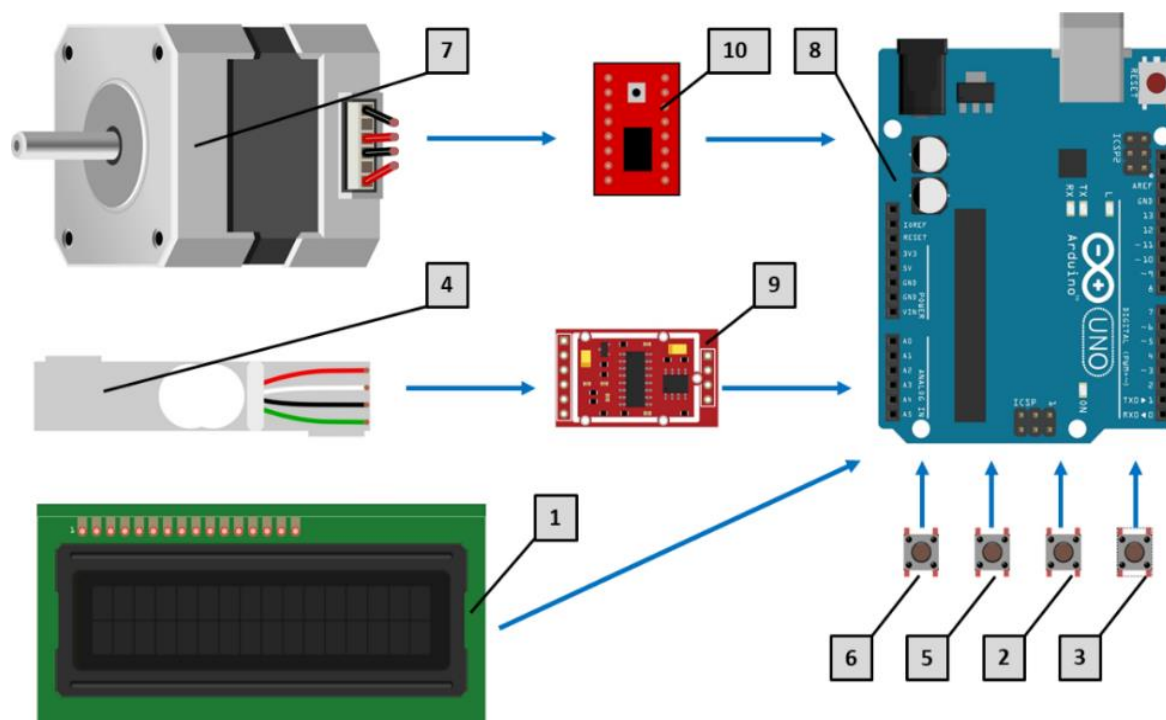
Do wyświetlania aktualnej wagi oraz zadanej naważki postanowiono użyć popularny alfanumeryczny wyświetlacz LCD wyświetlający 32 znaki w 2 rzędach oraz 16 kolumnach, posiadający konwerter I2C. Magistrala I2C służy do przesyłania danych między urządzeniami podrzędnymi (ang. *slave*) i urządzeniami głównymi (ang. *master*).

W platformie Arduino za jej obsługę odpowiadają dwa piny: pin, przez który przesyłane są dane o oznaczeniu SDA, a także pin, przez który przesyłany jest sygnał zegarowy, czyli SCL. Sygnał zegarowy podawany na tym pinie synchronizuje przesyłane dane. Sygnał wysoki odpowiada za zwolnienie magistrali, a sygnał niski podciąga magistralę do masy więc magistrala pracuje w konfiguracji open-drain. Piny SDA i SCL, czyli linie danych oraz zegar wymagają podciągnięcia do napięcia 5V przez rezystory.

Do precyzyjnego sterowania silnikiem krokowym niezbędny jest sterownik, który w odpowiednim czasie będzie zasiliał poszczególne jego uzwojenia. Do projektu prototypu dozownika wagowego zdecydowano się wykorzystać sterownik silników krokowych oparty na układzie A4988. Umożliwia on sterowanie silnikiem krokowym przez naprzemienne podawanie stanu wysokiego i niskiego na pin STEP. Naprzemienny sygnał jesteśmy w stanie wygenerować dowolnym mikrokontrolerem, w przypadku omawianego projektu dozownika jest to Arduino UNO rev 3.

W celach testowych prototypu dozownika wagowego układ elektroniczny połączono za pomocą płytki stykowej oraz przewodów. Na wyświetlaczu LCD (1) na bieżąco podawane jest aktualne wskazanie wagi i zadana masa proszku, jaką chcemy dozować. Do sterowania dozownikiem wykorzystane zostały cztery przyciski monostabilne. Pojedyncze wciśnięcie przycisku (2) zwiększa wartość dozowanej masy, a wciśnięcie przycisku (3) ją zmniejsza. Urządzenie daje możliwość zmiany wartości zadanej masy co 1 g. Tarowanie wagi (4) następuje po wciśnięciu przycisku (5). Po ustaleniu żądanej masy i wytarowaniu wagi naciśnięcie, przycisku (6) uruchamia się silnik krokowy (7) i rozpocznie się proces dozowania. Po osiągnięciu zadanej masy silnik zatrzymuje się, ponowne naciśnięcie przycisku (6) zainicjuje kolejny proces dozowania. W celu zwiększenia precyzji dozowania po osiągnięciu zadanej masy pomniejszonej o 20 g mikrokontroler (8) zmniejsza obroty silnika krokowego, a co za tym idzie – prędkość dozowania. Zdecydowano się zastosować takie rozwiązanie ze względu na możliwość nierównomiernego rozłożenia nadawy w podajniku ślimakowym.

Podczas pracy silnika zmiana zadanej masy i tarowanie wagi nie są możliwe. Silnik krokowy podłączono do mikrokontrolera za pomocą sterownika (9), a do poprawnej pracy wagi konieczne było użycie konwertera (10). Rysunek 6 ukazuje uproszczony schemat połączeń poszczególnych komponentów elektronicznych użytych w urządzeniu.



Rysunek 6. Uproszczony schemat połączeń komponentów elektronicznych.
Źródło: opracowanie własne.

Najlepszym rozwiązaniem do zasilania silników krokowych są zasilacze podające niestabilizowane napięcie prądu stałego. Silniki krokowe podczas swojej pracy mają tendencję do zwracania energii do źródła zasilania, dlatego nie zaleca się stosowania do ich zasilania popularnych zasilaczy impulsowych. Nie mają one możliwości odbioru zwrotu energii od odbiornika, co może spowodować uszkodzenie sterownika lub samego zasilacza.

Podczas doboru transformatora należy określić jego moc i napięcie wyjściowe, które powinno równać się napięciu znamionowemu zasilania sterownika, pomniejszonego o 5-10%.

Do programowania płytki Arduino, zastosowanej w projekcie dozownika wagowego, wykorzystany został język C.

ROZDZIAŁ 12

Automatyczna kosiarka ogrodowa (Józef Wójcik¹, Mateusz Wiecek²)

Współczesna technologia wciąż posuwa się naprzód, wprowadzając innowacje, które mogą ułatwić nasze codzienne życie. Do takich wynalazków zaliczają się także kosiarki. Istnieje wiele ich typów podzielonych ze względu na konstrukcję oraz przeznaczenie

Jednym z fascynujących przykładów tej ewolucji są kosiarki autonomiczne, które stają się coraz bardziej popularne wśród właścicieli ogrodów i terenów zielonych. Są to urządzenia elektryczne z krótkimi nożami, które obracają się ze stosunkowo wolną prędkością.

Celem projektu jest opracowanie koncepcji automatycznej kosiarki ogrodowej, która będzie realizowała proces koszenia trawy w zamkniętym obwodzie ogródka o powierzchni do 800 m². Urządzenie te ma mieć budowę odporną na deszcz, a także umożliwiającą zbudowanie jej za pomocą druku 3D i prostych narzędzi. Aby projekt dało się wydrukować w drukarce 3D o polu roboczym 30cm x 30cm musi składać się z elementów posiadających wymiary maksymalne niewykraczające poza obszar roboczy. Teren nie jest równy, więc pojazd będzie zawierał koła potrafiące pokonywać odpowiednie wzniesienia. Najbardziej odpowiednią tanią elektroniką będą podzespoły Arduino, czego wynikiem jest program napisany w środowisku arduino IDE. Pojazd będzie się poruszał z prędkością ok. 3 km/h.

Arduino IDE oferuje gotowe biblioteki, obsługę różnych modeli płytek Arduino, możliwość rozbudowy, szybki cykl rozwoju i łatwą integrację komputera z płytkami poprzez port USB. Dzięki bogatej dokumentacji i dostępnym samouczkom, IDE jest popularne wśród hobbystów, studentów i profesjonalistów, umożliwiając szybkie oraz efektywne programowanie urządzeń opartych na platformie Arduino.

Pozostałe założenia odnoszące się do projektowanej kosiarki to: elementy obudowy mają zostać zaprojektowane w taki sposób, aby można było wydrukować je drukiem 3D; elektronika powinna być w jak największej części wykonana z elementów Arduino; pojazd będzie realizował jazdę po zamkniętym terenie; koła odpowiednie do jazdy po nachylonym terenie; konstrukcja kosiarki musi być wytrzymała oraz odpowiednio zaprojektowana, aby umożliwić precyzyjne nawigowanie po trawniku.

Wszystkie części zaprojektowane w programie komputerowym docelowo wykonane będą za pomocą drukarki 3D wykorzystując plastik PLA. Polilaktyd to biodegradowalny biopolimer produkowany z surowców naturalnych. Jest łatwy w druku 3D przy niższych temperaturach (180-220°C).

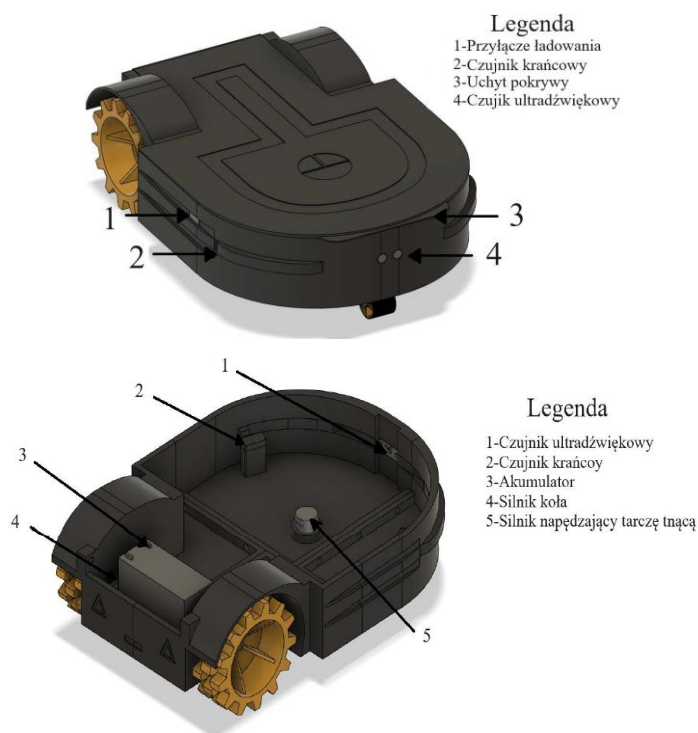
Koła tylne kosiarki (rysunek 2a) posiadają wypustki, aby lepiej wbijać się w piaszczyste podłoże oraz nie ześlizgiwać się na zboczach. Trójkątne wsporniki w środku pozwalają odciążyć konstrukcje oraz zmniejszyć użycie materiału przy zachowaniu tej samej sztywności co koła pełne.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0008-4889-1486.

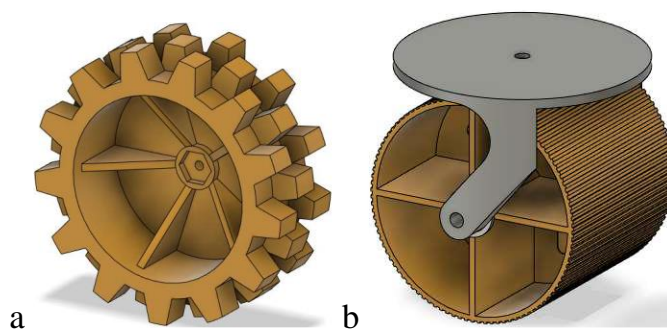
² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

Koła przednie (rysunek 2b) podtrzymują przód kosiarki. Z powodu częstego zmieniania kierunku jazdy koło zamontowane jest na obrotowej podstawie. Rozwiązanie to pozwala nie blokować ruchu podczas zmiany kierunku.

Projekt kosiarki został wykonany w programie Fusion 360. Na rysunku 1 ukazano widok ogólny projektowanej kosiarki autonomicznej.



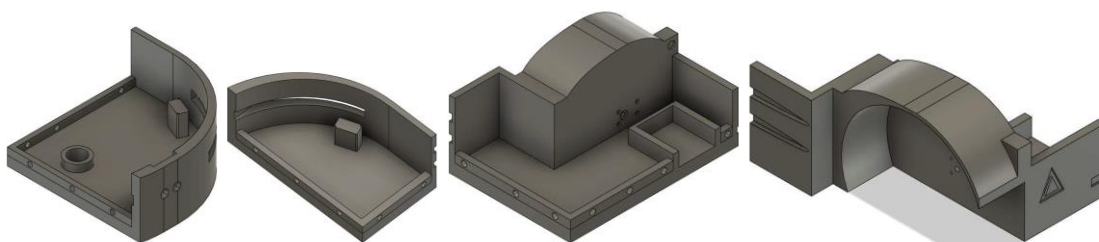
Rysunek 1. Widok ogólny projektowanej kosiarki autonomicznej.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 2. Widok ogólny kół kosiarki, a) tylnych, b) przednich.
Źródło: opracowanie własne.

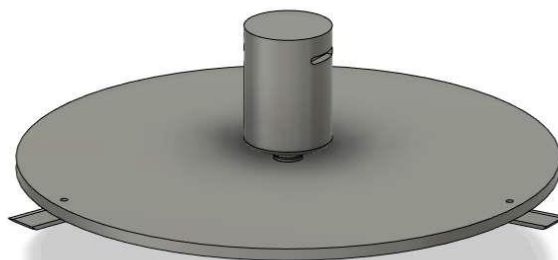
Wskutek wymogu wydrukowania korpusu w drukarce 3D obudowa została podzielona na cztery części, które mieszczą się w obszarze pola roboczego stołu grzewczego. Moduły zostały zaprojektowane tak, aby je poskładać w całość za pomocą śrub. Aby zachować sztywność przy silniku głównym, segment kosiarki z mocowaniem na silnik został umieszczony w jednej części.

Na rysunku 3 zaprezentowano model obudowy składający się z czterech części.



Rysunek 3. Modele elementów składowych obudowy kosiarki.
Źródło: opracowanie własne.

Tarcza (rysunek 4) posiada 3 noże uchylne. Po uderzeniu w przedmiot, dzięki zamontowaniu noża za pomocą pojedynczej śruby, nóż przekazuje swoją energię w ruch obrotowy dookoła swojego punktu osi. W ten sposób minimalizuje to uszkodzenia w wyniku natrafienia podczas koszenia na przedmioty twarde. Tarcza powinna zostać wykonana z metalu, ponieważ metal jest cięższy od plastiku, co nada mu większą siłę bezwładności i przeloży się to na utrzymanie większej prędkości tarczy. Przy większej prędkości, ścinanie trawy jest bardziej efektywne. Średnica tarczy przy tak dobranych nożach nie może przekroczyć średnicy 220 mm.



Rysunek 4. Model tarczy tnącej.
Źródło: opracowanie własne.

Kosiarkę autonomiczną napędza silnik GPX Extreme Swift 500 12V 11700RPM. Dzięki konstrukcji szczotkowej silnik napędzający koło z nożami posiada stosunkowo mały pobór mocy przy dość wysokich obrotach.

Do zasilenia całego systemu elektrycznego wybrany został akumulator Litowo Jonowy Li ion 3S 20Ah 12V z BMS. Jest to dedykowany akumulator do zasilania układów 12V z zabezpieczeniem BMS oraz czujnik temperatury.

Noże zostały wybrane jako standardowe ostrza ze stali nierdzewnej, pasujące do kosiarek marki Husqvarna i Gardena, gdyż są odporne na warunki atmosferyczne.

Mózgiem całego systemu sterowania jest Arduino Uno Rev3. Płytki te są znane ze swojej prostoty i łatwości użycia, co sprawia, że są idealne dla początkujących w dziedzinie elektroniki i programowania. Interfejs USB umożliwia łatwe podłączanie do komputera przez port USB. Posiada dużą społecznością użytkowników, co oznacza, że istnieje wiele dostępnych projektów.

W projekcie zastosowany zostanie czujnik ultradźwiękowy HC-SR04. Jest to najpopularniejszy i zarazem najtańszy czujnik ultradźwiękowy. Urządzenie może zmierzyć odległość od obiektów znajdujących się w zakresie między 2 a 200 cm od niego. Wymiary sensora to 45x20x15 mm. Czujnik mierzy odstęp czasu między wysłanym a powracającym sygnałem ultradźwiękowym.

W kosiarce wykorzystany zostanie regulator obrotów L298N, umożliwiający niezależne sterowanie dwoma silnikami prądu stałego. Działa jako mostek H, co pozwala na odwracanie kierunku obrotu silników. Moduł obsługuje prąd do 2A na kanał przy napięciu zasilania 12V. Posiada wejścia sterujące do ustawiania kierunku i prędkości obrotowej, a także zabezpieczenia diodowe i termiczne.

Mini czujniki krańcowe zastosowane w kosiarce są monostabilne i odpowiadają za wyłączanie i włączenia danych obwodów. Są zaprogramowane tak, aby dostrzegały zmiany położenia poszczególnych elementów ruchomych systemu.

Zabezpieczeniem, które ma uchronić człowieka przed urazem lub poważnymi obrażeniami, gdy kosiarka zostanie wywrócona lub celowo wyłączona, jest czujnik przechyłu. Reaguje on na zmianę położenia pojazdu i wysyła sygnał, kiedy poziom nachylenia zostanie przekroczony.

Moduł sterujący Arduino nie pozwala na obsługę bezpośrednią silnika głównego z powodu większego napięcia i natężenia prądu płynącego w przewodach zasilających silnik. Dlatego został zastosowany element pośredni, którym jest przekaźnik sterowany napięciem 5V obsługujący napięcie do 28V i natężenie do 12A.

Przetwornica napięcia jest elementem pozwalającym na zmniejszenie napięcia, które w akumulatorze wynosi 12V na napięcie 5V, które jest wymagane dla większości komponentów projektu. Dedykowaną przetwornicą dla Arduino, jest przetwornica LM2596 3,2V-35V 3A. Układ zmniejsza napięcie, które można regulować za pomocą wbudowanego potencjometru.

Na rysunku 5 ukazano schemat elektryczny kosiarki z prezentacją wszystkich zastosowanych elementów i opisem pinów.



Rysunek 5. Schemat elektryczny projektowanej kosiarki autonomicznej.

Źródło: opracowanie własne.

Program został napisany w środowisku Arduino IDE. Pierwszym krokiem było przypisanie zmiennych oraz wejść Arduino poszczególnych komponentów. Następnie należało określić, co robią dane wyjścia, czyli zdefiniować, czy dany pin ma odczytywać informację czy je wysyłać. Przed funkcją pętli zostały umieszczone funkcje początkowe. Ustawienie największej wartości PWM dla pinów 9 i 10. Piny te określają, z jaką mocą mają się kręcić silniki. Sterowanie cyfrowe służy do generowania impulsu prostokątnego, czyli sygnału przełączania pomiędzy włączonym (HIGH) a wyłączonym (LOW). Sprawdzenie, czy dane warunki zostały spełnione, realizowane jest w funkcji pętli za pomocą funkcji if. Pętla jest elementem języka programu, pozwalającym na ciągłe wykonywanie i kontrolowanie wybranego fragmentu kodu. Instrukcja "if" ("jeżeli") umożliwia wykonanie określonego kodu tylko wtedy, gdy pewien warunek jest spełniony. Jej działanie polega na sprawdzeniu warunku „i”, a w przypadku stwierdzenia jego prawdziwości, wykonaniu określonego bloku kodu [D]. Ostatnim krokiem była realizacja podfunkcji wykonywanych po spełnieniu danych warunków. Na rysunku 6 ukazano program pozwalający na prawidłowe funkcjonowanie projektowanej kosiarki.

```
1 // Określenie pinów dla silników
2 int pinSilnikLin1 = 7;
3 int pinSilnikLin2 = 8;
4 int pinSilnikPin1 = 11;
5 int pinSilnikPin2 = 12;
6 int silnikglowny = 13;
7
8 // Określenie wejść dla krańcówek
9 int pinKrancowkaL = 4;
10 int pinKrancowkaP = 5;
11
12 // Określenie pinów dla czujnika ultradźwiękowego
13 int pinUltraTrig = 3;
14 int pinUltraEcho = 2;
15
16 // Pin dla sygnału czujnika przechyżu
17 int pinStop = 6;
18
19 void setup() {
20     // Ustawienie pinów jako wyjścia lub wejścia
21     pinMode(pinSilnikLin1, OUTPUT);
22     pinMode(pinSilnikLin2, OUTPUT);
23     pinMode(pinSilnikPin1, OUTPUT);
24     pinMode(pinSilnikPin2, OUTPUT);
25     pinMode(pinKrancowkaL, INPUT_PULLUP);
26     pinMode(pinKrancowkaP, INPUT_PULLUP);
27     pinMode(pinUltraTrig, OUTPUT);
28     pinMode(pinUltraEcho, INPUT);
29     pinMode(pinStop, INPUT_PULLUP);
30     pinMode(silnikglowny, OUTPUT);
31
32     // Oczekiwanie 5 sekund po starcie.
33     // Jest to czas na odsunięcie się od kosiarki zanim zacznie swoją pracę
34     delay(5000);
35
36     analogWrite(pinUltraTrig, 255);
37     analogWrite(pinUltraEcho, 255);
38     //załączenie przekaźnika silnika głównego
39     analogWrite(silnikglowny, 255);
40
41 }
```

```

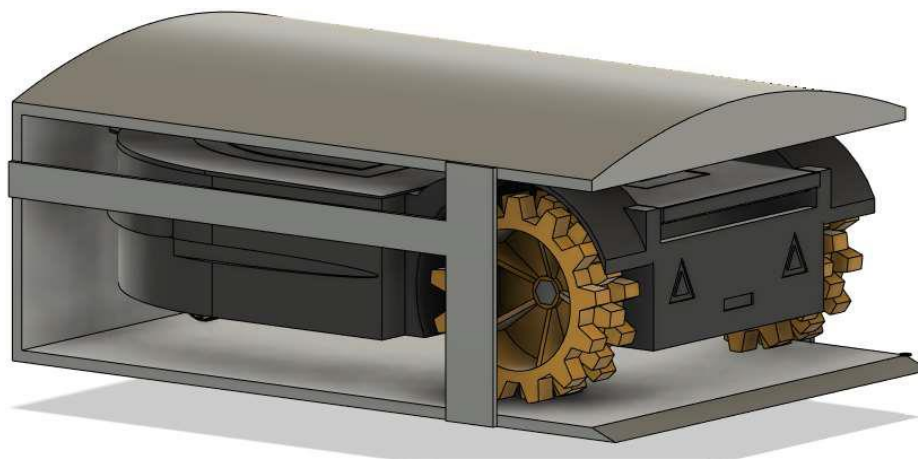
43
44 void loop() {
45 // Oba silniki kręcą się w prawo, czyli prosto
46 obracajWPrawo();
47
48 // Sprawdzenie Krańcówki Lewej
49 if (digitalRead(pinKrańcówkaL) == LOW) {
50 // Zatrzymanie silników na 2 sekundy
51 zatrzymajSilniki();
52 delay(2000);
53
54 // Silniki kręcą się w lewo (do tyłu) przez 2 sekundy
55 obracajWLewo();
56 delay(2000);
57
58 // Silnik L kręci się w prawo przez 2 sekundy a silnik P kręci się w lewo przez 2 sekundy
59 obracajWLewo();
60 delay(2000);
61 }
62
63 // Sprawdzenie Krańcówki prawej
64 if (digitalRead(pinKrańcówkaP) == LOW) {
65 // Zatrzymanie silników na 2 sekundy
66 zatrzymajSilniki();
67 delay(2000);
68
69 // Silniki kręcą się w lewo przez 2 sekundy
70 obracajWLewo();
71 delay(2000);
72
73 // Silnik P kręci się w prawo przez 2 sekundy a silnik L kręci się w lewo przez 2 sekundy
74 obracajWPrawo();
75 obracajWLewo();
76 delay(2000);
77 }
78
79 // Sprawdzenie czujnika ultradźwiękowego
80 if (odlegloscCzujnikaUltra() < 10) {
81 // Silnik L kręci się w prawo przez 1 sekundę a silnik P zatrzymuje się na 1 sekundę
82 obracajWPrawo();
83 zatrzymajSilniki();
84 delay(1000);
85 }
86
87 // Sprawdzenie sygnału stop
88 if (digitalRead(pinStop) == LOW) {
89 // Natychmiastowe zatrzymanie programu
90 while (true) {
91 // Pętla nieskończona
92 }
93 }
94 }
95 void obracajWPrawo() {
96 analogWrite(pinSilnikLin1, 255);
97 analogWrite(pinSilnikLin2, 0);
98 analogWrite(pinSilnikPin1, 255);
99 analogWrite(pinSilnikPin2, 0);
100 }
101
102 void obracajWLewo() {
103 analogWrite(pinSilnikLin1, 0);
104 analogWrite(pinSilnikLin2, 255);
105 analogWrite(pinSilnikPin1, 0);
106 analogWrite(pinSilnikPin2, 255);
107 }
108
109 void zatrzymajSilniki() {
110 analogWrite(pinSilnikLin1, 0);
111 analogWrite(pinSilnikLin2, 0);
112 analogWrite(pinSilnikPin1, 0);
113 analogWrite(pinSilnikPin2, 0);
114 }
115
116 // Funkcja mierząca odległość czujnika ultradźwiękowego
117 float odlegloscCzujnikaUltra() {
118 digitalWrite(pinUltraTrig, HIGH);
119 delayMicroseconds(10);
120 digitalWrite(pinUltraTrig, LOW);
121 // pomiar czasu jest przemnażany przez stałą prędkości dźwięku. Następnie wartość jest
122 // dzielona z powodu napodwójny dystans tam i z powrotem
123 return pulseIn(pinUltraEcho, HIGH) * 0.034 / 2;
124 }

```

Rysunek 6. Program projektowanej kosiarki autonomicznej.
Źródło: opracowanie własne.

Kosiarka może zostać wyposażona w moduł GPS umożliwiający precyzyjne nawigowanie po obszarze trawnika dzięki sygnałom satelitarnym. Przy wykorzystaniu tej technologii kosiarka tworzy mapy obszarów, co pozwala na inteligentne planowanie ścieżek i unikanie już skoszonych obszarów.

Projektowana kosiarka ładowana jest przy wykorzystaniu stacji dokującej (rysunek 7). Zastosowano stację, która wykorzystuje systemy nawigacyjne, by precyzyjnie kierować kosiarkę do stacji.



Rysunek 7. Stacja dokująca projektowanej kosiarki.

Źródło: opracowanie własne.

Opracowanie projektu było podyktowane chęcią utworzenia taniej alternatywy kosiarek komercyjnych, którą można samemu stworzyć i modyfikować. Suma wynosząca 1 166,79 zł spełnia wymóg taniej kosiarki, nieprzekraczającej 1 500 zł.

Po eksportowaniu projektu części do pliku .stl i uruchomienia go w programie Repieter-Host uzyskano przybliżoną ilość filamentu niezbędnego do utworzenia modelu realistycznego. Przy wypełnieniu modelu wynoszącego 40% uzyskana ilość potrzebnego filamentu wynosi 1701,013 m. W związku z powyższym do wydruku obudowy kosiarki zużyto sześć szpul filamentu w cenie 54 zł/sztuka.

ROZDZIAŁ 13

Urządzenie do łupania drewna (*Tadeusz Kantor¹, Jerzy Chruślicki²*)

Drewno łupane wytwarzane jest w procesie rozłupywania okrągłego drewna wzdłuż komórek osiowych. Zależnie od grubości oraz przeznaczenia, proces łupania przeprowadzany jest wzdłuż jednej lub kilku płaszczyzn podziału. Proces ten jest jednak niełatwy do przewidzenia, ponieważ struktura wewnętrzna drewna ma wpływ na jego mechaniczne właściwości. Proces łupania wykonywany jest najczęściej w celu przygotowania drewna na opał. Praca związana z tym procesem jest bardzo ciężka, lecz obecnie może być zmechanizowana dzięki użyciu łuparek. Maszyny produkowane są w bardzo zróżnicowany sposób, jeżeli chodzi o elementy łupiące, budowę zespołów napędowych, płaszczyzn ich pracy oraz sposób przemieszczania maszyny (Węgrzyn, Leszczyński, Kocira, 2016).

Przedsiębiorstwa produkcyjne i zakłady zajmujące się obróbką drewna stosują łuparkę w celu skrócenia czasu obróbki drewna oraz zwiększenia mocy przerobowej. Również przydomowe warsztaty używają łuparek, które ułatwiają pracę w rozłupywaniu drewnianych klocków. Istotną cechą łuparki jest fakt, że zwiększa ona bezpieczeństwo pracy przy obróbce drewna, głównie w gospodarstwie domowym. Łuparki stosowane w warsztatach przydomowych, różnią się parametrami od łuparek używanych w przemyśle. Biorąc łuparkę świdrową jako przykład, można zauważyć, że zmienia się wielkość piasty, moc silnika, średnica świdra i średnica wałka w zależności od ilości oraz wielkości drewnianych klocków (forsplit.pl, 2019).

Wprowadzenie łuparek do drewna na rynek spowodowało wyparcie tradycyjnej siekiery i piły mechanicznej z listy narzędzi najczęściej do tego wykorzystywanych. Głównym zastosowaniem łuparki jest rozłupywanie drewnianych klocków. Urządzenie pozwala w szybki i bezpieczny sposób rozłupywać dużą ilość drewna.

Wszystkie łuparki do drewna posiadają napęd, lecz bardzo wyraźne są różnice w ich budowie. Istnieją łuparki, w których napęd odbywa się za pomocą silnika elektrycznego z kołem pasowym i ciągnik rolniczy, który posiada wał odbioru mocy. Podstawową różnicą wśród rodzaju łuparek jest zasada działania. Łuparki hydrauliczne oraz kinetyczne mają bardzo podobną zasadę działania, polegającą na dociśnięciu drewnianego klocka do zamontowanego klina, który dzieli go na mniejsze części. Mimo to ich budowa bardzo się różni.

Obecne łuparki do drewna nie narażają operatorów na niebezpieczeństwo. Urządzenia te w bardzo łatwy sposób rozłupują praktycznie większość gatunków drewna. Obecnie w sprzedaży można znaleźć wiele modeli o różnych parametrach. Dzięki temu nabywca może dopasować urządzenie do swoich potrzeb. Działanie łuparki opiera się o prosty mechanizm, co ułatwia pracę użytkowników. Czynnościami, które trzeba wykonać, jest jedynie układanie drewnianych klocków na szynie łuparki oraz odłożenie szczapek. Standardowe łuparki są wielogabarytowymi maszynami, które wykorzystuje się do rozdrabniania drewnianych klocków (mgprojekt.com.pl, 2020).

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0009-0001-5515-3501.

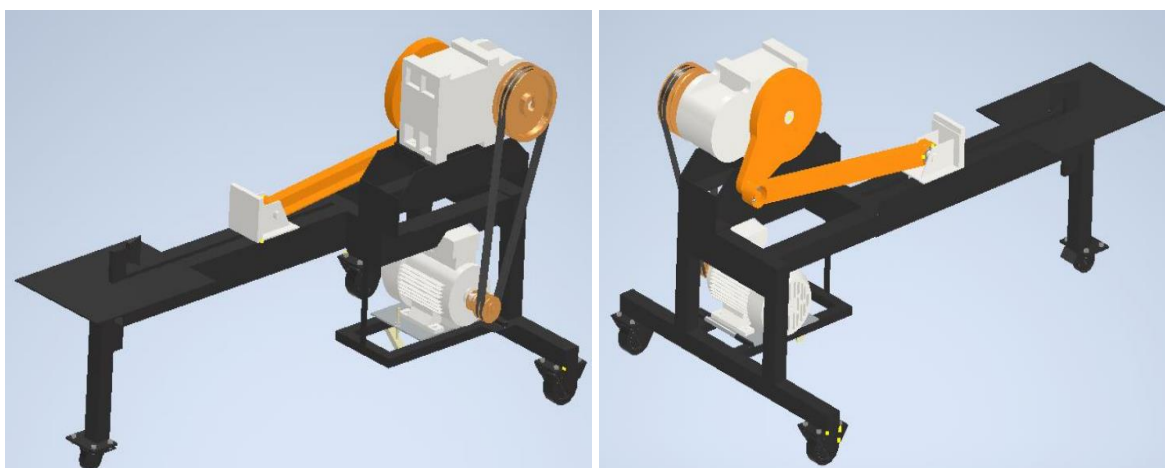
² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

Celem niniejszej pracy jest wykonanie projektu koncepcyjnego urządzenia do łupania drewna, które będzie konkurencyjne pod kątem finansowym.

Przyjęto następujące założenia projektowe dla koncepcyjnego urządzenia do łupania drewna:

- maszyna przeznaczona do rozłupywania drewnianych klocek;
- urządzenie przeznaczone do pracy w gospodarstwie domowym;
- maksymalna długość drewnianego klocka poddawanego łupaniu 50 mm;
- minimalna szerokość drewnianego klocka poddawanego łupaniu 10 mm;
- do zasilania urządzenia zostanie użyty silnik elektryczny 3 kW 1400 MS100L2-4;
- rama łuparki wykonana ze stali E295;
- szybkość pracy ramienia regulowana za pomocą kół pasowych i przekładni zębatej 2SM 200;
- wytrzymała konstrukcja, której wartość współczynnik bezpieczeństwa będzie powyżej $x > 2$;
- łatwa obsługa łuparki przez zastosowanie prostych w obsłudze mechanizmów;
- bezawaryjna praca dzięki prostej konstrukcji maszyny;
- łatwy transport urządzenia dzięki zastosowaniu kół jezdnych.

Na rysunku 1 przedstawiono wizualizację projektowanej łuparki do drewna.



Rysunek 1. Wizualizacja łuparki do drewna.

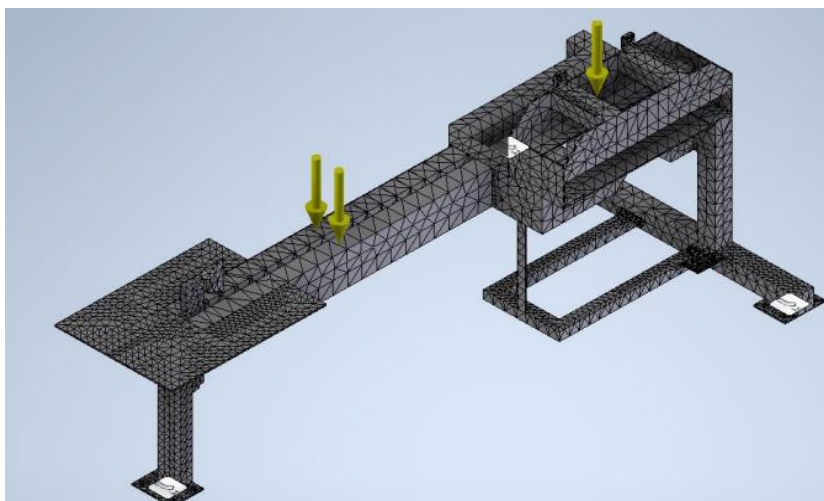
Źródło: opracowanie własne.

Zmniejszenie ilości obrotów ramienia zostanie osiągnięte dzięki zastosowaniu przekładni zębatej 2SM 200. Przekładnia zębata napędzana jest za pomocą silnika elektrycznego. Prędkość obrotowa silnika przekazywana jest do przekładni zębatej za pomocą dwóch kół pasowych i dwóch pasów klinowych PIX - B1700. Przekładnia 2SM 200 posiada przełożenie $i=53$, co pozwoli zmniejszyć obroty ramienia o tę wartość.

Do napędu łuparki zastosowano silnik elektryczny MS100L2-4. Jest to trójfazowy silnik o mocy 3kW i prędkości obrotowej 1420 obr./min. Obudowa silnika wykonana jest z aluminium, co pozwala obniżyć jego masę. Silnik cechuje się klasą izolacji F, co pozwala mu pracować w temperaturze do 155°C. Poprzez zastosowanie stopnia ochrony IP55 urządzenie jest płynoodporne.

Do przeniesienia prędkości obrotowej z silnika elektrycznego do przekładni zębatej w łuparce zostaną użyte dwa koła pasowe. Zastosowanie kół pasowych pozwoli też na zredukowanie prędkości obrotowej. Pasy klinowe cechują się dużą sprawnością oraz przenoszeniem dużych mocy. Wykorzystanie dwóch pasów klinowych pozwoli na przeniesienie przez tarcie siły obwodowej. Dobrano pas typu PIX-B1700 i średnicę małego koła $d_1 = 85$ mm.

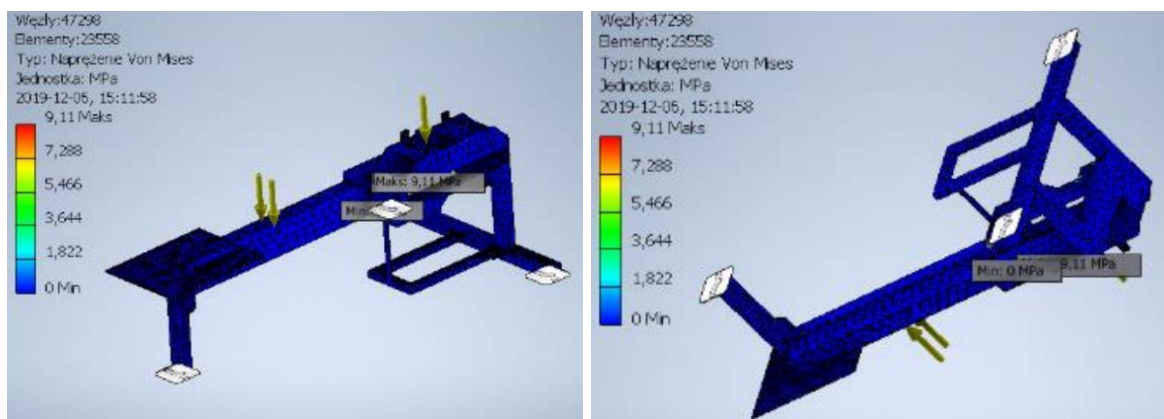
W celu przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej ramy wykorzystany został program Autodesk Inventor 2020. Ramę obciążono trzema siłami, zgodnie z rysunkiem 2. Do stworzenia ramy łuparki wybrano stal E295.



Rysunek 2. Rozkład sił obciążających łuparkę do drewna.

Źródło: opracowanie własne.

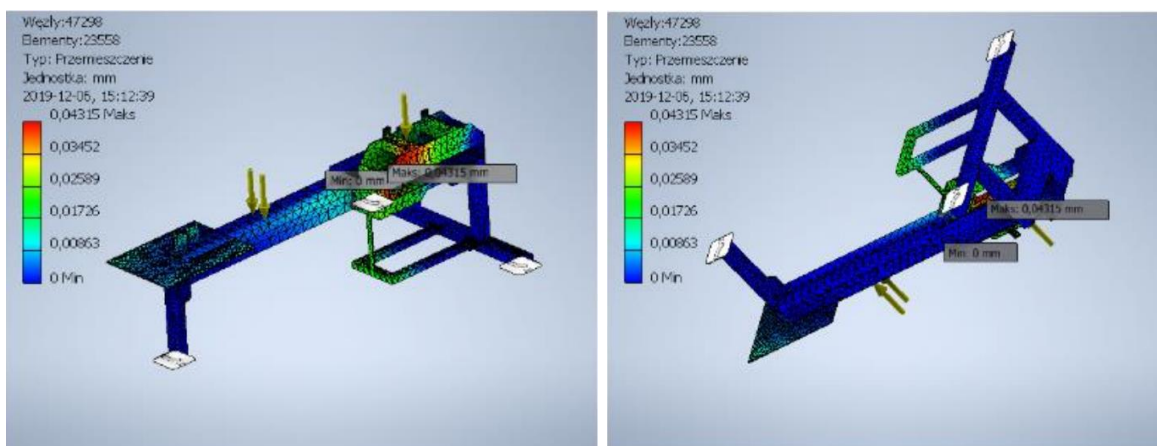
Na rysunku 3 ukazano wyniki analizy wytrzymałościowej w postaci rozkładu naprężeń działających na ramę łuparki do drewna.



Rysunek 3. Rozkład naprężeń działających na ramę łuparki do drewna.

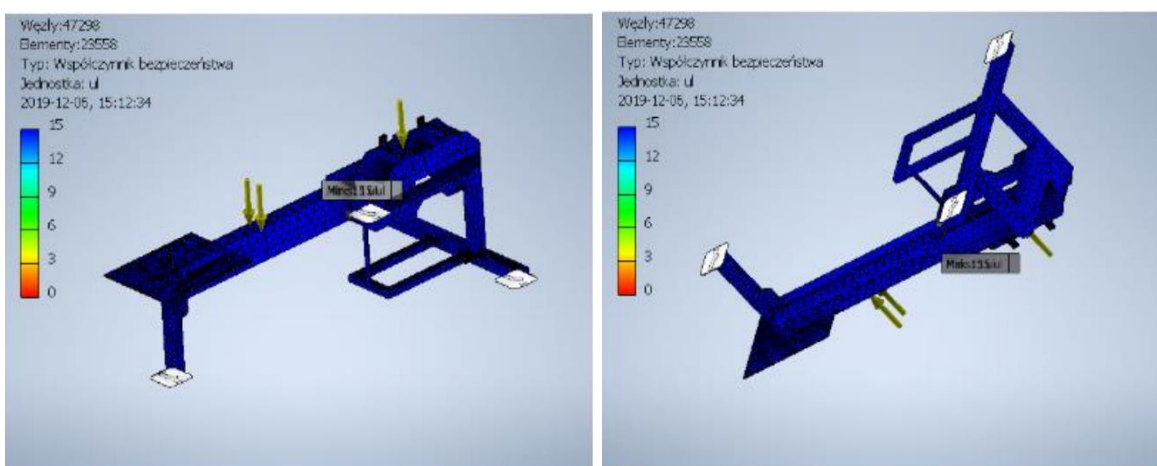
Źródło: opracowanie własne.

Największe przemieszczenie, jakie występuje w ramie łuparki, znajduje się przy mocowaniu przekładni zębatej, ponieważ w tym miejscu działa siła o wartości 900 N (rysunek 4). Wartość przemieszczenia jest niewielka, więc nie wpływa na konstrukcję urządzenia.



Rysunek 4. Rozkład przemieszczenia ramy łuparki do drewna.
Źródło: opracowanie własne.

Współczynnik bezpieczeństwa określa dopuszczalną granicę wytrzymałości materiału na odkształcenia. Dzięki zastosowaniu stali E295 osiągnięto wysoki współczynnik bezpieczeństwa, który wynosi 15. Jest to bardzo wysoki współczynnik, gwarantujący stabilną oraz wytrzymałą konstrukcję ramy. Wyniki analizy rozkładu współczynnika bezpieczeństwa ramy łuparki przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Rozkład współczynnika bezpieczeństwa ramy łuparki do drewna.
Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie otrzymanych wyników – dzięki przeprowadzonej analizie wytrzymałościowej – możemy stwierdzić, że użyte materiały i sposób wykonania ramy spełniają wcześniej przyjęte kryteria. Na podstawie analizy naprężeń według hipotezy Hubera Misesa Hencky'ego otrzymano wynik 9,11 MPa. Jest to bardzo mała wartość naprężeń, która nie wpłynie na sztywność i wytrzymałość konstrukcji ramy łuparki. Wartość przemieszczenia, którą wykazał program, wynosi 0,4315 mm. Przemieszczenie to znajduje się w części przedniej mocowania przekładni zębatej. Wartość ta jest bardzo niska i nie wpływa na konstrukcję urządzenia. Współczynnik bezpieczeństwa wykazał maksymalną wartość 15, co oznacza, że rama nie posiada żadnych obszarów plastyczności i jest bardzo wytrzymała w stosunku do sił, które na nią oddziałują.

Wykonanie łuparki do drewna (rysunek 6) odbyło się według następującego procesu technologicznego.

1. Stworzenie ramy odpowiadającej przyjętym kryteriom. W celu zamontowania kół do ramy łuparki użyto 12 śrub M10x20 oraz 12 nakrętek M10 – 17 mm. Śruby dokręcono kluczem dynamometrycznym o wartości 23,2 Nm.
2. Montaż przekładni zębatej 2SM 200, przy użyciu sześciu śrub M10x30 oraz sześciu nakrętek M10 – 19 mm. Śruby też dokręcono dynamometrycznym kluczem o wartości 23,2 Nm.
3. Montaż silnika elektrycznego MS100L2-4. Do montażu użyto czterech śrub M10x20 i czterech nakrętek M10 – 17 mm. Śruby dokręcono kluczem dynamometrycznym o wartości 23,2 Nm.
4. Wykonanie i zamontowanie dwóch kół pasowych na wale silnika oraz wale przekładni zębatej. W tym celu użyto wpustu 8x8x80 i wpustu 8x8x60. Oba koła pasowe połączono razem dwoma pasami klinowymi PIX – B1700, aby przenieść prędkość obrotową i zniwelować straty prędkości związane ze ślizganiem pasa klinowego.
5. Do montażu koła pasowego użyto wpustu o wymiarach 8x8x40, dzięki temu koło pasowe zostanie w niezmiennym położeniu. Montaż ramienia z popychaczem odbył się za pomocą sworznia 25x100.
6. Montaż gniazd siłowych i włącznika maszyny.



Rysunek 6. Łuparka do drewna.
Źródło: opracowanie własne.

ROZDZIAŁ 14

Określanie ilości zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego w oleju silnikowym – propozycja testu diagnostycznego w warunkach warsztatowych (Jerzy Langman¹)

Analiza właściwości eksploatacyjnych olejów silnikowych to obszerne, jak również wieloaspektowe zagadnienie, mające kluczowe znaczenie dla efektywnego funkcjonowania silników w dzisiejszym złożonym środowisku technologicznym.

Różnorodność dostępnych olejów silnikowych, obejmująca zarówno tradycyjne oleje mineralne, jak i zaawansowane oleje syntetyczne czy półsyntetyczne, wprowadza do analizy szereg zmiennych. Każdy rodzaj oleju charakteryzuje się unikalnym składem chemicznym, co ma bezpośredni wpływ na jego zdolność do skutecznego smarowania silnika. W skład analizy właściwości smarnych wchodzi badanie skomplikowanego składu chemicznego olejów (Korbicz, Obuchowicz, Uciński, 1994).

Każda substancja, która występuje w oleju, a nie jest olejem i nie jest jego integralną częścią, określana jest zanieczyszczeniem. Największą część zanieczyszczeń stanowią zanieczyszczenia stałe, czyli takie, które są nierozpuszczalne w n-pentanie. Wśród zanieczyszczeń stałych wyróżniamy (Langman, 1996):

- pyły z powietrza;
- koks;
- sadza;
- popiół;
- produkty zużycia ściernego współpracujących par kinematycznych silnika;
- produkty korozji;
- cząstki powłok.

Stale zanieczyszczenia w olejach są niezwykle szkodliwe, powodując zakłócenia w systemach smarowania, zwiększone zużycie tribologiczne współpracujących elementów, a nawet ich uszkodzenia.

Podczas pracy silnika spalinowego do oleju smarującego przedostają się różne zanieczyszczenia. Są to zanieczyszczenia metaliczne i niemetaliczne. Z biegiem czasu eksploatacji oleju silnikowego rośnie w nim koncentracja tych zanieczyszczeń, co z reguły prowadzi do zmiany jego właściwości smarnych.

Ustalany przez producenta silnika czas pracy oleju silnikowego jest wartością średnią, uzyskaną podczas badań eksploatacyjnych silnika przy średnich wartościach obciążeń. Koncentracja zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego zależy w dużym stopniu od stanu technicznego i wielkości obciążeń eksploatowanego silnika, a także czasokresu między kolejnymi wymianami oleju silnikowego.

Szczególnie niebezpieczne są zanieczyszczenia nagarowe, które powstają na skutek niepełnego spalania paliwa i oleju. Nagar to osad węglowy, który tworzy się na gorących powierzchniach silnika, takich jak chociażby tłoki, zawory czy ściany komory spalania.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

Te zanieczyszczenia mogą prowadzić do powstawania osadów i nagarów, które zatykają kanały olejowe, powodując niedostateczne smarowanie i zwiększone tarcie. W efekcie tego dochodzi do przyspieszonego zużycia powierzchni trących, co może prowadzić do poważnych uszkodzeń silnika, takich jak zatarcie łożysk, zniszczenie tłoków czy zatarcie pierścieni tłokowych.

Stopień koncentracji zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego określa się zwykle za pomocą pomiarów laboratoryjnych metodami wirówkowymi bądź filtracyjnymi wymagających skomplikowanej aparatury pomiarowej. Jednak podczas tych pomiarów określamy sumaryczną ilość zanieczyszczeń zarówno pochodzenia nagarowego, jak też metalicznych, będących produktami zużycia ściernego par kinematycznych silnika.

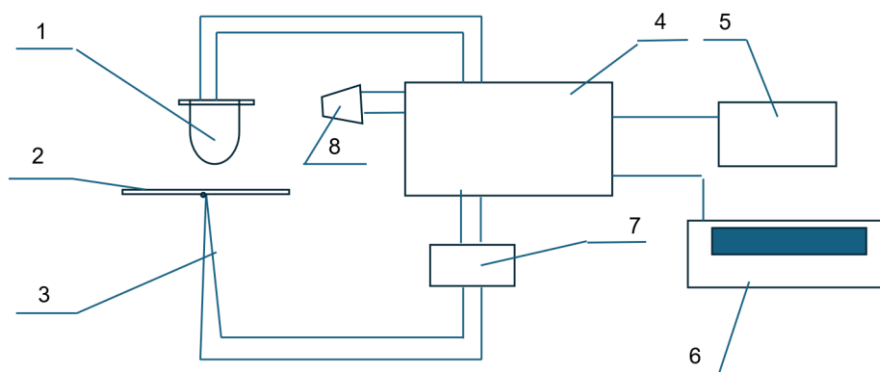
Przedmiotem badań jest olej silnikowy klasy 5/w30, używany w benzynowych silnikach samochodów osobowych.

Badania przeprowadzono na próbkach oleju, które osiągnęły przebieg zalecany przez producenta pojazdu i był wymieniany na olej świeży oraz olej świeży zalecany przez producenta pojazdu.

Próbki oleju przepracowanego pobierano podczas jego wymiany na rozgrzanym silniku.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat wyjaśniający budowę układu pomiarowego. Układ pomiarowy składa się z następujących komponentów:

- dioda LED typu LD 247 o kącie rozwarcia stożka strumienia promieniowania podczerwonego wynoszący 10 stopni kątowych, emitująca falę o długości 950nm;
- termopara typu K;
- wzmacniacz sygnału termopary zrealizowanego na układzie scalonym INA 128;
- czujnik temperatury zimnych końców termopary typu LM 35 o czułości 10mV/1°C;
- mikrokontroler ATmega 32;
- czytnik kart SD obsługujący karty no pojemności nie przekraczającej 4 GB;
- wyświetlacz alfanumeryczny 16 znaków w 2 liniach.

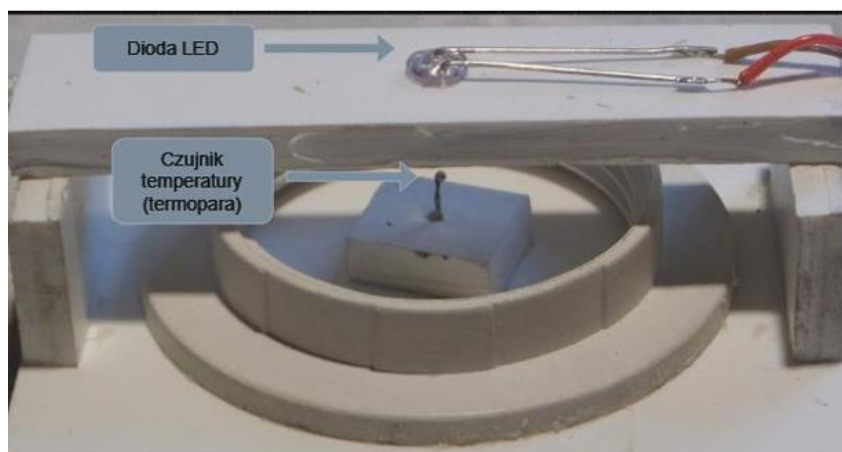


Rysunek 1. Schemat blokowy układu pomiarowego. 1 – dioda LED, 2 – próbka oleju na bibule filtracyjnej, 3 – termopara, 4 – mikrokontroler, 5 – czytnik karty SD, 6 – wyświetlacz alfanumeryczny, 7 – wzmacniacz termopary, 8 – czujnik temperatury zimnych końców termopary.

Źródło: opracowanie własne.

Po uruchomieniu programu sterującego pomiarem włączana jest dioda LED, oświetlając strumieniem światła podczerwonego próbkę oleju znajdującego się na krążku bibuły filtracyjnej. Pod próbką oleju znajduje się termopara, której gorący koniec dotyka spodnie części krążka z próbką oleju, mierząc jego temperaturę. Sygnał z termopary wzmacniany jest za pomocą niskoszumnego wzmacniacza operacyjnego. Wzmacniacz operacyjny połączony jest z temperaturą otoczenia, co zrealizowano bitowym przetwornikiem ADC mikrokontrolera. Ponieważ zimne końce termopary znajdują się w temperaturze otoczenia, do wartości temperatury uzyskanej z termopary należy dodać poprawkę uwzględniającą temperaturę otoczenia, co zrealizowano za pomocą czujnika LM35, który jest połączony z drugim kanałem przetwornika ADC mikrokontrolera. Pomiary są realizowane co 1 sekundę. Wyniki pomiarów są na bieżąco zapisywane na karcie SD w formacie akceptowalnym przez arkusz kalkulacyjny.

Na rysunku 2 przedstawiono wygląd głowicy pomiarowej. Wykonana ona została z tworzywa sztucznego (PCV) w kolorze białym. Chodziło o to, by konstrukcja wsporcza diody LED, termopary oraz bibuły filtracyjnej z badaną próbką oleju nie pochłaniały promieniowania podczerwonego emitowanego przez diodę LED. Stworzono układ wyizolowany tak, że promieniowanie podczerwone oddziałuje tylko na próbkę badanego oleju silnikowego.



Rysunek 2. Widok głowicy pomiarowej.

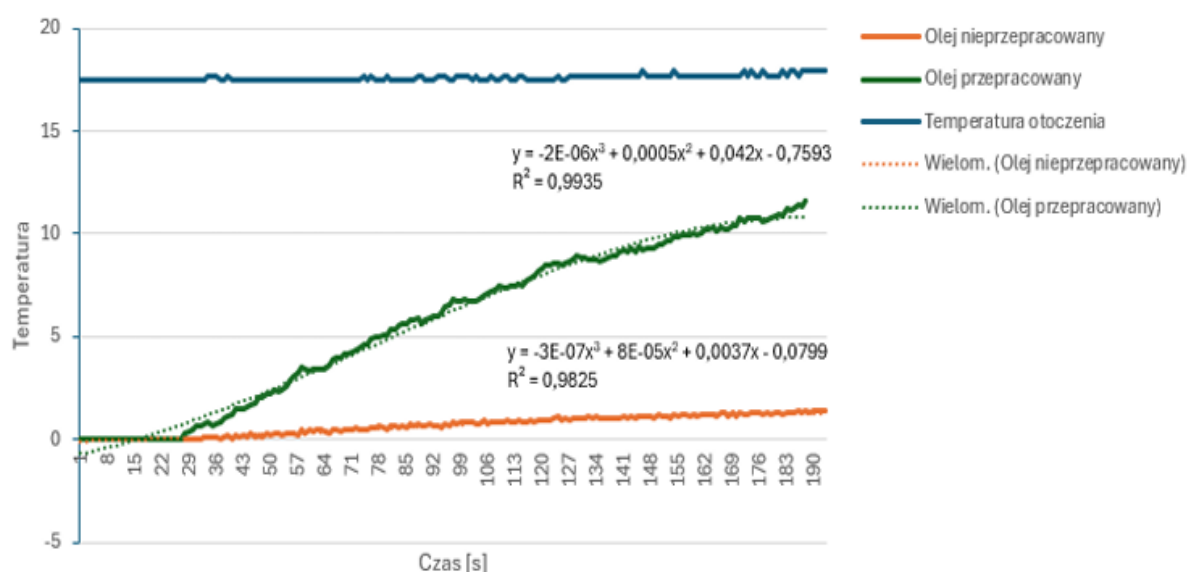
Źródło: opracowanie własne.

Opracowana metoda pomiaru wykorzystuje podstawowe zjawisko fizyczne, jakim jest pochłanianie przez ciało czarne promieniowania podczerwonego. Zanieczyszczenia pochodzenia nagarowego możemy uważać za ciało czarne. Pochłanianie przez nie promieniowanie podczerwone powoduje wzrost temperatury próbki badanego oleju i nośnika, na który jest naniesiona próbka. Tak więc przyrost temperatury próbki oleju w określonym przedziale czasu jest proporcjonalny do ilości zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego w badanej próbce.

Próbka oleju silnikowego w ilości dwóch kropli naniesiona jest na warstwę bibuły filtracyjnej. Pod próbką umieszczono końcówkę termopary, tak aby zapewnić punktowy kontakt końcówki termopary z podłożem z naniesioną próbką oleju silnikowego. Nad podłożem z próbką umieszczono diodę LED emitującą podczerwień. Termopara i dioda LED połączone są z mikrokontrolerem, którego zadaniem jest pomiar czasu ekspozycji próbki na promieniowanie podczerwone i pomiar przyrostu temperatury próbki w funkcji

czasu oraz ich rejestrację. Mikrokontroler obsługuje również pomiar oraz rejestrację temperatury zimnych końców termopary, gdyż termopara mierzy różnicę temperatur, w jakich znajdują się zimne i gorące końce termopary.

Na rysunku 3 ukazano charakterystyki przedstawiające przyrosty temperatury badanych próbek oleju w funkcji czasu nagrzewania diodą LED dla oleju świeżego (nieeksploatowanego) oraz dla oleju pobranego z silnika po przebiegu, po osiągnięciu którego producent samochodu zaleca jego wymianę. Na rysunku przedstawiono też wartość temperatury zimnych końców termopary, ponieważ termopara mierzy różnicę temperatur między gorącymi i zimnymi końcami termopary. Stabilizacja temperatury zimnych końców wskazuje na poprawność pomiaru przyrostu temperatury nagrzewanej próbki oleju. Przebieg krzywych nagrzewania próbek oleju świeżego i przepracowanego wskazują wyraźnie, że zaproponowana metoda diagnostyczna jest pod względem metodycznym poprawna.



Rysunek 3. Przebieg krzywych nagrzewania oleju świeżego i przepracowanego w funkcji czasu nagrzewania.

Źródło: opracowanie własne.

Zdjęte podczas pomiarów charakterystyki nagrzewania oleju przepracowanego $T_{zf}(t)$ (°C) oraz oleju świeżego $T_{sf}(t)$ (°C) zostały opisane za pomocą wielomianów trzeciego stopnia, co przedstawiają zależności (13.1.) i (13.2.)

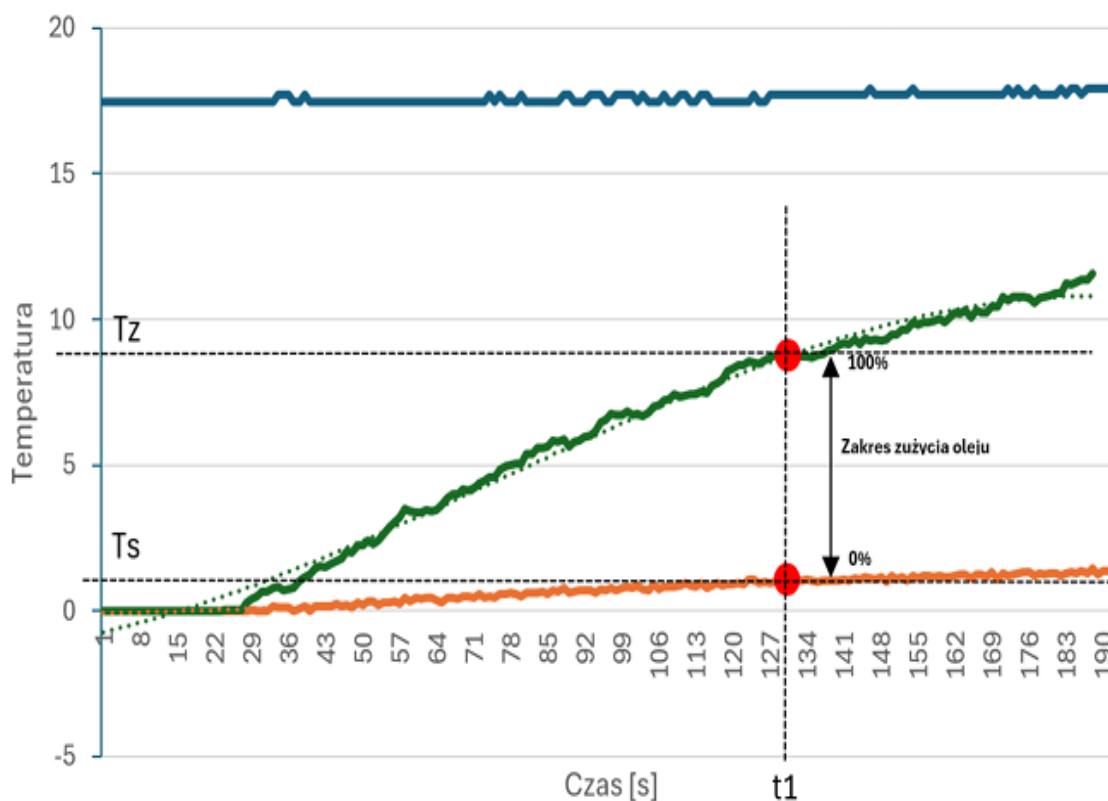
$$T_{zf}(t) = -0,000002 \cdot t^3 + 0,0005 \cdot t^2 + 0,042 \cdot t - 0,7593 \quad (1)$$

$$T_{sf}(t) = -0,0000003 \cdot t^3 + 0,00008 \cdot t^2 + 0,0037 \cdot t - 0,0799 \quad (2)$$

Analizując wykres, na którym naniesione zostały wyniki dla oleju przepracowanego i świeżego, możemy przeprowadzić obliczenia mające na celu wyznaczenie wzoru opisującego procent zużycia środka smarownego. Aby wyznaczyć procent zużycia, pierwszym krokiem jest określenie wartości temperatury dla badanej próbki w wybranym przez nas punkcie czasowym t_1 (rysunek 4). Następnie konieczne jest obliczenie wartości

temperatury oleju przetworzonego $T_z(t_1)$ (zależność 1) oraz oleju świeżego $T_z(t_1)$ (zależność 2) w tym samym czasie t_1 , dla którego dokonaliśmy pomiaru. Te dane umożliwią dalsze obliczenia i wyznaczenie stopnia zużycia środka smarowego S_z (zależność 3). Korzystając z tych parametrów, będziemy w stanie określić stopień koncentracji zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego S_z .

$$S_z = \frac{T_P(t_1) - T_S(t_1)}{T_Z(t_1) - T_S(t_1)} \cdot 100 \quad (3)$$



Rysunek 4. Sposób określania stopnia koncentracji zanieczyszczeń w badanym oleju.
Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiony powyżej sposób określania stopnia koncentracji zanieczyszczeń pochodzenia nagarowego jest trudny do zaimplementowania w pamięci programu mikrokontrolera. Trudnością są dosyć ograniczone możliwości przeprowadzania obliczeń zmiennoprzecinkowych w mikrokontrolerze. Dlatego zdecydowano się na zbudowanie klasyfikatora, który po dokonaniu pomiaru próbki oleju podawałby odpowiedź w postaci:

- dobrze, tzn. olej może być dalej eksploatowany;
- źle, tzn. przekroczono dopuszczalną koncentrację zanieczyszczeń;
- wadliwa próbka oleju.

Jako silnik takiego klasyfikatora wybrano sztuczne sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy uczony metodą wstecznej propagacji błędów.

Przyjęto następującą architekturę sieci:

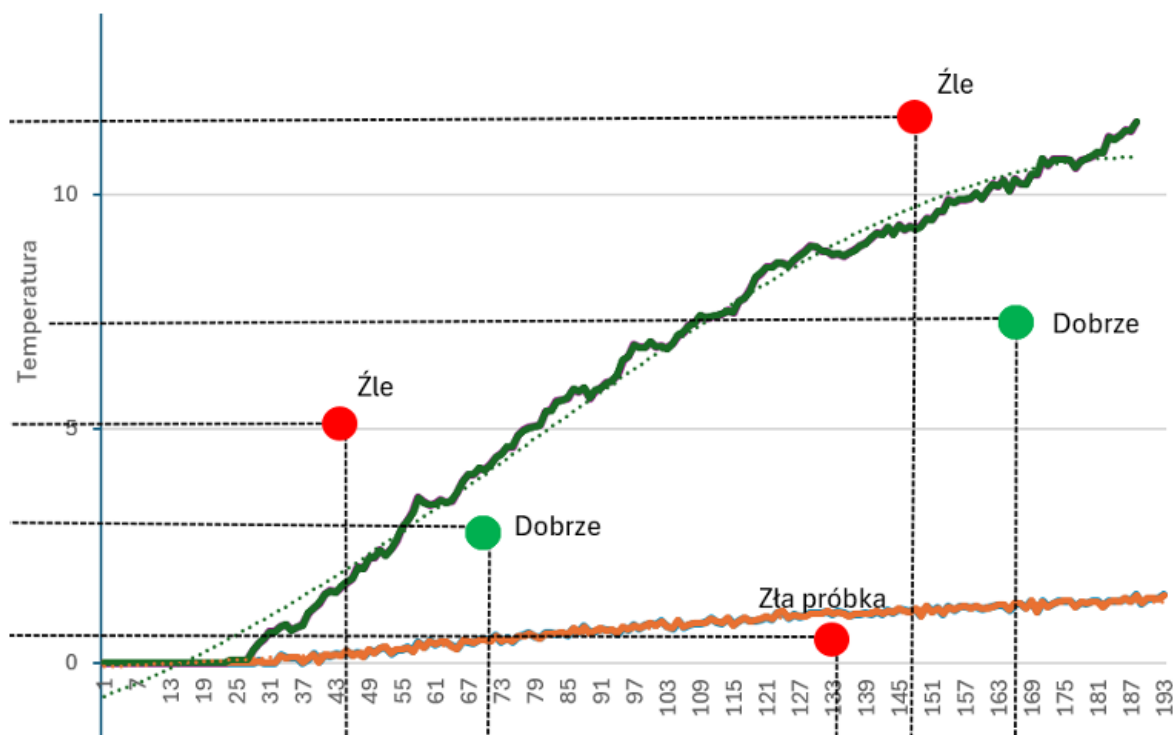
- dwa wejścia: czas pomiaru, temperatura próbki;
- dwa wyjścia binarne, na których mogą pojawiać się wartości odpowiadające: 00: dobrze, tzn. olej może być dalej eksploatowany; 01: źle, tzn. przekroczono dopuszczalną koncentrację zanieczyszczeń; 10: wadliwa próbka oleju;

- 12 neuronów w warstwie ukrytej;
- funkcja aktywacji warstwy ukrytej tangens hiperboliczny;
- funkcja aktywacji warstwy wyjściowej sigmoidalna;

Sieć była uczona metodą wstecznej propagacji błędów.

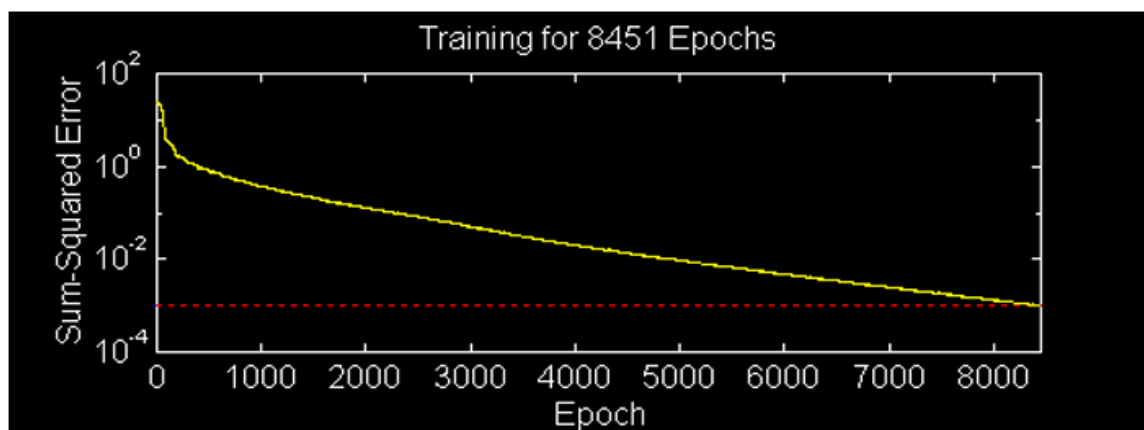
Na rysunku 5 przedstawiono przykład tworzenia plików uczących: zarówno wejściowych, jak i wyjściowych. Pliki uczące liczyły po 35 elementów, co w procesie uczenia okazało się wystarczające.

Za przyjęciem takiego rozwiązania przemawia fakt, że w razie potrzeby modyfikacji oprogramowania mikrokontrolera będącego elementem sterującym procesem pomiarowym oraz opracowującym diagnozę badanego oleju wystarczy wymienić tylko zbiór wag połączeń międzyneuronowych określonych dla nowego zbioru uczącego bez naruszania i konieczności modyfikacji całego algorytmu programu mikrokontrolera.



Rysunek 5. Ilustracja działania klasyfikatora wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe.
Źródło: opracowanie własne.

Wyniki procesu uczenia SSN najlepiej przedstawić w postaci wykresów. Wykresy, prezentują przebieg zmian błędów uczenia sieci po 8451 epokach i wykres zmian współczynnika uczenia sieci. Analizując pierwszy wykres (rysunek 6), w którym na osi X znajduje się liczba epok (czyli iteracji procesu uczenia), a na osi Y wartość błędów średniokwadratowych (Sum-Squared Error), można uzyskać informacje na temat skuteczności procesu uczenia. Na początku warto ocenić zmianę błędów w czasie. Kluczowe jest zaobserwowanie ogólnego trendu zmian błędów. W analizowanym przypadku wraz z kolejnymi epokami maleje błąd. Fakt ten świadczy o tym, że sieć neuronowa jest skutecznie uczona i dostosowuje się do danych uczących.



Rysunek 6. Przebieg zmian błędu w procesie uczenia sztucznej sieci neuronowej.
Źródło: opracowanie własne.

Poddana testowaniu nauczona sieć wykazała sześcioprocentowy błąd przetwarzania, co przyjmuje się za wartość bardzo dobrą, gdyż w praktyce dopuszcza się błędy na poziomie 10-15%.

ROZDZIAŁ 15

Sterowanie pracą maszyn za pomocą sztucznych sieci neuronowych i porównanie z metodami klasycznymi

(Jerzy Langman¹)

W ostatnich dekadach technologia sztucznej inteligencji (AI), a zwłaszcza sztucznych sieci neuronowych (SSN), przeszła olbrzymi rozwój, znajdując zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu. Jednym z obszarów, w którym sieci neuronowe wywierają znaczący wpływ, jest automatyzacja i sterowanie pracą maszyn. Dzięki zdolności do uczenia się, adaptacji oraz przetwarzania dużych ilości danych, SSN rewolucjonizują sposób, w jaki maszyny wykonują zadania – od prostych operacji produkcyjnych po skomplikowane procesy autonomiczne. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie zasad działania sztucznych sieci neuronowych w kontekście sterowania maszynami, omówienie korzyści i wyzwań związanych z ich zastosowaniem oraz zaprezentowanie przykładów praktycznych implementacji. Sztuczne sieci neuronowe to matematyczne modele inspirowane strukturą biologicznego układu nerwowego, w szczególności mózgu. Podstawową jednostką SSN jest neuron, który otrzymuje sygnały wejściowe, przetwarza je i generuje odpowiedź. Neurony są organizowane w warstwy: warstwę wejściową, warstwy ukryte i warstwę wyjściową. Przetwarzanie sygnałów między warstwami odbywa się za pomocą wag, które są modyfikowane podczas procesu uczenia sieci. Proces trenowania SSN polega na dostosowywaniu wag w taki sposób, aby minimalizować błąd między przewidywanymi a rzeczywistymi wynikami. Popularne algorytmy uczące, takie jak propagacja wsteczna błędu (*backpropagation*), umożliwiają sieciom nauczenie się bardzo złożonych funkcji odwzorowujących wejścia na wyjścia (Kaczorek, 1999).

Tradycyjnie maszyny były sterowane przy użyciu algorytmów deterministycznych, w których zestaw reguł określał zachowanie urządzenia w każdej sytuacji. Programowanie sterowników PLC (*Programmable Logic Controller*) opierało się na logice warunkowej: jeśli spełniony jest warunek A, wykonaj akcję B. Tego rodzaju podejście sprawdza się w środowiskach o wysokiej przewidywalności (Masters, 1996).

Jednak w warunkach zmiennych, w których maszyna musi adaptować się do nowych sytuacji, klasyczne systemy stają się niewystarczające. W takich przypadkach pojawia się potrzeba bardziej elastycznych metod sterowania – właśnie tutaj sztuczne sieci neuronowe wykazują swoją przewagę.

Główne cechy sieci neuronowych w sterowaniu maszynami:

- Uczenie sterowania bez potrzeby tworzenia dokładnego modelu. W przypadku wielu maszyn, zwłaszcza tych o złożonej dynamice, stworzenie precyzyjnego matematycznego modelu ich działania może być niezwykle trudne lub wręcz niemożliwe. Sieci neuronowe mogą uczyć się sterowania na podstawie danych eksperymentalnych – poprzez obserwację zachowania maszyny w różnych warunkach i uczenie się właściwych reakcji. Przykładowo, zamiast tworzyć

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

szczegółowy model kinematyczny robota przemysłowego, można wykorzystać SSN, aby na podstawie danych treningowych nauczyła się ona sterowania ramieniem robota w odpowiedzi na różne wejścia.

- Adaptacyjne sterowanie. Sztuczne sieci neuronowe potrafią nie tylko nauczyć się sterowania, ale też dostosowywać się do zmian w czasie. W przypadku zużycia mechanicznego komponentów maszyny lub zmieniających się warunków środowiskowych (np. zmiennych temperatur), klasyczne systemy często zawodzą. Z kolei sieć neuronowa, która została przeszkolona z użyciem technik uczenia adaptacyjnego, może dynamicznie dostosowywać swoje parametry, utrzymując wysoką efektywność działania.
- Predykcyjne sterowanie i optymalizacja. SSN mogą być też wykorzystywane do przewidywania przyszłych stanów maszyny na podstawie aktualnych oraz historycznych danych. Przykładowo, w systemach CNC (*Computer Numerical Control*) sieci neuronowe mogą przewidywać zużycie narzędzi i sugerować optymalne parametry cięcia, zmniejszając awaryjność oraz zwiększając efektywność produkcji.
- Sterowanie w robotyce autonomicznej. W robotyce mobilnej i autonomicznej sieci neuronowe są podstawą nowoczesnych systemów sterowania. Roboty potrafią nawigować w nieznanym terenie, unikając przeszkód i podejmując decyzje na podstawie danych sensorycznych, bez potrzeby tworzenia szczegółowych map otoczenia. Przykładem są autonomiczne wózki AGV (*Automated Guided Vehicle*) w magazynach.

W kontekście sterowania maszynami wykorzystywane są różne typy SSN:

- Sieci jednokierunkowe (*Feedforward Neural Networks*): Najprostsze sieci, gdzie sygnał przepływa od wejścia do wyjścia. Stosowane w prostych zadaniach sterowania i predykcji.
- Sieci rekurencyjne (*Recurrent Neural Networks*, RNN): Sieci te mają połączenia zwrotne, co pozwala im uwzględniać informacje o stanach wcześniejszych. Znajdują zastosowanie w sterowaniu systemami dynamicznymi, gdzie liczy się sekwencyjność zdarzeń.
- Sieci konwolucyjne (*Convolutional Neural Networks*, CNN): Choć głównie stosowane w przetwarzaniu obrazów, CNN mogą analizować dane sensoryczne w robotyce autonomicznej (np. wizję komputerową w robotach).
- Sieci głębokie (*Deep Neural Networks*, DNN): Pozwalają na modelowanie bardzo złożonych funkcji sterowania, wymagając jednak dużych zbiorów danych i mocy obliczeniowej.

Korzyści wynikające ze stosowania SSN w sterowaniu maszynami:

- Zwiększona adaptacyjność: SSN pozwalają maszynom na dostosowanie się do zmieniających się warunków operacyjnych.
- Redukcja kosztów modelowania: Brak konieczności tworzenia skomplikowanych modeli matematycznych oszczędza czas i zasoby.
- Lepsze wykorzystanie danych: SSN potrafią wykorzystać dane operacyjne maszyn do ciągłego uczenia i doskonalenia sterowania.
- Autonomia: W połączeniu z technikami sztucznej inteligencji maszyny mogą działać bardziej autonomicznie, zmniejszając potrzebę nadzoru człowieka.

- Złożoność przetwarzania: Mogą obsługiwać nieliniowości, zakłócenia oraz niepewności, trudne dla klasycznych algorytmów.

Mimo wielu korzyści, sterowanie maszynami przy użyciu SSN napotyka też ograniczenia:

- Wymagania dotyczące danych: Trenowanie skutecznej sieci wymaga dużych i reprezentatywnych zbiorów danych.
- Czasochłonność uczenia: Proces trenowania sieci, zwłaszcza głębokich, może być czasochłonny i kosztowny.
- Brak przejrzystości (*black-box problem*): SSN są często postrzegane jako systemy typu „czarna skrzynka”, co utrudnia analizę decyzji podejmowanych przez sieć.
- Bezpieczeństwo: W krytycznych zastosowaniach przemysłowych konieczne jest zapewnienie, że sieć neuronowa działa niezawodnie i przewidywalnie w każdych warunkach.

Przykłady praktyczne:

- Robotyka przemysłowa: W zakładach produkcyjnych roboty uczą się optymalnych trajektorii ruchu bez konieczności ręcznego programowania.
- Autonomiczne pojazdy: Samojezdne maszyny rolnicze wykorzystują SSN do rozpoznawania upraw, planowania tras i unikania przeszkód.
- Diagnostyka predykcyjna: Systemy oparte na SSN analizują dane z maszyn w czasie rzeczywistym, przewidując potencjalne awarie i sugerując działania serwisowe.
- Inteligentne linie produkcyjne: Sieci neuronowe optymalizują procesy montażu i kontroli jakości na podstawie analizy obrazów i sygnałów sensorycznych.

Sterowanie pracą maszyn za pomocą sztucznych sieci neuronowych to obszar o ogromnym potencjale rozwoju. Dzięki zdolnościom uczenia się, adaptacji i predykcji, SSN umożliwiają tworzenie bardziej elastycznych, wydajnych oraz autonomicznych systemów sterowania. Aby w pełni wykorzystać ich możliwości, konieczne jest jednak odpowiednie przygotowanie danych, wybór właściwej architektury sieci i zapewnienie bezpieczeństwa działania. W przyszłości można oczekiwać, że rola SSN w automatyzacji przemysłu będzie nadal rosła, prowadząc do jeszcze większej integracji maszyn i sztucznej inteligencji.

SSN są też coraz częściej integrowane z nadrzędnymi systemami zarządzania produkcją (MES – *Manufacturing Execution Systems*) oraz nadzoru i akwizycji danych (SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*). Dzięki temu możliwe jest tworzenie inteligentnych systemów sterowania, które nie tylko reagują na bieżące zmiany w procesie, ale też przewidują przyszłe stany na podstawie analizy dużych zbiorów danych historycznych i bieżących. Przykładowo, w hutnictwie czy przemyśle chemicznym sieci neuronowe mogą prognozować jakość produktu końcowego w zależności od parametrów procesu, umożliwiając wczesną interwencję i optymalizację.

Jednym z podstawowych zastosowań SSN w sterowaniu jest modelowanie oraz identyfikacja dynamicznych obiektów sterowania. W przypadkach, gdy model matematyczny systemu nie jest znany lub jest trudny do wyznaczenia analitycznie, sieci neuronowe – w szczególności rekurencyjne sieci neuronowe (RNN), sieci z pamięcią długoterminową (LSTM) oraz architektury GRU (*Gated Recurrent Unit*) – pozwalają na estymację dynamiki obiektu na podstawie zebranych danych eksperymentalnych. Tego

rodzaju modele neuronowe mogą służyć jako elementy wewnętrzne w strukturach sterowania predykcyjnego (*Model Predictive Control*, MPC), umożliwiając realizację sterowania w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem ograniczeń i przewidywanych stanów systemu.

Drugim istotnym obszarem jest projektowanie neuronowych regulatorów bezpośrednich (ang. *direct neural controllers*). W tym podejściu sieć neuronowa jest bezpośrednio uczona mapowania przestrzeni stanu na przestrzeń sygnałów sterujących. Taki regulator może być uczony za pomocą nadzorowanego uczenia maszynowego lub metod wzmacniających (*Reinforcement Learning*, RL), co czyni go szczególnie użytecznym w środowiskach o wysokim poziomie niepewności. Głębokie sieci neuronowe (*Deep Neural Networks*, DNN) i sieci konwolucyjne (*Convolutional Neural Networks*, CNN) są często wykorzystywane do przetwarzania danych sensorycznych, a następnie ich integracji z politykami sterującymi, zwłaszcza w systemach autonomicznych.

Sztuczne sieci neuronowe odgrywają również kluczową rolę w realizacji sterowania adaptacyjnego i uczenia online. W tego typu systemach SSN są aktualizowane w czasie rzeczywistym na podstawie bieżących danych operacyjnych, co pozwala na dostosowywanie strategii sterowania do zmieniających się warunków środowiskowych oraz parametrów obiektu. W literaturze szeroko opisywane są adaptacyjne regulatory neuronowe oparte na strukturze *backpropagation through time* (BPTT) bądź też wykorzystujące algorytmy typu *Extended Kalman Filter* (EKF) do aktualizacji wag sieci w czasie rzeczywistym.

W zaawansowanych zastosowaniach, takich jak sterowanie robotami mobilnymi, manipulatorami przemysłowymi, systemami lotniczymi czy pojazdami autonomicznymi, SSN wspomagają realizację planowania ruchu, estymacji trajektorii i podejmowania decyzji. W szczególności, architektury hybrydowe łączące klasyczne algorytmy sterowania z modułami opartymi na SSN umożliwiają tworzenie systemów sterowania o zwiększonej elastyczności, odporności na zakłócenia i zdolności do generalizacji w nowych warunkach operacyjnych.

Na koniec warto podkreślić rosnącą rolę SSN w rozproszonych systemach sterowania i w środowiskach opartych na technologii Internetu Rzeczy (IoT). Tutaj sieci neuronowe wykorzystywane są do lokalnego podejmowania decyzji, optymalizacji zużycia energii i adaptacji do preferencji użytkownika w inteligentnych budynkach czy zautomatyzowanych sieciach energetycznych.

Konwencjonalne metody sterowania opierają się na precyzyjnie zdefiniowanych modelach matematycznych, opisujących dynamikę procesów i maszyn. Do najczęściej stosowanych technik należą:

- Sterowanie proporcjonalno-całkująco-różniczkujące (PID). Regulator PID jest jednym z najpopularniejszych narzędzi. Działa na zasadzie obliczania sygnału sterującego jako sumy trzech składowych: proporcjonalnej, całkującej i różniczkującej względem błędu regulacji.
- Sterowanie optymalne. Metody takie jak LQR (*Linear Quadratic Regulator*) pozwalają na minimalizację pewnych kosztów sterowania (np. energii sygnału sterującego) przy zachowaniu dynamiki układu.
- Sterowanie adaptacyjne. W systemach zmieniających się w czasie stosuje się sterowanie adaptacyjne, które pozwala na dostosowywanie parametrów regulatora do zmieniających się warunków pracy.

- Sterowanie rozmyte (*Fuzzy Control*). Choć często traktowane jako bardziej „inteligentne”, systemy rozmyte też należą do konwencjonalnych technik, gdzie decyzje są podejmowane na podstawie logiki rozmytej.

Przykład: W przemyśle spożywczym klasyczne regulatory PID są szeroko stosowane do utrzymywania temperatury procesów fermentacji.

Mimo szerokiego zastosowania, konwencjonalne metody mają ograniczenia:

- Wymagają dokładnych modeli matematycznych. Modelowanie procesów skomplikowanych, np. nieliniowych, wielowymiarowych systemów, może być bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.
- Problemy z adaptacją do zmian. Jeśli charakterystyka obiektu sterowania ulega zmianom (np. z powodu zużycia maszyn lub zmiennych warunków środowiskowych), konwencjonalne regulatory mogą stracić swoją skuteczność. Klasyczne algorytmy są mniej skuteczne w środowiskach dynamicznie zmieniających się lub trudnych do dokładnego opisanie.
- Ograniczona odporność na zakłócenia i niepewność. W obecności dużych zakłóceń zewnętrznych lub nieznanymi parametrów modelu skuteczność klasycznych metod spada.
- Niska zdolność generalizacji: Problemy z radzeniem sobie z niepełną informacją, zakłóceniami, nieliniowościami i niepewnością modelu.

Porównanie klasycznych algorytmów sterowania maszyn z podejściem opartym na sztucznych sieciach neuronowych należy rozpatrywać w wielu aspektach, którymi są:

- *Podejście do modelowania systemu*

<i>Klasyczne algorytmy</i>
Wymagają precyzyjnego modelu matematycznego systemu (np. równania różniczkowe, modele liniowe).
Przykłady: PID, LQR, MPC. <i>Sterowanie z użyciem SSN</i> Mogą działać na podstawie danych wejściowych/wyjściowych bez znajomości modelu matematycznego (podejście „czarnej skrzynki”). Przykłady: neurosterowniki, sieci adaptacyjne, reinforcement learning.

- *Adaptacyjność i elastyczność*

<i>Klasyczne algorytmy</i>
Mało elastyczne – zmiany w systemie wymagają ponownego strojenia lub przeprojektowania regulatora.
Sterowanie adaptacyjne istnieje, ale jest bardziej ograniczone. <i>Sterowanie z użyciem SSN</i> Bardziej adaptacyjne – mogą uczyć się zmian zachodzących w systemie (np. degradacja maszyny, zmiany obciążenia). Sieci neuronowe mogą dynamicznie dostosowywać swoje parametry dzięki uczeniu.

- *Złożoność implementacji*

Klasyczne algorytmy

Łatwe do implementacji i zrozumienia.

Mniej zasobożerne.

Sterowanie z użyciem SSN

Złożone – wymagają dużych zbiorów danych, większej mocy obliczeniowej i specjalistycznej wiedzy.

Zasobożerne – szczególnie w czasie uczenia i przy dużych architekturach.

- *Zdolność do uogólniania i odporność na zakłócenia*

Klasyczne algorytmy

Dobrze działają w znanych warunkach, ale są wrażliwe na nieoczekiwane zmiany lub zakłócenia.

Sterowanie z użyciem SSN

Mogą uogólniać zachowanie systemu nawet przy nieznanym warunkach – jeśli były odpowiednio trenowane.

- *Transparentność (tzw. explainability)*

Klasyczne algorytmy

Przejrzyste – łatwo zrozumieć, jak działa regulator.

Łatwo analizować stabilność i dokładność.

Sterowanie z użyciem SSN

Trudne do interpretacji – sieci neuronowe to tzw. „czarne skrzynki”.

Trudniej formalnie analizować stabilność i poprawność działania.

- *Przykłady zastosowań*

Klasyczne algorytmy

Robotyka przemysłowa (PID)

Sterowanie ruchem pojazdów Systemy HVAC

Sterowanie z użyciem SSN

Autonomiczne pojazdy

Diagnostyka i predykcyjne utrzymanie ruchu

Inteligentne systemy sterowania procesami

ROZDZIAŁ 16

Lasery układy pomiarowe i kamery CCD w systemach wieloparametrycznej macierzowej oceny maszyn i wyrobów

(*Andrzej Ryniewicz¹*)

Jeden z ważniejszych problemów w systemach zapewnienia jakości dotyczy oceny jakości wyrobów. Jakość wyrobów, w znaczeniu ogólnym – rozumiana jako spełnienie wymagań klientów – wynika z jakości wykonania jego elementów składowych, co implikuje prawidłowe funkcjonowanie urządzenia.

Szczególnie ważne są parametry techniczno-użytkowe; dla znacznej grupy wyrobów są to parametry geometryczne, zapewniające ich prawidłowe funkcjonowanie. W większości przypadków prawidłowe funkcjonowanie wyrobów zależy nie od jednego, a kilku parametrów geometrycznych lub kinematycznych, tzw. parametrów dominujących, a także od ich wzajemnych relacji.

Dlatego też celem jest opracowanie systemu oceny wyrobów, bazującego na parametrach czy cechach dominujących z uwzględnieniem ich wzajemnych zależności funkcyjnych.

W przypadku prowadzenia badań obrabiarek nie zawsze jest konieczne i możliwe przeprowadzenie wszystkich badań opisanych w arkuszach odpowiednich norm. Jeżeli badania przeprowadza się w celach odbiorczych, to prawo wyboru zakresu badań dotyczących odpowiednich zespołów oraz właściwości obrabiarek pozostawia się użytkownikowi do uzgodnienia dostawcą. Badania te określa się dokładnie w kontrakcie.

Samo powołanie się na arkusz odpowiedniej normy bez wyszczególnienia badań, które należy przeprowadzić i bez uzgodnienia związanych z tym kosztów nie może być uważane za wiążące którąkolwiek ze stron kontraktu.

Przykładowo, warunki badań centrów obróbkowych podaje norma PN – ISO 10791. Jej celem jest dostarczenie wyczerpujących wiadomości na temat badań, które mogą być wykorzystywane w celach porównawczych, odbiorczych lub okresowej kontroli dokładności.

W procesie technologicznym każdy element jest wyznaczony z pewnej ilości punktów w przestrzeni, przy czym dokładność geometryczna wytworzonego przedmiotu zależy od dokładności poszczególnych ciągów punktów.

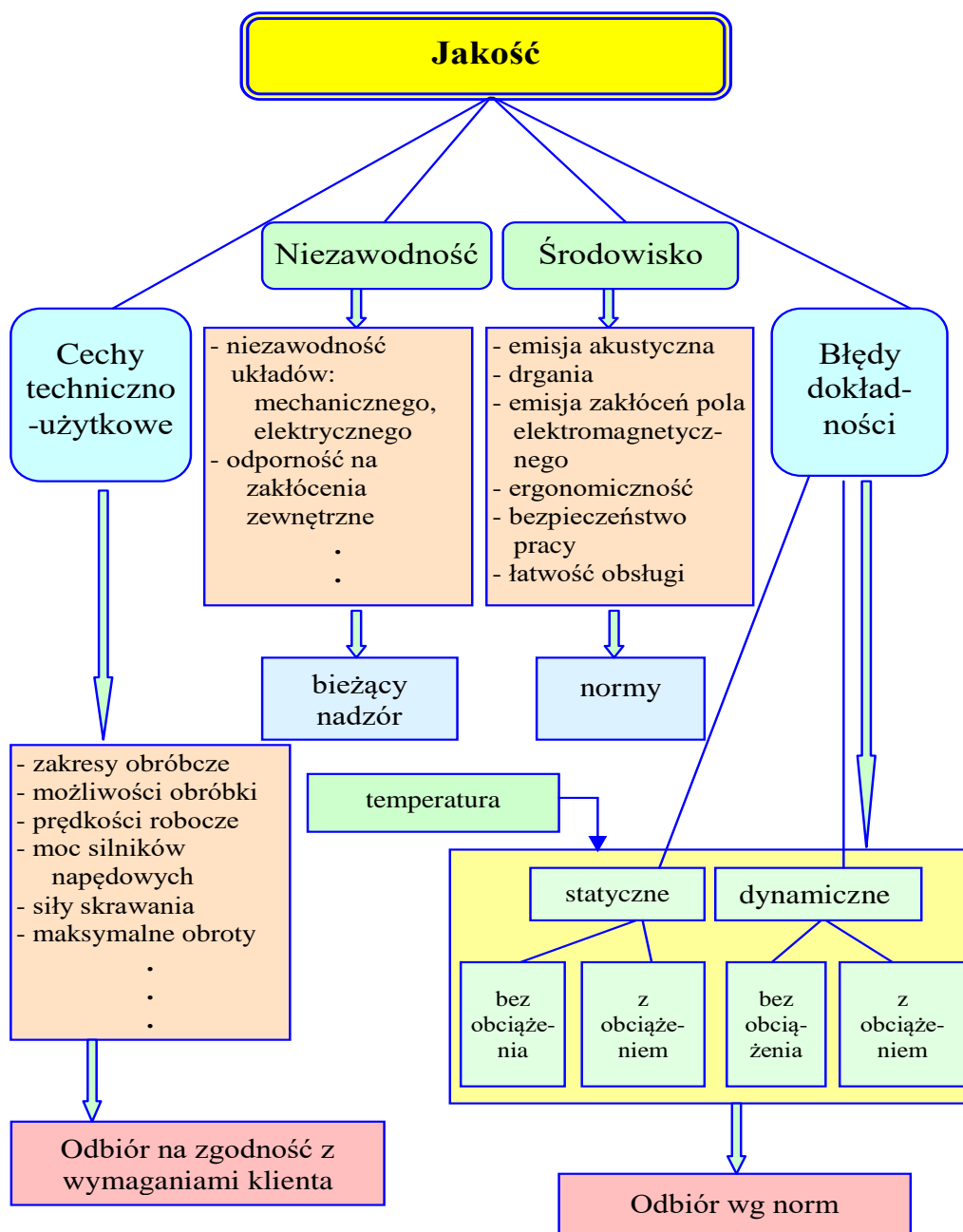
W przypadku ogólnym można wyróżnić część błędów wynikająca z błędów prowadzenia zespołów przesuwnych i realizacji określonego zadania (Dyrcz, Tabor, Zajac, 1999).

Aby określić charakter oddziaływania poszczególnych źródeł błędów, należy przeanalizować składowe systematyczne i przypadkowe wektora błędu pozycjonowania. Zasadniczy udział w tych częściach określony jest przez błędy wywołane nieprawidłową geometrią ruchu zespołów przesuwnych, wynikające głównie z błędów kształtu oraz położenia elementów bazujących i prowadzących.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0003-3437-7650.

Zastosowanie w tym przypadku wieloparametrycznego systemu oceny maszyn, ujmującego parametry geometryczne i kinematyczne, jest jak najbardziej wskazane. Badania takie wymagają skontrolowania wielu właściwości danego urządzenia, a skupienie tych czynności pomiarowych w jedną całość znacznie upraszcza zadanie metrologiczne.

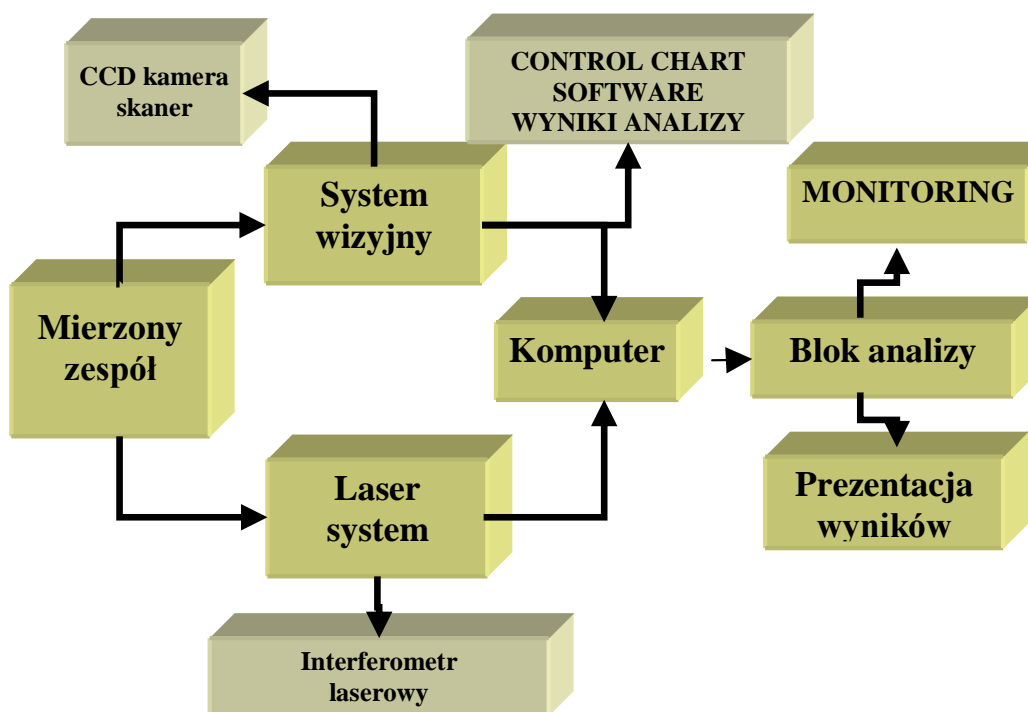
Schemat blokowy systemu przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rysunek 1. Wybrane składniki odbioru jakościowego urządzeń technologicznych.
Źródło: opracowanie własne.

System składa się z trzech głównych bloków: pomiarowego, monitoringu oraz wizualizacji, a także analizy danych.

Blok pomiarowy przeznaczony jest do przeprowadzenia pomiarów jednego lub kilku parametrów podczas jednego przebiegu pomiarowego zgodnie z przyjętą strategią, zbierania wyników i parametrów procesu technologicznego oraz zapisania wszystkich danych w formie pliku przeznaczonego do bloku analizy. Blok ten przeznaczony jest także do sterowania procesem pomiarowym, przyrządem pomiarowym i kontrolowanym urządzeniem. Głównie blok pomiarowy przystosowany jest do współpracy z laserowymi układami pomiarowymi mierzącymi parametry geometryczne, położenia i kinematyczne. Laserowy układ pomiarowy zmodernizowano w ten sposób, że jest on wykorzystywany do określenia położenia punktów charakterystycznych leżących na kontrolowanym elemencie urządzenia technologicznego. Otrzymane współrzędne charakterystycznych punktów w przyjętym układzie odniesienia, w warunkach statycznych lub dynamicznych, pozwalają na wyznaczenia błędów geometrycznych (wymiaru, kształtu), położenia oraz kinematycznych (prostoliniowości przesuwu, fluktuacji prędkości itd.).



Rysunek 2. Schemat systemu wieloparametrycznej oceny urządzeń.

Źródło: opracowanie własne.

Blok wizualizacji umożliwia zarejestrowanie procesu pomiarowego lub procesu technologicznego, podczas którego przeprowadzano pomiary. W przypadku zastosowania przyrządu pomiarowego nieposiadającego interfejsu umożliwiającego bezpośrednią współpracę z komputerem, blok ten realizuje funkcję bezpośredniej rejestracji wyników pomiarów.

Blok analizy przeznaczony jest do: statystycznej oceny wyników pomiarów, opracowania macierzy właściwości wyrobu z podziałem na cechy dominujące, wpływowe oraz uzupełniające, opracowanie macierzy odchyłek parametrów kontrolowanych, wyznaczeniu zależności funkcyjnych pomiędzy właściwościami dominującymi oraz określeniu wskaźników syntetycznych ujmujących wybrane właściwości wyroby i ich graficzną lub tabelaryczną prezentację.

Dla potrzeb analizy przyjęto następujące założenia:

$$A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

gdzie:

A – kontrolowane urządzenie

A_i – zespoły lub części składowe kontrolowanego urządzenia

$$U(A) = \{U_j, j = 1, 2, \dots, k\} \quad (2)$$

gdzie:

$U(A)$ – właściwości poszczególnych zespołów urządzenia A z uwagi na cechę U_j

W oparciu o powyższe założenia można określić zbiory właściwości technicznych oraz użytkowych urządzenia (wyrobu) A złożonego z zespołów A_i ($1, 2, \dots, n$), dla poszczególnych właściwości lub kryteriów wynikających z cech U wyrażonych właściwościami U_j ($1, 2, \dots, k$).

$$U(A_i) = \{U_j(A_i), j = 1, 2, \dots, k\} \quad (3)$$

gdzie:

$U_j(A_i)$ – stan zespołu A_i ze względu na właściwość U_j

Analizując urządzenia A złożone z zespołów A_i , o właściwościach U_j , można jego charakterystykę ujmującą wszystkie zespoły i cechy zapisać następująco:

$$\begin{array}{cccccc} U_1(A_1) & U_2(A_1) & \dots & U_j(A_1) & \dots & U_k(A_1) \\ U_1(A_2) & U_2(A_2) & \dots & U_j(A_2) & \dots & U_k(A_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_1(A_i) & U_2(A_i) & \dots & U_j(A_i) & \dots & U_k(A_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_1(A_n) & U_2(A_n) & \dots & U_j(A_n) & \dots & U_k(A_n) \end{array} \quad (4)$$

Każdy wiersz tej macierzy odpowiada określonemu zespołowi A_i , a każda kolumna odpowiada określonej właściwości U_j .

Właściwości U_j poszczególnych zespołów A_i powinny spełniać założone przez konstruktora kryteria K_r , a całe urządzenie kryterium główne $K(A)$:

$$K(A) = \{K_r(A_i), r = 1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

Można zatem wnioskować, że całe urządzenie A , po spełnieniu kryteriów K , posiadać będzie określone właściwości G :

$$G(K, A) = \{G_d, G_s, s = 1, 2, \dots, r\} \quad (6)$$

gdzie:

G_d – jest właściwością dominującą urządzenia A ,

G_s – są analizowanymi właściwościami urządzenia A .

Stwierdzono też, że całe urządzenie będzie posiadać założone cechy użytkowe w przypadku, gdy spełnione są właściwości $G(K, A)$ i gdy występują odpowiednie relacje pomiędzy właściwościami $U(A)$ poszczególnych zespołów urządzenia a właściwościami $G(K, A)$ urządzenia, co przyjęto zapisać jako:

$$W = U(A) F(Q) G(K, A) \quad (7)$$

gdzie:

$F(Q)$ jest relacją pomiędzy właściwościami $U(A)$ poszczególnych zespołów urządzenia a właściwościami $G(K, A)$ urządzenia dla spełnienia cech użytkowych Q .

Zapis (15.7) „ W ” oznacza wskaźnik syntetyczny, opisujący stopień spełnienia przez urządzenie A cech użytkowych Q .

Weryfikacja systemu przeprowadzona została na wybranym zespole centrum frezarskiego, w którym kontrolowano:

- błędy kształtu prowadnicy;
- prostoliniowość przesuwu suportu podczas biegu luzem oraz podczas pracy;
- fluktuację prędkości przesuwu suportu podczas biegu luzem oraz podczas pracy;
- pomiary falistości i chropowatości powierzchni przedmiotu kontrolnego.

Jako cechę użytkową przyjęto błąd falistości przedmiotu kontrolnego.

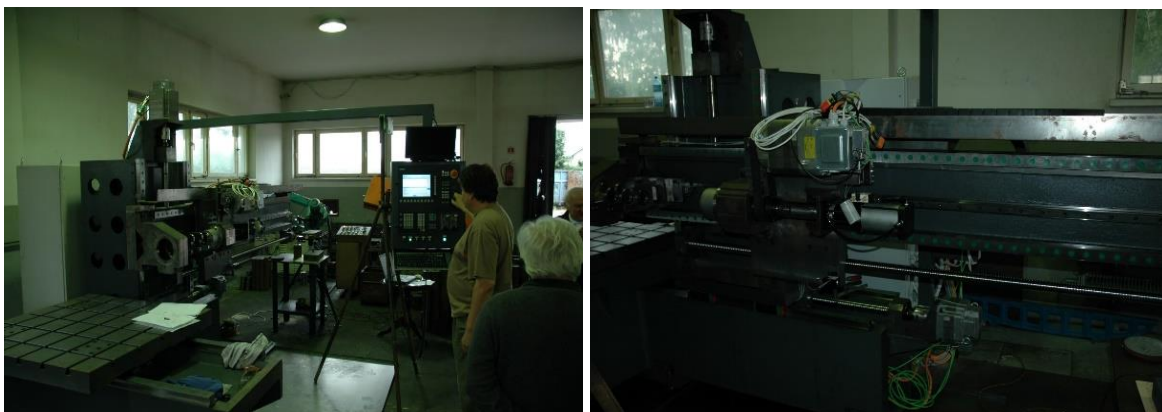
Pomiary przeprowadzono z zastosowaniem interferometru laserowego, za wizualizacją objęto: przesuw stołu obrabiarki oraz proces frezowania przedmiotu kontrolnego.

Rysunek 3 przedstawia kontrolę wybranych parametrów pozycjonowania suportu z zastosowaniem interferometru laserowego i obróbkę przedmiotu kontrolnego.

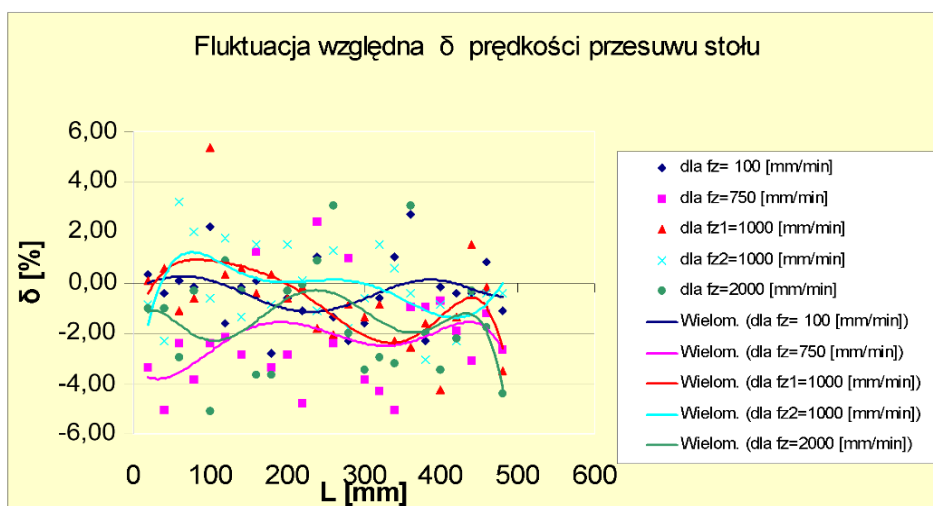
Na rysunku 4 ukazano przykładowo fluktuację względną δ prędkości przesuwu stołu podczas frezowania przedmiotu kontrolnego dla kilku wybranych prędkości frezowania, w funkcji długości odcinka kontrolnego.

Rysunek 5 prezentuje graficznie wskaźnik syntetyczny określający wpływ nieprostoliniowości przesuwu stołu [wskaźnik A] oraz fluktuację prędkości stołu obrabiarki [wskaźnik B] na błąd falistości powierzchni wykonywanych przedmiotów, bazując na:

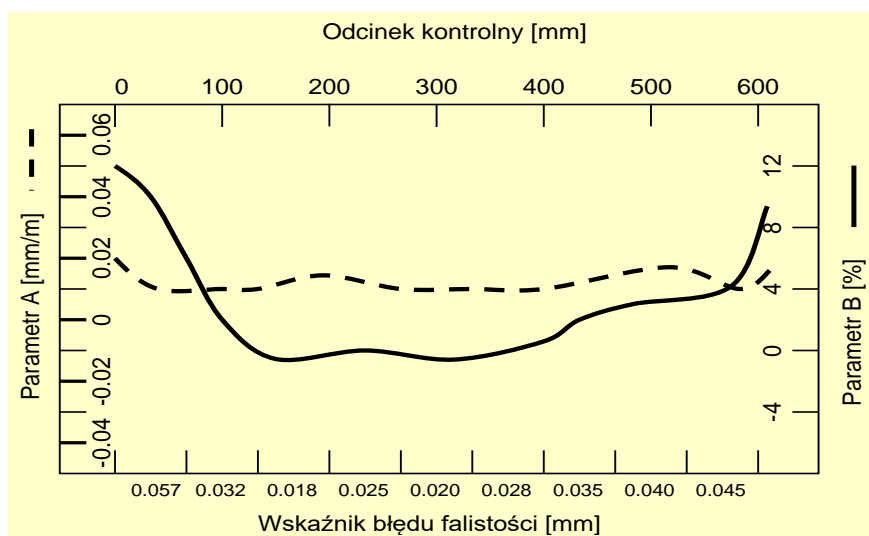
- prostoliniowości przesuwu stołu obrabiarki podczas obróbki;
- fluktuacji prędkości stołu podczas obróbki;
- profilu falistości powierzchni przedmiotu kontrolnego;
- funkcji korelacji pomiędzy falistością powierzchni a prostoliniowością przesuwu i fluktuacją prędkości;
- przedmiocie kontrolnym frezowanym z różnymi wartościami prędkości posuwu.



Rysunek 3. Laserowy pomiar wybranych parametrów pozycjonowania suportu wraz z obróbką przedmiotu kontrolnego.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4. Fluktuacja względna prędkości stołu podczas frezowania przedmiotu kontrolnego.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 5. Graficzna prezentacja wskaźnika syntetycznego.
Źródło: opracowanie własne.

W przedstawionym przykładzie wskaźnik syntetyczny określa, jako cechę urządzenia wytwórczego, wpływ nieprostoliniowości przesuwu stołu i fluktuację prędkości stołu obrabiarki na błąd falistości powierzchni przedmiotu kontrolnego.

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych charakterystyk można wnioskować, że formowanie powierzchni przedmiotu na długości odcinka kontrolnego przebiega w trzech etapach:

Etap I – początek obróbki, odcinek stabilizacji parametrów technologicznych,

Etap II – odcinek pracy stabilnej,

Etap III – odcinek pracy końcowy, niestabilna praca mechanizmu przesuwu stołu.

Jak wynika z badań w etapie I i III większy wpływ na błąd falistości wywiera fluktuacja prędkości przesuwu stołu, a wpływ nieprostoliniowości przesuwu nie wykazuje znaczących różnic w poszczególnych odcinkach obróbczych.

Opracowany system umożliwia przeprowadzenie oceny technologicznych urządzeń, określenie jakości całego urządzenia, bazując na parametrach czy cechach dominujących z uwzględnieniem ich zależności funkcyjnych lub jego wybranych zespołów. Równocześnie system może być wykorzystany do porównania kilku funkcjonalnie podobnych urządzeń z punktu widzenia wybranych właściwości bądź cech użytkowych.

Określenie wskaźników syntetycznych pozwala na wyznaczenie wpływu wybranych parametrów (geometrycznych lub kinematycznych) na analizowane cechy użytkowe.

System posiada budowę modułową, może współpracować z dowolnym urządzeniem pomiarowym wyposażonym w interfejs umożliwiający przekazywanie danych do komputera sterującego i dokonywać oceny urządzenia. Blok wizualizacji oraz monitoringu pozwala na ciągłe śledzenie procesu technologicznego łącznie z procesem pomiarowym.

ROZDZIAŁ 17

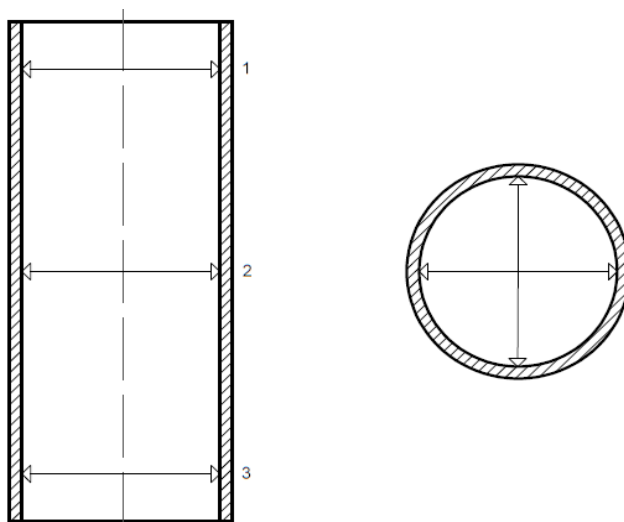
Modyfikacja silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego (Tomasz Kądziołka¹)

Silniki samochodowe stanowią serce każdego pojazdu, definiując jego wydajność i osiągi. W dzisiejszych czasach entuzjści motoryzacji często dążą do maksymalizacji potencjału swoich pojazdów poprzez modyfikacje, które zwiększają moc i moment obrotowy silnika (Brodowicz, 1993; Kijewski, 1999; Kozaczewski, 2024). W tym kontekście silnik BMW M50B20, będący częścią serii M50 produkowanej przez BMW w latach 1990-1996, stanowi fascynujące pole do eksploracji inżynierskiej. Jego konstrukcja i potencjał wydajnościowy stanowią solidną bazę do przeprowadzenia różnorodnych modyfikacji, mających na celu osiągnięcie jeszcze lepszych osiągnięć.

W niniejszej pracy skoncentrowano się na analizie, projektowaniu i implementacji modyfikacji, które pozwolą na efektywne zwiększenie mocy i momentu obrotowego tego silnika, przy jednoczesnym zachowaniu niezawodności oraz trwałości. Poprzez zastosowanie zaawansowanych technik inżynierskich i testów praktycznych, starano się dążyć do osiągnięcia optymalnej wydajności silnika BMW M50B20 (https://www.bmwpartsdeal.com/parts/bmw-cylinder_head_gasket_asbestos_free-11127506984.html).

Celem opracowania jest zwiększenie mocy i momentu obrotowego silnika BMW M50b20NV poprzez wykonanie modyfikacji, takich jak (Mysłowski, 2016):

- zastosowanie wału korbowego z silnika M51D25 o większym promieniu wykorbienia;
- zastosowanie tłoków z silnika M50B20 Vanos o mniejszej odległości KH (KH to odległość od osi sworznia do denka tłoka);
- montaż turbosprężarki.



Rysunek 1. Wyznaczone miejsca pomiarowe tulei cylindrowych.

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0003-0877-0846.

Weryfikacja tulei cylindrowych silnika spalinowego M50b20NV została ostatecznie przeprowadzona za pomocą mikrometra analogowego (Limit 272370503) i średnicówki zegarowej (Limit 61931309) – wyniki zostały zaprezentowane w tabelach 1 i 2, a miejsca dokonania pomiarów na rysunku 1. Przeprowadzono również weryfikację tłoków celem dopasowania ich do właściwego cylindra – wyniki pokazano w tabelach 3 i 4, a miejsce pomiaru na rysunku 2 (Luft, 2009).

Tabela 1
Wyniki pomiarów cylindrów 1-3

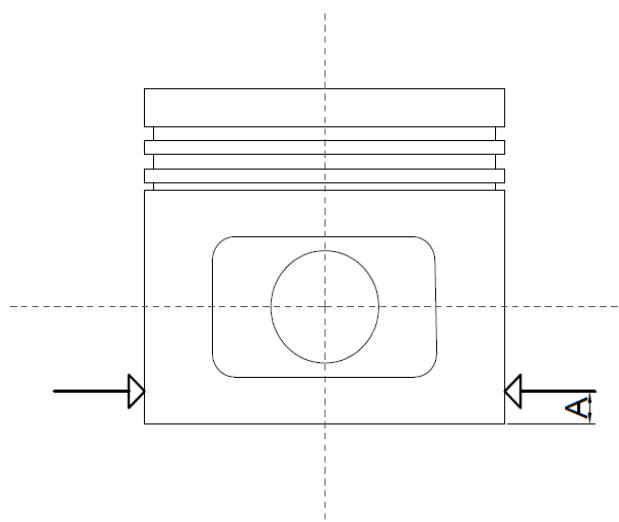
Rodzaj pomiaru	Nr cylindra (tulei)		
	1	2	3
Nominalna średnica cylindra	80,000 +0,014	80,000 +0,014	80,000 +0,014
Średnica cylindra na wysokości (1): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,02 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,02
Średnica cylindra na wysokości (2): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,04 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,04
Średnica cylindra na wysokości (3): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,03
Maksymalna średnica cylindra (tulei) [mm]	80,080 +0,014	80,080 +0,014	80,080 +0,014
Owalność cylindra (tulei) - na wysokości (1) [mm] - na wysokości (2) [mm] - na wysokości (3) [mm]	(1): 0,01 (2): 0,00 (3): 0,00	(1): 0,01 (2): 0,01 (3): 0,00	(1): 0,01 (2): 0,01 (3): 0,00
Maksymalna owalność cylindra (tulei) [mm]	0,01	0,01	0,01
Dopuszczalna owalność cylindra (tulei) [mm]	0,01	0,01	0,01
Stożkowość cylindra (tulei): (Różnica wymiarów na wysokościach 1 i 3) [mm]	0,01	0,01	0,01

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Tabela 2
Wyniki pomiarów cylindrów 4-6

Rodzaj pomiaru	Nr cylindra (tulei)		
	4	5	6
Nominalna średnica cylindra	80,000 +0,014	80,000 +0,014	80,000 +0,014
Średnica cylindra na wysokości (1): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,04 (Y): 80,03	(X): 80,03 (Y): 80,03
Średnica cylindra na wysokości (2): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,04 (Y): 80,04	(X): 80,04 (Y): 80,03	(X): 80,04 (Y): 80,04
Średnica cylindra na wysokości (3): - wymiar w osi X [mm] - wymiar w osi Y [mm]	(X): 80,03 (Y): 80,04	(X): 80,03 (Y): 80,03	(X): 80,04 (Y): 80,03
Maksymalna średnica cylindra (tulei) [mm]	80,080 +0,014	80,080 +0,014	80,080 +0,014
Owalność cylindra (tulei) - na wysokości (1) [mm] - na wysokości (2) [mm] - na wysokości (3) [mm]	(1): 0,00 (2): 0,00 (3): 0,01	(1): 0,01 (2): 0,01 (3): 0,00	(1): 0,00 (2): 0,00 (3): 0,01
Maksymalna owalność cylindra (tulei) [mm]	0,01	0,01	0,01
Dopuszczalna owalność cylindra (tulei) [mm]	0,01	0,01	0,01
Stożkowość cylindra (tulei): (Różnica wymiarów na wysokościach 1 i 3) [mm]	0,01	0,01	0,01

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.



Rysunek 2. Miejsce dokonania pomiarów na płaszczu tłoka.

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Tabela 3

Wyniki pomiarów tłoków 1-3

Rodzaj pomiaru	Nr tłoka		
	1	2	3
Nominalna średnica tłoka [mm]	79,98	79,98	79,98
Odległość (A) [mm]	7	7	7
Średnica tłoka w punkcie pomiarowym [mm]	79,962	79,966	79,974
Graniczna dopuszczalna średnica tłoka [mm]	79,95	79,95	79,95

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Tabela 4

Wyniki pomiarów tłoków 4-6

Rodzaj pomiaru	Nr tłoka		
	4	5	6
Nominalna średnica tłoka [mm]	79,98	79,98	79,98
Odległość (A) [mm]	7	7	7
Średnica tłoka w punkcie pomiarowym [mm]	79,962	79,964	79,972
Graniczna dopuszczalna średnica tłoka [mm]	79,95	79,95	79,95

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Po dokonaniu pomiarów i wyznaczeniu średnich pomiarów, dokonano doboru tłoków (Kijewski, 1999; Luft, 2009) do cylindrów według wytycznych producenta, a wyniki zobrazowano w tabeli 5.

Tabela 5

Dobór tłoków do cylindrów

Nr cylindra	1	2	3	4	5	6
Średni wynik pomiaru [mm]	80,03	80,03	80,03	80,04	80,04	0,04
Nr Tłoka	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Średni wynik pomiaru [mm]	79,96	79,97	79,97	79,96	79,96	79,97
Optymalne zestawienie (Tłok-cylinder)						
Nr Cylindra	1	2	3	4	5	6
Nr Tłoka	T1	T4	T5	T2	T3	T6

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Analizując tabelę 5, stwierdzić można, że przy takim doborze tłoków do cylindrów otrzymuje się pasowanie równe 0,07 mm.

Po analizie dostępnych turbosprężarek, a także ze względu łatwy dostęp do turbosprężarki typu k64 GT28.64, podjęto decyzję o jej zamontowaniu. Ten konkretny model turbosprężarki charakteryzuje się doskonałymi parametrami wydajnościowymi, które idealnie odpowiadają założeniom projektu. Oferuje ona zarówno wysoką efektywność, jak i możliwość generowania odpowiedniego ciśnienia do uzyskania znacznego wzrostu mocy silnika. Dodatkowym argumentem przemawiającym za wyborem tej turbosprężarki była jej dostępność na rynku, co umożliwiło sprawne zrealizowanie planów modernizacji układu napędowego (Mysłowski, 2016). Montaż turbosprężarki pokazano na rysunku 3.



Rysunek 3. Zamontowana turbosprężarka w modyfikowanym silniku.

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

W celu pokazania osiągnięć modyfikowanego silnika wybrano do testów pojazd marki BMW E36 z roku 1993. Kultowy model z serii 3, ceniony za swoje właściwości jezdne i konstrukcję, stał się bazą do przeprowadzenia modyfikacji mających na celu weryfikację osiągnięć zmodyfikowanego silnika.

Dodatkowo dokonano zmian i modyfikacji następujących podzespołów silnika:

– Wtryskiwacze paliwa:

W pojeździe zastosowano wtryskiwacze marki BOSCH o numerze 0280156023, które charakteryzują się:

Statycznym przepływem paliwa: 261 g/min przy ciśnieniu 3 barów. Wtryskiwacze te zostały zaadaptowane do współpracy z oryginalną pompą paliwa BMW E36, co zapewniło odpowiednie zasilanie silnika przy zwiększonym zapotrzebowaniu na paliwo spowodowanym modyfikacjami układów silnika (<https://www.wyborkierowcow.pl/wtrysk-wielopunktowy-zasada-dzialania-wady-i-zalety-posredniego-wtrysku-paliwa/>).

– Układ dolotowy:

W ramach modyfikacji dolotu zastosowano, chłodnicę powietrza (Intercooler) TurboWorks MG-IC-065 o wymiarach rdzenia 550x140x65 mm. Intercooler ten skutecznie obniża temperaturę powietrza doładowanego, zwiększając gęstość mieszanki paliwowo-powietrznej i poprawiając efektywność pracy silnika. Zawór upustowy ciśnienia doładowania marki EPMAN model EPMBOV881, który zapobiega nadmiernemu wzrostowi ciśnienia w układzie dolotowym, chroniąc turbosprężarkę i inne podzespoły przed uszkodzeniem.

– Układ wydechowy:

Aby zwiększyć przepływ spalin i poprawić wydajność silnika, wykonano kompletny układ wydechowy z rur ze stali nierdzewnej o średnicy 3 cali. Materiał ten gwarantuje wysoką trwałość układu oraz odporność na korozję, nawet w trudnych warunkach pracy. Zwiększona średnica rur pozwala na efektywne odprowadzenie spalin, co przyczynia się do szybszej reakcji turbosprężarki i redukcji ciśnienia wstecznego.

Badany pojazd skierowano do specjalistycznego zakładu zajmującego się pomiarami mocy i momentu obrotowego oraz dostrajaniem układów sterowania silnika. Proces ten miał na celu zoptymalizowanie pracy silnika, dostosowanie parametrów sterowania do nowego układu doładowania i sprawdzenie rzeczywistych osiągnięć silnika (Luft, 2009).

Następnie dostrojono sterownik silnika (ECU) w celu pełnego wykorzystania potencjału zmodernizowanego silnika. W tym celu komputer sterujący został podłączony do oprogramowania diagnostyczno-tunerskiego, które umożliwia modyfikację map paliwowych, zapłonu i sterowania turbosprężarką.

Specjalistyczny zakład przeprowadził szczegółową analizę parametrów pracy silnika, takich jak:

- ciśnienie doładowania generowane przez turbosprężarkę;
- proporcja mieszanki paliwowo-powietrznej (AFR);
- kąt wyprzedzenia zapłonu;
- temperatura spalin i innych kluczowych komponentów.

Na podstawie uzyskanych danych dokonano zmian w mapach sterujących pracą silnika, optymalizując je pod kątem uzyskania większej mocy i momentu obrotowego przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy jednostki napędowej. Szczególną uwagę zwrócono na kontrolę ciśnienia doładowania, aby uniknąć ryzyka uszkodzenia turbosprężarki lub silnika (Brodowicz, 1993; <https://dynamech.pl/usterki-jak-to-dziala>).

Po zakończeniu procesu dostrajania ECU przystąpiono do pomiaru mocy silnika i momentu obrotowego na hamowni podwoziowej VT-2 TractionBoost. Wyniki potwierdziły wzrost mocy silnika i poprawę charakterystyki momentu obrotowego, szczególnie w zakresie średnich i wysokich obrotów, co przełożyło się na lepsze osiągi pojazdu.



Rysunek 4. Wykres mocy i momentu obrotowego badanego silnika.

Źródło: *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, P. Krzak, 2025, ANS Nowy Sącz.

Analizując wyniki otrzymane na rysunku 4, stwierdzono, że przeprowadzona modyfikacja silnika BMW M50B20, polegająca na wymianie wału korbowego na wał pochodzący z silnika M51D25 i zamontowaniu turbosprężarki, przyniosła znaczące zwiększenie mocy maksymalnej i momentu obrotowego w porównaniu z parametrami jednostki seryjnej (Kozłowiecki, 1974).

Wzrost osiąarów silnika:

Seryjnie montowany silnik:

Moc maksymalna: 110 [kW] (150 KM) przy 6000 [obr./min]

Moment obrotowy: 190 [Nm] przy 4900 [obr./min]

Zmodyfikowany silnik:

Moc maksymalna: 305,5 [KM] przy 5477 [obr./min]

Moment obrotowy: 439,4 [Nm] przy 4607 [obr./min]

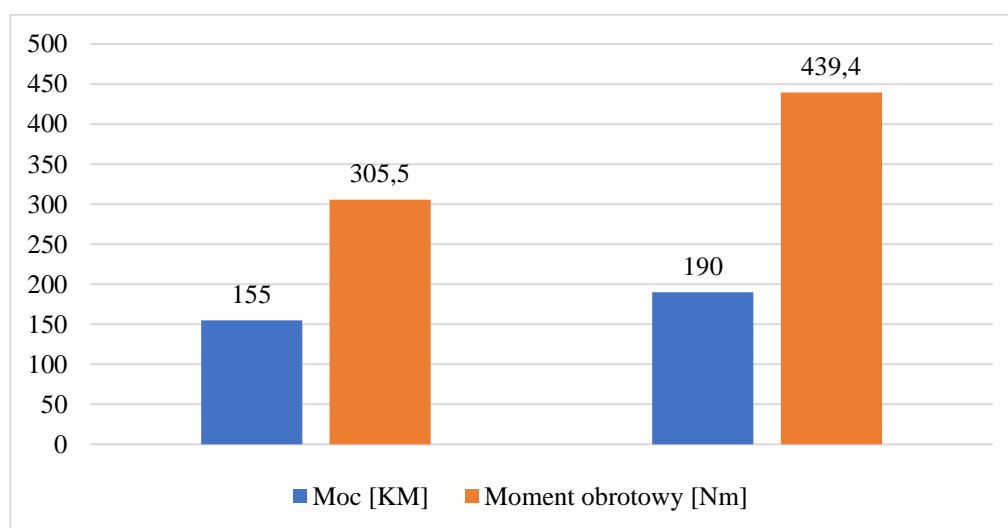
Porównanie wyników:

Moc maksymalna wzrosła o 155% (z 150 [KM] do 305,5 [KM]).

Maksymalny moment obrotowy wzrósł o 131% (z 190 [Nm] do 439,4 [Nm])

(rysunek 5).

Zastosowanie wału korbowego pochodzącego z jednostki wysokoprężnej M51D25 pozwoliło zwiększyć pojemność skokową silnika dzięki dłuższemu skokowi tłoka. Zmiana ta wpłynęła na poprawę charakterystyki momentu obrotowego, szczególnie w dolnym i średnim zakresie obrotów. Silniki wysokoprężne charakteryzują się bardziej wytrzymałymi komponentami, co zapewniło lepszą odporność na zwiększone obciążenia generowane przez turbosprężarkę.



Rysunek 5. Porównanie wyników silnika przed i po modyfikacji.

Źródło: opracowanie własne.

Dodanie turbosprężarki stanowiło kluczowy element modyfikacji. Dzięki niej uzyskano znaczne zwiększenie ilości powietrza dostarczanego do cylindrów, co umożliwiło spalanie większej ilości paliwa i w efekcie wygenerowanie większej mocy. Turbosprężarka znacząco poprawiła elastyczność i dynamikę silnika, co jest szczególnie widoczne we wzroście maksymalnego momentu obrotowego.

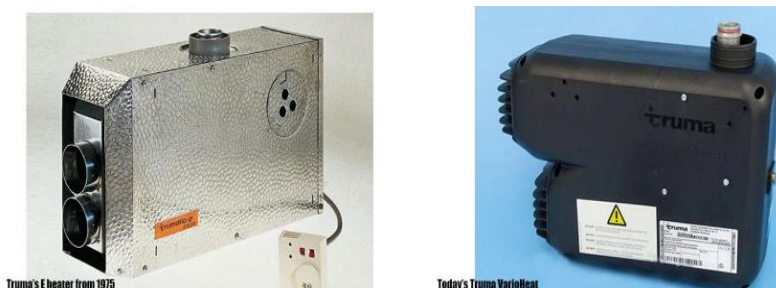
Zwiększenie momentu obrotowego o 249,4 [Nm] przełożyło się na lepsze przyspieszenie oraz wyraźnie większą siłę napędową, szczególnie w średnim zakresie obrotów, co znacząco poprawiło osiągi pojazdu.

ROZDZIAŁ 18

Analiza pracy urządzenia grzewczego do samochodów kempingowych, w zależności od czynników zewnętrznych i nastawów urządzenia (Kazimierz Opoka¹)

Jednym z podstawowych elementów wpływających na komfort użytkowania samochodów kempingowych jest system ogrzewania. W początkowym okresie karawaniingu ogrzewanie było realizowane głównie przez przenośne piecyki na paliwa stałe, które były nie tylko niewygodne, ale też potencjalnie niebezpieczne. Z biegiem lat technologia ewoluowała, wprowadzając bardziej zaawansowane i bezpieczne systemy ogrzewania wnętrza oraz wody użytkowej. W latach 50. i 60. XX wieku pojawiły się pierwsze zintegrowane systemy ogrzewania gazowego, które oferowały znacznie lepszy komfort cieplny i były bardziej wydajne. Kolejnym przełomem było wprowadzenie systemów ogrzewania olejowego i elektrycznego, które umożliwiały bardziej precyzyjne regulowanie temperatury i były bardziej przyjazne dla użytkowników. Współczesne urządzenia grzewcze do samochodów kempingowych to zaawansowane technologicznie systemy, które mogą działać w oparciu o różne źródła energii, takie jak gaz, olej, energia elektryczna czy nawet energia słoneczna. Systemy te często są zintegrowane z innymi urządzeniami w pojeździe, co pozwala na automatyczne dostosowywanie warunków wewnętrznych do panujących na zewnątrz. Dzięki temu użytkownicy mogą cieszyć się komfortem termicznym niezależnie od warunków atmosferycznych (Jenkinson, 2022).

Rozwój projektowania grzejników opiera się głównie na doświadczeniu oraz postępie technologicznym. Z biegiem lat kolejne pokolenia udoskonalały konstrukcje, a nowe technologie umożliwiały rozwiązania wcześniej niedostępne. Jednym z przełomów były ulepszenia w obwodach elektronicznych, które pozwoliły na elektroniczny zapłon oraz skuteczniejsze monitorowanie i kontrolę pracy grzejnika. Zwiększyło to bezpieczeństwo, niezawodność, jak również wygodę użytkowania. Równolegle rozwój wysokowydajnych tworzyw sztucznych umożliwił rezygnację z cięższych, metalowych obudów na rzecz lżejszych, formowanych plastikowych elementów. Przykładem tej zmiany jest przejście od metalowej obudowy grzejnika Truma E (1975) do nowoczesnego, lekkiego modelu VarioHeat z plastikową obudową (Owen, 2021) (rysunek 1).



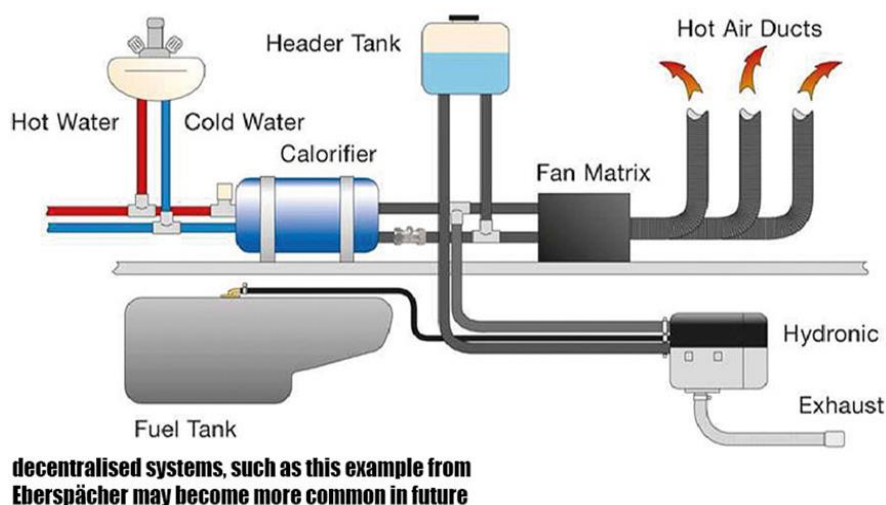
Rysunek 1. Porównanie urządzeń Truma.

Źródło: *Historia systemów ogrzewania pojazdów rekreacyjnych w Europie*, T. Owen, www.aboutcam-pbtob.eu/the-history-of-rv-heating-systems-in-europe-part-2/.

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0002-3434-4827.

Jednym z największych przełomów w projektowaniu grzejników kamperowych było wprowadzenie technologii z branży komputerowej. Już w 2013 roku firma Whale zaprezentowała system iVan, umożliwiający sterowanie ogrzewaniem przez panel przypominający smartfon z łącznością Wi-Fi, co uprościło instalację i obsługę. Później branża zaczęła wdrażać systemy autobusowe, takie jak CI-BUS, oferujące stabilniejszą komunikację przy minimalnym okablowaniu. W 2016 roku firma Truma wprowadziła system iNet, umożliwiający sterowanie ogrzewaniem z dowolnego miejsca poprzez SMS, bez potrzeby dostępu do Internetu. Takie rozwiązania zapewniły użytkownikom niespotykaną wcześniej wygodę i kontrolę (Owen, 2021).

W nadchodzących latach oczekuje się, że kampery będą coraz mniejsze, lżejsze i zdominowane przez napędy elektryczne. LPG jako paliwo grzewcze będzie stopniowo wycofywane ze względu na emisję CO₂ i niewygodę użytkowania, ustępując miejsca energii elektrycznej, olejowi napędowemu (w pojazdach z silnikami diesla) lub potencjalnie bio-etanolowi – paliwu neutralnemu klimatycznie oraz łatwiejszemu w przechowywaniu. Taki kierunek rozwoju stawia nowe wyzwania przed producentami systemów grzewczych. Przewiduje się odejście od ciężkich jednostek centralnych na rzecz lekkich, modułowych i zdecentralizowanych rozwiązań (rysunek 2), które można rozmieszczać elastycznie w różnych częściach pojazdu. Sprzyja to także systemom hydronicznym, w których ciepło transportowane jest za pomocą cieczy (Owen, 2021).

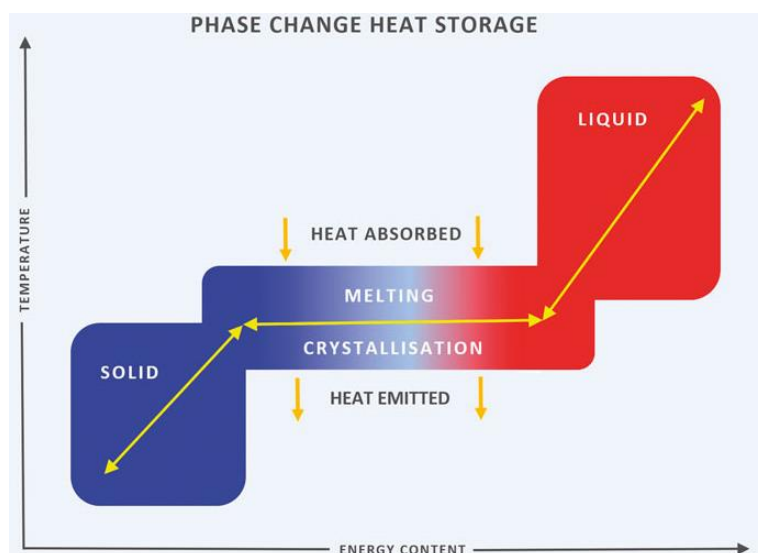


Rysunek 2. Zdecentralizowany system ogrzewania.

Źródło: *Historia systemów ogrzewania pojazdów rekreacyjnych w Europie*, T. Owen, www.aboutcam-pbtoeb.eu/the-history-of-rv-heating-systems-in-europe-part-2/.

Ogrzewanie podczerwienią wykorzystuje promieniowanie cieplne, które ogrzewa bezpośrednio obiekty, a nie powietrze wokół nich – podobnie jak promienie słoneczne. Nie jest to promieniowanie jonizujące, lecz bezpieczna forma energii znajdująca się tuż poniżej widzialnego światła czerwonego. Grzejniki na podczerwień, znane od czasów II wojny światowej, są bardzo wydajne, gdyż przekazują ciepło bez strat pośrednich. Dzięki temu zużywają mniej energii niż tradycyjne systemy grzewcze. Ich lekka i płaska konstrukcja sprawia, że doskonale sprawdzają się w elektrycznych kamperach. Przykładem jest koncepcyjny model e.home firmy Dethleffs, zaprezentowany w 2017 roku, w którym panele grzewcze zostały zintegrowane z podłogą, ścianami i meblami (Owen, 2021).

Kemper Dethleffs e.home wykorzystywał również technologię zmiany fazy, polegającą na magazynowaniu i uwalnianiu ciepła przez specjalne materiały, które zmieniają swój stan skupienia. Gdy temperatura rośnie, materiał pochłania energię, a gdy spada – oddaje ją w niemal stałej temperaturze. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest przechowywanie większej ilości energii cieplnej niż w tradycyjnych materiałach. Technologia ta działa podobnie jak w chemicznych termoforach, gdzie krystalizacja uwalnia ciepło, a ponowne upłynnienie następuje przez podgrzewanie (Owen, 2021).



Rysunek 3. Schemat magazynowania ciepła.

Źródło: *Historia systemów ogrzewania pojazdów rekreacyjnych w Europie*, T. Owen, www.aboutcam-pbtob.eu/the-history-of-rv-heating-systems-in-europe-part-2/.

Technologia pomp ciepła już znajduje zastosowanie w kamperach, głównie w formie odwracalnych jednostek klimatyzacyjnych, które pobierają ciepło z zewnątrz i przekazują je do wnętrza. Choć ciepłe powietrze włączane przy suficie nie jest idealne, systemy takie – np. od Dometic czy Truma – osiągają moc od 1,7 do 3,0 kW, przy bardzo wysokiej wydajności: z 1 kW energii elektrycznej produkują ok. 3 kW ciepła. To obiecujące rozwiązanie dla przyszłych, w pełni elektrycznych kamperów. Ograniczeniem jest spadek efektywności poniżej 0°C oraz stosunkowo duża masa urządzeń. Mimo to rozwój technologii kompresorów może wkrótce umożliwić szersze zastosowanie pomp ciepła do podgrzewania wody i klimatyzacji (Owen, 2021).

Choć pojazdy elektryczne zasilane bateriami są coraz popularniejsze, ich wady, takie jak wysoki koszt, waga, zajmowana przestrzeń i wykorzystanie rzadkich surowców jak kobalt, skłaniają do poszukiwania alternatyw. Jedną z nich jest technologia wodorowa – pojazdy z ogniwem paliwowym mogą samodzielnie wytwarzać energię elektryczną, wymagając jedynie niewielkiej baterii pomocniczej. W dłuższej perspektywie wodor może zasilać systemy grzewcze oraz kuchenne, zastępując LPG. Jednak zastosowanie wodoru wiąże się z wyzwaniem inżynierskimi – m.in. koniecznością stosowania palników o wielu drobnych dyszach i odmiennymi właściwościami płomienia. Wodorowe urządzenia wymagają zupełnie nowych rozwiązań technicznych. Rozwój „zielonego” wodoru, produkowanego z nadmiaru energii odnawialnej, może w przyszłości stać się przełomem w zasilaniu kamperów (Owen, 2021.)

Głównym celem artykułu było przeprowadzenie szczegółowej analizy pracy urządzenia grzewczego Truma Combi D 4 E, wykorzystywanego w samochodach kempingowych, w zależności od czynników zewnętrznych i ustawień samego urządzenia. Badania te mają na celu określenie efektywności energetycznej urządzenia w różnych warunkach eksploatacyjnych, a także zbadanie wpływu różnych materiałów izolacyjnych na zużycie paliwa i energii elektrycznej. Kluczowym elementem pracy jest ocena, jak różne temperatury zewnętrzne, wewnętrzne, poziomy wilgotności, histereza i rodzaje paliwa wpływają na wydajność systemu grzewczego.

Kocioł Truma Combi D 4 E (rysunek 4) jest zaawansowanym systemem grzewczym, który łączy funkcje ogrzewania powietrza i podgrzewania wody w jednym kompaktowym urządzeniu. Jest to jedno z najbardziej wszechstronnych i efektywnych rozwiązań dostępnych na rynku, szczególnie cenione wśród właścicieli kamperów oraz przyczep kempingowych. Truma Combi D 4 E składa się z kilku kluczowych komponentów, które współpracują, aby zapewnić efektywne ogrzewanie powietrza i wody. Kompaktowa jednostka główna zawiera palnik olejowy, wymiennik ciepła oraz system wentylacyjny. Palnik zapewnia ciepło poprzez spalanie oleju napędowego, a wymiennik przenosi je do powietrza i wody. Wentylatory rozprawdają ogrzane powietrze po wnętrzu pojazdu, a wbudowany zbiornik o pojemności 10 litrów umożliwia podgrzewanie wody użytkowej. Elektroniczny panel sterujący pozwala na łatwą kontrolę temperatury i trybów pracy. Opcjonalne grzałki elektryczne umożliwiają korzystanie z zasilania elektrycznego, gdy jest dostępne (Truma Gerätetechnik GmbH & Co. KG, 2020).



Rysunek 4. Urządzenie Truma Combi D 4 E.

Źródło: <https://www.truma.com/product-category/heating-systems/>.

Truma Combi D 4 E działa na zasadzie spalania oleju napędowego, by wytworzyć ciepło przekazywane do powietrza i wody. Po włączeniu urządzenia palnik zostaje uruchomiony, a pompa paliwowa dostarcza olej do komory spalania, gdzie jest zapalany przez iskrownik. Powstałe spaliny są odprowadzane na zewnątrz pojazdu przez specjalny komin. Wymiennik ciepła absorbuje wygenerowane ciepło i przekazuje je do powietrza oraz wody. Wentylatory rozprawdają ogrzane powietrze przez kanały wentylacyjne, a woda w zbiorniku jest podgrzewana do celów sanitarnych. Jeśli dostępne jest zewnętrzne źródło zasilania, urządzenie może korzystać z wbudowanych grzałek elektrycznych, co pozwala na oszczędność paliwa.

Wydajność Truma Combi D 4 E zależy od różnych czynników zewnętrznych i ustawień urządzenia (tabela 1). Niska temperatura otoczenia zwiększa zużycie paliwa i energii, podczas gdy dobra izolacja kampera zmniejsza straty ciepła, poprawiając

efektywność ogrzewania. Odpowiednie ustawienia termostatu pozwalają zoptymalizować zużycie energii, zaś właściwe rozmieszczenie kanałów wentylacyjnych zapewnia równomierne ogrzewanie wnętrza. Częste korzystanie z ciepłej wody może natomiast ograniczyć ilość ciepła dostępnego do ogrzewania powietrza.

Tabela 1

Parametry techniczne urządzenia Truma Combi D 4 E

Parametr	Wartość
Moc grzewcza	2000/4000 W (paliwo) oraz 900/1800 W (elektryczność)
Zużycie paliwa	160-320 ml/h
Pojemność zbiornika na wodę	10 litrów
Wymiary (dł. x szer. x wys.)	510 x 450 x 300 mm
Waga	15,8 kg
Zasilanie elektryczne	230 V AC, 12 V DC
Przepływ powietrza	287 m ³ /h
Temperatura pracy	-20°C do +40°C

Źródło: opracowanie własne.

Dobór komory chłodniczej

Aby zbadać działanie urządzenia grzewczego Truma Combi D 4 E w różnych warunkach zewnętrznych, stworzono kontrolowane środowisko badawcze. Wykorzystano do tego samochód Mercedes Sprinter wyposażony w zabudowę typu kontener – mroźnia/chłodnia, zawierający system chłodniczy, umożliwiający precyzyjną kontrolę temperatury i wilgotności wewnątrz. Dzięki precyzyjnej kontroli temperatury i wilgotności możliwa jest symulacja różnych warunków zewnętrznych, co pozwala na dokładną analizę działania Truma Combi D 4 E. Takie rozwiązanie charakteryzuje się uniwersalnością, precyzyjnym sterowaniem klimatem, wysoką izolacyjnością minimalizującą straty energii i solidną konstrukcją zapewniającą bezpieczeństwo.



Rysunek 5. Samochód z zabudową chłodniczą i wnętrze kontenera chłodniczego.

Źródło: opracowanie własne.

Kontener został zbudowany w technologii sandwich (rysunek 5), co zapewnia doskonałą izolację termiczną i mechaniczną. Składa się z zewnętrznej warstwy laminatu chroniącej przed uszkodzeniami oraz wpływami atmosferycznymi, 3 cm pianki XPS (Ekstrudowany polistyren) o niskiej przewodności cieplnej i wewnętrznej warstwy laminatu zabezpieczającej wewnątrz. Ściany, sufit oraz podłoga są sklejone w prasie

próżniowej, eliminując mostki cieplne. Podłoga posiada dodatkową warstwę wodoodpornej, antypoślizgowej sklejki o grubości 22 mm, zwiększającą wytrzymałość oraz bezpieczeństwo użytkowania. Tylne drzwi kontenera wyposażone są w parę izolowanych drzwi otwieranych na boki, co ułatwia dostęp i utrzymanie odpowiednich warunków termicznych. Grube gumowe uszczelki zapewniają szczelność i zapobiegają niekontrolowanej wymianie powietrza.

Izolację termiczną kontenera zapewnia 3 cm pianka XPS o niskim współczynniku przewodzenia ciepła ($\lambda \approx 0,029 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), co minimalizuje straty ciepła i utrzymuje stabilne warunki wewnętrzne. Aby precyzyjnie kontrolować warunki klimatyczne, kontener wyposażono w jednostkę chłodząco-grzewczą Thermo King, umożliwiającą regulację temperatury w zakresie od -25°C do $+25^{\circ}\text{C}$. Wilgotność kontrolowana jest przez nawilżacz powietrza Trotec B 400, który równomiernie rozprowadza wilgoć oraz osuszacz GÜDE GBT 50.1, skutecznie redukujący nadmiar wilgoci i zapobiegający kondensacji oraz rozwojowi pleśni.

Dodatkowe wyposażenie obejmuje system wentylacji zapewniający cyrkulację powietrza oraz energooszczędne oświetlenie LED.

Tabela 2

Parametry techniczne samochodu Mercedes Sprinter

Parametr	Wartość
Długość wewnętrzna	4,20 m
Szerokość wewnętrzna	2,20 m
Wysokość wewnętrzna	2,00 m
Objętość kontenera	20,328 m ³
Technologia budowy	Technologia sandwich
Zewnętrzna warstwa	Laminat chroniący przed uszkodzeniami i wpływami atmosferycznymi
Izolacja termiczna	Pianka XPS (przewodność cieplna $\lambda \approx 0,029 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
Grubość izolacji (XPS)	3 cm
Wewnętrzna warstwa	Laminat chroniący przed uszkodzeniami wewnątrz
Podłoga	Sklejka wodoodporna i antypoślizgowa
Grubość podłogi	22 mm
Tylne drzwi	Para drzwi otwieranych na boki
Szczelność drzwi	Gumowe uszczelki zapewniające szczelność
Jednostka chłodząco-grzewcza	Thermo King
Zakres temperatur	-25°C do $+25^{\circ}\text{C}$
Nawilżacz powietrza	Trotec B 400
Osuszacz powietrza	GÜDE GBT 50.1
Oświetlenie	Energooszczędne oświetlenie LED

Źródło: opracowanie własne.

Aby dokładnie przeanalizować działanie urządzenia grzewczego Truma Combi D 4 E w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, zastosowano skrzyniopaletę jako symulację przestrzeni mieszkalnej pojazdu kempingowego. Została ona zaprojektowana i zbudowana tak, żeby jak najwierniej odzwierciedlać warunki pracy urządzenia. Skrzyniopaleta służy jako imitacja przestrzeni mieszkalnej kampera, umożliwiając ocenę wydajności Truma Combi D 4 E, analizę wpływu warunków zewnętrznych na jego działanie i testowanie różnych ustawień w celu znalezienia optymalnych parametrów pracy.

Skrzyniopaleta została zbudowana z materiałów odzwierciedlających typowe elementy konstrukcji kamperów. Podstawa i szkielet wykonane są z litych desek sosnowych, co zapewnia solidność i stabilność. Ściany, podłoga i sufit wypełnione są 18-milimetrowymi płytami OSB, które cechują się dobrą izolacją i wytrzymałością. Skrzyniopaleta ma wymiary $2,15 \times 1,20 \times 2,00$ m, co daje objętość $5,16$ m³. Wymiary skrzyniopalety zostały dobrane tak, aby jak najlepiej imitować przestrzeń mieszkalną kampera, jednocześnie mieszcząc się wewnątrz kontenera na Mercedesie Sprinterze, co umożliwia przeprowadzenie testów w kontrolowanych warunkach. Dla ułatwienia dostępu jedna ze ścian jest demontowalna, co pozwala na swobodną manipulację, przeprowadzanie testów i dokonywanie modyfikacji wewnątrz konstrukcji.



Rysunek 6. Skrzyniopaleta.
Źródło: opracowanie własne.

Skrzyniopaleta (rysunek 6) była każdorazowo izolowana różnymi materiałami, takimi jak pianka poliuretanowa, wełna mineralna i płyty styropianowe, aby zbadać zużycie paliwa urządzenia grzewczego w zależności od rodzaju izolacji stosowanej w kamperach. Do umieszczenia skrzyniopalety w kontenerze wykorzystano wózek paletowy i rampę załadowniczą, zapewniając bezpieczny transport.

Montaż urządzenia grzewczego we wnętrzu skrzyniopalety

W ramach badań nad wydajnością Truma Combi D 4 E urządzenie zamontowano wewnątrz skrzyniopalety imitującej przestrzeń mieszkalną kampera. Podłoga skrzyniopalety została oczyszczona i przygotowana, a urządzenie przymocowano do niej fabrycznymi mocowaniami, wykorzystując zestaw montażowy producenta. Podłączono zasilanie 12V z akumulatora w szoferce, używając grubych przewodów dla minimalizacji strat energii, oraz napięcie 230V. Spaliny odprowadzono rurą wydechową z tłumikiem, a świeże powietrze doprowadzono rurą dolotową przez odpowiednie otwory w ścianach skrzyniopalety i kontenera, zapewniając szczelność połączeń. Podłączono przewód paliwowy zgodnie z instrukcjami producenta oraz przeprowadzono testy szczelności. Do urządzenia podpięto źródło wody, wyprowadzono jej odpływ i sprawdzono pod kątem szczelności oraz wydajności. Ciepłe powietrze z urządzenia było odprowadzane bezpośrednio do wnętrza skrzyniopalety, co zapewniało równomierne ogrzewanie przestrzeni ze względu na jej niewielkie rozmiary.

Podczas montażu urządzenia grzewczego Truma Combi D 4 E użyto wkrętarki z bitem i wkrętów konfirmatów do solidnego przymocowania do podłogi, wykorzystując zestaw montażowy producenta. Przewody elektryczne o zwiększonej grubości minimalizowały straty energii, a rury wydechowe i dolotowe z materiałów odpornych na wysoką temperaturę i korozję zapewniły bezpieczne odprowadzanie spalin oraz doprowadzanie powietrza. Uruchomiono urządzenie grzewcze i przeprowadzono testy jego działania. Monitorowano temperaturę, zużycie paliwa oraz sprawność systemu w różnych warunkach.

Materiały izolacyjne wykorzystane w symulacji

XPS (ekstrudowany polistyren)

Ekstrudowany polistyren (XPS) jest powszechnie stosowanym materiałem izolacyjnym w samochodach kempingowych, zapewniającym komfort cieplny przez cały rok. XPS to sztywny materiał izolacyjny o zamkniętej strukturze komórkowej, wykorzystywany m.in. w izolacji termicznej pojazdów rekreacyjnych. Charakteryzuje się niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła ($\lambda \approx 0,029 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), co skutecznie ogranicza straty ciepła zimą i przegrzewanie wnętrza latem. Jego nienasiąkliwość zapobiega absorpcji wilgoci oraz rozwojowi pleśni i grzybów. Wysoka wytrzymałość na ściskanie zapewnia odporność na uszkodzenia, a lekkość materiału pozwala na minimalizację masy pojazdu, co poprawia efektywność paliwową. XPS jest trwały, odporny na starzenie się oraz łatwy w obróbce i montażu, co przyspiesza budowę lub modernizację kamperów. XPS znajduje szerokie zastosowanie w kamperach, zapewniając izolację ścian, sufitu i podłogi, co minimalizuje straty ciepła zimą i chroni wnętrze przed przegrzewaniem latem. Dzięki wysokiej wytrzymałości na ściskanie idealnie sprawdza się też w izolacji podłóg, poprawiając komfort termiczny i akustyczny. Może być również stosowany do izolacji przegrody silnika, redukując przenikanie ciepła oraz hałasu. Jego zalety to wysoka efektywność energetyczna, odporność na wilgoć, stabilność termiczna i lekkość przy zachowaniu wytrzymałości mechanicznej, co czyni go idealnym materiałem do zastosowania w pojazdach kempingowych.

Styropian

Styropian (EPS – spieniony polistyren) to lekki i sztywny materiał izolacyjny powszechnie stosowany w kamperach. Powstaje przez spienianie granulek polistyrenu, tworząc zamkniętą strukturę komórkową wypełnioną powietrzem. Charakteryzuje się niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła ($\lambda \approx 0,036 - 0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), co skutecznie ogranicza straty ciepła zimą i chroni wnętrze przed przegrzewaniem latem. Jego niewielka waga ułatwia transport, montaż i poprawia efektywność paliwową pojazdu. Styropian jest odporny na nasiąkanie wodą i dobrze znosi ściskanie, choć ma mniejszą odporność na uderzenia i zginanie w porównaniu do XPS. Jest łatwy w obróbce, można go ciąć i mocować prostymi narzędziami, a jego niska cena czyni go atrakcyjnym wyborem w izolacji kamperów. Styropian znajduje szerokie zastosowanie w izolacji kamperów – montowany jest w ścianach, suficie i podłodze, gdzie dzięki lekkości i dobrej wytrzymałości na ściskanie poprawia komfort cieplny oraz efektywność energetyczną pojazdu. Może być również używany do izolacji przegród, drzwi oraz schowków. Jego zaletami są dobra izolacyjność cieplna, odporność na wilgoć, niska cena oraz łatwość montażu, co czyni go praktycznym i ekonomicznym wyborem w budowie i modernizacji kamperów.

Wełna mineralna

Wełna mineralna, dostępna jako wełna szklana lub skalna, to jeden z najczęściej stosowanych materiałów izolacyjnych, także w kamperach. Wytwarzana z włókien mineralnych, takich jak bazalt szkło lub żużel wielkopiecowy, zapewnia skuteczną izolację termiczną ($\lambda \approx 0,033 - 0,045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) oraz bardzo dobrą izolację akustyczną dzięki swojej włóknistej strukturze. Pomaga utrzymać stabilną temperaturę, tłumi hałasy i zwiększa komfort wewnątrz pojazdu. Wełna mineralna jest materiałem niepalnym (klasa A1), odpornym na wysoką temperaturę, wilgoć i rozwój pleśni, a przy tym trwałym oraz ekologicznym – wykonanym z naturalnych surowców i możliwym do recyklingu. Wełna mineralna jest stosowana w kamperach do izolacji ścian, sufitu, drzwi oraz przegrody silnika, zapewniając skuteczną ochronę termiczną i akustyczną. Dzięki elastyczności łatwo dopasowuje się do różnych powierzchni, poprawiając izolacyjność całej konstrukcji. Jej zalety to wysoka efektywność energetyczna, komfort cieplny oraz dźwiękowy, odporność na ogień i wilgoć, a także trwałość i ekologiczność – materiał jest niepalny, hydrofobowy, długowieczny i przyjazny dla środowiska.

Prace badawcze i wyniki badań

W ramach badania 1 analizowano pracę urządzenia grzewczego Truma Combi D 4 E w warunkach kontrolowanych. Skrzyniopaleta została zaizolowana płytami XPS o grubości 3 cm i umieszczona w kontenerze chłodniczym. Ustawiono temperaturę wewnętrzną na 15°C, zewnętrzną na 0°C, wilgotność zewnętrzną na poziomie 10%, a histerezę $\pm 1^\circ\text{C}$. Urządzenie zasilano olejem napędowym, a woda o temperaturze początkowej 10°C była podgrzewana do 40°C. W ciągu 24 godzin zużyto 20 litrów wody użytkowej.

Przed rozpoczęciem testów zamontowano system grzewczy zgodnie z instrukcją producenta, zapewniając odpowiednie warunki do spalania oraz wentylacji – spaliny odprowadzono rurą wydechową, a powietrze do spalania dostarczano poprzez dolot. Pomiar zużycia paliwa prowadzono za pomocą 10-litrowego zbiornika z podziałką, a zużycie energii elektrycznej monitorowano oddzielnie dla napięcia 12V i 230V przy użyciu odpowiednich watomierzy. Podczas testu urządzenie pracowało w trybie ogrzewania powietrza i wody, a wszystkie parametry były rejestrowane przez całą dobę.

Tabela 3

Wszystkie możliwe kombinacje badań

Materiał izolacyjny		Temperatura wewnętrzna	Temperatura zewnętrzna	Histeresa	Wilgotność zewnętrzna	Paliwo	Zużycie wody	Temperatura począt. wody	Temperatura wody po podgrzaniu
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	10%	Olej napędowy	20 litrów/24h	10°C	40°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	10%	Olej napędowy	20 litrów/24h	10°C	80°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	10%	Olej opałowy	20 litrów/24h	10°C	40°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	10%	Olej opałowy	20 litrów/24h	10°C	80°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	90%	Olej napędowy	20 litrów/24h	10°C	40°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	90%	Olej napędowy	20 litrów/24h	10°C	80°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	90%	Olej opałowy	20 litrów/24h	10°C	40°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 1^\circ\text{C}$	90%	Olej opałowy	20 litrów/24h	10°C	80°C
XPS		15°C	0°C	$\pm 3^\circ\text{C}$	10%	Olej napędowy	20 litrów/24h	10°C	40°C

W trakcie badania 1 odnotowano zużycie 3,5 litra oleju napędowego w ciągu 24 godzin pracy urządzenia Truma Combi D 4 E. Zużycie prądu wyniosło 28 Ah (12V) i 2,2 kWh (230V). Woda użytkowa została podgrzana z temperatury początkowej 10°C do 40°C, zgodnie z założeniami.

Uzyskane wyniki wskazują na umiarkowane zużycie paliwa przy stabilnych warunkach zewnętrznych (0°C) i dobrze dobranej izolacji z płyt XPS. Niskie zużycie prądu w obu systemach zasilania potwierdza wysoką efektywność energetyczną urządzenia. Dodatkowo, niska wilgotność (10%) mogła sprzyjać sprawniejszemu spalaniu paliwa, co pozytywnie wpłynęło na całkowite zużycie energii.

Badanie potwierdziło, że izolacja z XPS skutecznie wspiera efektywną pracę urządzenia Truma Combi D 4 E, zapewniając niskie zużycie paliwa i energii w warunkach umiarkowanej temperatury oraz niskiej wilgotności. Wyniki wskazują, że XPS jest odpowiednim materiałem do izolacji kamperów, wspomagając stabilną i energooszczędną pracę systemu grzewczego. W dalszych badaniach warto porównać różne materiały izolacyjne w celu optymalizacji wydajności ogrzewania w pojazdach rekreacyjnych. Wyniki pozostałych badań przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Wyniki badań dla każdej możliwej kombinacji

Temperatura wewnętrzna	Temperatura zewnętrzna	Histeresa	Wilgotność zewnętrzna	Paliwo	Temperatura wody po podgrzaniu	Zużycie paliwa (l/24h)	Zużycie prądu 12V (Ah/24h)	Zużycie prądu 230V (kWh/24h)
15°C	0°C	±1°C	10%	Olej napędowy	40°C	3,5	28	2,2
15°C	0°C	±1°C	10%	Olej napędowy	80°C	4	30	2,4
15°C	0°C	±1°C	10%	Olej opałowy	40°C	3,6	29	2,3
15°C	0°C	±1°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,2	31	2,5
15°C	0°C	±1°C	90%	Olej napędowy	40°C	3,8	29	2,3
15°C	0°C	±1°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,4	32	2,6
15°C	0°C	±1°C	90%	Olej opałowy	40°C	3,9	30	2,4
15°C	0°C	±1°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,5	33	2,7
15°C	0°C	±3°C	10%	Olej napędowy	40°C	3,7	29	2,3
15°C	0°C	±3°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,3	31	2,5
15°C	0°C	±3°C	10%	Olej opałowy	40°C	3,8	30	2,4
15°C	0°C	±3°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,4	32	2,6
15°C	0°C	±3°C	90%	Olej napędowy	40°C	3,9	30	2,4
15°C	0°C	±3°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,5	33	2,7
15°C	0°C	±3°C	90%	Olej opałowy	40°C	4	31	2,5
15°C	0°C	±3°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,6	34	2,8
15°C	-20°C	±1°C	10%	Olej napędowy	40°C	4,1	32	2,6
15°C	-20°C	±1°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,7	34	2,8
15°C	-20°C	±1°C	10%	Olej opałowy	40°C	4,2	33	2,7
15°C	-20°C	±1°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,8	35	2,9
15°C	-20°C	±1°C	90%	Olej napędowy	40°C	4,2	33	2,7
15°C	-20°C	±1°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,8	35	2,9
15°C	-20°C	±1°C	90%	Olej opałowy	40°C	4,3	34	2,8
15°C	-20°C	±1°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,9	36	3
15°C	-20°C	±3°C	10%	Olej napędowy	40°C	4,3	33	2,7
15°C	-20°C	±3°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,9	35	2,9
15°C	-20°C	±3°C	10%	Olej opałowy	40°C	4,4	34	2,8
15°C	-20°C	±3°C	10%	Olej opałowy	80°C	5	36	3
15°C	-20°C	±3°C	90%	Olej napędowy	40°C	4,4	34	2,8

15°C	-20°C	±3°C	90%	Olej napędowy	80°C	5	36	3
15°C	-20°C	±3°C	90%	Olej opałowy	40°C	4,5	35	2,9
15°C	-20°C	±3°C	90%	Olej opałowy	80°C	5,1	37	3,1
25°C	0°C	±1°C	10%	Olej napędowy	40°C	3,8	29	2,3
25°C	0°C	±1°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,4	32	2,6
25°C	0°C	±1°C	10%	Olej opałowy	40°C	3,9	30	2,4
25°C	0°C	±1°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,5	33	2,7
25°C	0°C	±1°C	90%	Olej napędowy	40°C	3,9	30	2,4
25°C	0°C	±1°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,5	33	2,7
25°C	0°C	±1°C	90%	Olej opałowy	40°C	4	31	2,5
25°C	0°C	±1°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,6	34	2,8
25°C	0°C	±3°C	10%	Olej napędowy	40°C	3,9	30	2,4
25°C	0°C	±3°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,5	33	2,7
25°C	0°C	±3°C	10%	Olej opałowy	40°C	4	31	2,5
25°C	0°C	±3°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,6	34	2,8
25°C	0°C	±3°C	90%	Olej napędowy	40°C	4	31	2,5
25°C	0°C	±3°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,6	34	2,8
25°C	0°C	±3°C	90%	Olej opałowy	40°C	4,1	32	2,6
25°C	0°C	±3°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,7	35	2,9
25°C	-20°C	±1°C	10%	Olej napędowy	40°C	4,1	32	2,6
25°C	-20°C	±1°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,7	34	2,8
25°C	-20°C	±1°C	10%	Olej opałowy	40°C	4,2	33	2,7
25°C	-20°C	±1°C	10%	Olej opałowy	80°C	4,8	35	2,9
25°C	-20°C	±1°C	90%	Olej napędowy	40°C	4,2	33	2,7
25°C	-20°C	±1°C	90%	Olej napędowy	80°C	4,8	35	2,9
25°C	-20°C	±1°C	90%	Olej opałowy	40°C	4,3	34	2,8
25°C	-20°C	±1°C	90%	Olej opałowy	80°C	4,9	36	3
25°C	-20°C	±3°C	10%	Olej napędowy	40°C	4,3	33	2,7
25°C	-20°C	±3°C	10%	Olej napędowy	80°C	4,9	35	2,9
25°C	-20°C	±3°C	10%	Olej opałowy	40°C	4,4	34	2,8
25°C	-20°C	±3°C	10%	Olej opałowy	80°C	5	36	3
25°C	-20°C	±3°C	90%	Olej napędowy	40°C	4,4	34	2,8
25°C	-20°C	±3°C	90%	Olej napędowy	80°C	5	36	3
25°C	-20°C	±3°C	90%	Olej opałowy	40°C	4,5	35	2,9
25°C	-20°C	±3°C	90%	Olej opałowy	80°C	5,1	37	3,1

Źródło: opracowanie własne.

Analiza wyników badań obejmowała wpływ różnych parametrów, takich jak rodzaj paliwa, temperatury wewnętrzne i zewnętrzne, histereza, wilgotność oraz temperatura wody, na zużycie paliwa i energii elektrycznej. Dla oleju napędowego średnie zużycie wyniosło 4,01 litra na 24 godziny, a dla oleju opałowego 4,13 litra. Choć olej opałowy zużywa się nieco więcej, różnica wynosi jedynie 0,12 litra na dobę. Koszt ogrzewania też został porównany. Przy cenie 6,50 zł za litr oleju napędowego, dobowy koszt wynosi 26,07 zł, a dla oleju opałowego przy cenie 5,00 zł/l wynosi 20,65 zł. Oznacza to, że olej opałowy jest tańszy w eksploatacji, dając oszczędność 5,42 zł na dobę.

Olej opałowy, pomimo nieco wyższego zużycia niż olej napędowy, okazuje się tańszym i bardziej opłacalnym paliwem do ogrzewania kampera. Koszt jego stosowania jest niższy o 5,42 zł na dobę, co w dłuższej perspektywie może przynieść istotne oszczędności. Choć olej napędowy zużywa się średnio w mniejszej ilości, to wybór paliwa powinien uwzględniać nie tylko wydajność, ale także koszty eksploatacyjne – na ich tle olej opałowy wypada korzystniej.

Analiza zużycia paliwa wykazała, że utrzymanie wyższej temperatury wewnętrznej (25°C) prowadzi do większego zużycia paliwa niż w przypadku niższej temperatury (15°C), co jest związane z większym zapotrzebowaniem na energię. Podobnie, niższa

temperatura zewnętrzna (-20°C) powoduje wyraźny wzrost zużycia paliwa w porównaniu do 0°C , ze względu na większe straty ciepła. Większa histereza ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) wpływa korzystnie na oszczędność paliwa, gdyż ogranicza częstotliwość załączania urządzenia. Wilgotność zewnętrzna (10% vs 90%) nie ma istotnego wpływu na zużycie paliwa, choć może wpływać na komfort cieplny. Natomiast olej opałowy zużywa się nieco więcej niż olej napędowy, co może wynikać z różnic w składzie i efektywności spalania.

Zużycie energii elektrycznej, zarówno w systemie 12V, jak i 230V, wzrasta przy wyższej temperaturze wewnętrznej (25°C) i niższej temperaturze zewnętrznej (-20°C), co jest związane z większym obciążeniem systemu grzewczego. Większa histereza ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) sprzyja oszczędności energii, zmniejszając częstotliwość cykli pracy urządzenia. Wilgotność zewnętrzna nie wpływa znacząco na zużycie energii, podobnie jak rodzaj paliwa – choć różnice w spalaniu mogą pośrednio oddziaływać na zużycie prądu przez wpływ na ogólną wydajność systemu.

Efektywność ogrzewania wody zależy głównie od różnicy temperatur między stanem początkowym a końcowym. Podgrzanie wody do 80°C generuje wyższe zużycie paliwa oraz energii elektrycznej niż ogrzewanie do 40°C , co wynika z większego zapotrzebowania na energię. Przy stałym zużyciu wody wynoszącym 20 litrów na dobę, zużycie energii rośnie proporcjonalnie do zakresu podgrzewania, co potwierdza bezpośredni wpływ ustawionej temperatury docelowej na obciążenie systemu grzewczego.

Badania wykazały, że zużycie paliwa i energii elektrycznej jest najbardziej zależne od temperatury wewnętrznej i zewnętrznej, histerezy i temperatury wody po podgrzaniu. Wilgotność zewnętrzna miała marginalny wpływ, choć może wpływać na odczuwalny komfort cieplny. Rodzaj paliwa oddziałuje głównie poprzez efektywność spalania. W kolejnych badaniach warto skoncentrować się na optymalizacji ustawień pracy systemu grzewczego oraz porównaniu różnych materiałów izolacyjnych, aby jeszcze skuteczniej ograniczyć zużycie energii w kamperach.

Badania uzupełniające i wyniki badań

W ramach badań uzupełniających przeanalizowano trzy skrajne kombinacje warunków, by porównać efektywność ogrzewania przy zastosowaniu różnych materiałów izolacyjnych: XPS, styropianu i wełny mineralnej. Wybrane scenariusze uwzględniały zróżnicowane temperatury wewnętrzne i zewnętrzne, poziom wilgotności, rodzaj paliwa oraz temperaturę docelową podgrzewanej wody.

Kombinacja 1 dotyczy warunków umiarkowanych – przy temperaturze wewnętrznej 15°C i zewnętrznej 0°C , niskiej wilgotności (10%) oraz histerezie $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Wykorzystano olej napędowy, a woda była podgrzewana z 10°C do 40°C przy zużyciu 20 litrów na dobę.

Kombinacja 2 przedstawia warunki – temperatura wewnętrzna wynosiła 15°C , zewnętrzna – 20°C , wilgotność była wysoka (90%), zaś histereza wynosiła $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Zastosowano olej opałowy, a wodę podgrzewano z 10°C do 80°C , przy takim samym dobowym zużyciu wody.

Kombinacja 3 to test w najbardziej wymagających warunkach – 25°C wewnątrz i -20°C na zewnątrz, wysoka wilgotność (90%) oraz histereza $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Wykorzystano olej napędowy, a woda była również podgrzewana z 10°C do 80°C przy zużyciu 20 litrów na 24 godziny.

Tabela 5
Wyniki badań

Kombinacja	Materiał izolacyjny	Zużycie paliwa (l/24h)	Zużycie prądu 12V (Ah/24h)	Zużycie prądu 230V (kWh/24h)
1	XPS	3,5	28	2,2
1	Styropian	3,8	30	2,4
1	Wełna mineralna	4,0	32	2,5
2	XPS	4,8	35	2,9
2	Styropian	5,2	38	3,2
2	Wełna mineralna	5,5	40	3,4
3	XPS	5,0	36	3,0
3	Styropian	5,4	38	3,3
3	Wełna mineralna	5,8	41	3,6

Źródło: opracowanie własne.

Kombinacja 1: Najniższe zużycie paliwa (3,5 l) i energii odnotowano przy izolacji z XPS. Styropian i wełna mineralna wypadły słabiej – odpowiednio 3,8 l i 4,0 l paliwa oraz wyższe zużycie prądu. W warunkach umiarkowanych XPS zapewnia najlepszą efektywność energetyczną.

Kombinacja 2: Przy dużym obciążeniu cieplnym XPS również okazał się najskuteczniejszy (4,8 l paliwa), wyraźnie lepszy niż styropian (5,2 l) i wełna mineralna (5,5 l). Niższe zużycie energii elektrycznej potwierdza jego lepsze właściwości izolacyjne w trudnych warunkach.

Kombinacja 3: W najbardziej wymagających warunkach XPS ponownie osiągnął najniższe zużycie – 5,0 l paliwa i najmniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną. Styropian i wełna mineralna wykazały wyraźnie większe straty energetyczne, co wskazuje na słabszą izolacyjność przy wysokich wymaganiach cieplnych.

Spośród trzech testowanych materiałów izolacyjnych XPS wykazał najwyższą efektywność, charakteryzując się najniższym zużyciem paliwa i energii. Styropian wypadł przeciętnie – lepiej niż wełna mineralna, jednak gorzej niż XPS. Wełna mineralna okazała się najmniej skuteczna, generując najwyższe straty energii. Wyniki jednoznacznie wskazują, że dobór materiału izolacyjnego ma istotny wpływ na wydajność systemów grzewczych w kamperach, zaś XPS jest pod tym względem najlepszym rozwiązaniem.

Podsumowanie

Wyniki badań potwierdziły, że rodzaj zastosowanego materiału izolacyjnego znacząco wpływa na efektywność pracy urządzenia grzewczego. Najlepsze właściwości izolacyjne wykazał XPS, przy którym zużycie paliwa oraz energii elektrycznej było najniższe. Styropian okazał się materiałem średnio efektywnym, a wełna mineralna charakteryzowała się największym zużyciem energii. Dla przykładu, przy temperaturze wewnętrznej 15°C i zewnętrznej 0°C, XPS zużył 3,5 l paliwa, styropian 3,8 l, a wełna mineralna 4,0 l na dobę. W warunkach 25°C na wewnątrz i -20°C na zewnątrz, wartości te wzrosły odpowiednio do 5,0 l, 5,4 l oraz 5,8 l, co dodatkowo potwierdza przewagę XPS jako materiału izolacyjnego w kamperach.

Badania wykazały, że XPS jest najbardziej efektywnym materiałem izolacyjnym pod względem zużycia paliwa i energii, co czyni go optymalnym wyborem do izolacji termicznej kamperów. Niższe temperatury zewnętrzne i wysoka wilgotność wyraźnie zwiększają zapotrzebowanie na energię, dlatego odpowiednie przygotowanie pojazdu do zimowych warunków ma kluczowe znaczenie. Urządzenie Truma Combi D 4 E działało wydajnie w różnych warunkach, ale jego efektywność można poprawić przez zastosowanie większej histerezy ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) i odpowiednią regulację temperatury wewnętrznej, co pozwala ograniczyć zużycie energii bez pogorszenia komfortu cieplnego.

Zaleca się stosowanie XPS jako głównego materiału izolacyjnego w kamperach ze względu na jego bardzo dobre właściwości termiczne. Dodatkowo, ustawienie histerezy na poziomie $\pm 3^{\circ}\text{C}$ może skutkować oszczędnością energii bez wyraźnej utraty komfortu. Warto kontynuować badania, uwzględniając inne materiały oraz konfiguracje warunków, by jeszcze skuteczniej optymalizować efektywność systemów grzewczych.

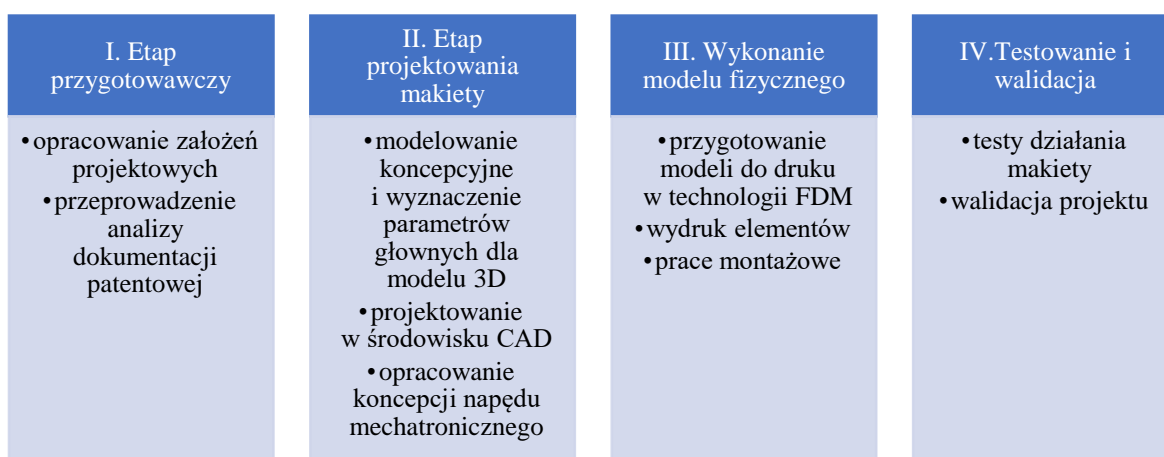
ROZDZIAŁ 19

Projekt 3D (CAD) makiety edukacyjnej silnika sześciusuwowego bazujący na rozwiązaniu technicznym opisanym w patencie firmy Porsche (Piotr Lachowski¹)

W obliczu dynamicznych przemian w przemyśle motoryzacyjnym, związanych z globalną tendencją do elektryfikacji napędów i ograniczania emisji spalin, rozwój klasycznych silników spalinowych znajduje się pod rosnącą presją. Niemniej jednak, innowacyjne podejścia do konstrukcji jednostek napędowych, takie jak np. silniki pięciosuwowe i sześciusuwowe, stanowią dowód na to, że rozwój technologii spalinowych nie został jeszcze definitywnie zakończony. Zrozumienie alternatywnych cykli pracy jednostek napędowych stanowi ważny element edukacji inżynierskiej, zwłaszcza w kontekście poszukiwania optymalnych rozwiązań hybrydowych i przejściowych.

W niniejszym rozdziale przedstawiono proces projektowania oraz wykonania makiety edukacyjnej, opartej na innowacyjnym silniku spalinowym opatentowanym przez firmę Porsche (numer patentu: US20240301817A1), zatytułowanym „Method for a Combustion Machine with Two Times Three Strokes”. Makieta została zaprojektowana jako narzędzie dydaktyczne przeznaczone do wykorzystania w ramach zajęć z konstrukcji silników spalinowych prowadzonych dla studentów kierunku mechatronika. Celem opracowania było przybliżenie unikatowej konstrukcji silnika sześciusuwowego.

Prace projektowe zostały podzielone na kilka etapów wraz z wyznaczeniem poszczególnych zadań projektowych (rysunek 1).



Rysunek 1. Etapy prac projektowych.

Źródło: opracowanie własne.

Projekt makiety zakładał odwzorowanie podstawowych elementów konstrukcyjnych oraz sposobu działania silnika opisanego w dokumentacji patentowej, z zachowaniem wyraźnie edukacyjnego charakteru przedsięwzięcia. Przyjęto, że makieta:

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0002-7803-9250.

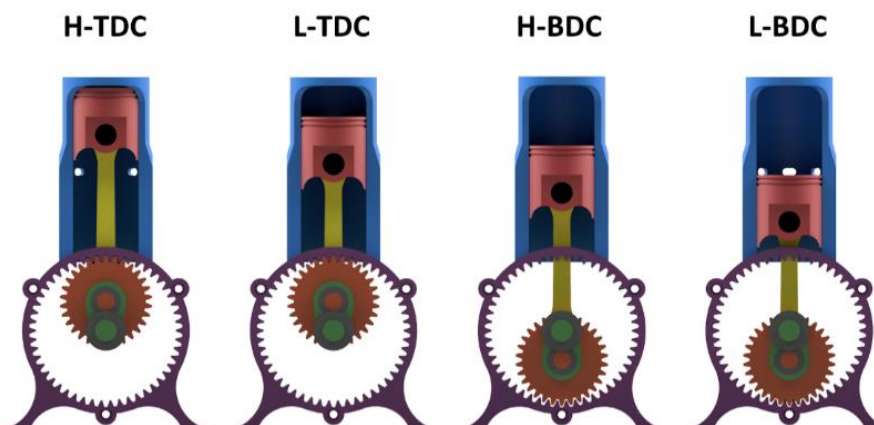
- 1) będzie w pełni funkcjonalna w zakresie demonstracji cyklu pracy sześciosuwowego (obejmującego 1080° obrotu wału korbowego);
- 2) nie zawiera elementów rzeczywistego układu spalania paliwa;
- 3) zostanie wykonana z bezpiecznych materiałów, umożliwiających demonstrację w warunkach sali dydaktycznej;
- 4) uwzględni uproszczoną kinematykę układu korbowego zgodną z opisem patentowym;
- 5) zostanie zaprojektowana w formacie cyfrowym 3D z możliwością wykonania z zastosowaniem technik wytwarzania przyrostowego;
- 6) zaimplementuje podstawowe elementy mechatroniki w celu zapewnienia interaktywności makiety.

Patent firmy Porsche US20240301817A1 zawiera szczegółowy opis konstrukcji silnika spalinowego, który realizuje dwa cykle pracy w ciągu trzech obrotów wału korbowego. Rozwiązanie to wymusza nietypową konstrukcję i rozkład faz rozrządu, a także kinematyki układu korbowego. Dokumentacja zawiera m.in.: rysunki techniczne, przekroje schematyczne i szczegółowy opis cyklu pracy, który został przeanalizowany w kontekście możliwości jego odwzorowania w formie makiety, która skupia się nad kinematyką układu korbowego.

Opracowano uproszczony szkic kinematyki układu tłok – wał korbowy. Kluczowym założeniem było umożliwienie obserwacji wpływu cech charakterystycznych przekładni obiegowej wraz z mimośrodem na konstrukcję, a także stworzenie czterech charakterystycznych pozycji tłoka. Są to po dwie pozycje odpowiadające tym z układów klasycznych, tj. GMP (Górne Martwe Położenie) oraz DMP (Dolne Martwe Położenie), na potrzeby tego opracowania zostały one nazwane roboczo zgodnie z nomenklaturą angielską:

- H-TDC (Higher – Top Dead Center z ang. Wysokie – Górne Martwe Położenie);
- L-TDC (Lower – Top Dead Center z ang. Niskie – Górne Martwe Położenie);
- H-BDC (Higher – Bottom Dead Center z ang. Wysokie – Dolne Martwe Położenie);
- L-BDC (Lower – Bottom Dead Center z ang. Niskie – Dolne Martwe Położenie).

Wizualizacja charakterystycznych pozycji tłoka przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Wizualizacja charakterystycznych pozycji tłoka.

Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym aspektem było określenie parametrów głównych dla makiety oraz kluczowych komponentów, które zestawiono w tabeli 1.

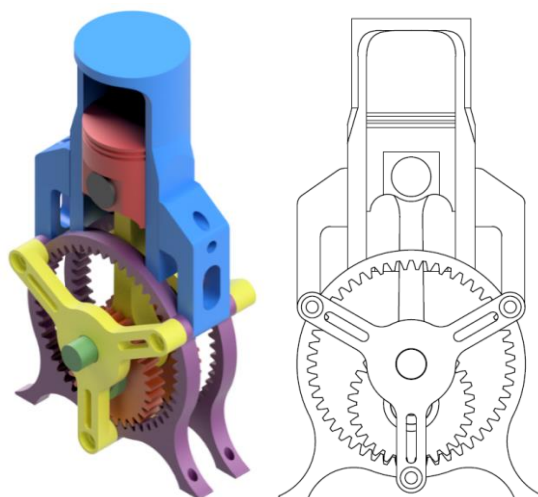
Tabela 1

Parametrów główne dla makiety i kluczowych komponentów

Nazwa komponentu	Parametr	Wartość	Jednostka
Tłok	Średnica	51,50	mm
	Wysokość	50,00	mm
Cylinder	Średnica wewnętrzna	52,00	mm
	Wysokość całkowita	128,00	mm
Koło zębate – koronowe	Promień (do szczytu zęba)	48,00	mm
	Ilość zębów	50	szt.
Koło zębate – satelita	Promień (do szczytu zęba)	32,00	mm
	Ilość zębów	30	szt.
Korbowód	Długość (od osi do osi)	105,00	mm
Mimośród	Przesunięcie	20,10	mm

Do wykonania modelu 3D wykorzystano oprogramowanie Autodesk Inventor, jest to narzędzie z rodziny CAD (*Computer Aided Design*, z ang. Projektowanie wspierane komputerowo). Proces rozpoczęto od zaprojektowania pojedynczych elementów, takich jak tłok, cylinder czy korbowód. Do zaprojektowania przekładni zębatej wykorzystano narzędzie Design Accelerator – Przekładnia walcowa. Następnie został utworzony plik złożenia, w którym dodano kolejne zaprojektowane elementy i nadano im stosowne wiązania. Po złożeniu podstawowych elementów, przystąpiono do ich modyfikacji, zaprojektowania elementu mimośrodowego i pozostałych komponentów wymaganych do montażu kompletnej makiety. W celu wyeliminowania nadmiernego tarcia w kluczowych dla makiety połączeniach obrotowych zostały zastosowane łożyska kulkowe (6801RS, 6902RS oraz 6201RS). W ramach projektowania uwzględniono ograniczenia technologiczne druku 3D (FDM), optymalizując geometrię komponentów, a także redukując potrzebę wykorzystania struktur podporowych do niezbędnego minimum.

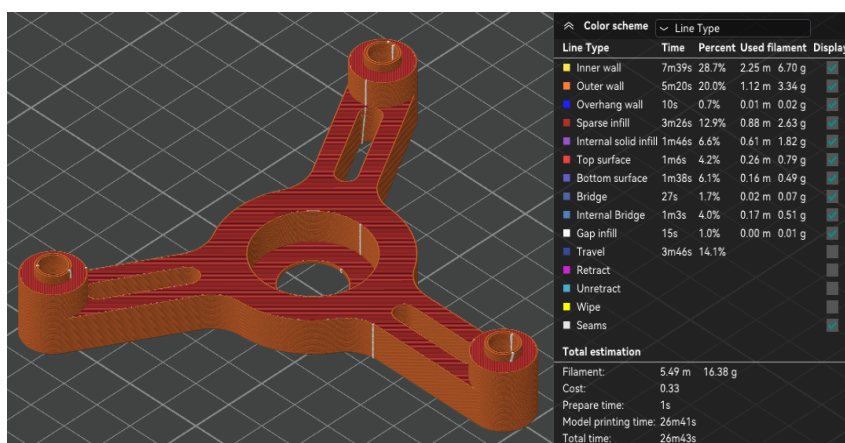
Makieta (rysunek 3) może pełnić funkcję demonstracyjną przy użyciu napędu manualnego. Przewidziano też automatyzację demonstracji ruchu tłoka i mechanizmu korbowo-tłokowego, poprzez zastosowanie silnika prądu stałego typu JGY-370 ze zintegrowaną przekładnią kątową, co pozwala na uzyskanie prędkości obrotowej rzędu 35 obr./min przy napięciu znamionowym 12V. Oś silnika (D-kształt), została połączona z wałem korbowym a jego obudowa zamocowana do elementu centrującego. Układ zasilania oparto na zasilaczu impulsowym 12V o mocy 12W, ponadto wykonano zabudowę gniazda DC typu 5.5/2.1 co umożliwiło intuicyjną obsługę przez użytkowników. Całość obwodu elektrycznego została zainstalowana jako element makiety, z zachowaniem zasad bezpieczeństwa użytkowania i estetyki wykonania.



Rysunek 3. Wizualizacja złożenia makiety.

Źródło: opracowanie własne.

Modele zaprojektowane w środowisku CAD zostały wyeksportowane do formatu STEP, zapewniając kompletność danych dotyczących zaprojektowanych brył (rysunek 4). Następnie wykorzystano oprogramowanie typu slicer (Orca Slicer), celem określenia optymalnych parametrów druku, takich jak: wysokość warstwy (0,24 mm), liczba obrysów, gęstość wypełnienia (20-30%) i geometria podpór. W przypadku elementów cylindrycznych lub zawierających otwory o znacznych rozpiętościach zastosowano podpory typu „drzewo” z parametrem „drukuj wyłącznie na stole roboczym”. Zwrócono również uwagę na optymalną orientację modelu w przestrzeni w celu minimalizacji materiału podporowego oraz poprawy estetyki powierzchni funkcjonalnych.

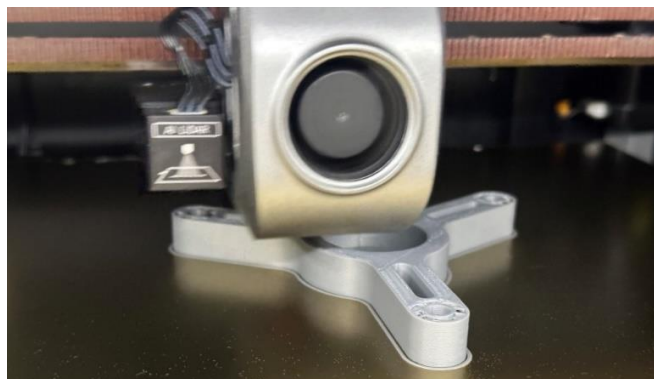


Rysunek 4. Zrzut ekranu z wizualizacją procesu wytwarzania elementu centrującego (Orca Slicer).

Źródło: opracowanie własne.

Do wydruku komponentów makiety wykorzystano drukarkę 3D Creality K1 MAX, wykorzystującą technologię FDM (*Fused Deposition Modeling*). Urządzenie to należy do segmentu szybkich i dużych drukarek FDM, umożliwia wydruki o wymiarach do 300×300×300 mm i charakteryzuje się wysoką prędkością druku, dochodzącą nawet do 600 mm/s. Po uruchomieniu wydruku, drukarka rozpoczyna nagrzewanie głowicy i stołu roboczego do zadanych temperatur. Następnie wykonuje automatyczną kalibrację

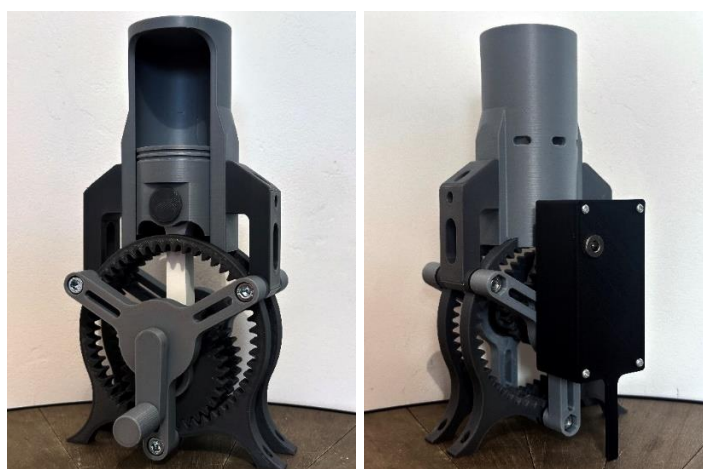
oraz pierwsze linie testowe, co pozwala sprawdzić przyczepność materiału do stołu. Drukowanie odbywa się warstwa po warstwie – filament jest topiony i nanoszony na stół roboczy zgodnie z instrukcjami i trajektorią zapisaną w wygenerowanym pliku G-code. Element centrujący w trakcie procesu drukowania przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Element centrujący w trakcie procesu drukowania.
Źródło: opracowanie własne.

Do wykonania elementów makiety wykorzystano filament PLA (Polilaktyd – poli[kwas mlekowy]), jest to polimer biodegradowalny otrzymywany z surowców odnawialnych takich jak np. mączka kukurydziana. Polilaktyd jest szeroko stosowany jako materiał biomedyczny, w tym do produkcji implantów dentystycznych czy nici chirurgicznych.

Wydrukowane elementy zostały poddane obróbce, w tym usunięciu struktur podporowych, szlifowaniu powierzchni kontaktowych i regulacji kształtu otworów montażowych. Następnie na gorąco zaimplementowano mosiężne wkładki gwintowane, które znacząco zwiększają wytrzymałość połączeń śrubowych, przewidzianych do montażu makiety. Wszystkie elementy zostały połączone zgodnie z projektem, zaś w elementach współpracujących osadzono łożyska kulkowe. W tylnej części makiety zamontowano zabudowę silnika DC wraz z wykonaną instalacją niskonapięciową. Makieta została zaprojektowana i wykonana w dwóch wariantach z napędem manualnym oraz automatycznym (rysunek 6).



Rysunek 6. Zdjęcia wykonanej makiety: po lewej widok od przodu – wersja z napędem manualnym, po prawej widok od tyłu – wersja z napędem elektrycznym.
Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzone zostały testy funkcjonalne opracowanej makiety w dwóch konfiguracjach: z napędem manualnym oraz z napędem zautomatyzowanym. W wersji manualnej (z korbką) zwrócono uwagę na poprawną ergonomię obsługi, płynność obrotu wału korbowego i zgodność kinematyki mechanizmu z sekwencją suwów opisaną w patencie. Testerzy wskazywali na wysoką czytelność wizualną procesu i możliwość zatrzymywania cyklu w dowolnym momencie w celu dokładniejszej analizy bądź omówienia procesów towarzyszących. W przypadku wersji zautomatyzowanej testowano wydajność i stabilność pracy obciążonego silnika DC. Zweryfikowano również stopień nagrzewania się komponentów podczas dłuższej pracy ciągłej – nie zidentyfikowano znaczącego podniesienia się temperatury elementów wykonawczych. Zidentyfikowano potrzebę doraźnego smarowania elementów mechanicznych oraz kontrolowania stanu połączeń śrubowych, pod kątem ich samoistnego luzowania. Obie wersje oceniono jako w pełni funkcjonalne i przydatne w dydaktyce, z zastrzeżeniem stosowania napędu zautomatyzowanego pod nadzorem osoby prowadzącej zajęcia dydaktyczne.

Makieta edukacyjna, wykonana na podstawie patentu US20240301817A1, stanowi skuteczne narzędzie dydaktyczne, pozwalające na przystępne przedstawienie zasady działania innowacyjnego silnika sześciosuwowego. Wykorzystanie informacji z dokumentacji patentowej w kontekście edukacyjnym mieści się w granicach dozwolonego użytku i nie narusza praw własności przemysłowej. Projekt potwierdza możliwość efektywnego łączenia wiedzy teoretycznej z praktyką inżynierską w nauczaniu akademickim.

ROZDZIAŁ 20

Wpływ systemów mechatronicznych w pojazdach osobowych na redukcję emisji spalin i ich zgodność z normami środowiskowymi (Mariusz Cygnar¹, Mateusz Kuzak²)

Zmiany zachodzące współcześnie w motoryzacji są potrzebą dostosowania się do coraz bardziej wymagających przepisów środowiskowych. Wprowadzane przez instytucje krajowe i międzynarodowe normy emisji spalin nakładają na producentów pojazdów obowiązek redukcji emisji szkodliwych substancji, takich jak tlenek węgla (CO), tlenek azotu (NO_x) czy cząstki stałe (PM). Jednym z kluczowych sposobów osiągnięcia tych celów stało się wdrażanie systemów mechatronicznych, które dzięki ingerencji mechaniki, informatyki oraz elektroniki znacząco wpływają na poprawę efektywności silników i ograniczenie ich wpływu na środowisko. Systemy mechatroniczne umożliwiają precyzyjne monitorowanie emisji w czasie rzeczywistym, precyzyjne sterowanie procesami spalania i optymalizację pracy jednostki napędowej. Wprowadzanie technologii, takich jak filtry cząstek stałych (DPF/GPF), recyrkulacja spalin (EGR) czy selektywna redukcja katalistyczna (SCR), pozwala znacznie zredukować emisję spalin, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności pojazdów. Rozwój tych systemów jest odpowiedzią na zaostrzenie norm emisji, takie jak Euro 6, a także na przyszłe regulacje takie jak Euro 7, które będą wymagały jeszcze większej skuteczności w ograniczaniu produkowanej emisji (Kruczyński, Słezak, 2021).

Normy emisji spalin są jednym z kluczowych elementów polityki ochrony środowiska, mającym na celu zredukowanie zanieczyszczeń powietrza pochodzących z pojazdów mechanicznych. Wprowadzenie takich regulacji prawnych pozwala na ograniczenie emisji szkodliwych substancji, takich jak tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO_x), węglowodory (HC) i cząstki stałe (PM). W Unii Europejskiej normy są określane za pomocą standardów „Euro”.

Euro 0 to norma, która została wprowadzona w 1992 roku i była pierwszym krokiem w ujednoczeniu przepisów dotyczących emisji spalin w Europie. Nie określała ona precyzyjnych limitów emisji spalin, jednak nakłaniała producentów pojazdów do stosowania rozwiązań redukujących zanieczyszczenia. Przed jej wprowadzeniem pojazdy charakteryzowały się bardzo wysokimi poziomami emisji, co miało duży wpływ na zanieczyszczenie powietrza w miastach. Brak obowiązku stosowania katalizatorów powodował, że emisja PM, HC i CO były na bardzo wysokim poziomie. Mimo to norma Euro 0 umożliwiła przemysłowi motoryzacyjnemu przygotowanie się do bardziej rygorystycznych regulacji, które wkrótce miały nadejść. Wpływ tej normy był jednak mocno ograniczony, ponieważ brakowało precyzyjnych wytycznych i mechanizmów kontroli (Bugła, 2022). Norma Euro 1 została wprowadzona w 1993 roku i stanowiła ona przełom w regulacji emisji spalin. Został wprowadzony obowiązek stosowania katalizatorów trójfunkcyjnych, które w znacznym stopniu obniżyły emisję tlenku węgla

¹ Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu; ORCID: 0000-0002-3688-0244.

² Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.

(CO), tlenków azotu (NO_x) oraz węglowodorów (HC). Nowe przepisy wymagały też zastosowania paliwa bezołowiowego, co dodatkowo zredukowało negatywny wpływ na środowisko. Limity emisji zostały określone na poziomie 2,72 g/km dla CO oraz 0,97 g/km dla HC+NO_x. Dzięki takim limitom możliwe było obniżenie produkowania szkodliwych substancji o 50% w porównaniu z pojazdami, które nie były wyposażone w katalizatory.

Wprowadzenie normy Euro 1 wymusiło rozwój nowych technologii i zwiększyło koszty produkcji samochodów, ale korzyści środowiskowe i zdrowotne były znaczne (Kubit-Bienia, 2023).

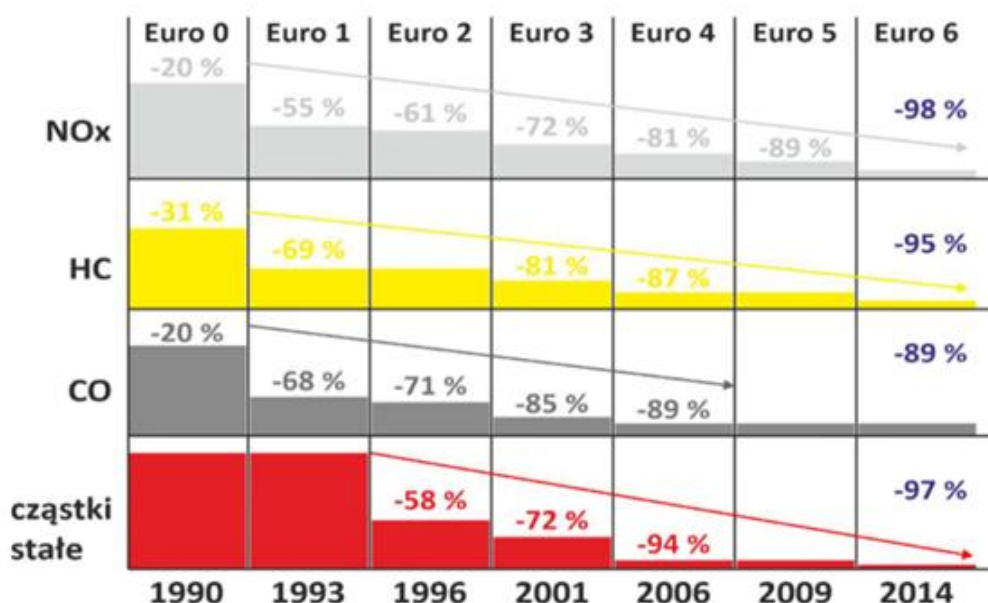
Norma Euro 2 zaczęła obowiązywać od 1996 roku. Po raz pierwszy wprowadzone zostało odróżnienie limitów dla silników wysokoprężnych (diesla) i benzynowych. Dla pojazdów benzynowych emisja została ograniczona do 2,2 g/km, a HC+NO_x do 0,5 g/km. W przypadku silników wysokoprężnych wprowadzono bardziej surowe limity emisji cząsteczek stałych na poziomie 0,08 g/km. Rozwój technologiczny objął bardziej zaawansowane systemy wtrysku 6 paliwa i optymalizację procesu spalania. Norma ta znacznie przyczyniła się do poprawy jakości powietrza, głównie w obszarach miejskich, gdzie problem z emisją był największy. Rozdzielenie wymogów na silniki benzynowe i wysokoprężne pozwoliło na bardziej efektywne i precyzyjne regulacje (Bugła, 2022).

Norma Euro 3 weszła w życie w 2000 roku i wprowadziła bardziej rygorystyczne normy emisji spalin oraz osobne wartości graniczne dla węglowodorów (HC) i tlenków azotu (NO_x) w silnikach benzynowych. Dla pojazdów z silnikiem benzynowym maksymalna dopuszczalna emisja CO wynosiła 2,3 g/km, NO_x 0,15 g/km, a HC 0,2 g/km. Dla silników wysokoprężnych limity te ustalono na poziomie 0,64 g/km dla CO, 0,05 g/km dla PM i 0,56 g/km dla HC + NO_x. Norma Euro 3 wprowadziła również technologię recyrkulacji spalin (EGR), która pozwoliła na zmniejszenie NO_x poprzez zmniejszenie temperatury spalin.

Norma Euro 4 zaczęła obowiązywać od 2005 roku, jeszcze bardziej zaostrzyła limity emisji spalin w sposób, który wymusił na producentach stosowanie zaawansowanych technologii oczyszczania spalin, takich jak filtry cząstek stałych (DPF) w pojazdach z silnikami wysokoprężnymi. Maksymalna emisja CO dla silników benzynowych została ustalona na poziomie 1,0 g/km, NO_x na 0,08 g/km, a 0,1 g/km w przypadku HC. W silnikach diesla limity te wynosiły 0,5 g/km dla CO, 0,025 g/km dla PM, oraz 0,3 g/km dla HC + NO_x. Wprowadzenie w życie normy Euro 4 miało ogromny wpływ na przemysł motoryzacyjny, zmuszając tym producentów do inwestowania w nowe technologie które zwiększyły koszty produkcji pojazdów, jednak obniżyły emisję spalin, ale także poprawiły efektywność paliwową w pojazdach. Korzyści dla środowiska były widoczne w postaci znacznej redukcji emisji cząsteczek stałych i tlenków azotu (Bugła, 2022).

Norma Euro 5, wprowadzona w 2009 roku, jeszcze bardziej zaostrzyła limity emisji spalin dla pojazdów z silnikami benzynowymi i wysokoprężnymi. Maksymalna emisja NO_x dla diesla została zmniejszona do 0,18 g/km, a limit PM dla wszystkich pojazdów wynosił zaledwie 0,005 g/km. W przypadku silników benzynowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa został wprowadzony obowiązek stosowania filtrów cząsteczek stałych (GPF). Rozpowszechnienie technologii DPF, GPF i SCR przyczyniło się do dalszej redukcji emisji spalin. Norma ta była kolejnym krokiem w kierunku poprawy jakości powietrza i zmniejszenia negatywnego wpływu transportu na zdrowie publiczne (Kubit-Bienia, 2023).

Norma Euro 6 zaczęła obowiązywać w 2014 roku i jest aktualnie najnowszym standardem emisji w Unii Europejskiej. Wprowadziła rygorystyczne limity emisji tlenków azotu dla pojazdów z silnikami wysokoprężnymi na poziomie 0,08 g/km, a także HC + NO_x 0,17 g/km. Dla silników benzynowych limity wynoszą 1,0 g/km dla CO, 0,06 g/km dla NO_x oraz 0,1 g/km dla HC. Wymogi te zmusiły producentów pojazdów do stosowania zaawansowanych systemów 7 oczyszczania spalin, takich jak AdBlue, SCR i udoskonalone filtry cząsteczek stałych. Norma Euro 6 miała ogromny wpływ na redukcję emisji szkodliwych substancji, które przyczyniły się do poprawy jakości powietrza i zmniejszenie zachorowalności na choroby związane z zanieczyszczeniem środowiska. W tabeli 1 przedstawiono przyporządkowanie norm Euro do lat produkcji pojazdów osobowych (Kubit-Bienia, 2023).



Rysunek 1. Różnice procentowe między normami.

Źródło: www.mappingair.meteo.uni.wroc.pl.

Niniejsze opracowanie prezentuje wpływ systemów mechatronicznych stosowanych w pojazdach osobowych na redukcję emisji spalin i ocenę ich skuteczności w kontekście spełniania wymagań norm środowiskowych. Badania przeprowadzono w warunkach warsztatowych z wykorzystaniem analizatora spalin i dymomierza, a ich celem była praktyczna ocena efektywności tych rozwiązań.

Oba urządzenia wyposażone są w sondy pomiarowe. Sonda spalinowa jest umieszczana w końcówce układu wydechowego pojazdu, a do pomiaru obrotów silnika wykorzystuje się urządzenie przekazujące parametry do analizatora DGA 1500 poprzez wpięcie się do OBD pojazdu. Pomiar temperatury oleju realizowany jest za pomocą sondy kontaktowej. W celu weryfikacji podstawowych parametrów technicznych pojazdu przed przystąpieniem do pomiaru emisji spalin wykorzystano stanowisko wyposażone w linię diagnostyczną VIDEOline 2000. Urządzenie to umożliwia szybki odczyt danych pojazdu z wykorzystaniem złącza diagnostycznego OBD-II. Badania przeprowadzone zostały dla silnika o zapłonie iskrowym. Rysunek 2 przedstawia pojazd na stanowisku badawczym. W pierwszej kolejności wykonano próbę szczelności układu wydechowego.



Rysunek 2. Stanowisko badawcze.
Źródło: opracowanie własne.

Proces badania silnika o zapłonie iskrowym rozpoczęto od umieszczenia sondy w końcowej części układu wydechowego pojazdu, co przedstawiono na rysunku 3.

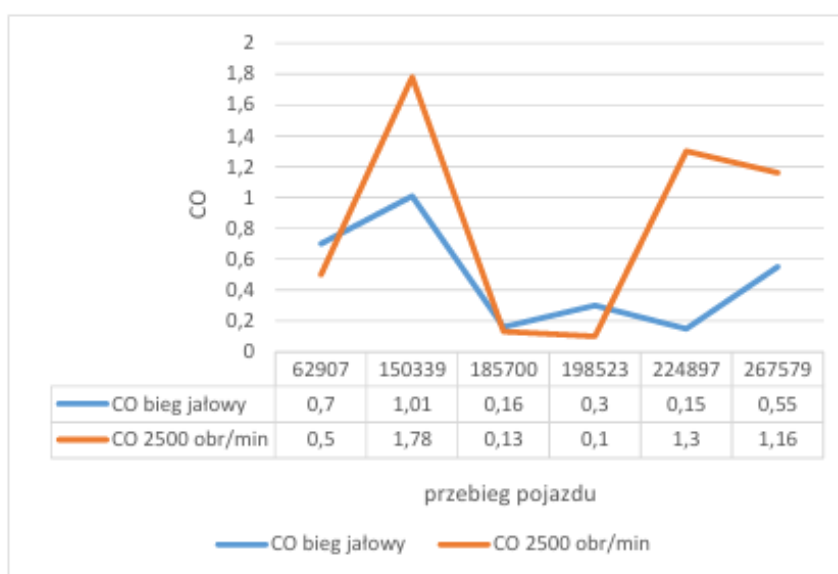


Rysunek 3. Sonda pomiarowa.
Źródło: opracowanie własne.

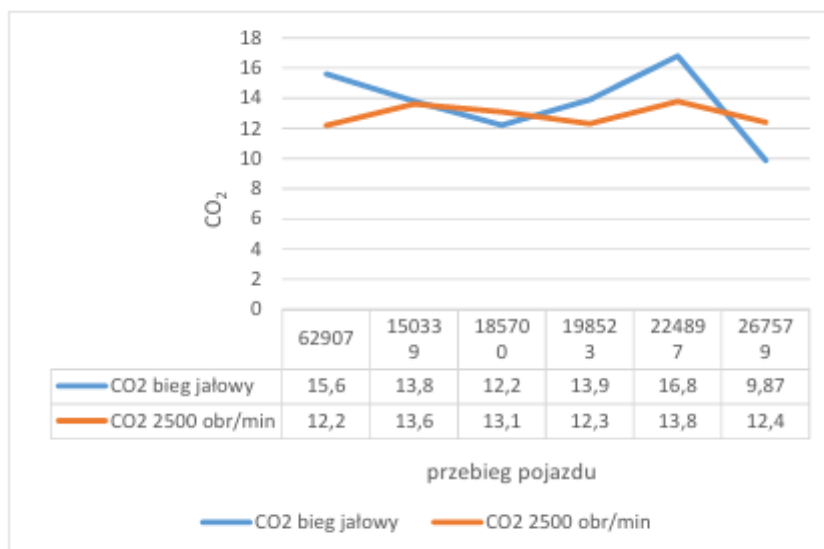
Na ekranie głównym analizatora DGA wybrano tryb badania dla pojazdu zasilanego benzyną, co umożliwiło pomiar następujących parametrów:

- zawartości tlenku węgla (CO) w spalinach,
- zawartości dwutlenku węgla (CO₂),
- stężenia niespalonych węglowodorów (HC),
- wartości współczynnika nadmiaru powietrza (lambda).

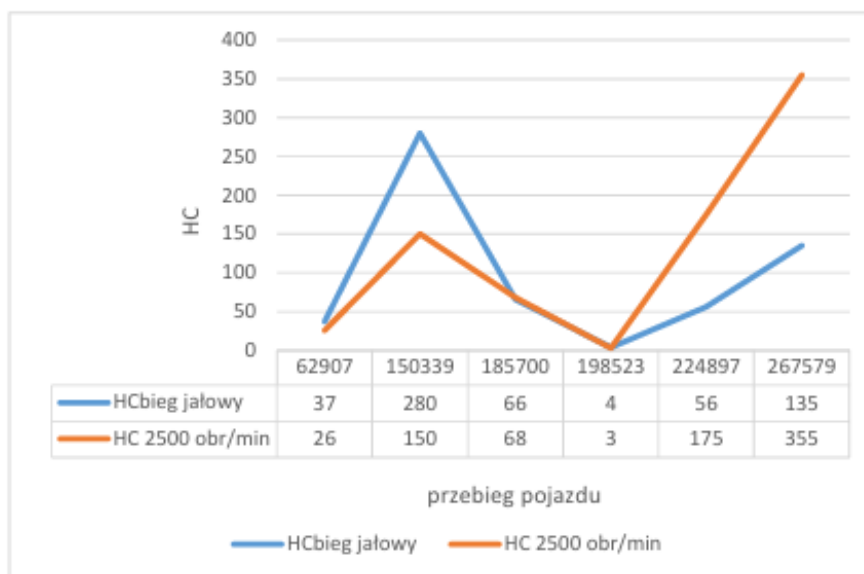
Po wybraniu odpowiedniego programu „F1” odczekano odpowiednią ilość czasu, aby urządzenie mogło przeprowadzić pomiar. Poniżej przedstawiono zakładkę w której będą wyświetlane wyniki. 38 Pomiar przeprowadzono w dwóch zakresach pracy silnika: 1. Na biegu jałowym – przy stabilnych obrotach wynoszących ok. 800-900 obr./min, przy braku obciążenia. 2. Przy podwyższonych obrotach – ok. 2500 obr./min, przy równomiernym i delikatnym wciśnięciu pedału przyspieszenia. Po każdej fazie pomiarowej zapisano wyniki i porównano je z dopuszczalnymi wartościami według obowiązujących norm emisji dla danego pojazdu. Wyniki z analizatora DGA były prezentowane na ekranie w czasie rzeczywistym, a po zakończeniu testu zostały zapisane. Pomiar wykonano zgodnie z procedurami przewidzianymi dla stacji kontroli pojazdów, z zachowaniem warunków gwarantujących poprawność i powtarzalność wyników. Poniżej na rysunkach 4-7 ukazano wyniki z pomiaru dla normy Euro 6 dla 6 pojazdów.



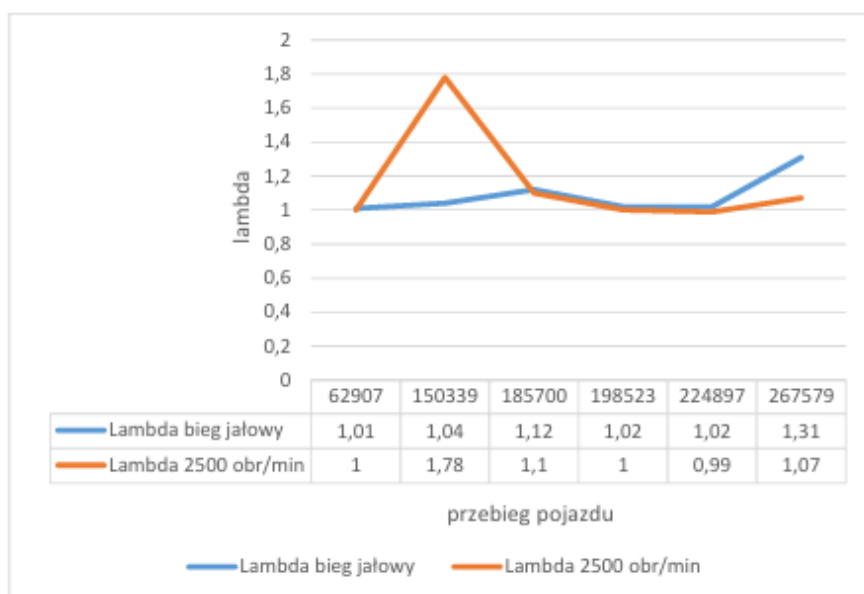
Rysunek 4. CO dla normy Euro 6.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 5. CO₂ dla normy Euro 6.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 6. HC dla normy Euro 6.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7. Lambda dla normy Euro 6.
Źródło: opracowanie własne.

Analiza wyników pomiarów emisji spalin dla pojazdów spełniających normę EURO 6 wykazała zróżnicowane parametry emisji, które są ściśle powiązane z przebiegiem pojazdu, pojemnością skokową silnika i stanem technicznym układów oczyszczania spalin. Emisja tlenku węgla (CO) na biegu jałowym wahały się od 0,15% do 1,01%, przy czym najwyższy poziom zanotowano w pojeździe o najmniejszej pojemności silnika (1390 cm³) z przebiegiem 150 339 km. Na wyższych obrotach (2500 obr./min) emisja CO była znacznie niższa i utrzymywała się w granicach 0,02-1,78%. Podwyższone wartości CO mogą wskazywać na niewłaściwe funkcjonowanie układów recyrkulacji spalin (EGR), katalizatorów lub systemów sterowania mieszanką paliwowo-powietrzną. Emisje dwutlenku węgla (CO₂) były stosunkowo stabilne, mieszcząc się w przedziale

od 9,87% do 16,8% zarówno na biegu jałowym, jak też przy 2500 obr./min. Warto zauważyć, że niższe wartości CO₂ (ok. 10-13%) najczęściej dotyczyły pojazdów o wyższych przebiegach (powyżej 185 000 km), co może sugerować zmiany w efektywności spalania oraz ewentualne osłabienie działania układów oczyszczania. Emisja węglowodorów (HC) zaobserwowano znaczne rozproszenie wartości HC w badanej grupie, od 4 ppm do 280 ppm na biegu jałowym i od 3 ppm do 175 ppm przy 2500 obr./min. Szczególnie wysokie emisje HC w pojeździe o pojemności 1390 cm³ i przebiegu 150 339 km wskazują na możliwe niedomagania w układzie zapłonowym, nieszczelności w układzie dolotowym lub problemy z katalizatorem. Wyższe emisje HC mogą również być 59 efektem nieoptymalnej regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej lub niewłaściwego działania sond lambda. Wartości współczynnika lambda mieściły się w zakresie od 0,99 do 1,36, co generalnie wskazuje na prawidłowy bądź lekko odchyłony skład mieszanki paliwowo-powietrznej. Wyjątkowo wysokie wartości lambda (powyżej 1,3) zaobserwowano w pojazdach z większym przebiegiem (powyżej 185 000 km), co może świadczyć o zubożeniu mieszanki spowodowanym zużyciem lub niewłaściwą kalibracją układu sterowania silnikiem. Zubożona mieszanka przyczynia się do wzrostu emisji tlenków azotu oraz zwiększonego zużycia komponentów silnika. Pojazdy o przebiegach przekraczających 180 000 km wykazały tendencję do wyższej emisji HC i niekiedy podwyższonych poziomów CO, co sugeruje stopniowe zużycie elementów, które są odpowiedzialne za kontrolę emisji, takich jak sondy lambda, katalizatory, czy zawory EGR. Ponadto większe przebiegi korelują z większą zmiennością współczynnika lambda, co świadczy o potrzebie częstszej diagnostyki oraz serwisowania układów sterowania silnikiem. Nie stwierdzono jednoznacznej zależności pomiędzy pojemnością silnika a poziomem emisji CO₂, jednak mniejsze jednostki napędowe (poniżej 1500 cm³) cechowały się większą zmiennością emisji CO oraz HC, co może wynikać z mniejszej tolerancji tych silników na zużycie i awarie układów sterowania. Podsumowując, pomiary emisji spalin w pojazdach normy EURO 6 wskazują na ogólnie dobrą skuteczność systemów oczyszczania spalin, jednak zauważalne są odstępstwa w pojazdach o wyższych przebiegach, co podkreśla konieczność systematycznej kontroli i konserwacji układów kontroli emisji w celu utrzymania norm emisji na wymaganym poziomie.

PODSUMOWANIE

Celem monografii było zaprezentowanie prac o różnej specyfice, a przedstawione zagadnienia i zastosowane rozwiązania z zakresu inżynierii praktycznej i nowoczesnych metod projektowania w oparciu o obecną wiedzę są kolejnym przykładem rozwoju zaawansowanych technik inżynierskich.

Wszystkie rozdziały przygotowano tak, aby czytelnik mógł w łatwy sposób zapoznać się z problematyką i zastosowaniem odpowiednich narzędzi do rozwiązywania złożonych problemów technicznych. Różnorodność poruszanych zagadnień daje szerokie spektrum możliwości zastosowanych metod obliczeniowych i badań stanowiskowych, co ma bezpośrednie zastosowanie w praktycznym podejściu do rozwiązywania problemów z zakresu inżynierii.

Autorzy poszczególnych rozdziałów skupili się głównie na zagadnieniach obecnie wykorzystywanych w projektowaniu maszyn oraz urządzeń mających zastosowanie w przemyśle. Dodatkowo, szereg prac jest związanych z przemysłem motoryzacyjnym wykonanych na stanowiskach badawczych i projektów eksploatacyjnych.

Niniejsza monografia niewątpliwie jest uzupełnieniem gruntownej wiedzy i wnosi duży wkład do zagadnień z zakresu inżynierii produkcji.

BIBLIOGRAFIA

- Benzi, M. (2002). *Preconditioning techniques for large linear systems. Journal of Computational Physics*, 182(2), 418-477.
- Bertsekas, D.P. (2016). *Nonlinear programming*. Belmont: Athena Scientific.
- Botland (2019). Serwo TowerPro MG-996R Robot 180 – standard. Pobrane z: <https://botland.com.pl/pl/serwa-typu-standard/4799-serwo-towerpro-mg-996r-robot-180-standard.html>.
- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G., Ljung, G. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. Hoboken: Wiley.
- Box, G.E., Draper, N.R. (2007). *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. Hoboken: Wiley.
- Boyd, S., Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brodowicz, W. (1993). *Technologia silników spalinowych*. Warszawa: Wydawnictwo WSiP.
- Cervo, D., Anderson, R. (2014). *Arduino dla zaawansowanych*. Gliwice: Wydawnictwo Helion.
- Coello Coello, C.A., Lamont, G.B., Van Veldhuizen, D.A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. New York: Springer.
- Duff, I., Erisman, A., Reid, J. (2017). *Direct methods for sparse matrices*. Oxford: Oxford University Press.
- Dyrcz, B., Tabor, A., Zając, A. (1999). *Zarządzanie jakością: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. T. 1, Jakość i systemy zapewnienia jakości*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Ferziger, J.H., Perić, M. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer.
- Gawrysiak M. (1997). *Mechatronika i projektowanie mechatroniczne*. Wprowadzenie. Białystok: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej
- Gawrysiak, M. (2003). *Analiza systemowa urządzenia mechatronicznego*. Białystok: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej.
- Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A., Rubin, D.B. (2013). *Bayesian data analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Geniec, G. (2025). *Projekt mikroprocesorowego systemu sterowania małą obrabiarką CNC*. Nowy Sącz: Praca dyplomowa, Wydział Nauk Inżynierskich Akademii Nauk Stosowanych w Nowym Sączu.
- Haberman, R. (2013). *Applied partial differential equations*. Harlow: Pearson.
- Hesthaven, J.S., Warburton, T. (2008). *Nodal Discontinuous Galerkin Methods*. New York: Springer.
- Honczarenko, J. (2008). *Obrabiarki sterowane numerycznie*. Warszawa: WNT.
- Hughes, T.J. (2000). *The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis*. Mineola: Dover Publications.
- Jędrzykiewicz, Z., Pluta, J., Stojek, J. (2024). *Napęd i sterowanie hydrauliczne*. Kraków: Skrypt Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
- Jelonek, K. (2015). *Arduino – czujnik odległości HC-SR04 i wykresy w czasie rzeczywistym*. Pobrane z: <http://krzysztofjelonek.net/arduino-czujnik-odleglosci-hc-sr04-i-wykresy-w-czasie-rzeczywistym/>.
- Kaczorek, T. (1999). *Teoria sterowania*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Kamel, K., Kamel, E. (2009). *Programmable Logic Controllers: Industrial Control*. Nowy Jork: Mcgraw-Hill Education-Europe, Mcgraw-Hill Professional, Mcgraw Hill Book Co
- Kijewski, J. (1999). *Silniki spalinowe*. Warszawa: Wydawnictwo WSiP.
- Korbicz, J., Obuchowicz, A., Uciński, D. (1994). *Artificial neural networks – basics and applications*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ.
- Kozaczewski, W. (2004). *Konstrukcja grupy tłokowo-cylindrowej silników spalinowych*. Warszawa: Wydawnictwo WKŁ.
- Kozłowiecki, H. (1974). *Łożyska tłokowych silników spalinowych*. Warszawa: Wydawnictwo WKŁ.
- Kreyszing, E. (2011). *Advanced Engineering Mathematics*. New York: Wiley.
- Krzak, P. (2025). *Koncepcja i wykonanie modyfikacji silnika BMW M50B20nv w celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego*. Praca dyplomowa, ANS Nowy Sącz.
- Langman, J. (1996). Diagnosis of agricultural machinery. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, 243, 1-76.
- Logan, J.D. (2019). *Applied mathematics*. New York: Wiley.
- Luft, S. (2009). *Podstawy budowy silników*. Warszawa: Wydawnictwo WKŁ.
- Masters, T. (1996). *Neural networks in practice – programming in C++ language*. Warszawa: WNT.
- Monk, S. (2021). *Arduino dla początkujących. Kolejny krok*. Gliwice: Wydawnictwo Helion.
- Mysłowski, J. (2016). *Pojazdy samochodowe. Doładowanie silników*. Warszawa: Wydawnictwo WKŁ.
- Nikiel, G. (2004). *Programowanie obrabiarek CNC na przykładzie układu sterowania Sinumerik 810D/840D*. Bielsko-Biała: Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.
- Nocedal, J., Wright, S. (2023). *Numerical optimization*. New York: Springer.
- O'Connor, P., Kleyner, A. (2020). *Practical reliability engineering*. Hoboken: Wiley.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation.
- Patent nr: US20240301817A1, Konstruktorzy/Projektanci: Andre Kopp, Ovidiu Barac-Zbircea, Nicolae Vlad Burnete, 2024. *Method for a combustion machine with two times three strokes*.
- Pozrikidis, C. (2011). *Introduction to theoretical and computational fluid dynamics*. Oxford: Oxford University Press.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Quarteroni, A. (2008). *Mathematical Models in Science and Engineering*. Milano: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Rausand, M., Høyland, A. (2019). *System reliability theory: Models, statistical methods, and applications*. Hoboken: Wiley.
- Reddy, J.N. (2019). *An introduction to the finite element method*. New York: McGraw-Hill Education.
- Ryś, M. (2020). *Projekt i wykonanie humanitarnej łapki na kunę*. Praca inżynierska. Nowy Sącz: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu.
- Saad, Y. (2003). *Iterative methods for sparse linear systems*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Saltelli, A., Bammer, G., Bruno, I., Charters, E., Walker, W. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33), 16651-16656.

- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. Chichester: Wiley.
- Stefański, T., Zawarczyński, Ł. (2012). Sterowanie przepływem i prędkością silnika hydraulicznego w układzie z falownikowym napędem pompy. *Napędy i Sterowanie*, 2, 72-77.
- Tadeusiewicz, R. (1993). *Sieci neuronowe*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza RM.
- Trefethen, L.N. (2000). *Spectral methods in MATLAB*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).
- Turing, A.M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 37-72.
- Węgrzyn, A., Leszczyński, N., Kocira, S. (2016). Tendencje w budowie niestacjonarnych głowic do łupania drewna. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*, 1, 16-19.
- White, F.M. (2021). *Fluid mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- Witts, J., Storey, M. (2021). *Rowery. Regulacja, naprawa, konserwacja*. Warszawa: Alma-Press Sp. z o.o.
- Zajac, P. (2017). *Silniki pojazdów samochodowych*. Warszawa: Wydawnictwo WKŁ.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Zwarczyński, Ł., Wikarek, J., Dmochowski, A. (2023). Porównanie falownikowych napędów pompy hydraulicznej w układzie sterowania objętościowego. *Przegląd Elektrotechniczny*, 5, 251-255.
- forsplit.pl. (2019, 11 07). Pobrano z: https://forsplit.pl/pol_m_Luparki-do-drewna_Luparki-hydrauliczne-172.html.
- <https://bike.shimano.com/pl-PL/technologies/component/electronics.html>.
- <https://dynamech.pl/usterki-jak-to-dziala>.
- https://www.bmwpartsdeal.com/parts/bmw-cylinder_head_gasket_asbestos_free-11127506984.html.
- <https://www.sram.com/en/sram/mountain/collections/eagle-axs>.
- <https://www.wyorkierowcow.pl/wtrysk-wielopunktowy-zasada-dzialania-wady-i-zalety-posredniego-wtrysku-paliwa/>.
- mgprojekt.com.pl. (2020, 01 14). Pobrano z: <https://www.mgprojekt.com.pl/blog/luparka-do-drewna/>.