WYBRANE PROBLEMY TECHNOLOGII NAPRAW POJAZDÓW

pod redakcją
Piotra Aleksandrowicza
Tomasza Kałaczyńskiego
Marcina Łukasiewicza

WYBRANE PROBLEMY TECHNOLOGII NAPRAW POJAZDÓW

pod redakcją
Piotra Aleksandrowicza
Tomasza Kałaczyńskiego
Marcina Łukasiewicza

Recenzent
prof. dr hab. Marek Idzior

Opracowanie redakcyjne i techniczne
mgr Aleksandra Górska, mgr Patrycja Fereni-Morzyńska

Projekt okładki
lic. Olga Wierzbicka

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej
Bydgoszcz 2025

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych,
mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-68285-15-4

Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej
Redaktor Naczelny
dr hab. inż. Marcin Zastempowski, prof. PBŚ
ul. Sucha 9B, 85-796 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@pbs.edu.pl https://wydawnictwa.pbs.edu.pl

Wyd. I. Ark. aut. 9,0. Ark. druk. 9,7.
Zakład Małej Poligrafii PBŚ

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA 5

Piotr Aleksandrowicz, Michał Pająk

PROBLEM RESTYTUCJI W PROCESIE ODNOWY POJAZDÓW USZKODZONYCH W ZDARZENIACH DROGOWYCH.....7

Magdalena Czyżewska, Mirosław Szubartowski, Klaudiusz Migawa, Andrzej Neubauer

ZASTOSOWANIE METOD NIEDERMINISTYCZNYCH DO ANALIZY EFEKTYWNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA AUTOBUSÓW MIEJSKICH 21

Tomasz Kałaczyński, Mateusz Borkowski, Aleksandr Dykha

OCENA WPŁYWU PROCESU PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI NA PARAMETRY POWŁOK LAKIERNICZYCH PROSZKOWYCH.....33

Jakub Horka, Michał Stopel

UCHWYT DO TRANSPORTU ZDEMONTOWANYCH ZBIORNIKÓW CYSTERN DROGOWYCH TYPU SILOS UCHYLNY NA TERENIE ZAKŁADU NAPRAWCZEGO.....50

Michał Liss, Kacper Krause

OCENA EFEKTYWNOŚCI NAPRAWY PANELOWEJ SŁUPKA A NADWOZIA POJAZDU OSOBOWEGO.....61

Emil Golonka, Michał Pająk, Davor Kolar

DIAGNOSTYKA WOLNOOBROTOWYCH SYSTEMÓW NAPĘDOWYCH Z UŻYCIEM TECHNIK ML 75

Karolina Karolewska, Sebastian Karolewski

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH W NAPRAWACH POJAZDÓW 86

Joanna Wilczarska, Mateusz Klemens, Oleh Polishchuk

WPŁYW URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH STOSOWANYCH W MOTOCYKLACH NA BEZPIECZEŃSTWO JAZDY.....101

Marcin Łukasiewicz, Valeriy Martynyuk, Serhii Matiukh

ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO NA TERENIE UNII EUROPEJSKIEJ 118

Sebastian Kilimnik, Bogdan Landowski, Łukasz Muślewski,
Oleg Polishchuk

ANALIZA I BADANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW
OLEJU SILNIKOWEGO EKSPLOATOWANEGO
W TURBODOŁADOWANYCH JEDNOSTKACH NAPĘDOWYCH
(ZI) O NISKICH POJEMNOŚCIACH 131

Marietta Markiewicz

ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY SILNIKÓW
SPALINOWYCH W ASPEKCIE ZASILANIA ICH PALIWEM
ALTERNATYWNYM.....145

PRZEDMOWA

Zastosowanie w procesie eksploatacji optymalnych metod oceny stanu technicznego maszyn, będących podstawą automatyzacji procesu rozpoznawania ich stanu, wymaga określenia zbioru parametrów diagnostycznych, wyznaczenia testów diagnostycznych oraz optymalizacji metod genezowania i prognozowania ich stanu.

W tym celu należy dokonać identyfikacji metod rozpoznawania stanu maszyn, opracować procedury możliwe do wykorzystania w procesie rozpoznawania stanu maszyn oraz określić reguły wnioskowania będące elementem oprogramowania pokładowego systemu rozpoznawania stanu maszyny.

Metody i środki diagnostyki technicznej dostarczają na bieżąco aktualnej informacji o stanie badanych maszyn dla potrzeb racjonalnej organizacji, zarządzania i strategii ich eksploatacji.

Maszynom i ich eksploatacji nieodłącznie towarzyszą procesy destrukcyjne starzenia i zużycia wymagające prowadzenia badań degradacji stanu, z których wynikają zakres i częstotliwość czynności obsługowych, regulacyjnych i naprawczych przywracających ich zdatność użytkową.

Problematyka związana z technologią napraw blacharsko-lakierniczych czy też oceny stanu technicznego nadwozi pojazdów samochodowych w artykułach branżowych i naukowych jest szeroko opisywana. Jednakże istnieje konieczność łączenia aspektów eksploatacji, zastosowania narzędzi wirtualnych w badaniach symulacyjnych czy też implementacji specjalistycznych technik informatycznych z modelowaniem symulacyjnym istotnym w dokonywaniu analizy przyczynowo-skutkowej.

Wprowadzenie zmiennych eksploatacyjnych oraz technik symulacyjnych pozwala na zwiększenie zakresu weryfikacji jakości napraw pojazdów samochodowych i środków transportu w aspekcie szeroko rozumianego bezpieczeństwa.

Takie interdyscyplinarne podejście do bezpieczeństwa napraw pojazdów pozwala na określenie szerokiego zakresu oddziaływań na realizowane procesy napraw.

Przedstawiony w monografii materiał stanowi źródło cennych informacji w zakresie systemu oceny jakości i bezpieczeństwa napraw pojazdów, skutków technicznych i ekonomicznych napraw powypadkowych oraz procesów z nimi związanych, przeznaczonych zarówno dla naukowców, jak i praktyków.

PROBLEM RESTYTUCJI W PROCESIE ODNOWY POJAZDÓW USZKODZONYCH W ZDARZENIACH DROGOWYCH

Piotr Aleksandrowicz[1*], Michał Pająk[2]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Puławskiego, Wydział Mechaniczny, ul. hm. kpt. Eugeniusza Stasieckiego 54, 26-600 Radom

Streszczenie. W pracy podjęto problematykę przywrócenia pojazdu do stanu sprzed szkody, która jest ważkim zagadnieniem zarówno dla towarzystw ubezpieczeniowych, jak i właścicieli pojazdów podlegających naprawie powypadkowej. Rolą każdej naprawy jest przede wszystkim przywrócenie pojazdowi bezpieczeństwa. Dlatego też zaprezentowana analiza zawiera propozycję metod diagnozowania zakresu uszkodzeń oraz weryfikacji naprawy na zgodność z jej planem, przegląd narzędzi informatycznych do kalkulowania kosztów naprawy powypadkowej i sposoby ich ustalenia w zależności od rodzaju użytych części. Praca zawiera też rekomendacje dalszego rozwoju proponowanego przez autorów podejścia do omawianej problematyki za pomocą metod umożliwiających podjęcie właściwej decyzji odszkodowawczej, co ma walor aplikacyjny dla restytucji w procesie odnowy pojazdów uszkodzonych w zdarzeniach drogowych.

Słowa kluczowe: diagnozowanie uszkodzeń, bezpieczeństwo pojazdu po naprawie, odnowa pojazdu, koszty naprawy powypadkowej, decyzja odszkodowawcza, metody ocenowe restytucji

1. POSTĘPOWANIE LIKWIDACYJNE

Czasy współczesne charakteryzuje duża mobilność ludzi i towarów, przez co używanie pojazdów samochodowych stało się już całkowicie powszechne. Wzrastają również poziom świadomości ubezpieczeniowej społeczeństwa oraz złożoność problematyki procesu likwidacji szkód. Obejmuje on czynności, które są niezbędne do ustalenia odpowiedzialności za szkodę i wysokości odszkodowania w terminach wynikających z obowiązujących przepisów prawa lub zawartej umowy ubezpieczenia. Regulacje te determinowane są w zależności od rodzaju ubezpieczenia komunikacyjnego będącego podstawą prowadzonego postępowania likwidacyjnego, czyli może być to ubezpieczenie OC posiadaczy pojazdów mechanicznych lub dobrowolne ubezpieczenie autocasco. Dla praktycznego zastosowania w procesie likwidacji szkód komunikacyjnych w literaturze, na przykład [19], mają zastosowanie tak zwane szkody częściowe, gdy uszkodzenie pojazdu ma taki zakres, że wartość przewidywanych kosztów naprawy nie przekracza wartości rynkowej pojazdu sprzed dnia powstania szkody. Innymi słowy naprawa ta jest opłacalna ekonomicznie oraz technicznie możliwa. Nieco odmienne regulacje w tym zakresie dotyczą szkód z ubezpieczenia

[*] adres korespondencyjny: p.aleksandrowicz@pbs.edu.pl

dobrowolnego autocasco, gdyż najczęściej spotykaną granicą sygnalizowanej wcześniej opłacalności ekonomicznej naprawy jest 70% wartości rynkowej pojazdu, a nie 100% tej wartości, jak ma to miejsce w przypadku likwidacji szkody z obowiązkowego ubezpieczenia OC posiadaczy pojazdów mechanicznych. W prezentowanej pracy skoncentrowano się właśnie na ww. szkodach. Wyróżnia się dwie metody ustalania odszkodowania dla tego rodzaju szkód [12], tj. kosztorysową i serwisową.

Metoda serwisowa polega na tym, że odszkodowanie za naprawę pojazdu określane jest na podstawie faktury lub rachunku za jej wykonanie. Tymczasem metoda kosztorysowa, będąca obszarem szczególnego zainteresowania autorów tej pracy, sprowadza się do tego, że wysokość odszkodowania za naprawę pojazdu określana jest przez zakład ubezpieczeń na podstawie kalkulacji w systemie eksperckim, którego bazy danych umożliwiają zastosowanie w obliczeniach norm czasowych operacji naprawczych producenta pojazdu, części zamiennych i materiałów zapewniających przywrócenie pojazdu do stanu sprzed szkody. Wyróżniane są trzy rodzaje jakości części zamiennych, które uwzględnia się w kalkulacjach O, Q, P [11, 19], a ich definicje przedstawiono na rysunku 1.

Nazwa	Opis zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 28.01.2003r. w sprawie wyłączenia określonych porozumień wertykalnych w sektorze pojazdów samochodowych spod zakazu porozumień ograniczających konkurencję.	System dystrybucji Cechy zewnętrzne	ISP
oryginalne części zamienne	§ 2.20 - części zamienne tej samej jakości co komponenty stosowane do montażu pojazdu samochodowego, produkowane zgodnie ze specyfikacjami i standardami produkcyjnymi, ustalonymi przez producenta tych pojazdów do produkcji komponentów lub części zamiennych danego pojazdu samochodowego, w tym części zamienne produkowane na tej samej linii produkcyjnej co komponenty danego pojazdu samochodowego; przyjmuje się, że części zamienne są oryginalne, jeżeli producent tych części zaświadczy, że zostały one wyprodukowane zgodnie ze specyfikacjami i standardami produkcyjnymi ustalonymi przez producenta danych pojazdów i są one tej samej jakości co części stosowane do montażu tych pojazdów;	Producent pojazdu część / opakowanie oznakowane logiem - znakiem towarowym producenta pojazdu	**O**
		Producent części część / opakowanie oznakowane logiem - znakiem towarowym producenta części	**Q**
części zamienne o porównywalnej jakości	§ 2.21 - części zamienne, których producent zaświadczy, że są one tej samej jakości co komponenty, które są lub były stosowane do montażu danych pojazdów samochodowych;		**P**
zamienniki	pozostałe nie wymienione w Rozporządzeniu		**Z**

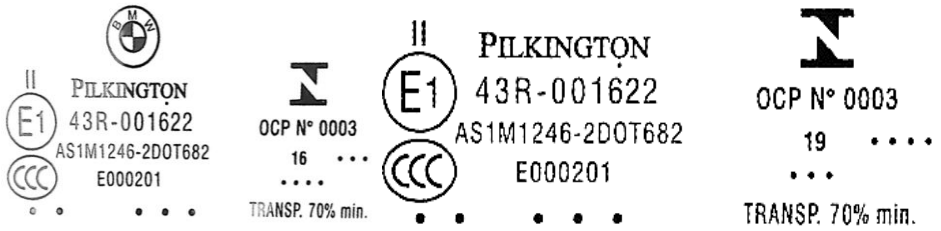
Rys. 1. Rodzaje jakości części stosowanych w kalkulacjach napraw pojazdów [11, 19]

W praktyce przez strony procesu likwidacji szkód, tj. zakłady ubezpieczeń, warsztaty naprawcze i dostawców części, stosowany jest najczęściej podział [17] ustalony na podstawie Rozporządzenia w sprawie włączeń grupowych BER (ang. *Block Exemption Regulation*) 1400/2002, zwanych też GVO (*Gruppenfreistellungsverordnung*), które zaprezentowano na rysunku 2.

Przepisy Unijne - Rozporządzenia GVO wraz z dodatkowymi dokumentami KE (2002, 2010)		Wspólny Komunikat ubezpieczycieli i dostawców nt. systemu oznaczeń (2005)		Oznakowania wg KNF (2014, 2021)	Zwyczajowe nazewnictwo warsztatowe	Zwyczajowe nazewnictwo ubezpieczeniowe	Dystrybucja jest kojarzona z:
nazwy i definicje	uszczegółowienie wg „Explanatory Brochure" KE (2002)	oznakowania	dod. objaśnienia (uszczegółowienie)				
części zamienne oryginalne	*producent pojazdów produkuje i dystrybuuje*	**O**		**O**	**oryginały***	*brak jednolitej linii nazewnictwa (np. „serwisowe")*	**ASO**
	producent pojazdów kupuje od dostawcy i sam dystrybuuje						
	dostawca (tzw. Tier 1, Tier 2) producenta pojazdów dystrybuuje produkowany przez siebie towar w swoim opakowaniu	**Q**		**Q**		**części alternatywne** *(czyli te części, które nie są dystrybuowane poprzez ASO)*	**Aftermarket**
części zamienne o porównywalnej jakości	*oświadczenie producenta plus dobrowolny zewnętrzny certyfikat z badań*	**PT** lub **PC**	*część posiada dobrowolny zewn. certyfikat techn.*	**P**	**zamienniki**		
	tylko oświadczenie producenta	**PJ**	*tę część „szczególnie poleca" sam dystrybutor*				
		P					
pozostałe (GVO nie wspomina)		**Z**					

Rys. 2. Nazewnictwo samochodowych części zamiennych wg BER/GVO [17]

Przykładowe oznaczenia szyby czołowej oryginalniej producenta pojazdu rodzaju O oraz oryginalnej Aftermarket rodzaju Q przedstawiono na rysunku 3.



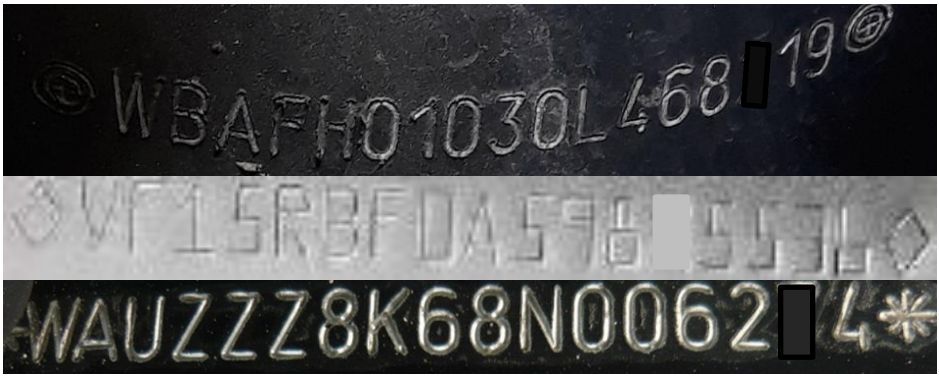
Rys. 3. Oznaczenia szyb oryginalnych rodzaju O oraz rodzaju Q do samochodu [17]

Tymczasem stawki roboczogodziny ustalane są na podstawie cen stosowanych przez warsztaty naprawcze mające zaplecze techniczne i kadrowe umożliwiające przeprowadzanie naprawy w sposób zapewniający przywrócenie pojazdu do stanu sprzed szkody. Wolny rynek napraw powypadkowych powoduje, że stawki robocizny nie są odgórnie ustalane czy też limitowane. Dla realizacji celów pracy wykorzystano uśrednioną stawkę robocizny za prace blacharskie, mechaniczne i lakiernicze w wysokości 148 zł netto, ustaloną na podstawie rozpoznania rynku województwa kujawsko-pomorskiego [1].

2. DIAGNOZOWANIE ZAKRESU USZKODZEŃ POJAZDU PRZED NAPRAWĄ

W praktyce likwidacji szkód komunikacyjnych diagnozowanie pojazdu w celu określenia zakresu zaistniałej szkody i zdefiniowania planu naprawy określającego części kwalifikowane do wymiany, naprawy czy sprawdzenia odbywa się podczas oględzin pojazdu samochodowego będącego przedmiotem likwidowanej szkody komunikacyjnej. Zakres czynności podczas oględzin pojazdu określają procedury zakładu ubezpieczeń oraz wytyczne dla ekspertów [15]. Można wyróżnić trzy grupy niezbędnych czynności – rekomendowanych do prawidłowego zdiagnozowania zakresu szkody w pojeździe.

Do pierwszej grupy należy identyfikacja pojazdu obejmująca odczytanie numeru VIN (ang. *Vehicle Identification Number*) [9], ustalenie marki, modelu i typu oraz rodzaju nadwozia w celu późniejszego wyboru pojazdu w systemie eksperckim do kalkulowania kosztów naprawy. W szczególności w sytuacji, gdy nie ma możliwości zdekodowania tego numeru na przykład za pomocą programu AudaVIN [5], służącego do zautomatyzowanej usługi identyfikacji pojazdów włącznie z wyposażeniem fabrycznym, który jest zintegrowany z systemem Audatex [4]. Na rysunku 4 wskazano przykładowe, udokumentowane na zdjęciach numery VIN, które są trwale naniesione na płaskie oraz zaokrąglone powierzchnie elementu nadwozia pojazdu.



Rys. 4. Przykładowe ciągi znaków VIN pojazdów (opracowanie własne)

Do drugiej grupy należy identyfikacja rodzaju lakieru oraz jego kodu wraz z pomiarem grubości powłoki lakierowej za pomocą miernika. W praktyce stosowane są mierniki umożliwiające pomiary z automatycznym wykrywaniem blach stalowych, stalowych ocynkowanych i aluminiowych. Pomiar grubości powłoki lakierowej ma na celu wykrycie ewentualnych wcześniejszych napraw pojazdu. Identyfikacja rodzaju lakieru związana jest natomiast z jego późniejszym wyborem w kalkulacji, co ma wpływ na koszty naprawy lakierniczej. Identyfikacja ta umożliwia obliczenia w zależności od ilości warstw lakieru

oraz jego efektów optycznych. Te ostatnie dotyczą tak zwanych lakierów perłowych, gdy to do kosztów naprawy doliczane jest 15% kosztów materiału lakierniczego. W przypadku braku możliwości ustalenia rodzaju lakieru z numeru VIN pojazdu w praktyce eksperci posiłkują się recepturami lakieru z danych uzyskanych z systemów mieszalnika, w które już powszechnie wyposażone są lakiernie samochodowe. Na rysunku 5 wskazano przykład receptury z systemu Standox [18], jednego z czołowych partnerów przemysłu motoryzacyjnego dostarczającego również technologie cyfrowe do precyzyjnego dobrania koloru, jak również materiały lakiernicze.

Producent	Kod koloru producenta	Region
BMW	**B39**	**EUROPA**

Nazwa koloru producenta	Format daty	Typ	Informacja o wzorcu
MINERALGRAU	**2014-02-20**	**Perła**	

	Mix	Opis	gr (bezwgl)	gr (narast.)	Waga %
		Wytarować puszkę + mieszadło			
1	STBLUE 111	PERLWEISS	275,09	275,09	26,5
2	STBLUE 152	SCHWARZ	236,09	511,18	22,8
3	STBLUE 120	PERLBLAU GROB	193,29	704,47	18,7
4	STBLUE 112	PERLWEISS FEIN	84,53	789,00	8,2
5	STBLUE 190	SPEZIAL-ZUSATZ	38,09	827,09	3,7
6	STBLUE 191	TRANSPARENT	16,33	843,42	1,6
7	STBLUE 161	OXIDROT	13,31	856,73	1,3
8	STBLUE 110	EFFEKTWEISS	6,03	862,76	0,6
9	STBLUE 175	TUERKISBLAU *WYMIESZAĆ*	3,64	866,40	0,4
10	8520	STANDOBLUE VISCOSITY ADJUSTER SLOW 8520 *WYMIESZAĆ, GOTOWE DO UŻYCIA*	170,00	1036,40	16,4

Rys. 5. Przykładowa receptura lakieru perłowego pojazdu [18]

Trzecia grupa dotyczy zdefiniowania planu naprawy pojazdu nazywanego w likwidacji szkód „Protokołem szkody w pojeździe". W tej części procesu likwidacji szkody następuje kwalifikacja elementów do wymiany, naprawy, lakierowania, sprawdzenia i regulacji czy też pomiaru. Etap ten jest decydujący dla wysokości kosztów naprawy pojazdu. Wymaga on również identyfikowania rodzaju części pojazdu oraz nowego podejścia do napraw blacharsko-lakierniczych w celu wykorzystania technologii napraw niekonwencjonalnych, umożliwiających przywrócenie pojazdowi bezpieczeństwa. Możliwość kalkulacji kosztów takich napraw oferują współczesne systemy eksperckie, które stosują ubezpieczyciele oraz rzeczoznawcy. Przykładowy plan naprawy opracowany w systemie Audatex [4] przedstawiono na rysunku 6. W toku likwidacji szkód komunikacyjnych w pojazdach oględziny, podczas których wykonywany jest plan naprawy, odbywają się w warunkach terenowych, czyli w miejscu wskazanym przez poszkodowanego lub w warunkach warsztatowych. Bardzo dużą zaletą oględzin w warunkach warsztatowych jest możliwość skorzystania z jego

wyposażenia oraz częściowego demontażu elementów pojazdu pomocnego w ustaleniu zakresu uszkodzeń. Przykładowe zdjęcia z oględzin warsztatowych przedstawiono na rysunku 7. Podczas tych oględzin wykorzystano podnośnik umożliwiający przeprowadzenie inspekcji uszkodzeń od spodu pojazdu – układu wydechowego, podłogi bagażnika, ekranów termicznych oraz zdemontowanej z pojazdu okładziny zderzaka tylnego.

Audatex a Solera company	Protokół szkody w pojeździe nr 576E	Numer szkody 390/001

I. DANE POJAZDU

Właściciel pojazdu/Ubespieczający	Data szkody	Rodzaj ubespieczenia
, ,	2022-04-04	OC

Rodzaj pojazdu	Marka, model, typ pojazdu	Rok produkcji
Osobowy	MERCEDES-BENZ [03],C180 - C320 Lim. (od 05/'00 do 03/'07)(W203/S203) [26] [V][R][M],C180 - C320 Lim. (od 05/'00 do 03/'07)(W203/S203) [26] [V][R][M],	

Data I rejestracji	Numer nadwozia VIN	Przebieg: podany, odczytany, domyślny
2006-12-18	WDB2032071F90	km(Odczytany)

Silnik rodzaj	Silnik moc	Pojemność	Audatex kod	Import	Lakier
Inny		cm3	032646	b.d.	

Wyposażenie pojazdu

WYPOSAŻENIE CLASSIC [A6]	KLIMAT AUTOMAT KOMFO [F2]	SENSOR OPADU DESZCZU [G2]	OD A937./F865./R246. [G6]
ANTENA TELEFONU [H3]	TAPIC: TKANINA [J1]	URZĄDZENIE HOL [L9]	MOZLIWOSC PRZELAD [M1]
KIER SKÓR/DŹWIG BIEG [M2]	FILTR CZĄSTECZ STAŁ [O4]	NORMA SPALIN EURO 4 [O6]	AKUMULAT WZMOCNIONY [O7]
SYST NAWIGAC COMAND [O8]	SKRZ BIEG MECH 6 BIE [P4]	OPONA 195/65 R 15 H [R1]	OBRECZE 6 J X 15 [S1]
SYSTEM PARKTRONIK [V8]	MODEL 2007 [X5]	2-WARSTW-METALLIC [Y4]	WST LAKIER CZ WYBUD [Y7]
LAKIER BEZBAR TWARDY [Z1]			

Ogumienie producent:
Wysokość rzeźby bieżnika

Poz nr	Nazwa części	Typ operacji	[JC]	Rodzaj lak	NZS
1482	DRZWI PRZ P	E		LE	
1656	LIST OZD T R OKNA PP	E			
1694	LISTWA OZD DRZWI P P	E		LE1	
1724	FOLIA DRZWI PRZ P	E			
6981	PASKI OZDOBNE		1.0		
9973	JAZDA PRÓBNA		2.0		
1782	DRZWI T P		5.0	LI	
1782	DRZWI T P		2.0		
1994	LISTWA OZD DRZWI T P (ODTW. LAK. EL. Z TW.)			LI	
2208	OSLONA PROGU P (ODTW. LAK. EL. Z TW.)			LI	
3494	ELEM KOLANKOWY T P (ODNOWA LAKIERU)			LI	
0742	BLOTNIK PRZ P (LAK. WIERZCHNIE ST 2)			L	

Rys. 6. Protokół szkody w pojeździe [4]

Rys. 7. Oględziny podwozia pojazdu i okładziny zderzaka w warunkach warsztatowych (opracowanie własne)

Powyższe grupy wskazanych czynności dokumentowane są również fotografiami. Zarówno ilość, jak i rozdzielczość zdjęć regulowane są wewnętrznymi procedurami zakładu ubezpieczeń. Tymczasem wymagane widoki uszkodzeń pojazdu obejmują zwykle zdjęcia nadwozia po przekątnej oraz widoki szczegółowe postaci zaistniałych uszkodzeń. W praktyce szkodowej nie spotyka się pomiarów geometrycznych deformacji, lecz najczęściej są przystawione przymiary, które mogą służyć do skalowania zdjęć i ich późniejszego wykorzystania w celu weryfikacji okoliczności powstania szkody [2]. Przykładowe zdjęcia z przymiarami widoku boku nadwozia oraz widoku szczegółowego tylnej części nadkola błotnika tylnego zamieszczono na rysunku 8.

Rys. 8. Widok prawego boku nadwozia i strefy uszkodzeń nadkola z przymiarami (opracowanie własne)

3. DIAGNOZOWANIE POJAZDU PO NAPRAWIE

Badanie pojazdu w toku likwidacji szkody komunikacyjnej dotyczy nie tylko ustalenia zakresu uszkodzeń i w efekcie planu naprawy pojazdu, lecz także weryfikacji, czy został on prawidłowo naprawiony zgodnie z danymi zawartymi w „Protokole szkody w pojeździe”. To właśnie za prawidłowo przeprowadzoną naprawę pojazdu według zakresu uszkodzeń, zdefiniowanego przez ubezpieczyciela lub eksperta działającego w jego imieniu, *de facto* wypłacane jest odszkodowanie. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że rolą każdej naprawy jest przywrócenie pojazdowi stanu, który będzie zapewniał bezpieczeństwo. Weryfikacja ta odbywa się podczas tak zwanych oględzin ponaprawczych pojazdu wykonywanych w szczególności w przypadkach kwalifikowania ele-

mentów do wymiany, których deformacje wskazują na możliwość ich odbudowy bez zachowania rygorów technologicznych producenta pojazdu.

Pierwszą z proponowanych przez autorów procedur umożliwiających weryfikację naprawy są oględziny uszkodzonych wcześniej stref, które podlegały naprawie w ramach likwidowanej szkody. W toku tego badania autorzy wskazują na pomiary szczelin między pasowanymi elementami, np. drzwi i pokryw. Odległości między elementami powinny być te same zarówno w badaniu statycznym, jak i po wymuszeniu naprężeń nadwozia przez uniesienie jednego z kół pojazdu, podczas gdy pozostałe spoczywają na podłożu. Pęknięcia powłoki lakierowej na miejscu łączeń elementów oraz plastycznych wypełnień również wskazują na nieprawidłową naprawę nadwozia pojazdu. Ujawnienie po wymuszeniu ww. naprężeń niepolakierowanych części elementów powstałych od przesunięcia punktów ich mocowania to kolejna przesłanka do wnioskowania o nieprawidłowej naprawie nadwozia.

Druga procedura obejmuje pomiary grubości powłoki lakierowej nadwozia w strefach naprawy. Pomiary powinny odbywać się w tych strefach nadwozia, gdzie plan naprawy pojazdu obejmował wymianę i naprawę elementów. Dzięki pomiarom można zweryfikować, czy naprawa została przeprowadzona zgodnie z planem naprawy [8], w szczególności – czy wymieniono elementy na nowe.

Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru poszycia nadwozia elementu w trzech miejscach za pomocą miernika GL – PRO o rozdzielczości dla blach stalowych 1 μm [13], wskazujące na naprawę z użyciem masy szpachlowej, a nie wymianę elementu na nowy. W zależności od lat produkcji oraz marki pojazdu nienaprawiane wcześniej blacharsko-lakierniczo elementy nadwozia pojazdu podczas pomiaru uzyskują wartość w przedziale od 85 μm do 135 μm [8].

Rys. 9. Wartości pomiaru grubości powłoki lakierowej elementu nadwozia pojazdu (opracowanie własne)

W przypadku rozległych uszkodzeń nadwozia wymagających naprawy z użyciem ramy pomiarowo-naprawczej zaleca się stosowanie trzeciej procedury w warunkach warsztatowych. Wykorzystuje ona możliwość zastosowania urzą-

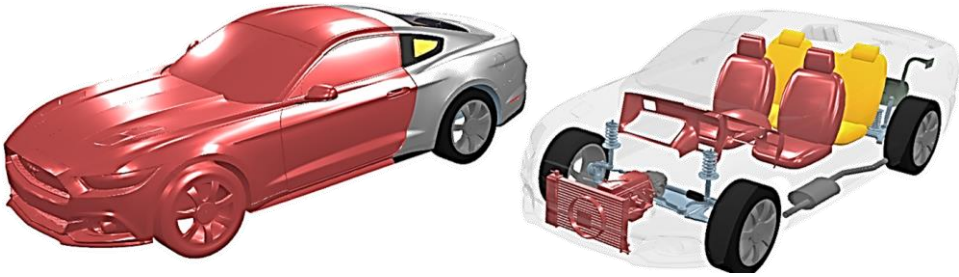
dzeń do pomiaru punktów bazowych płyty podłogowej samochodu [14] i zweryfikowania, czy ich ustawienie zostało przywrócone podczas naprawy oraz geometrii bryły nadwozia. Jednym z takich systemów jest Herkules Compact+, który umożliwia jednoczesny pomiar ośmiu punktów pomiarowych i stanowi akcesorium do ram naprawczych tej firmy lub też może być stosowany samodzielnie [10]. Przyrząd ten zaprezentowano na rysunku 10, a jego zakres pomiarowy umożliwia zastosowanie do nadwozi samochodów osobowych i dostawczych.

Dokładność pomiaru osiąga ± 1 mm, przy podziałce 1 mm.

Rys. 10. Mechaniczny systemem pomiarowy do kontroli wymiarów karoserii samochodów [10]

4. NARZĘDZIA INFORMATYCZNE W USTALANIU KOSZTU NAPRAWY POWYPADKOWEJ POJAZDU

W rzeczoznawstwie samochodowym oraz w likwidacji szkód komunikacyjnych do kalkulowania kosztów napraw pojazdów zawierających dane producenta w zakresie nakładów czasu technologicznego: wymian elementów nadwozia w obszarze blacharstwa, wymian elementów w części mechanicznej oraz prac lakierniczych, cen części zamiennych różnego rodzaju jakości oraz materiałów lakierniczych stosuje się systemy Audatex [4], DAT [6] i Eurotax [7]. W pracy wykorzystano możliwości obliczeniowe systemu Audatex, na rysunku 11 zamieszczono okno dialogowe programu w trybie wyboru stref uszkodzeń.



Rys. 11. AudaNet – okno dialogowe wyboru stref uszkodzeń do kalkulacji naprawy [4]

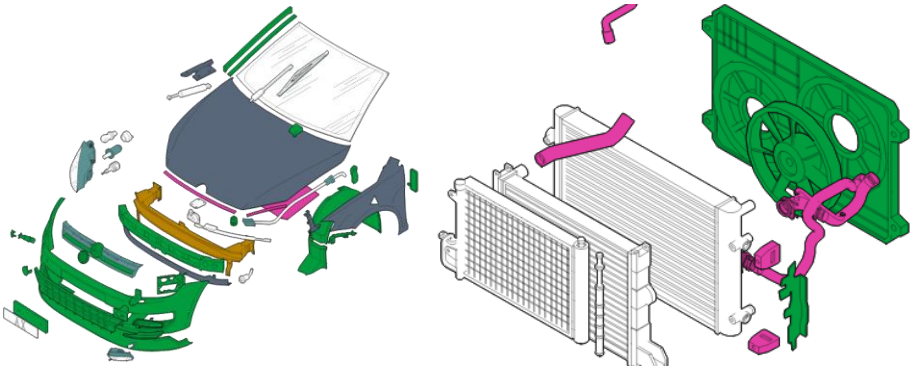
Użyte narzędzie informatyczne zapewniło autorom obliczenia z wykorzystaniem podanych wcześniej części rodzaju O, Q, P oraz metody lakierowania AZT [3]. Zgodnie z tą metodą określa się czas naprawy i koszty materiałów na podstawie analizy zewnętrznych powierzchni elementów nadwozia pojazdu, bez względu na producenta samochodu i materiałów lakierniczych, w tym wielowarstwowych. Program ten umożliwia również operatorowi stosowanie alternatywnych napraw w miejsce konwencjonalnych. Na przykład napraw panelowych, wymian i napraw częściowych, *Smart Repair* (ang. *Small and Medium Area Repair Technologies*), np. Spot (ang. *repair of an area of less than one panel in size*), czyli metody lakierowania miejscowego w celu usunięcia otarć powłoki lakierowej, oraz PDR (ang. *Paintless Dent Repair*), tj. metody naprawy blacharskiej bez lakierowania [14, 20].

5. WYBÓR WARIANTU ROZLICZENIA SZKODY

Obliczenia kalkulacyjne przeprowadzono na podstawie studium przypadku szkody komunikacyjnej w samochodzie Volkswagen Golf (5G) obejmującej do wymiany (E) oraz do naprawy (I):

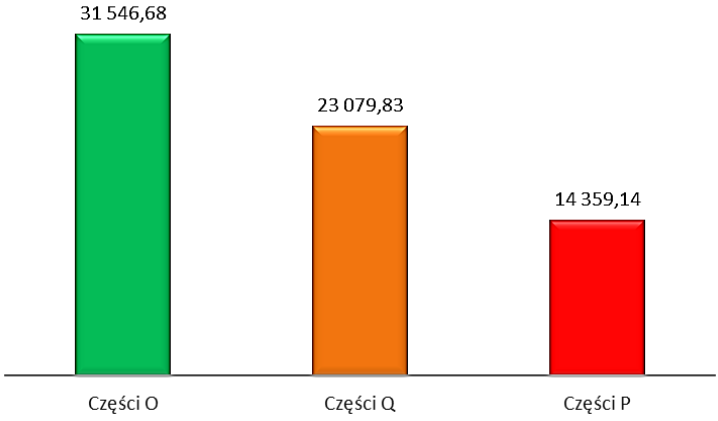
- okładzinę zderzaka przedniego ze wzmocnieniem – E;
- kratę wlotu w zderzaku przednim – E;
- reflektory przednie i przeciwmgłowe – E;
- błotniki przednie – E;
- pokrywę komory silnikowej – I;
- szybę czołową – E;
- chłodnice klimatyzacji i płynu chłodzącego – E;
- drzwi przednie prawe i lewe – wyrównanie koloru (cieniowanie).

Koszty naprawy obliczano wariantowo dla trzech rodzajów jakości części O, Q, P z uwzględnieniem jednorazowych części technologicznych oraz zabezpieczenia antykorozyjnego elementów. Na rysunku 12 zamieszczono okna dialogowe wyboru elementów programu kalkulacyjnego Audatex [4].



Rys. 12. AudaNet – okno dialogowe w trybie wyboru operacji naprawy/wymiany [4]

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano następujące koszty naprawy samochodu Volkswagen: 31 546,68 zł dla zastosowanych części oryginalnych rodzaju O z logo producenta Volkswagen AG, 23 546,68 zł dla zastosowanych części oryginalnych rodzaju Q dostawców alternatywnych oraz 14 359,14 zł dla zastosowanych części porównywalnej jakości dostawców alternatywnych rodzaju P. Na rysunku 13 przedstawiono ww. koszty naprawy brutto PLN w powyższych wariantach zastosowanych części zamiennych.



Rys. 13. Koszty naprawy w PLN brutto dla zastosowanych części O, Q, P (opracowanie własne)

6. WNIOSKI I REKOMENDACJE

Przeprowadzona analiza z wykorzystaniem rezultatów badania rynku w zakresie stawek roboczogodziny oraz zasobów bazy danych części zamiennych rodzajów O, Q, P systemu Audatex [4, 5] wykazała, że najlepsze rezultaty redukcji kosztu naprawy pod względem ekonomicznym uzyskano dla wariantu z częściami zamiennymi rodzaju P. Nie są to jednak części oryginalne. Dlatego w toku

likwidacji szkody i restytucji w procesie odnowy pojazdu pojawia się problem przywrócenia pojazdu do stanu sprzed szkody. Jak wynika z praktyki, właśnie na tym tle dochodzi do licznych sporów sądowych wymagających ponownych obliczeń kosztów naprawy pojazdu, która przywracałaby mu bezpieczeństwo i walory estetyczne, ale również gwarantowałaby przywrócenie go do stanu poprzedniego, sprzed zaistnienia szkody. Stąd też niezależnie od doboru właściwej technologii i ustalenia zakresu uszkodzeń w planie naprawy pojazdu istotne jest również identyfikowanie rodzaju części, które uległy uszkodzeniu (O, Q, P).

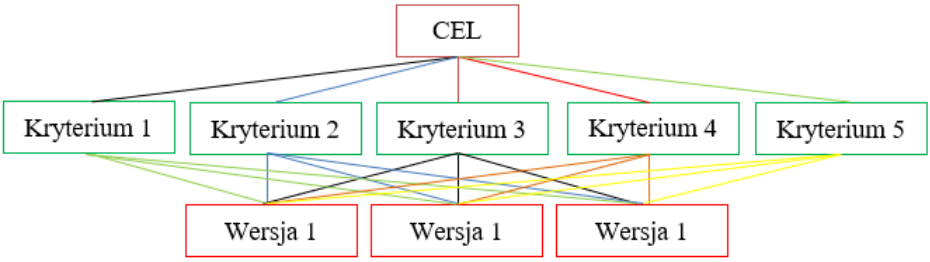
Przegląd raportu tak zwanej optymalizacji części w module AudaOptima systemu Audatex [4, 5], dzięki któremu można zautomatyzować wprowadzenie występujących w sprzedaży części niezależnych dostawców w miejsce części oryginalnych z logo producenta pojazdu, wskazuje, że dla wariantu reprezentującego koszty 23 546,68 zł brutto uzyskano kompletację pojazdu Volkswagen najbardziej zbliżoną do fabrycznej. W wariancie tym części oryginalne z logo producenta pojazdu rodzaju O (okładzina zderzaka, reflektory główne i przeciwmgłowe, szyba czołowa i komplet chłodnic) zastąpione są częściami oryginalnymi znanych dostawców części samochodowych na pierwszy montaż takich pojazdów, jak Valeo, Hella, Magneti Marelli. Kompletacja ta gwarantuje przywrócenie bezpieczeństwa po naprawie. Dla towarzystw ubezpieczeniowych poza omawianym aspektem technicznym naprawy pojazdu w procesie restytucji przedmiotu szkody jest również istotna ocena tego procesu przez poszkodowanych i klientów. Dochodzą więc ważne z tego punktu widzenia dodatkowe elementy oceny poszkodowanych, dotyczące łatwości zgłoszenia szkody i komunikacji z ubezpieczycielem, czasu likwidacji szkody, satysfakcji klienta z realizacji procesu odnowy pojazdu po szkodzie komunikacyjnej oraz w efekcie – reputacji zakładu ubezpieczeń, który likwidował szkodę w pojeździe.

W tabeli 1 zestawiono propozycje autorów w zakresie kryteriów oceny do wykorzystania w dalszych analizach za pomocą metod wielokryterialnych.

Tab. 1. Kryteria oceny w procesie odnowy pojazdów uszkodzonych w zdarzeniach drogowych (opracowanie własne)

Klient Towarzystwa Ubezpieczeniowego	**Towarzystwo Ubezpieczeniowe**
Kanały obsługi szkody Osobiste w TU Telefoniczne – Callcenter Internetowe	Kanały obsługi szkody Internetowe Telefoniczne – Callcenter Osobiste w TU
Czas naprawy/likwidacji szkody Najkrótszy	Czas naprawy/likwidacji szkody Najkrótszy
Wartość średnia kosztu naprawy Najwyższa	Wartość średnia kosztu naprawy Najniższa
Rodzaj użytych części do naprawy O – oryginalne z logo producenta pojazdu Q – oryginalne z logo producenta części P – porównywalnej jakości do oryginalnych	Rodzaj użytych części do naprawy P – porównywalnej jakości do oryginalnych Q – oryginalne z logo producenta części O – oryginalne z logo producenta pojazdu
Satysfakcja klienta	Reputacja

Należy wskazać, że proponowane przez autorów pracy podejście do procesu odnowy pojazdów w szkodach komunikacyjnych wsparte metodami wielokryterialnymi ma potencjał aplikacyjny. Możliwe do zastosowania mogłyby stać się np.: metody Promethee, sztuczne sieci neuronowe czy metoda AHP (ang. *Analytic Hierarchy Process*) – szeroko stosowana w różnych obszarach gospodarki i organizacjach, gdy konieczne jest podjęcie optymalnej decyzji. Metoda ta została opracowana przez Saaty'ego [16]. Ułatwia ona optymalny wybór rozwiązania w przypadku wielu kryteriów mających na nią wpływ dzięki zastosowaniu hierarchicznej struktury na trzech poziomach ważności działania decydenta. Pierwszy poziom obejmuje zdefiniowany cel działania, którego osiągniecie mierzone jest na poziomie drugim kryteriów oceny poprzez wybór optymalnej decyzji wynikającej z badania na poziomie trzecim. Tego rodzaju schemat struktury hierarchicznej drzewa decyzyjnego w podziale na trzy poziomy analizy zawarto na rysunku 14.



Rys. 14. Przykładowa struktura hierarchiczna zadania (opracowanie własne)

Optymalizowanie procesu restytucji w procesie odnowy pojazdów samochodowych uczestniczących w zdarzeniach drogowych jest więc zagadnieniem złożonym, wymagającym dalszego doskonalenia i rozwoju za pomocą metod umożliwiających podjęcie decyzji odszkodowawczej najlepiej ocenianej przez klienta towarzystwa ubezpieczeniowego czy też poszkodowanego, ale jednocześnie najkorzystniejszej z punktu widzenia interesu zakładu ubezpieczeń.

LITERATURA

[1] Aleksandrowicz I., Aleksandrowicz P. Badania własne w zakresie ustalenia uśrednionych stawek roboczogodziny napraw powypadkowych dla województwa kujawsko-pomorskiego warsztatów nieautoryzowanych w II kwartale 2023 r.
[2] Aleksandrowicz P., 2016. Inżynieria powypadkowa w weryfikacji roszczeń odszkodowawczych. Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz.
[3] Allianz Zentrum für Technik, 2020. Lakierowanie według AZT. AZT Automotive GmbH, Ismaning, Niemcy.

[4] AudaNet. Program do kalkulacji kosztów napraw powypadkowych, https://www.audanet.pl (dostęp: 05.05.2024).
[5] AudaVIN i AudaOptima. Programy zintegrowane z systemem AudaNet, https://www.audanet.pl (dostęp: 03.05.2024).
[6] DAT. Program do kalkulacji kosztów napraw powypadkowych, https://www.datgroup.com/pl (dostęp: 05.05.2024).
[7] EUROTAX. Program do kalkulacji kosztów napraw powypadkowych, https://eurotax.pl (dostęp: 05.05.2024).
[8] Gonera J., Michalski R., 2011. Kompleksowa ocena stanu technicznego nadwozia samochodu. BEL Studio sp. z o.o., Warszawa.
[9] Hebda M., 2005. Eksploatacja samochodów. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
[10] Herkules Compact +, https://sklep.herkules-sc.pl (dostęp: 04.05.2024).
[11] Jednolity system informowania o jakości części. Audanet, https://www.audanet.pl/PL/docs/JAKOSCI_CZESCI.pdf (dostęp: 30.04.2024).
[12] Krupa T., Kulińska E., 2015. Likwidacja szkód z ubezpieczeń komunikacyjnych – podstawowe problemy. KNF, Warszawa.
[13] Miernik lakieru GL-PRO-2-FAZ, https://www.prodig-tech.pl/ (dostęp: 03.05.2024).
[14] Raatz B., 2009. Blacharstwo i naprawy powypadkowe samochodów. TROTON, Ząbrowo.
[15] Rzeczoznawca samochodowy, 2016. Instrukcja określania wartości pojazdów 1/2026. SRTSiRD, Warszawa.
[16] Saaty T., 1996. The Analytic Hierarchy Process, Planing Priority Setting, Resource Allocation. PA RWS Publications, Pittsburgh.
[17] Sklorz A., 2021. Forum Komisji Nadzoru Finansowego. Auto-Elements.
[18] Standox Polska Axalta Coating Systems Poland Sp. z o.o., https://www.standox.com/pl/pl_PL/products/passenger-cars.html (dostęp: 01.05.2024).
[19] Uchwała nr 414/2024 Komisji Nadzoru Finansowego z dnia 16 grudnia 2014 r. w sprawie wydania Wytycznych dotyczących likwidacji szkód z ubezpieczeń komunikacyjnych.
[20] Wielgoławski W., 2023. Pomiędzy blacharstwem, a lakiernictwem. RG MEDIA, Białe Błota.

ZASTOSOWANIE METOD NIEDETERMINISTYCZNYCH DO ANALIZY EFEKTYWNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA AUTOBUSÓW MIEJSKICH

Magdalena Czyżewska[1], Mirosław Szubartowski[2], Klaudiusz Migawa[1*], Andrzej Neubauer[3]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Management Business and Service, ul. Jagiellońska 103, 85-027 Bydgoszcz
[3] Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, Wydział Mechaniczny, Plac Wolności 1, 87-800 Włocławek

Streszczenie. W publikacji przedstawiono problematykę sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych. Opracowany model umożliwia analizę jakości funkcjonowania systemu transportowego z uwzględnieniem wybranych kryteriów: gotowości obiektów technicznych, dochodu jednostkowego oraz ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych.

Słowa kluczowe: komunikacja miejska, metody niedeterministyczne, efektywność, bezpieczeństwo

1. WPROWADZENIE

W pracy przedstawiono problematykę sterowania procesem eksploatacji obiektów technicznych, realizowanym w systemie użytkowania autobusów miejskich. Działanie złożonych systemów eksploatacji obiektów technicznych powinno opierać się na wyborze racjonalnych decyzji sterujących. W tym celu należy zastosować odpowiednie metody naukowe, aby wybór realizowanego wariantu decyzyjnego nie był oparty tylko na doświadczeniach decydentów systemu. Z uwagi na złożoność modelowanych procesów oraz systemów technicznych należy zastosować zaawansowane modele i narzędzia matematyczne, co zapewni prawidłowość realizacji badań, jak i opracowanie i analizę wyników. Stosowanie odpowiednich metod matematycznych pozwala na racjonalny wybór decyzji sterujących, które zapewnią efektywną realizację zadań powierzonych systemowi technicznemu. Modele z zastosowaniem kryteriów oceny, takich jak niezawodność oraz gotowość, są prezentowane w wielu publikacjach [np.: 3–5, 8]. Związane jest to z zagadnieniami dotyczącymi zapewnienia optymalnego sterowania zarówno podsystemem wykonawczym, jak i podsystemem utrzymania obiektów technicznych. Jednym ze sposobów analizy i oceny prawidłowej realizacji przydzielonego zadania jest wyznaczenie wartości charakterystyk związanych z bezpieczeństwem oraz efektywnością badanego systemu eksploatacji obiektów technicznych. W pracy [7] opisano semi-markowski model decyzyjny sterowania gotowością, zgodnie z którym wybór

[*] adres korespondencyjny: klaudiusz.migawa@pbs.edu.pl

optymalnej strategii został zrealizowany za pomocą algorytmu genetycznego. Z kolei w pracy [6] przedstawiono semi-markowski model analizy i oceny ryzyka w systemie transportowym, według którego do wyboru strategii suboptymalnych zastosowano dwa wielokryterialne algorytmy – genetyczny i symulowanego wyżarzania. Algorytmy te należą do metod niedeterministycznych, które umożliwiają przedstawianie otrzymanych wyników z zastosowaniem frontu Pareto. Również w pracy [1] opisano metodę sterowania ryzykiem i bezpieczeństwem systemu transportu morskiego z zastosowaniem algorytmu Howarda oraz decyzyjnych procesów semi-Markowa. Wspomniane metody umożliwiają uzyskanie rozwiązań optymalnych lub suboptymalnych z zastosowaniem modeli dotyczących optymalizacji wielokryterialnej.

W prezentowanej publikacji przedstawiono wyniki wyznaczenia suboptymalnych strategii sterowania procesem eksploatacji autobusów miejskich z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa, algorytmu genetycznego oraz frontu Pareto. Kryteriami analizy funkcjonowania (realizacji przydzielonych zadań) systemu eksploatacji autobusów miejskich są: gotowość obiektu technicznego (efektywność eksploatacyjno-techniczna), dochód jednostkowy (efektywność ekonomiczna) oraz ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych (bezpieczeństwo).

2. DECYZYJNY MODEL WYZNACZANIA STRATEGII STEROWANIA PROCESEM EKSPLOATACJI

2.1. Stany modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej

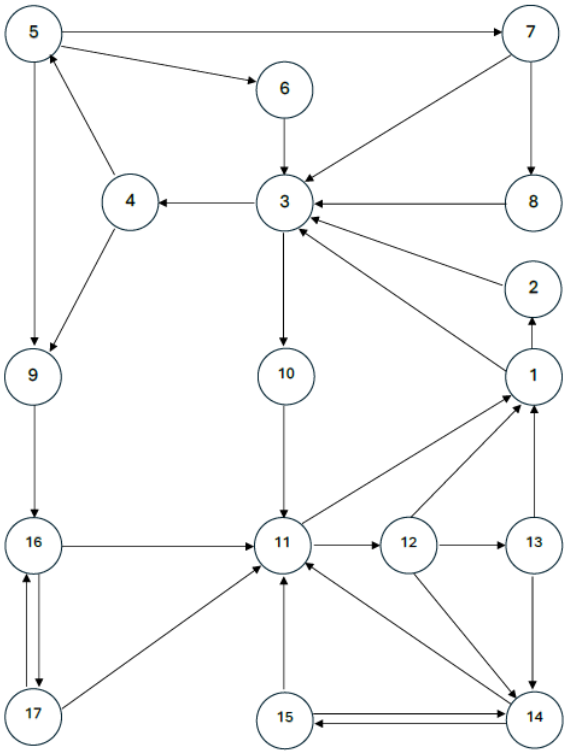
Do budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji najczęściej wykorzystywane są procesy stochastyczne. Spowodowane jest to losowym charakterem czynników, które wpływają na przebieg procesu eksploatacji obiektów technicznych, np. środków transportu miejskiego. Bardzo częste zastosowanie w modelowaniu procesu eksploatacji obiektów technicznych mają procesy Markowa oraz semi-Markowa. Z kolei w przypadku zagadnień, które związane są ze sterowaniem złożonymi procesami eksploatacji, wykorzystywane są decyzyjne procesy Markowa oraz semi-Markowa.

Obiektem analizy rozpatrywanym w tej pracy jest model procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej. Obiekt ten może znajdować się w jednym z siedemnastu rozpatrywanych stanów matematycznego modelu tego procesu:

- stan 1 – stan postoju na placu zajezdni autobusowej,
- stan 2 – stan naprawy na placu zajezdni autobusowej,
- stan 3 – stan realizacji zadania na trasie,
- stan 4 – stan zgłoszenia uszkodzenia obiektu technicznego i oczekiwania na przyjazd Pogotowania Technicznego,
- stan 5 – stan diagnozowania przez Pogotowie Techniczne,
- stan 6 – stan naprawy przez Pogotowie Techniczne bez utraty kursu,

- stan 7 – stan naprawy przez Pogotowie Techniczne z utratą kursu,
- stan 8 – stan oczekiwania na realizację zadania po naprawie przez Pogotowie Techniczne,
- stan 9 – stan zjazdu awaryjnego (zjazd samodzielny lub holowanie),
- stan 10 – stan oczekiwania na wjazd na stanowiska stacji obsługi,
- stan 11 – stan uzupełniania paliwa,
- stan 12 – stan codziennej obsługi technicznej,
- stan 13 – stan okresowej obsługi technicznej,
- stan 14 – stan naprawy w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia podczas codziennej lub okresowej obsługi technicznej,
- stan 15 – stan diagnozowania po naprawie w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia podczas codziennej lub okresowej obsługi technicznej,
- stan 16 – stan naprawy w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na trasie,
- stan 17 – stan diagnozowania po naprawie w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na trasie.

Na rysunku 1 przedstawiono graf skierowany odwzorowania zmian stanów modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej.



Rys. 1. Graf skierowany odwzorowania zmian stanów modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej z przestrzenią stanów S = {1, 2, …, 17} (opracowanie własne)

2.2. Model matematyczny procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej

Dla grafu skierowanego przedstawionego na rysunku 1 zbudowano model matematyczny. Jednocześnie przyjęto, że jest to proces stochastyczny X(t). Na podstawie teorii procesów semi-Markowa opracowano 17-stanowy model procesu eksploatacji transportu autobusowego z przestrzenią stanów S = {1, 2, …, 17}. Przyjęto założenie, że jeśli X(t) = i, to rozpatrywany obiekt znajduje się w stanie i w chwili t. Macierz prawdopodobieństw przejść włożonego w proces semi-markowski łańcucha Markowa dla rozpatrywanego modelu ma postać:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{1,2} & p_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{2,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{3,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{4,5} & 0 & 0 & 0 & p_{4,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,6} & p_{5,7} & 0 & p_{5,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{6,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{7,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{8,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{9,16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{10,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{12,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{12,13} & p_{12,14} & 0 & 0 & 0 \\ p_{13,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{13,14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14,11} & 0 & 0 & 0 & p_{14,15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{15,11} & 0 & 0 & p_{15,14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{16,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{16,17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17,16} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$p_{i,j}$, i, j = 1, 2, …, 17 – prawdopodobieństwo przejścia ze stanu i do stanu j.

W tabeli 1 przedstawiono możliwe decyzje podejmowane w stanach decyzyjnych opracowanego modelu procesu eksploatacji, natomiast w tabeli 2 – wartości średnie czasów przebywania oraz jednostkowe dochody w stanach analizowanego modelu w zależności od zastosowanej decyzji.

Tab. 1. Decyzje w stanach decyzyjnych analizowanego modelu procesu eksploatacji (opracowanie własne)

Stan procesu	**Decyzja „0”**	**Decyzja „1”**
2	Naprawa na placu zajezdni autobusowej – „normalna”	Naprawa na placu zajezdni autobusowej – „intensywna”
3	Trasa „lekkie” warunki realizacji zadania przewozowego	Trasa „trudne” warunki realizacji zadania przewozowego
5	Diagnozowanie przez PT – „normalne”	Diagnozowanie przez PT – „intensywne”
6	Naprawa przez PT bez utraty kursu – „normalna”	Naprawa przez PT bez utraty kursu – „intensywna”

cd. tab. 1

7	Naprawa przez PT z utratą kursu – „normalna”	Naprawa przez PT z utratą kursu – „intensywna”
9	Zjazd awaryjny – samodzielny	Zjazd awaryjny – holowanie
12	Obsługiwanie OC – „normalne”	Obsługiwanie OC – „intensywne”
13	Obsługiwanie OT – „normalne”	Obsługiwanie OT – „intensywne”
14	Naprawa w SO – „normalna”	Naprawa w SO – „intensywna”
15	Diagnozowanie po naprawie w SO – „normalne”	Diagnozowanie po naprawie w SO – „intensywne”
16	Naprawa w SO – „normalna”	Naprawa w SO – „intensywna”
17	Diagnozowanie po naprawie w SO – „normalne”	Diagnozowanie po naprawie w SO – „intensywne”

Tab. 2. Średnie czasy oraz jednostkowe dochody w stanach analizowanego modelu procesu eksploatacji w zależności od zastosowanej decyzji (opracowanie własne)

Stan procesu	$ET_i^{(0)}$ **[h]**	$ET_I^{(1)}$ **[h]**	$z_i^{(0)}$ **[PLN na h]**	$z_i^{(1)}$ **[PLN na h]**
1	5,659	5,659	-6,77	-6,77
2	0,280	0,224	-68,08	-87,21
3	8,852	7,967	28,44	33,56
4	0,053	0,053	-24,66	-24,66
5	0,213	0,202	-54,98	-71,47
6	0,070	0,063	-69,78	-97,69
7	0,545	0,436	-145,87	-176,43
8	0,442	0,442	-68,66	-68,66
9	0,712	0,712	-275,70	-275,70
10	1,797	1,797	-8,02	-8,02
11	0,096	0,096	-23,09	-23,09
12	0,122	0,092	-214,78	-253,04
13	3,885	2,914	-211,21	-235,44
14	3,359	2,687	-117,08	-136,21
15	0,398	0,359	-99,17	-128,09
16	3,359	2,687	-161,08	-180,21
17	0,398	0,359	-143,17	-172,09

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych łańcucha Markowa należy rozwiązać macierzowy układ równań:

$$P^T \cdot \Pi = \Pi \tag{2}$$

gdzie:

$$P^T = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,1} & p_{12,1} & p_{13,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
p_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
p_{1,3} & p_{2,3} & 0 & 0 & 0 & p_{6,3} & p_{7,3} & p_{8,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & p_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & p_{4,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & p_{5,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{7,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & p_{4,9} & p_{5,9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & p_{3,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{10,11} & 0 & 0 & 0 & p_{14,11} & p_{15,11} & p_{16,11} & p_{17,11} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{11,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{12,13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{12,14} & p_{13,14} & 0 & p_{15,14} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14,15} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{9,16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{17,16} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{16,17} & 0
\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \\ \pi_6 \\ \pi_7 \\ \pi_8 \\ \pi_9 \\ \pi_{10} \\ \pi_{11} \\ \pi_{12} \\ \pi_{13} \\ \pi_{14} \\ \pi_{15} \\ \pi_{16} \\ \pi_{17} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Macierzowy układ równań (2) można zastąpić układem równań liniowych (6), w którym w celu otrzymania jednoznacznego rozwiązania wprowadzono warunek normalizacyjny (5):

$$\sum_i \pi_i = 1 \tag{5}$$

wówczas wyznaczony układ równań liniowych (6) ma postać:

$$\begin{cases} p_{11,1} \cdot \pi_{11} + p_{12,1} \cdot \pi_{12} + p_{13,1} \cdot \pi_{13} = \pi_1 \\ p_{1,2} \cdot \pi_1 = \pi_2 \\ p_{1,3} \cdot \pi_1 + p_{2,3} \cdot \pi_2 + p_{6,3} \cdot \pi_6 + p_{7,3} \cdot \pi_7 + p_{8,3} \cdot \pi_8 = \pi_3 \\ p_{3,4} \cdot \pi_3 = \pi_4 \\ p_{4,5} \cdot \pi_4 = \pi_5 \\ p_{5,6} \cdot \pi_5 = \pi_6 \\ p_{5,7} \cdot \pi_5 = \pi_7 \\ p_{7,8} \cdot \pi_7 = \pi_8 \\ p_{4,9} \cdot \pi_4 + p_{5,9} \cdot \pi_5 = \pi_9 \\ p_{3,10} \cdot \pi_3 = \pi_{10} \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_7 + \pi_8 + \pi_9 + \pi_{10} + \\ +\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{13} + \pi_{14} + \pi_{15} + \pi_{16} + \pi_{17} = 1 \\ p_{11,12} \cdot \pi_{11} = \pi_{12} \\ p_{12,13} \cdot \pi_{12} = \pi_{13} \\ p_{12,14} \cdot \pi_{12} + p_{13,14} \cdot \pi_{13} + p_{15,14} \cdot \pi_{15} = \pi_{14} \\ p_{14,15} \cdot \pi_{14} = \pi_{15} \\ p_{9,16} \cdot \pi_9 + p_{17,16} \cdot \pi_{17} = \pi_{16} \\ p_{16,17} \cdot \pi_{16} = \pi_{17} \end{cases} \tag{6}$$

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń otrzymano wzory opisujące prawdopodobieństwa graniczne włożonego w proces semi-markowski łańcucha Markowa:

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{A}{M} \\ \pi_2 = p_{1,2} \cdot \frac{A}{M} \\ \pi_3 = \frac{B}{M} \\ \pi_4 = p_{3,4} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_5 = p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_6 = p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot p_{5,6} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_7 = p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot p_{5,7} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_8 = p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot p_{5,7} \cdot p_{7,8} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_9 = (p_{4,9} \cdot p_{3,4} + p_{5,9} \cdot p_{4,5} \cdot p_{3,4}) \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_{10} = p_{3,10} \cdot \frac{B}{M} \\ \pi_{11} = \frac{1}{M} \\ \pi_{12} = \frac{p_{11,12}}{M} \\ \pi_{13} = \frac{p_{11,12} \cdot p_{12,13}}{M} \\ \pi_{14} = \frac{p_{11,12} \cdot (p_{12,14} + p_{13,14} \cdot p_{12,13})}{M \cdot (1 - p_{14,15} \cdot p_{15,14})} \\ \pi_{15} = \frac{p_{14,15} \cdot p_{11,12} \cdot (p_{12,14} + p_{13,14} \cdot p_{12,13})}{M \cdot (1 - p_{14,15} \cdot p_{15,14})} \\ \pi_{16} = \frac{B \cdot p_{9,16} \cdot (p_{4,9} \cdot p_{3,4} + p_{5,9} \cdot p_{4,5} \cdot p_{3,4})}{M \cdot (1 - p_{16,17} \cdot p_{17,16})} \\ \pi_{17} = \frac{B \cdot p_{16,17} \cdot p_{9,16} \cdot (p_{4,9} \cdot p_{3,4} + p_{5,9} \cdot p_{4,5} \cdot p_{3,4})}{M \cdot (1 - p_{16,17} \cdot p_{17,16})} \end{cases} \tag{7}$$

gdzie:

$$M = A \cdot (1 + p_{1,2}) +$$
$$+ B \cdot \left(1 + p_{3,4} \cdot (1 + p_{4,9}) + p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot (p_{5,6} + p_{5,7} \cdot (1 + p_{7,8}) + p_{5,9}\right) + p_{3,10}) +$$
$$+1 + p_{11,12} \cdot \left(1 + p_{12,13}\right) +$$
$$+\left(1 + p_{14,15}\right) \cdot \left(\frac{p_{11,12} \cdot \left(p_{12,14} + p_{13,14} \cdot p_{12,13}\right)}{1 - p_{15,14} \cdot p_{14,15}}\right) +$$
$$+(1 + p_{16,17}) \cdot \left(\frac{B \cdot (p_{4,9} \cdot p_{3,4} + p_{5,9} \cdot p_{4,5} \cdot p_{3,4}}{1 - p_{17,16} \cdot p_{16,17}}\right)$$

$$A = p_{11,1} + p_{11,12} \cdot (p_{12,1} + p_{13,1} \cdot p_{12,13})$$

$$B = \frac{m_1 \cdot (p_{1,3} + p_{1,2} \cdot p_{2,3})}{1 - p_{4,5} \cdot p_{3,4} \cdot (p_{5,6} + p_{2,3} \cdot p_{5,7} + p_{8,3} \cdot p_{5,7} \cdot p_{7,8})}$$

3. WYZNACZENIE FUNKCJI KRYTERIALNYCH

W publikacji opracowano semi-markowski model analizy efektywności i ryzyka funkcjonowania systemu eksploatacji autobusów miejskich. Rozważany jest 17-stanowy proces semi-Markowa X(t) z przestrzenią stanów S = {1, 2, …, 17}. Przez z_i, i = 1, 2, …, 17 oznacza się dochód/koszt jednostkowy przypadający na jednostkę czasu dla stanu i. W pracy przyjęto, że $z_3 > 0$, $z_i < 0$ dla i = 1, 2, 4, …, 17. Zatem jeżeli obiekt techniczny znajduje się w stanie 3, to generowany jest dochód, natomiast jeżeli obiekt techniczny znajduje się w pozostałych stanach, generowane są koszty.

W opracowanym modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich do zbioru stanów gotowości należą:

- stan 1 – stan postoju na placu zajezdni autobusowej,
- stan 3 – stan realizacji zadania na trasie,
- stan 8 – stan oczekiwania na realizację zadania po naprawie przez Pogotowie Techniczne,

natomiast do zbioru stanów niepożądanych, w których generowane są dodatkowe koszty dotyczące nieplanowanych działań powodujących zakłócenie realizacji przydzielonych zadań przewozowych w systemie eksploatacji autobusów miejskich, należą:

- stan 2 – stan naprawy na placu zajezdni autobusowej,
- stan 4 – stan zgłoszenia uszkodzenia obiektu technicznego i oczekiwania na przyjazd Pogotowania Technicznego,
- stan 5 – stan diagnozowania przez Pogotowie Techniczne,
- stan 6 – stan naprawy przez Pogotowie Techniczne bez utraty kursu,
- stan 7 – stan naprawy przez Pogotowie Techniczne z utratą kursu,
- stan 9 – stan zjazdu awaryjnego (zjazd samodzielny lub holowanie),
- stan 14 – stan naprawy w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia podczas codziennej lub okresowej obsługi technicznej,

- stan 15 – stan diagnozowania po naprawie w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia podczas codziennej lub okresowej obsługi technicznej,
- stan 16 – stan naprawy w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na trasie,
- stan 17 – stan diagnozowania po naprawie w stacji obsługi po wykryciu uszkodzenia na trasie.

Funkcje kryterialne zastosowane do analizy funkcjonowania badanego systemu transportu miejskiego zostały wyznaczone na podstawie twierdzenia granicznego dla procesów semi-Markowa [2], wówczas dla rozpatrywanego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich:

1) funkcja kryterialna opisująca dochód generowany w jednostce czasu w [PLN na h] przedstawiona jest wzorem:

$$Z^{OT} = \frac{\pi_1 \cdot ET_1 \cdot z_1 + \pi_2 \cdot ET_2 \cdot z_2 + \pi_3 \cdot ET_3 \cdot z_3 + \cdots + \pi_{17} \cdot ET_{17} \cdot z_{17}}{\pi_1 \cdot ET_1 + \pi_2 \cdot ET_2 + \pi_3 \cdot ET_3 + \cdots + \pi_{17} \cdot ET_{17}} \tag{8}$$

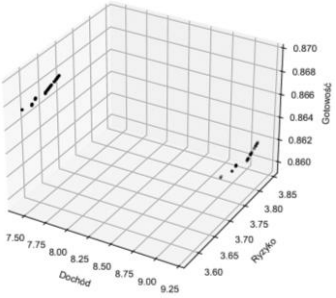
2) funkcja kryterialna opisująca gotowość obiektu technicznego przedstawiona jest wzorem:

$$G^{OT} = \frac{\pi_1 \cdot ET_1 + \pi_3 \cdot ET_3 + \pi_8 \cdot ET_8}{\pi_1 \cdot ET_1 + \pi_2 \cdot ET_2 + \pi_3 \cdot ET_3 + \cdots + \pi_{17} \cdot ET_{17}} \tag{9}$$

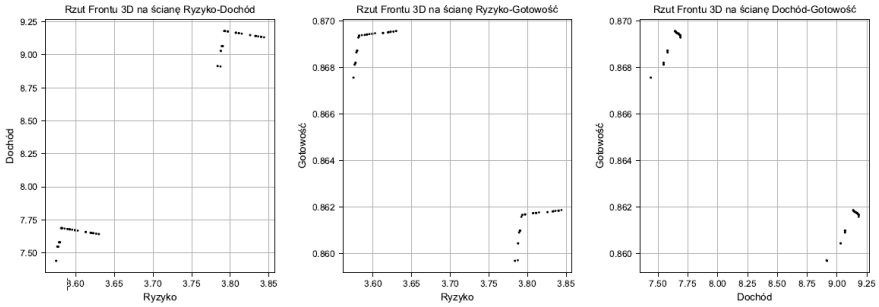
3) funkcja kryterialna opisująca ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych w [PLN na h] przedstawiona jest wzorem:

$$r^{OT} = \frac{\pi_2 \cdot ET_2 \cdot z_2 + \pi_4 \cdot ET_4 \cdot z_4 + \pi_5 \cdot ET_5 \cdot z_5 + \pi_6 \cdot ET_6 \cdot z_6 + \pi_7 \cdot ET_7 \cdot z_7 + \pi_8 \cdot ET_8 \cdot z_8 + \pi_9 \cdot ET_9 \cdot z_9}{\pi_1 \cdot ET_1 + \pi_2 \cdot ET_2 + \pi_3 \cdot ET_3 + \cdots + \pi_{17} \cdot ET_{17}} + \\ + \frac{\pi_{14} \cdot ET_{14} \cdot z_{14} + \pi_{15} \cdot ET_{15} \cdot z_{15} + \pi_{16} \cdot ET_{16} \cdot z_{16} + \pi_{17} \cdot ET_{17} \cdot z_{17}}{\pi_1 \cdot ET_1 + \pi_2 \cdot ET_2 + \pi_3 \cdot ET_3 + \cdots + \pi_{17} \cdot ET_{17}} \tag{10}$$

Dla danych przedstawionych w tabeli 2 przeanalizowano warianty możliwych do zastosowania strategii sterowania (ciągu decyzji – tab. 1). Wyniki obliczeń opracowane z zastosowaniem decyzyjnych procesów semi-Markowa, algorytmu genetycznego oraz frontu Pareto (obliczenia wykonano z zastosowaniem opracowanego programu komputerowego) przedstawiono na poniższych rysunkach.

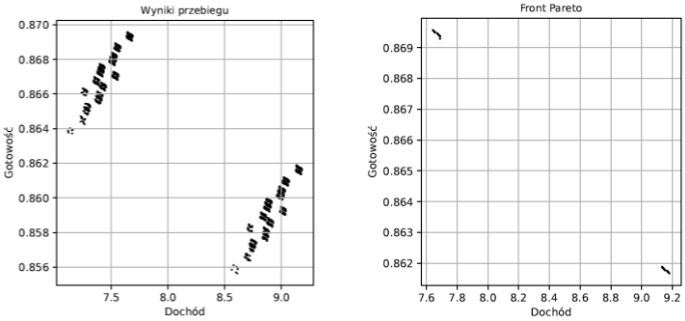


Rys. 2. Front Pareto rozwiązań suboptymalnych wyznaczany za pomocą algorytmu genetycznego (3 kryteria: dochód [PLN na h], ryzyko [PLN na h], gotowość) (opracowanie własne)

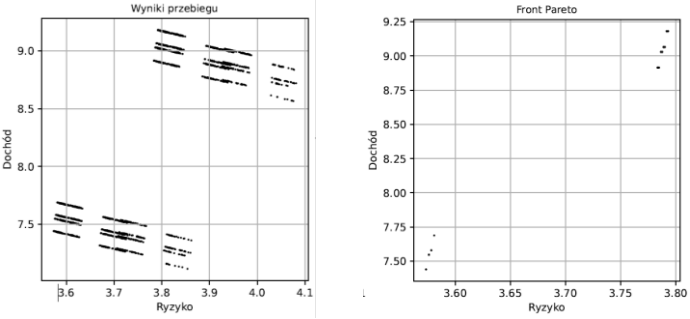


Rys. 3. Rzuty frontu Pareto rozwiązań suboptymalnych, przedstawionego na rysunku 2 (3 kryteria: dochód [PLN na h], ryzyko [PLN na h], gotowość) (opracowanie własne)

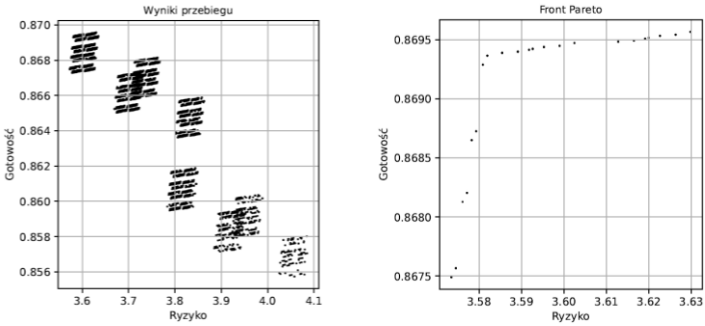
Na poniższych rysunkach przedstawiono analizę dwukryterialną: gotowość i dochód jednostkowy (rys. 4), dochód jednostkowy i ryzyko (rys. 5) oraz gotowość i ryzyko (rys. 6).



Rys. 4. Wyniki analizy 2-kryterialnej: dochód jednostkowy [PLN na h] – gotowość (poszczególne realizacje otrzymane za pomocą algorytmu genetycznego oraz front Pareto rozwiązań suboptymalnych) (opracowanie własne)



Rys. 5. Wyniki analizy 2-kryterialnej: ryzyko [PLN na h] – dochód jednostkowy [PLN na h] (poszczególne realizacje otrzymane za pomocą algorytmu genetycznego oraz front Pareto rozwiązań suboptymalnych) (opracowanie własne)



Rys. 6. Wyniki analizy 2-kryterialnej: ryzyko [PLN na h] – gotowość (poszczególne realizacje otrzymane za pomocą algorytmu genetycznego oraz front Pareto rozwiązań suboptymalnych) (opracowanie własne)

4. PODSUMOWANIE

Wyniki badań z wykorzystaniem metod niedeterministycznych wyznaczania rozwiązań suboptymalnych przedstawione w publikacji dotyczą analizy wielokryterialnej, w tym przypadku z zastosowaniem trzech kryteriów, takich jak dochód jednostkowy [PLN na h], gotowość i ryzyko [PLN na h]. Dla przyjętych danych wejściowych (tab. 2) dokonano przeglądu możliwych do zastosowania wariantów strategii sterowania (ciągów podejmowanych decyzji – tab. 1) oraz wyznaczono zbiory rozwiązań optymalnych w sensie Pareto. Zbiór optymalny w sensie Pareto jest to zbiór niezdominowanych rozwiązań całej dopuszczalnej przestrzeni poszukiwań. Rozwiązania optymalne w sensie Pareto tworzą tzw. front Pareto.

Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że zwiększenie dochodu jednostkowego oraz gotowości środków transportu wiąże się ze zwiększeniem ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych. Może to wynikać z faktu, że zwiększenie dochodu jednostkowego oraz gotowości obiektów technicznych nie jest spowodowane zmniejszeniem prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych, a jedynie efektem realizacji dodatkowych działań i ponoszenia dodatkowych środków w celu uzdatniania obiektów technicznych i zapewnienia możliwości prawidłowej realizacji przydzielonych zadań przewozowych w systemie autobusowej komunikacji miejskiej. Realizowane jest to przez zwiększenie intensywności wykonywanych obsług i napraw, np. zastosowanie bardziej wydajnych urządzeń i narzędzi oraz zaangażowanie większej liczby pracowników, a to przyczynia się do zwiększenia kosztów dotyczących usuwania skutków zdarzeń niepożądanych.

W zależności od potrzeb zaprezentowany w pracy sposób wyznaczania rozwiązań suboptymalnych, którego głównymi składowymi są semi-markowski model procesu eksploatacji badanych obiektów technicznych, algorytm genetyczny oraz front Pareto, może być zastosowany do matematycznego formuło-

wania i rozwiązywania szerokiej gamy problemów związanych ze sterowaniem złożonymi systemami technicznymi. Dotyczy to przede wszystkim analizy dochodów i kosztów (efektywność ekonomiczna), sterowania gotowością i niezawodnością obiektów technicznych (efektywność eksploatacyjno-techniczna), a także analizy i zarządzania ryzykiem wystąpienia zdarzeń niepożądanych, niebezpiecznych lub katastroficznych (bezpieczeństwo funkcjonowania systemu eksploatacji obiektów technicznych).

LITERATURA

[1] Grabski F., 2010. Analiza ryzyka w decyzyjnych semi-markowskich modelach procesu eksploatacji. XXXVIII Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, 43–52.

[2] Grabski F., 2014. Semi-Markov processes: Applications in system reliability and maintenance. Elsevier, Amsterdam.

[3] Knopik L., Migawa K., Wdzięczny A., 2016. Profit optimalization in operation systems. Polish Maritime Research 23(1/89), 93–98.

[4] Kulkarni V.G., 1995. Modeling and analysis of stochastic systems. Chapman & Hall, New York.

[5] Lee K.W., 2000. Stochastic models for random-request availability. IEEE Trans. Reliability 49, 80–84.

[6] Migawa K., Knopik L., Sołtysiak A., Kolber P., 2017. The method of risk assessment in transport system. Engineering Mechanics, Czech Republic, 658–661.

[7] Migawa K., Knopik L., Wawrzyniak S., 2016. Application of genetic algorithm to control the availability of technical systems. Engineering Mechanics, Czech Republic, 386–389.

[8] Szubartowski M., Migawa K., Neubauer A., Knopik L., 2017. Method of determining optimal control strategy. 58th International Conference of Machine Design Departments – ICMD, 380–385.

OCENA WPŁYWU PROCESU PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI NA PARAMETRY POWŁOK LAKIERNICZYCH PROSZKOWYCH

Tomasz Kałaczyński[1*], Mateusz Borkowski[1], Aleksandr Dykha[2]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Khmelnitsky National University, Institutskaia str. 11, Khmelnitsky, 29016, Ukraine

Streszczenie. W pracy zaprezentowano analizę wpływu procesu przygotowania powierzchni na parametry powłok lakierniczych proszkowych. Zwrócono uwagę na zagrożenia związane z tą technologią. Przeprowadzono również próbę różnych technologii przygotowania powierzchni stosowanych w polskim przemyśle lakierniczym oraz zbadano wpływ wyboru technologii na właściwości uzyskiwanych powłok proszkowych.

Słowa kluczowe: lakierowanie proszkowe, farby proszkowe, powłoka lakiernicza

1. WPROWADZENIE

Pierwszym etapem na każdej linii lakierowania proszkowego jest przygotowanie powierzchni elementów. Ten proces stanowi kluczowy etap dla trwałości uzyskanej powłoki lakierniczej w kontekście odporności na korozję. Jednocześnie ma istotny wpływ na aspekty dekoracyjne powłoki [7].

Najpowszechniejszym mechanicznym środkiem przygotowującym powierzchnię jest obróbka strumieniowo-ścierna. Śrutowanie, popularna metoda czyszczenia, służy do usuwania zgorzelin tlenkowych i rdzy z powierzchni metalowych. Proces ten polega na bombardowaniu powierzchni obrabianych elementów dużą ilością małych, twardych cząstek przy stosunkowo dużej prędkości, w zakresie 40–100 $m \cdot s^{-1}$ [9]. Charakteryzuje się on niskim kosztem pojedynczego procesu, wysoką wydajnością i niezawodną jakością. Proces ten daje efekt w postaci czystej, srebrzystej powierzchni. Śrutowanie często stosuje się do renowacji elementów (do usuwania starej powłoki lakierniczej). Warto jednak zaznaczyć, że nie eliminuje on tłustych pozostałości, np. po środkach konserwujących, które mogą znajdować się na przechowywanej blasze.

Jako etap przygotowania powierzchni powszechnie stosuje się mycie chemiczne z użyciem myjek natryskowych. Te urządzenia zazwyczaj składają się z zestawu tuneli wykonanych ze stali nierdzewnej, zamontowanych na zbiornikach zawierających różne substancje chemiczne oraz wodę do płukania. W trakcie procesu mycia dysze kolejno natryskują różne substancje na detale. Dzięki odpowiednio przygotowanej technologii osiąga się skuteczne odtłuszczenie i wypłukanie, obojętne pH powierzchni zostaje przywrócone, a wszelkie związki chemiczne [8] z niej – usunięte.

[*] adres korespondencyjny: kalaczynskit@pbs.edu.pl

Technologie chemicznej obróbki powierzchni są zazwyczaj wieloetapowe, a liczba etapów zależy od stanu wyjściowego powierzchni oraz oczekiwań dotyczących powłok lakierniczych. Najbardziej kompleksowe procedury stosuje się w przypadku obróbki stali z korozją, gdy konieczne jest usunięcie produktów korozji przed nałożeniem farby.

Przykładem wieloetapowego mycia jest proces fosforanowania krystalicznego, który obejmuje jedenaście kolejnych etapów: odtłuszczanie alkaliczne, podwójne płukanie wodą sieciową, trawienie, podwójne płukanie wodą zdemineralizowaną, aktywowanie, fosforanowanie, płukanie wodą sieciową, płukanie wodą zdemineralizowaną, pasywowanie. Mniejsza liczba etapów ma miejsce w fosforanowaniu amorficznym, gdzie nie występuje aktywacja po trawieniu. Istnieje także jednoetapowa technologia fosforanowania amorficznego w kąpieli na bazie rozpuszczalników organicznych, obejmująca: odtłuszczanie, usuwanie/przekształcanie produktów korozji i tworzenie powłoki fosforanowej w jednym etapie. Jednak tę technologię można stosować tylko w przypadku powierzchni z lekkim, równomiernym nalotem korozji [1].

Powszechnie używanym procesem przed lakierowaniem proszkowym jest fosforanowanie amorficzne. Jeśli nie ma wysokich wymagań dotyczących odporności na korozję lakierowanych wyrobów z stali, aluminium czy stali ocynkowanej, efektywnym rozwiązaniem jest jednoetapowy proces fosforanowania amorficznego. W ramach tego procesu, w jednym etapie dokonuje się odtłuszczania powierzchni i tworzenia na niej amorficznej powłoki fosforanowej. W technologiach opartych na kąpielach wodnych istotnym etapem jest płukanie. W technologiach opartych na rozpuszczalnikach organicznych etap płukania jest eliminowany [2].

W skład integralnej linii produkcyjnej wraz z myjką nieodzownie wchodzi suszarka. To urządzenie utrzymuje temperaturę w zakresie 100–120°C. Dzięki tej temperaturze elementy są całkowicie osuszane, co nie tylko utrwala efekty przeprowadzonych zabiegów, lecz także skutecznie przygotowuje powierzchnię do bezpośredniego nałożenia powłoki proszkowej. W rezultacie proces ten zapewnia nie tylko eliminację wilgoci, lecz także optymalne warunki dla skutecznego nanoszenia kolejnych warstw na powierzchnię elementów [6].

2. ZAGROŻENIA PROCESU LAKIEROWANIA PROSZKOWEGO

Aplikowanie powłok powierzchniowych ma na celu spełnienie zarówno aspektów estetycznych i morfologicznych, jak i funkcjonalnych. Zazwyczaj obejmuje to ochronę przed korozją chemiczną i mechanicznym zużyciem poprzez utworzenie bariery ochronnej dla metalicznego podłoża [3].

Zagrożenia procesu lakierowania proszkowego mogą wpływać na jakość uzyskanej powłoki. Oto kilka czynników, które mogą negatywnie wpływać na jakość powłoki w procesie lakierowania proszkowego:

- **nieprawidłowe przygotowanie powierzchni:** brak odpowiedniego przygotowania powierzchni przed nałożeniem proszku może skutkować słabym przyczepieniem powłoki. Niedokładne czyszczenie, obecność olejów, rdzy lub innych zanieczyszczeń mogą prowadzić do defektów i obniżenia jakości powłoki;
- **nieprawidłowa grubość powłoki:** niewłaściwa grubość nałożonej powłoki może prowadzić do różnych problemów, takich jak nadmierna grubość (co może prowadzić do pęknięć) lub niewystarczająca grubość (co może skutkować słabą ochroną przed korozją);
- **niedostateczna eliminacja pyłów i zanieczyszczeń:** pyły, zanieczyszczenia lub drobne cząstki w powietrzu mogą osadzać się na powierzchni mokrej powłoki, co prowadzi do powstawania nierówności i defektów;
- **błędy w procesie utwardzania:** niewłaściwe warunki utwardzania proszku mogą prowadzić do niejednolitego utwardzenia powłoki, co wpływa na jej trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne;
- **niewłaściwa aplikacja proszku:** nieprawidłowa technika nanoszenia proszku, np. zbyt szybka aplikacja, może prowadzić do nadmiernego rozpryskiwania i nierównomiernego pokrycia, co wpływa na estetykę i jakość powłoki;
- **zanieczyszczenia w proszku:** zanieczyszczenia w proszku lakierowym mogą prowadzić do powstawania plam, przebarwień lub innych defektów w powłoce;
- **niewłaściwe parametry procesu:** błędy w ustawieniach parametrów, takich jak temperatura pieca, czas utwardzania czy przepływ powietrza, mogą prowadzić do nieprawidłowej polimeryzacji proszku i obniżenia jakości uzyskanej powłoki.

3. METODY I METODYKA OCENY WPŁYWU PROCESU PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI NA PARAMETRY POWŁOK LAKIERNICZYCH PROSZKOWYCH

W przeprowadzonym badaniu skupiono się na błędach w przygotowaniu powierzchni i aplikacji farby. Są to najczęściej popełniane błędy w technologii lakierowania proszkowego, które powstają często już na etapie planowania inwestycji w budowę lakierni proszkowej. Niewłaściwe założenia, źle dobrana technologia niosą ryzyko, że uzyskiwana jakość powłoki będzie daleka od oczekiwanej. Często przez koszt inwestycyjny inwestorzy rezygnują z budowy np. myjki natryskowej, zastępując ten proces odtłuszczaniem za pomocą marketowych odtłuszczaczy nanoszonych za pomocą bawełnianych szmatek, lub śrutownicy na rzecz szlifierki kątowej z tarczą listkową [4, 5].

Celem badania jest także ukazanie, na ile inwestycja w kosztowne urządzenia jest uzasadniona w kontekście jakości uzyskiwanej powierzchni.

3.1. Warunki i obiekt badań

W celu przeprowadzenia badań przygotowano 40 próbek z walcowanej stali typu DC01 o grubości 1,2 mm, uzyskanej poprzez rozwinięcie z kręgu. Elementy zostały wypalone za pomocą wycinarki laserowej CNC. Następnie, przed lakierowaniem, połowę z nich poddano procesowi wyginania na prasie krawędziowej.

Przygotowane próbki zostały przetransportowane do lakierni proszkowej. Proces lakierowania przygotowanych próbek został zrealizowany w siedmiu różnych konfiguracjach, co zostało szczegółowo opisane w tabeli 1. Jako wzorzec przyjęto powierzchnie dwóch próbek wygiętych i dwóch niewygiętych, poddanych pełnemu cyklowi technologicznemu. Pozostałe próbki przygotowano zgodnie z przewidzianymi technologiami. Odtłuszczanie ręczne przeprowadzono z użyciem Malchem Thinner AK. W myjce natryskowej zastosowano szereg zabiegów obejmujących odtłuszczanie, płukanie wodą sieciową oraz płukanie wodą zdemineralizowaną. Następnie przeprowadzono proces suszenia próbek przy temperaturze około 120°C.

Tab. 1. Zestawienie parametrów próbek wraz z ich numerem (opracowanie własne)

Sposób przygotowania	**Wydatek zalecany 60 [$m^3 \cdot h^{-1}$]**		
płytka wzorcowa: śrutowanie + odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty przed lakierowaniem	1;39		
płytka wzorcowa: śrutowanie + odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty po lakierowaniu	2;40		
	Wydatek 60 [$m^3 \cdot h^{-1}$]	**Wydatek 50 [$m^3 \cdot h^{-1}$]**	**Wydatek 70 [$m^3 \cdot h^{-1}$]**
bez przygotowania powierzchni + gięty przed lakierowaniem	3	4	5
bez przygotowania powierzchni + gięty po lakierowaniu	6	7	8
szlifowanie szlifierką kątową + odtłuszczanie z użyciem szmatki + gięty przed lakierowaniem	9	10	11
szlifowanie szlifierką kątową + odtłuszczanie z użyciem szmatki + gięty po lakierowaniu	12	13	14
śrutowanie + gięty przed lakierowaniem	15	16	17
śrutowanie + gięty po lakierowaniu	18	19	20
odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty przed lakierowaniem	21	22	23
odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty po lakierowaniu	24	25	26
śrutowanie + odtłuszczanie z użyciem szmatki + gięty przed lakierowaniem	27	28	29
śrutowanie + odtłuszczanie z użyciem szmatki + gięty po lakierowaniu	30	31	32
szlifowanie szlifierka kątową + odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty przed lakierowaniem	33	34	35
szlifowanie szlifierka kątową + odtłuszczanie w myjce natryskowej + gięty po lakierowaniu	36	37	38

Aplikację wykonano za pomocą urządzenia Sprint Airfluid Pem X1 firmy Wagner. Do badania zastosowano farbę proszkową Freiotherm PF1003A firmy Freilacke o kolorze szarym bazaltowym – oznaczenie RAL7012.

Ta powłoka oparta jest na żywicy poliestrowej i została dostosowana do dekoracyjnego zastosowania zewnętrznego. Ze względu na swoją wysoką rozlewność tworzy gładką powłokę o półpołysku. W przypadku lakierowania w systemie osadzania elektrostatycznego, znanego jako „Corona", producent zapewnia następujące właściwości końcowej powłoki:

Kontrolna grubość warstwy wynosząca 70 µm,

Test siatki nacięć – Gt 0,

Test odporności na uderzenie – 80 $kg \cdot cm^{-2}$ dla płaskiej powierzchni.

Aby osiągnąć powyższe właściwości, producent wymaga, aby podłoże nie zawierało substancji ograniczających przywieranie, takich jak oleje, smary czy rdza. Producent zaleca zastosowanie obróbki strumieniowo-ściernej i przygotowania chemicznego w procesie przygotowywania powierzchni. W przeprowadzonym badaniu zastosowano trzy różne wydajności podawania proszku przez pistolet. Zalecany czas i wskazana temperatura wypalania farby wynoszą 10 minut w 180°C po nagrzaniu elementu.

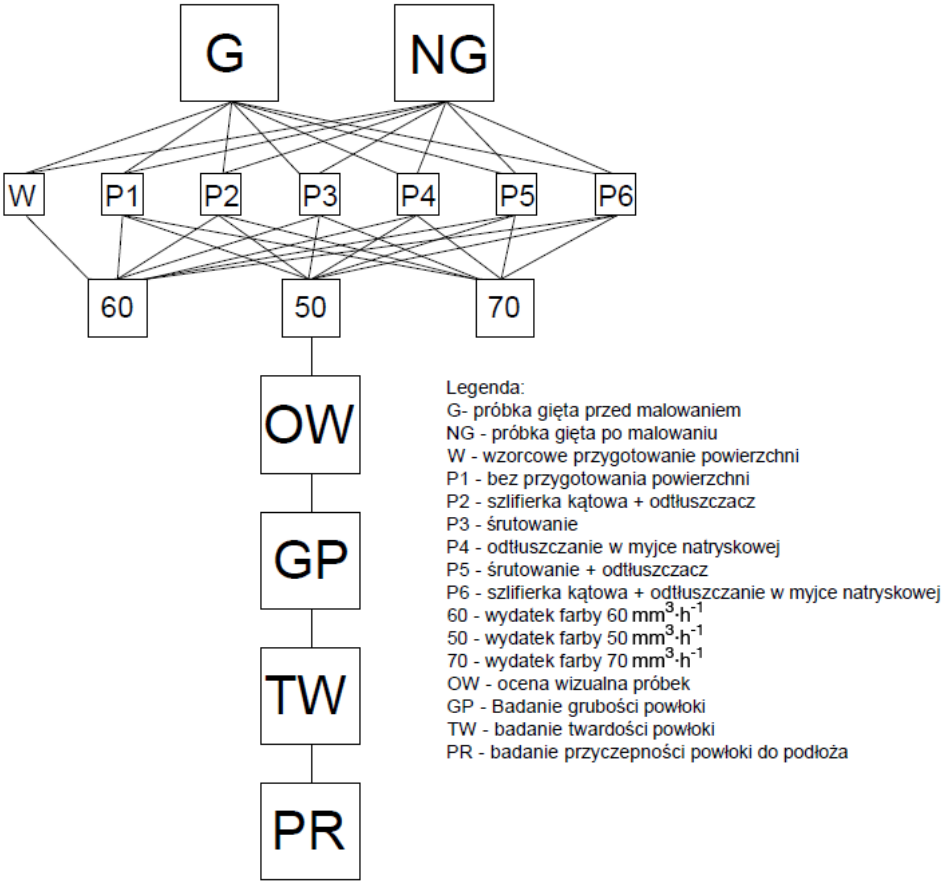
3.2. Procedura badawcza

Poniżej opisano procedurę badawczą dotyczącą wpływu procesu przygotowania powierzchni na parametry powłok lakierniczych proszkowych. Procedura obejmuje badanie wizualne, pomiar grubości powłoki lakierniczej, badanie twardości powłoki oraz jej przyczepności do podłoża (rys. 1).

Ocena wizualna powierzchni powłoki proszkowej:

Ocenę należy przeprowadzić nieuzbrojonym okiem z odległości 3 m dla powłok przeznaczonych do użytku wewnątrz i 5 m dla powłok przeznaczonych do użytku na zewnątrz pomieszczeń, w zwykłym świetle dziennym. Wymagania obejmują to, że z podanej odległości w normalnym świetle dziennym na powłoce nie powinny być widoczne żadne zmarszczki, zacieki, kratery, pęcherze ani inne nieregularności powierzchni. Warto również brać pod uwagę ewentualne nieprawidłowości widoczne przez powłokę, które odzwierciedlają powierzchnię stalową lub cynkowania ogniowego.

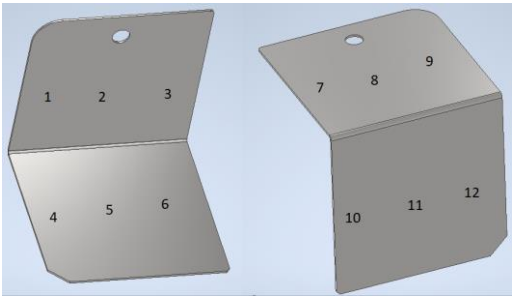
W badaniu zastosowano farbę przeznaczoną do dekoracyjnego zastosowania zewnętrznego, dlatego ocenę powłoki należy przeprowadzić w świetle dziennym w odległości 5 m od elementu.



Rys. 1. Schemat blokowy opisywanego badania (opracowanie własne)

Pomiar grubości powłoki

Grubość poszczególnych warstw w systemie oraz całkowitą grubość ostatecznej powłoki trzeba pomiarowo określać za pomocą miernika grubości, zgodnie z normą ISO 2808. Wykonane pomiary powinny być reprezentatywne dla badanego obszaru. Zgodnie z ISO 19840 cała powleczona powierzchnia może być wykorzystana do ustalenia liczby niezbędnych pomiarów. Mierzenie próbek obejmowało pobieranie 12 odczytów z każdej próbki, a miejsca pobierania poszczególnych pomiarów zostały przedstawione na poniższym rysunku (rys. 2).



Rys. 2. Oznaczenie miejsc kolejnych pomiarów grubości powłoki (opracowanie własne)

Warunki dla właściwie wykonanej powierzchni to:

– średnia arytmetyczna grubości poszczególnych warstw powinna być równa lub przekraczać wymaganą grubość – dla użytej farby w badaniu wartość ta wynosi 70 μm;
– wszystkie pojedyncze pomiary powinny być równorzędne lub przekraczać 80% wymaganej grubości – dla użytej farby w badaniu wartość ta wynosi 56 μm;
– średnia arytmetyczna nie może przewyższać maksymalnej grubości pokrycia, zgodnie z zaleceniami producenta powłoki. W przypadku braku takich wytycznych maksymalna grubość (pojedynczy pomiar) nie może przekraczać trzykrotności nominalnej, pełnej grubości pokrycia – dla użytej farby w badaniu producent nie określił maksymalnej grubości powłoki, dlatego stosując drugą zasadę, maksymalna wartość ta wynosi 210 μm.

Pomiar twardości powłoki

Badanie twardości powłok proszkowych za pomocą twardościomierza Rockwella w skali HRB służy do oceny równomierności twardości powłoki. Proces ten wymaga wykonania dwóch pomiarów: pierwszego na środku oraz drugiego na brzegu płaskiej powierzchni elementu.

Aby właściwie przeprowadzić badanie, należy najpierw uzbroić twardościomierz w odpowiednie obciążenie zgodne z normą HRB. Następnie na głowicę twardościomierza trzeba zamocować kulkę z węglika o średnicy 1/16", a także wykonać próbny pomiar na płytce wzorcowej o twardości 90 HRB.

Kolejnym krokiem jest ostrożne umieszczenie próbki na płaskiej i stabilnej powierzchni twardościomierza, tak aby mogła być stabilnie przyciśnięta podczas pomiaru. Po umieszczeniu próbki powinno się nacisnąć głowicę twardościomierza na jej powierzchnię i odczekać, aż wskazówka ustabilizuje się na wyświetlaczu. Należy upewnić się, że nacisk głowicy jest wystarczający, aby zapewnić poprawny pomiar, ale jednocześnie niezbyt duży, aby uniknąć uszkodzenia próbki. Po ustabilizowaniu się wskazówki można odczytać wynik twardości z wyświetlacza twardościomierza Rockwella. W przypadku skali HRB wynik będzie wyrażony jako liczba na skali twardości Rockwella.

Badanie przyczepności powłoki

Należy przeprowadzić test, który obejmuje wykonanie prostopadłych nacięć przez powłokę aż dotrze się do podłoża, przy zachowaniu odpowiedniej odległości między poszczególnymi nacięciami. Po usunięciu ewentualnych luźnych fragmentów powłoki przeprowadza się ocenę i klasyfikację wyników testu, stosując sześciostopniową skalę. W skali tej, ocena wynosi od 0 – co oznacza brak uszkodzeń siatki, do 5 – co reprezentuje największe zniszczenia. Klasyfikacja jest dokonywana z wykorzystaniem graficznej prezentacji poszczególnych stopni, zgodnie z normą ISO 2409. Prawidłowa powierzchnia wymaga przyczepności powierzchni na poziomie maksymalnie Gt1.

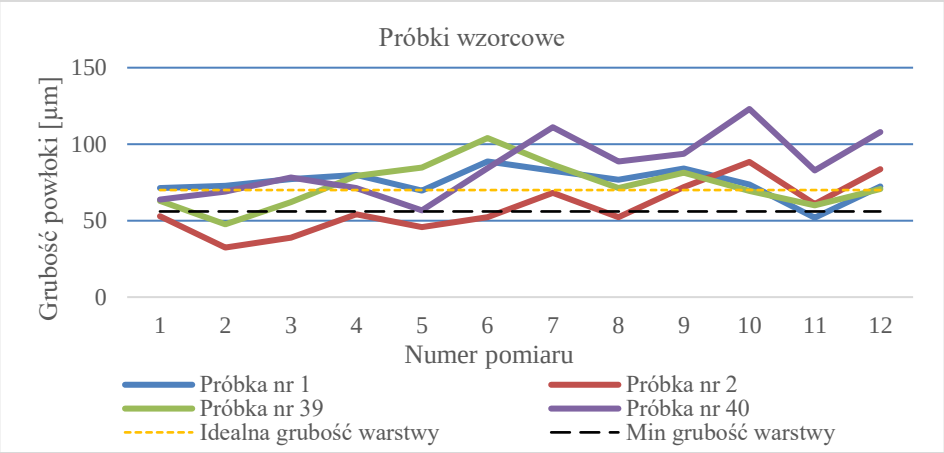
3.3. Wyniki badań

W pracy zaprezentowano wybrane wyniki badań dotyczących jakości powłok proszkowych – całość wyników dostępna jest u autorów opracowania. Badania obejmowały ocenę wizualną, pomiar grubości, twardości oraz przyczepności powłoki farby do malowanego elementu. Przedstawienie tych wyników pozwoli na pełniejsze zrozumienie skuteczności różnych metod przygotowania powierzchni i ich wpływu na ostateczne właściwości powłoki.

Wyniki pomiarów grubości powłoki proszkowej na badanych próbkach zostały przedstawione w tabelach. Obliczono średnią grubość lakieru oraz utworzono wykresy ilustrujące trend grubości lakieru na poszczególnych próbkach.

Wzorcowe – próbki o numerach 1–2 oraz 39–40:

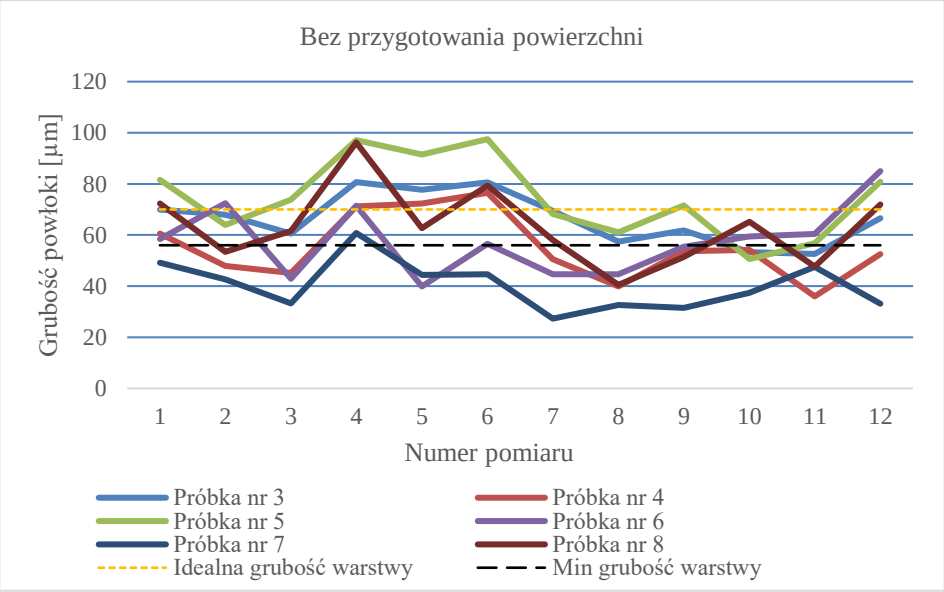
Średnia arytmetyczna grubości warstw przekracza wymaganą wartość 70 µm, co wskazuje na zgodność z normą. Jednakże pojedyncze pomiary w próbce numer 2 oraz jeden z pomiarów w próbce numer 39 są poniżej minimalnej grubości powłoki. Dodatkowo na wykresie zauważalne jest, że jedna strona drugiej próbki (pomiary 1–6) ma znacznie cieńszą powłokę niż pozostałe obszary (rys. 3).



Rys. 3. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)

Bez przygotowania powierzchni – próbki o numerach 3–8:

Średnia arytmetyczna grubości warstw, z wyjątkiem próbki numer 5, nie przekracza wymaganej wartości 70 µm, co wskazuje na zbyt cienką warstwę powłoki na elementach. Rozrzut wartości pomiarów jest znaczący, często nie spełnia wymaganej grubości 56 µm i waha się od poniżej 30 µm do ponad 90 µm. Szczególnie niepokojąca jest próbka numer 3, gdzie tylko w jednym pomiarze grubość przekracza minimalną wartość (rys. 4).



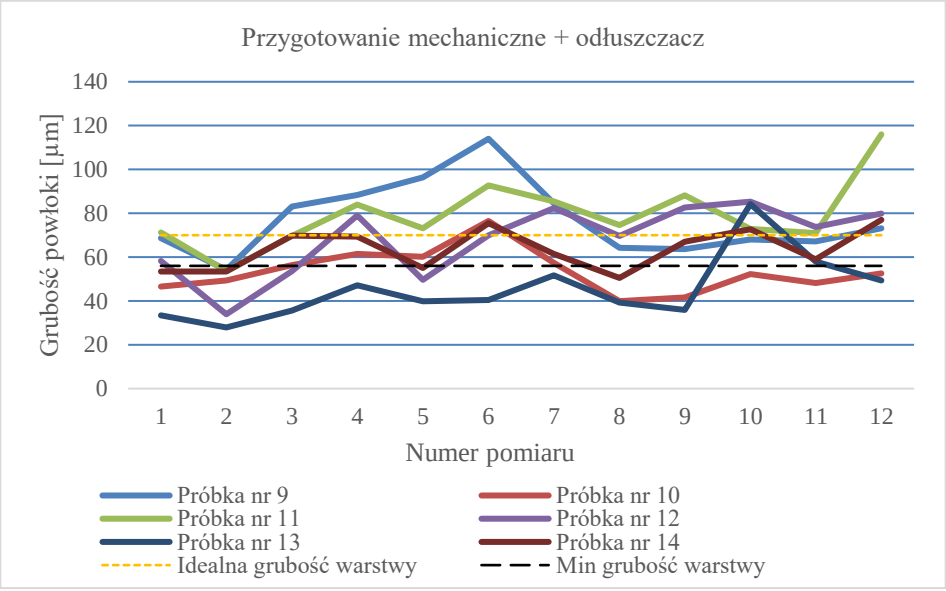
Rys. 4. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)

Przygotowane mechanicznie i odtłuszczone – próbki o numerach 9–14:

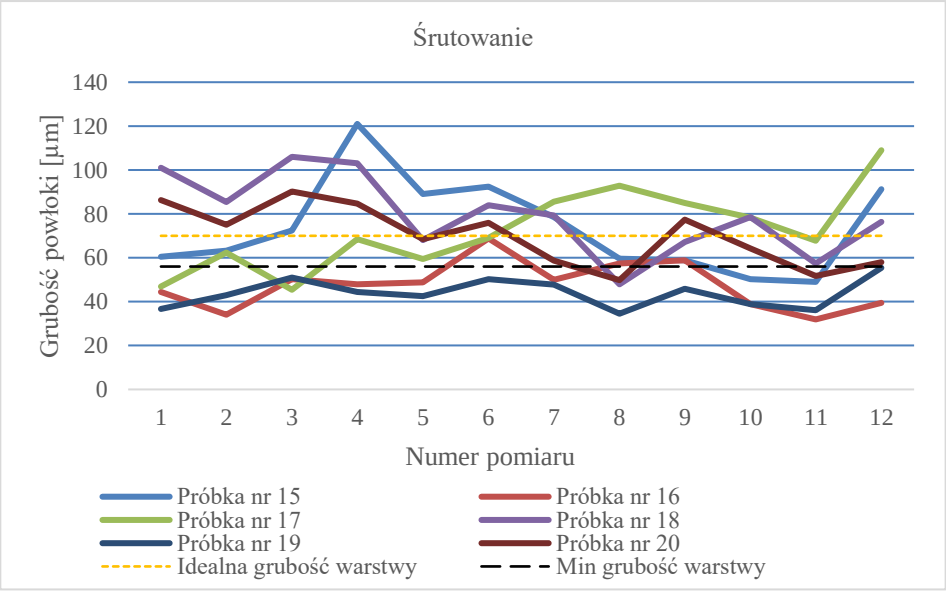
Średnia arytmetyczna grubości warstw, z wyjątkiem próbek o numerach 9 oraz 11, nie przekracza wymaganej wartości 70 µm, co sugeruje, że warstwa powłoki na elementach jest zbyt cienka. W każdej z próbek występują wartości nieprzekraczające minimalnej grubości 56 µm, ale również zdarzają się pomiary przekraczające 100 µm. W przypadku próbek o numerach 9 i 11, jedynie pomiar numer dwa nieznacznie nie spełnia normy, co sprawia, że powłoka nie odpowiada wymaganiom (rys. 5).

Po śrutowaniu – próbki o numerach 15–20:

Średnia arytmetyczna grubości warstw, z wyjątkiem próbek o numerach 16 oraz 19, przekracza wymaganą wartość 70 µm. Niemniej jednak w każdej z próbek występuje przynajmniej jeden pomiar, który nie przekracza minimalnej grubości 56 µm. Takie odstępstwa sprawiają, że żaden z elementów nie spełnia normy dotyczącej grubości powłoki (rys. 6).



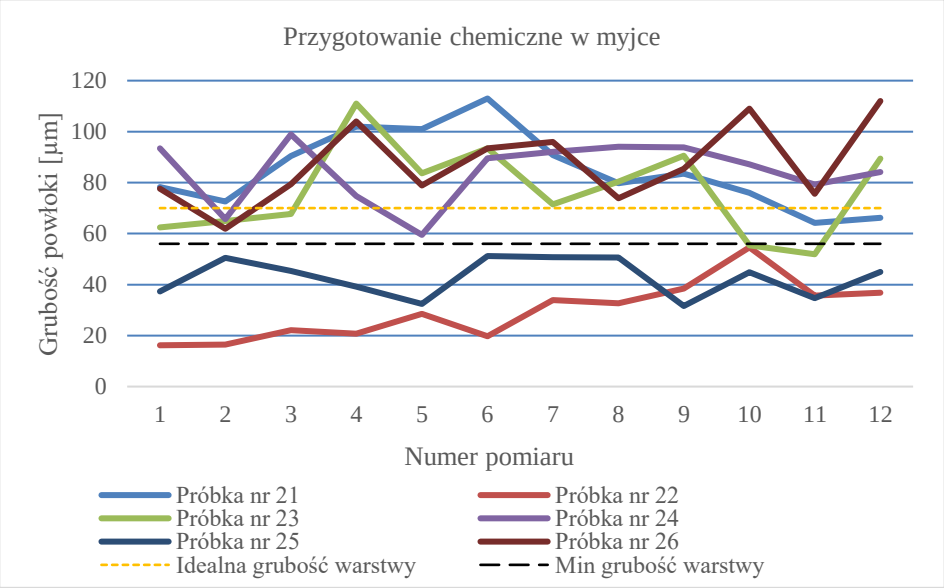
Rys. 5. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)



Rys. 6. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)

Odtłuszczane w myjce natryskowej – próbki o numerach 21–26:

W powyższej technologii przygotowania powierzchni zauważalny jest znaczny rozrzut uzyskiwanych wyników. Próbki o numerach 21, 24 oraz 26 spełniają normy dotyczące grubości powłoki. Próbka o numerze 23 spełnia wymóg średniej arytmetycznej grubości powłoki, jednak dwa pomiary – próbki o numerach 10 i 11 – przekraczają minimalną grubość powłoki. Próbki o numerach 22 oraz 25 uzyskały natomiast bardzo niskie wyniki, co wskazuje na stanowczo zbyt cienką grubość powłoki (rys. 7).



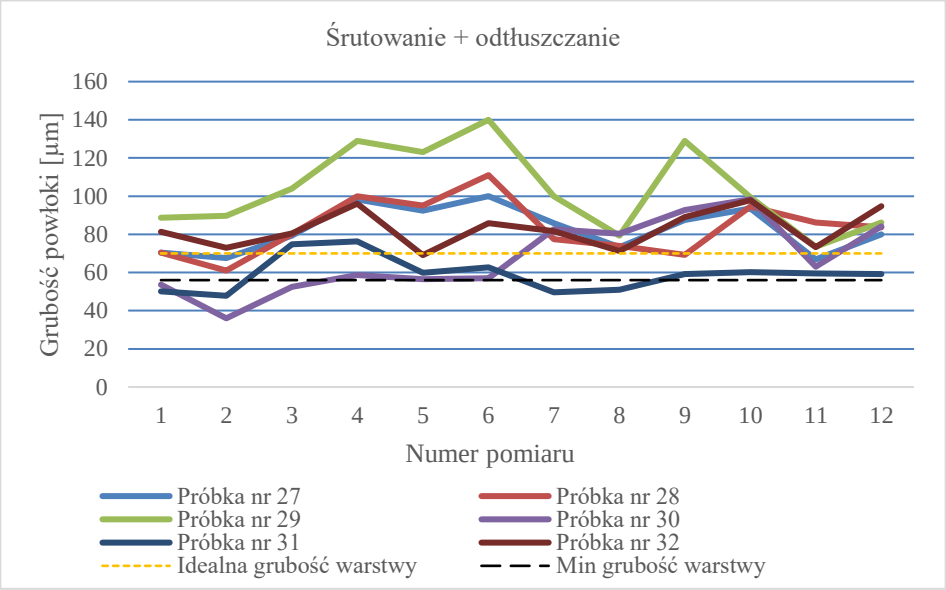
Rys. 7. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)

Po śrutowaniu i odtłuszczaniu – próbki o numerach 27–32:

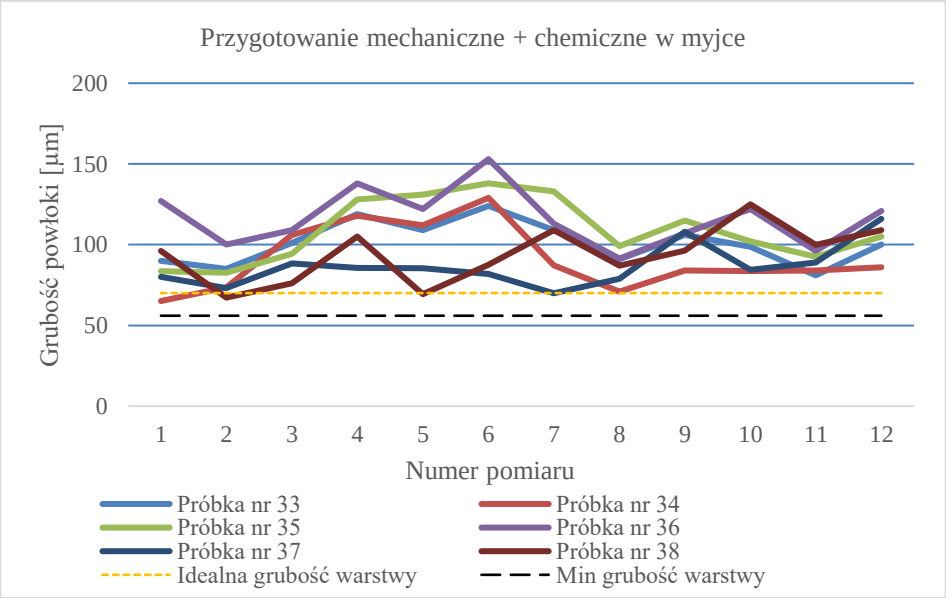
Dla czterech z sześciu próbek średnia arytmetyczna grubości warstw przekracza wymagane 70 µm, a każdy pomiar przekracza minimalną wymaganą wartość. Pozostałe dwie próbki – o numerach 30 oraz 31 – nie spełniają wymogów dotyczących grubości powłoki. Widoczny jest również duży rozrzut uzyskiwanych wyników – najniższy pomiar w partii to 36 µm, a w innym przypadku uzyskano wartość aż 140 µm (rys. 8).

Przygotowane mechaniczne i odtłuszczone w myjce natryskowej – próbki o numerach 33–38:

Wymagana średnia arytmetyczna grubości warstw wszystkich próbek została przekroczona. Dodatkowo żaden z pojedynczych pomiarów nie osiągnął wartości niższej niż 56 µm, co oznacza, że wszystkie próbki spełniają normy. Uzyskane średnie wartości są co najmniej 16 µm wyższe niż zalecane przez producenta farby 70 µm (rys. 9).



Rys. 8. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)



Rys. 9. Wykres przedstawiający grubość powłoki w odniesieniu do minimalnej i docelowej wartości (opracowanie własne)

Wyniki badań przyczepności powłoki proszkowej do stalowych próbek są optymistyczne (rys. 10). Wszystkie próbki spełniają wymagania testu i normę dotyczącą przyczepności. Zgodnie z tą normą, klasyfikuje się je jako należące

do klasy Gt0 oraz Gt1. Oznacza to, że maksymalnie 5% powłoki może odejść od powierzchni badanego elementu, a zatem przyczepność powłoki jest silna i odporna, co przekłada się na wysoką jakość wykonywanych powłok proszkowych (tab. 2).

Rys. 10. Nacięcia wykonane z dwumilimetrowym rozstawem ostrzy nożyka (opracowanie własne)

Tab. 2. Wyniki badania przyczepności powłoki proszkowej (opracowanie własne)

Numer próbki	Klasa przyczepności	Numer próbki	Klasa przyczepności
1	Gt0	21	Gt0
2	Gt0	22	Gt0
3	Gt1	23	Gt0
4	Gt1	24	Gt0
5	Gt0	25	Gt0
6	Gt1	26	Gt0
7	Gt1	27	Gt0
8	Gt0	28	Gt0
9	Gt0	29	Gt0
10	Gt0	30	Gt0
11	Gt0	31	Gt0
12	Gt0	32	Gt0
13	Gt0	33	Gt0
14	Gt1	34	Gt0
15	Gt0	35	Gt0
16	Gt0	36	Gt0
17	Gt1	37	Gt0
18	Gt0	38	Gt0
19	Gt1	39	Gt0
20	Gt0	40	Gt0

3.4. Analiza wyników badań

Na podstawie analizy wyników badań wpływu przygotowania powierzchni na uzyskaną powłokę proszkową, wykazano kilka istotnych wniosków. Poprawne przygotowanie powierzchni ma kluczowe znaczenie dla uzyskania właściwości farby na lakierowanym elemencie. Wzorcowa technologia przygotowania powierzchni, czyli śrutowanie wraz z odtłuszczaniem w myjce natryskowej, w większości przypadków gwarantuje równą grubość powłoki i jej prawidłowy wygląd, eliminując defekty, takie jak ciała obce czy efekt skórki pomarańczowej. Tylko jeden element miał widocznie mniejszą grubość powłoki – szczególnie z jednej strony. Próbki bez przygotowania powierzchni charakteryzują się licznymi wadami, takimi jak: kratery czy obecność ciał obcych, losowość uzyskiwanej grubości powłoki, co uniemożliwia spełnienie norm. Proste metody przygotowania powierzchni, takie jak: szlifowanie szlifierką kątową i odtłuszczanie szmatką, poprawiają walory wizualne, ale nie wpływają znacząco na grubość powłoki. Samo śrutowanie również nie zapewnia odpowiedniej powłoki, pozostawiając chropowatą powierzchnię z ciałami obcymi. Odtłuszczanie w myjce natryskowej może dawać zróżnicowane efekty, od gładkich powierzchni o odpowiedniej grubości do powłok zbyt cienkich. Dodatkowe odtłuszczenie szmatką po śrutowaniu poprawia przyleganie farby, ale powoduje powstanie znaczących chropowatości. Najlepsze wyniki uzyskano wskutek szlifowania za pomocą szlifierki kątowej i odtłuszczania w myjce natryskowej, co pozwoliło uzyskać powłokę bez wad i o odpowiedniej grubości. W porównaniu ze wzorcowym procesem przygotowania próbki miały znacząco grubszą powłokę.

Podczas wykonywania próbek dla każdej metody i kształtu próbki, z pominięciem próbek wzorcowych, wprowadzono zmiany w ilości proszku podawanego przez pistolet. W przypadku próbek z surową powierzchnią zwiększenie ilości proszku pozwoliło na uzyskanie grubości powłoki zbliżonej do normy. Każde zwiększenie wydatku o 10 $m^3 \cdot h^{-1}$ powodowało wzrost uzyskiwanej średniej grubości powłoki o około 10 μm. W przypadku kolejnych trzech metod, dla próbek o numerach od 9 do 26, obniżenie wydatku do 50 $m^3 \cdot h^{-1}$ skutkowało znacznym zmniejszeniem uzyskiwanej grubości powłoki, podczas gdy zwiększenie wydatku praktycznie nie miało na nią wpływu. Tendencja ta odwróciła się dla dwóch ostatnich metod, gdy zmniejszenie wydatku nieznacznie wpływało na efekty, natomiast zwiększenie skutkowało znacznym wzrostem uzyskiwanej grubości powłoki.

Istnieje również zależność między wydatkiem farby a twardością gotowej powłoki. W przypadku każdej badanej technologii przygotowania powierzchni, powłoka utworzona przy wydatku 50 $m^3 \cdot h^{-1}$ jest najgrubsza, a przy wydatku 70 $m^3 \cdot h^{-1}$ – najcieńsza. W większości próbek obniżenie grubości powłoki idzie w parze ze wzrostem jej twardości. Jedynie próbki w technologii wzorcowej wykazują odwrotną zależność – próbka o numerze 2 ma cieńszą grubość powłoki i mniejszą twardość w porównaniu z pozostałymi próbkami.

Kształt próbek również wpłynął na końcowy efekt powłoki. Próbki gięte przed lakierowaniem miały zauważalnie grubszą powłokę w strefie pomiarów o numerach od 4 do 6, czyli w strefie prostopadłej do toru i miejsca zawieszenia. Zjawisko to dotyczyło wszystkich metod przygotowania powierzchni. Jedynym wyjątkiem jest próbka o numerze 22, na której w tej strefie detalu były widoczne braki w powłoce.

Dla wszystkich technologii i dla każdego wydatku proszku przyczepność powierzchni jest bardzo dobra i spełnia normę. Badane próbki wykazały stabilność przyczepności, niezależnie od zastosowanej metody przygotowania powierzchni oraz ilości podawanego proszku.

4. PODSUMOWANIE

Analiza przeprowadzonych badań poprzez ocenę wyników poszczególnych badań i odniesienie ich względem siebie, stanowi podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- W celu uzyskania gładkiej powierzchni bez defektów w postaci m.in. ciał obcych czy kraterów konieczne jest zastosowanie w procesie odtłuszczania w myjce natryskowej.
- Poprawne przygotowanie powierzchni przed zaaplikowaniem powłoki znacząco wpływa na uzyskiwaną grubość powłoki. Metody takie jak śrutowanie wraz z odtłuszczaniem w myjce natryskowej oraz szlifowanie szlifierką kątową w połączeniu z odtłuszczeniem zapewniają najbardziej równomierne i odpowiednie grubości powłoki.
- Zwiększenie ilości podawanego proszku powoduje wzrost grubości powłoki, co może częściowo zastąpić proces mycia natryskowego, jednak istnieje pewna granica, po przekroczeniu której dodatkowe zwiększenie ilości proszku nie przynosi już istotnych zmian. Dodatkowo podnosi to koszty lakierowania przez zwiększone zużycie farby.
- Kształt próbek oraz sposób zawieszenia elementów mogą mieć istotny wpływ na końcowy efekt powłoki. Elementy, które po zawieszeniu mają powierzchnie prostopadłe do toru przenośnika lakierni, mogą wykazywać różnice w grubości powłoki w zależności od strefy pomiarowej, gdyż podczas natrysku proszku na poziomych powierzchniach będzie osadzać się więcej farby niż na powierzchniach pionowych.
- Dla wszystkich badanych technologii i różnych ilości podawanego proszku, przyczepność powierzchni jest bardzo dobra i spełnia normy branżowe.
- W większości przypadków można zaobserwować tendencję wzrostu twardości powłoki wraz ze zmniejszeniem jej grubości. Jednak istnieją wyjątki, takie jak próbki w technologii wzorcowej, gdzie odnotowano odwrotną zależność.

W celu określenia najlepszej metody przygotowania powierzchni do aplikacji powłoki proszkowej należy kontynuować badania, skupiając się na analizie dodatkowych czynników wpływających na jakość i trwałość powłoki. W tym celu dla próbek w powyższym badaniu należy dodatkowo przeprowadzić badania polegające m.in. na:
– badaniu koloru i połysku powłoki proszkowej,
– przeprowadzeniu testu odporności powłoki na uderzenie,
– przeprowadzeniu testu odporności na naturalną mgłę solną,
– przeprowadzeniu testu odporności na wilgoć,
– przeprowadzeniu przyśpieszonego testu klimatycznego.

W celu poszukiwania najoptymalniejszych rozwiązań technologii przygotowania powierzchni, jak i procesu nanoszenia powłok proszkowych należy wprowadzić dodatkowe zmienne w zakresie całego procesu, takie jak:
– uzupełnienie badań innymi metodami przygotowania powierzchni, np. metalizacją,
– rozbudowanie ilości procesów realizowanych w myjce natryskowej poprzez dodanie np. pasywacji lub fosforanowania,
– wprowadzenie zmiennych polimeryzacji farby – czasu oraz temperatury wygrzewania oraz kontrola rozkładu temperatury w piecu,
– wprowadzenie zmiennych: producenta, typu oraz właściwości farby proszkowej,
– dodanie nowych zmiennych w procesie aplikowania farby proszkowej, badanie np. strat farby i jej stopnia odzysku, wpływu napięcia ładowania na efektywność lakierowania.

LITERATURA

[1] Huang J., Yang M., Wan L., Tang K., Zhang H., Chen J., Noël J.J., Barker I., Zhang H., Zhu J., 2023. Ultrafine powder coating: Smooth surface, dense structure and enhanced corrosion resistance. Chemical Engineering Journal 455, 140815.
[2] Jegdić B.V., Bajat J.B., Popić J.P., Stevanović S.I., Mišković-Stanković V.B., 2011. The EIS investigation of powder polyester coatings on phosphated low carbon steel: The effect of $NaNO_2$ in the phosphating bath. Corrosion Science 53(9), 2872–2880.
[3] Michalski Ł., Kowal M., 2015. Ocena dyskomfortu pracowników na stanowiskach pracy malarni proszkowej. Wydawnictwo Instytutu Inżynierii Bezpieczeństwa i Nauk o Pracy Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
[4] Powder Coating Institute, 1994. Powder Coating. The Complete Finisher's Handbook 3rd Edition.
[5] Powder Coating Institute, 2021. Powder Coating. The Complete Finisher's Handbook 5th Edition.

[6] Richtering W., 2001. Polymer coatings: powder-based, Encyclopedia of materials: science and technology. Elsevier, Oxford, 7233–7234.
[7] Rubino G., Venettacci S., 2023. Advances in powder coating of metal components: A case study for wire die springs. Journal of Manufacturing Processes 101, 1257–1274.
[8] Teknos Oy, 2012. Podręcznik ochrony przeciwkorozyjnej powierzchni stalowych z zastosowaniem systemów malarskich.
[9] Zhang J., Dong X., Zhou Y., Liu J., 2022. Surface derusting of rust-covered metallic surface via shot blasting: A smoothed particle hydrodynamics simulation. Wear 514–515, 204566.

UCHWYT DO TRANSPORTU ZDEMONTOWANYCH ZBIORNIKÓW CYSTERN DROGOWYCH TYPU SILOS UCHYLNY NA TERENIE ZAKŁADU NAPRAWCZEGO

Jakub Horka*, Michał Stopel

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie. W prezentowanej publikacji przedstawiono etapy projektowania, a następnie budowę pełnowymiarowego uchwytu do transportu zdemontowanych zbiorników cystern drogowych. W dwóch pierwszych rozdziałach zawarto treść teoretyczną pracy. Pierwszy rozdział skupia się na omówieniu zagadnień teoretycznych związanych z szeroko pojętym zagadnieniem, jakim są cysterny drogowe typu silos uchylny, pokrótce zostaje przybliżona ich budowa, elementy wyposażenia eksploatacyjnego oraz możliwości zabudowy na różnego typu pojazdy. Rozdział drugi tyczy się zaś zagadnienia typowo inżynierskiego, mianowicie identyfikacji założeń konstrukcyjnych, zbierania danych, wykonania szkicu koncepcyjnego, projektowania 3D, analizy MES oraz wykonania pełnowymiarowego uchwytu. Pracę zamyka podsumowanie, które punktuje tego typu rozwiązanie na rzecz poprawy bezpieczeństwa oraz ergonomii procesu.

Słowa kluczowe: cysterna, uchwyt, dźwig

1. OMÓWIENIE PROBLEMATYKI SERWISU CYSTERN DROGOWYCH

Cysterny drogowe typu silos uchylny są to specjalistyczne pojazdy, których zadaniem jest transport materiałów sypkich na duże odległości. Liczba tego typu pojazdów bardzo znacząco wzrosła przez ostanie 25 lat. Pojazdy tego typu muszą spełniać wiele wytycznych, norm i certyfikatów, aby zostały dopuszczone do pracy. Pojazdy tego typu muszą ponadto przechodzić cykliczne badania techniczne prowadzone przez uprawione zakłady pod nadzorem takich instytucji, jak TDT, TÜV SÜD, TÜV NORD. Pojazdy tego typu również mogą przewozić materiały zawarte w konwencji ADR, czyli materiały niebezpieczne, wiąże się to z dodatkowymi wymaganiami, jakie muszą spełniać taki pojazd oraz jego wyposażenie. Firmy, które zajmują się naprawą, modernizacją oraz serwisem tego typu pojazdów, mają dużej wielkości parkingi na pojazdy oczekujące na swoją kolej, profesjonalną kadrę pracowniczą, która zdobywa niezbędne certyfikaty i uprawnienia do wykonywania tego typu czynności. Zakłady tego typu dysponują ponadto wysokiej klasy sprzętem w postaci spawarek, elektronarzędzi, pras hydraulicznych, podnośników hydraulicznych, wózków widłowych, suwnic podwieszanych, dźwigów samojezdnych, ciągników zakła-

* adres korespondencyjny: jakhor000@pbs.edu.pl

dowych, aby maksymalnie zwiększyć efektywność procesów dla pojazdu, który jest obsługiwany. Czynności, jakie są bardzo często wykonywane przy naprawie, serwisie i modernizacji tego typu pojazdów, to [2–4, 6, 11–14, 16–19]:

- zmiana koloru lub odmalowanie ramy oraz zbiornika,
- naprawa słupic osi przedniej,
- doposażenie w indywidualny układ hydrauliczny do unoszenia zbiornika,
- dozór okresowy zgodnie z dokumentacją nadzorczą,
- wymiana urządzeń kontrolnych oraz filtrów i uszczelek,
- naprawa oświetlenia,
- prostowanie ramy pojazdu,
- naprawa ramy pojazdu,
- prostowanie zbiornika pojazdu,
- naprawa zbiornika pojazdu,
- wymiana siłownika unoszącego zbiornik,
- kontrola stanu sworznia królewskiego oraz płyty ślizgowej,
- naprawa podestu roboczego oraz barierki bezpieczeństwa.

1.1. Omówienie cysterny drogowej typu silos uchylny

Cysterna drogowa to zbiornik wykonany z metalu lub tworzyw sztucznych wraz z całym osprzętem potrzebnym do bezpiecznego użytkowania. Zbiornik jest na stałe połączony z ramą nośną pojazdu w tylnej części do ramy pojazdu za pomocą specjalnych uchwytów, które umożliwiają wychylenie zbiornika z pozycji transportowej do pozycji wyładunku, w przedniej części za pomocą specjalnych uchwytów jest zamocowany teleskopowy siłownik hydrauliczny. Cysterna tego typu może zostać zamontowana na różnego rodzaju podwoziach, które przedstawiono poniżej na rysunkach 1–4.

Rys. 1. Cysterna drogowa typu silos uchylny marki O.ME.P.S na podwoziu pojazdu ciężarowego [9]

Rys. 2. Cysterna drogowa typu silos uchylny na podwoziu przyczepy marki O.ME.P.S [9]

Rys. 3. Cysterna drogowa naczepa typu silos uchylny w wersji VAKKUM marki SPS [10]

Rys. 4. Cysterna drogowa typu silos uchylny w wersji kontenera morskiego marki FFB [5]

1.2. Przedstawienie rozwiązań załadunku/rozładunku produktu do/z silosu

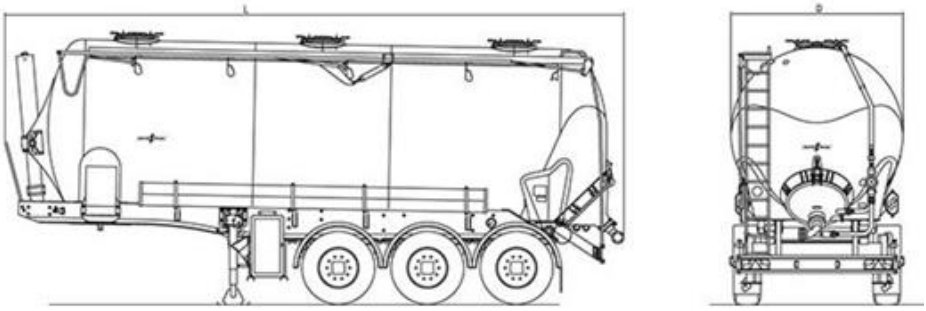
Cysterna drogowa typu silos uchylny to specjalny rodzaj cysterny drogowej, która jest przeznaczona do przewozu sypkich substancji, takich jak ziarna, cukier, nawozy czy różnego rodzaju proszki, granulaty. Cysterny tego typu mają charakterystyczną konstrukcję, która umożliwia ładowanie i rozładunek sypkiego materiału przez specjalny otwór umiejscowiony w tylnej części zbiornika cysterny. Zwykle są wyposażone też w systemy pneumatycznego lub hydraulicznego rozładunku, załadunku, który umożliwia kontrolowane wypompowywanie materiału ze zbiornika, które przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

Rys. 5. Cysterna typu silos uchylny z pneumatycznym układem rozładunku marki LAG [8]

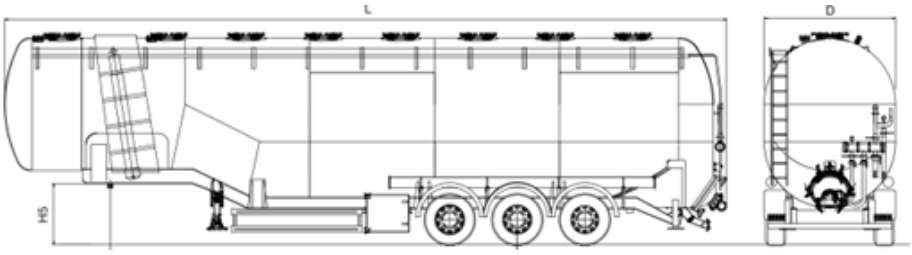
Rys. 6. Cysterna typu silos uchylny z hydraulicznym układem rozładunkowym marki Van Hooll [15]

1.3. Przedstawienie danych gabarytowych tego typu pojazdów

Cysterny typu silos uchylny mają cylindryczny kształt i są wykonane z aluminium lub tworzyw sztucznych, które zapewniają szczelność i ochronę przewożonego materiału przed wilgocią, zanieczyszczeniami i utratą jakości. Cysterna drogowa typu silos uchylny składa się z podwozia w postaci ramy nośnej naczepy oraz nadwozia, czyli zbiornika w kształcie cylindra. Długość takiego pojazdu jest uzależniona od pojemności zbiornika, która może się wahać w granicach od 38 m^3 do 90 m^3. Długość takiego zbiornika może wynosić od 8 do 14 m. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono dokumentację 2D rzutu bocznego cysterny drogowej w dwóch rozwiązaniach konstrukcyjnych uzależnionych od maksymalnej pojemności zbiornika.



Rys. 7. Rzut boczny oraz tylny cysterny drogowej typu silos uchylny marki SPS o pojemności 38 m^3, L – 9150 mm, D – 2550 mm [10]



Rys. 8. Rzut boczny oraz tylny cysterny drogowej typu silos uchylny marki KAS o pojemności 90 m^3, L – 14040 mm, D – 2550 mm [7]

1.4. Przedstawienie wyposażenia eksploracyjnego cysterny drogowej typu silos uchylny

Pojazdy tego typu są wyposażone w dodatkowe elementy, które przedstawiono na rysunkach 9–11. Wszystkie te elementy wyposażenia służą do bezpiecznego eksploatowania pojazdu.

Rys. 9. Przedstawienie wyposażenia cysterny drogowej typu silos uchylny: 1 – drabina, 2 – barierka, 3 – lej zsypowy, 4 – zawór rozładunkowy sterowany ręcznie (opracowanie własne)

Rys. 10. Przedstawienie wyposażenia cysterny drogowej typu silos uchylny: 1 – magistrala napowietrzająca dolna, 2 – nogi podporowe przednie, 3 – skrzynka sterowania siłownikiem hydraulicznym, 4 – schowek na węże rozładunkowe, 5 – osłona antyrowerowa, 6 – ucho mocujące, 7 – hydrauliczny siłownik teleskopowy, 8 – uchwyty siłownika hydraulicznego, 9 – rama nośna pojazdu, 10 – zbiornik ładunkowy pojazdu (opracowanie własne)

Rys. 11. Przedstawienie wyposażenia cysterny drogowej typu silos uchylny: 1 – magistrala napowietrzająca górna, 2 – nogi podporowe tylne rozładunkowe, 3 – schowek z pilotem zdalnego sterowania unoszeniem zbiornika, 4 – tylne uchwyty łączące zbiornik z ramą pojazdu, 5 – kolektor napowietrzający, 6 – ramię stabilizujące zbiornik, 7 – właz rewizyjny, 8 – manometr, 9 – wizjer rewizyjny filtra powietrza, 10 – schowek na wąż napowietrzający, 11 – węże napowietrzające (opracowanie własne)

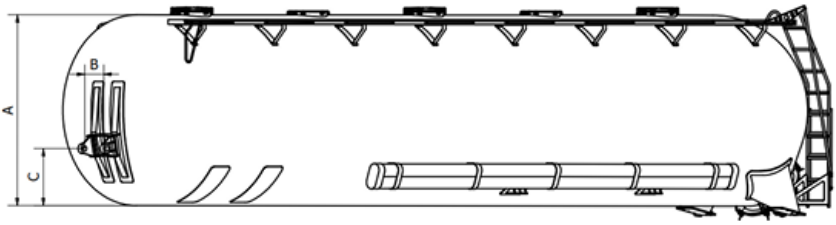
2. IDENTYFIKACJA ZAŁOŻEŃ KONSTRUKCYJNYCH, MODEL 3D, ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ORAZ WYKONANIE UCHWYTU

Główne założenia konstrukcyjne uchwytu do transportu zdemontowanych zbiorników cystern drogowych typu silos uchylny na terenie zakładu naprawczego to:

- udźwig maksymalny 1000 kg,
- masa poniżej 250 kg,
- kompatybilność z widłami wózków widłowych posiadanych przez firmę, wymiary wideł (długość 1100 mm, szerokość 100 mm, wysokość 40 mm),
- wysokość maksymalna 500 mm.

2.1. Wykonanie pomiarów elementów zamocowania siłownika

Pomiary usytuowania uchwytów zamocowania siłownika dla cystern producentów FFB, KAS, LAG, SP przedstawiono na rysunku 12. Oznaczenia: A – średnica zewnętrzna zbiornika, B – rozstaw między uchwytami siłownika, C – wysokość osi otworu uchwytu siłownika do płaszczyzny mającej kontakt z podłożem. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.



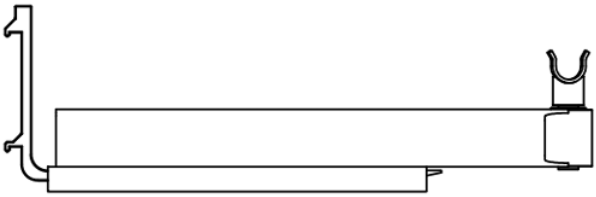
Rys. 12. Schemat pomiarów dla uchwytów siłownika cysterny typu silos uchylny (widok izometryczny bez ramy pojazdu) (opracowanie własne)

Tab. 1. Pomiary usytuowania uchwytów zamocowania siłownika dla cystern producentów FFB, SP, KAS, LAG (opracowanie własne)

Wymiar / Producent	A (mm)	B (mm)	C (mm)
FFB	2550	350	800
SP	2550	350	950
KAS	2530	350	750
LAG	2530	350	1200

2.2. Rozwiązanie koncepcyjne – główne ramię uchwytu wykonane z dwuteownika

Dzięki metodzie podwójnego punktowania można ocenić, która koncepcja jest najlepsza do wykonania projektu. Suma punktów dla koncepcji wykonanej z dwuteownika jest najwyższa. Wobec tego wykonany został uchwyt zgodny z koncepcją – główne ramię wykonane z dwuteownika, przedstawione na rysunku 13.

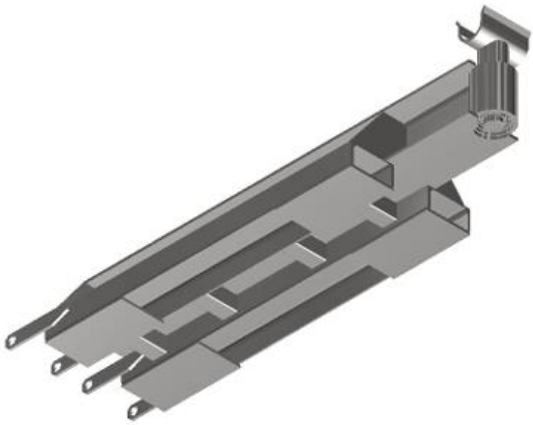


Rys. 13. Szkic koncepcji wykonanej z dwuteownika (opracowanie własne)

2.3. Zaprojektowanie konstrukcji z zastosowaniem oprogramowania CAD

Elementy znormalizowane, takie jak wpust i łożyska oraz sworznie zabezpieczające, zostały dobrane na podstawie tabel z danymi technicznymi oraz przeprowadzono dla nich obliczenia sprawdzające. Szkic gotowego uchwytu wykonanego w programie INVENTOR przedstawiono na rysunkach 14 i 15.

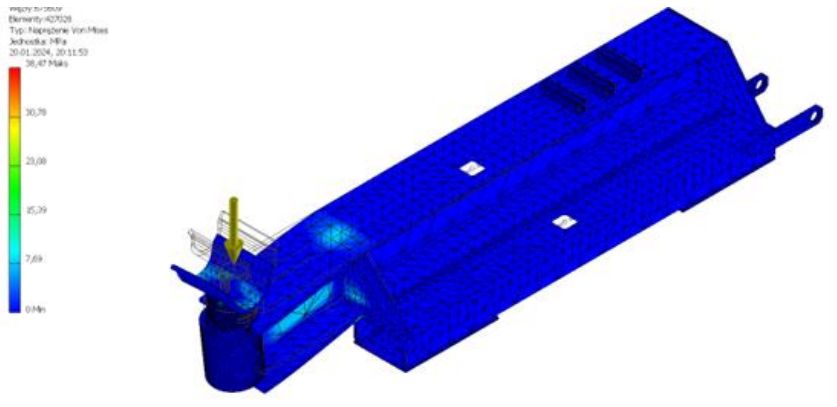
Rys. 14. Prezentacja gotowego projektu uchwytu w programie INVENTOR



Rys. 15. Prezentacja gotowego projektu uchwytu INVENTOR

2.4. Analiza wytrzymałościowa zaprojektowanego uchwytu

Analiza wytrzymałościowa zaprojektowanego uchwytu została wykonana w programie Autodesk INVENTOR 2023 i składa się z kilku etapów. Etap pierwszy poległ na wykonaniu obliczeń sprawdzających elementów znormalizowanych dobranych na podstawie wielkości prezentowanych w tabelach technicznych produktów. Takie obliczenia zostały wykonane dla łożysk oraz wpustu. Etap drugi polegał na wykonaniu obliczeń za pomocą „kreatora wałów", którym dysponuje program INVENTOR, oraz wykonaniu analizy naprężeń wału za pomocą operacji „analiza naprężeń". Etap trzeci polegał na wykonaniu analizy naprężeń całego uchwytu. Przykład analizy wytrzymałościowej przedstawiono na rysunku 16. Etap czwarty polegał na wykonaniu obliczeń dla spoin użytych do wykonania uchwytu. Gotowy element przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 16. Analiza wytrzymałościowa przeprowadzona w oprogramowaniu INVENTOR (opracowanie własne)

Rys. 17. Rzut izometryczny uchwytu zabezpieczonego powłokami lakierniczymi (opracowanie własne)

Na uchwyt została złożona dokumentacja patentowa w celu ochrony praw autorskich.

3. PODSUMOWANIE

Wykonany uchwyt do transportu zdemontowanych zbiorników cystern drogowych spełnia wszystkie założenia i warunki. Jego budowa przebiegła bardzo sprawnie, jednakże podczas montażu łożysk zauważono, że tuleja zewnętrzna obrotnicy została zdeformowana poprzez spoiny, którymi była montowana. Problem usunięto poprzez szlifowanie otworu tulei pod wymiary łożysk. Testy uchwytu do transportu zdemontowanych zbiorników cystern drogowych typu silos uchylny potwierdziły, że zwiększa on bezpieczeństwo podczas wykonywania operacji przeprowadzania zbiornika pomiędzy stanowiskami naprawczymi oraz poprawia komfort pracy operatora oraz ergonomię procesu.

LITERATURA

[1] DZIENNIK USTAW RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ, Warszawa, dnia 11 maja 2023 r. poz. 891 OŚWIADCZENIE RZĄDOWE z dnia 13 marca 2023 r. w sprawie wejścia w życie zmian do załączników A i B do Umowy dotyczącej międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR), sporządzonej w Genewie dnia 30 września 1957 r. TOM I.

[2] DZIENNIK USTAW RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ, Warszawa, dnia 11 maja 2023 r. poz. 891 OŚWIADCZENIE RZĄDOWE z dnia 13 marca 2023 r. w sprawie wejścia w życie zmian do załączników A i B do Umowy dotyczącej międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR), sporządzonej w Genewie dnia 30 września 1957 r. TOM II.

[3] http://www.horka.com.pl/ (dostęp: 05.12.2023).

[4] https://pl.wikipedia.org/wiki/Cysterna_drogowa (dostęp: 05.12.2023).

[5] https://www.facebook.com/photo/?fbid=6213721088671316&set=g.696863007809018 (dostęp: 05.12.2023).

[6] https://www.feldbinder.com/pl/pojazdy-silosowe__8/ (dostęp: 05.12.2023).

[7] https://www.kaessbohrer.com/pl/products/naczepy-silosy-596-c/kiprowane-597-c (dostęp: 05.12.2023).

[8] https://www.lag.eu/de/trailers/silo-auflieger/ (dostęp: 05.12.2023).

[9] https://www.omeps.it/en/portfolio/cra-34/ (dostęp: 05.12.2023).

[10] https://www.spitzer-silo.com/pl/pojazdy/naczepy-silosowe-ze-zbiornikami-podnoszonymi/ (dostęp: 05.12.2023).

[11] https://www.tdt.gov.pl/dzialalnosc/dzialalnosc-dozorowa/urzadzenia-podlegajace-dozorowi-technicznemu/specjalistyczne-urzadzenia-cisnieniowe/cysterny-cisnieniowe/#1611734976306-5b69a300-57f7/ (dostęp: 05.12.2023).

[12] https://www.tuvsud.com/pl-pl/branze/chemiczna-paliwowa-wydobywcza/badania-nieniszczace-ndt (dostęp: 05.12.2023).

[13] https://www.tuvsud.com/pl-pl/branze/produkcja-przemyslowa/spawalnictwo/-kwalifikowanie-technologii-spawania-wpqr (dostęp: 05.12.2023).

[14] https://www.tuvsud.com/pl-pl/branze/produkcja-przemyslowa/technologia-cisnienia-i-pary/odbiory-cystern-adr-rid-tped (dostęp: 05.12.2023).

[15] https://www.vanhool.com/en (dostęp: 05.12.2023).

[16] PN-EN 10216-2+A1:2020-05 – wersja polska rury bezszwowe do zastosowań ciśnieniowych.

[17] PN-EN 13445-1:2021-10 – wersja angielska zbiorniki ciśnieniowe.

[18] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać drogowe cysterny pomiarowe, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych.

[19] ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ROZWOJU I TECHNOLOGII1) z dnia 17 grudnia 2021 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego dla niektórych urządzeń ciśnieniowych podlegających dozorowi technicznemu. Na podstawie art. 8 ust. 4 ustawy z dnia 21 grudnia 2000 r. o dozorze technicznym (Dz.U. z 2021 r. poz. 272 i 2269).

OCENA EFEKTYWNOŚCI NAPRAWY PANELOWEJ SŁUPKA A NADWOZIA POJAZDU OSOBOWEGO

Michał Liss*, Kacper Krause

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie. Zdecydowana większość analiz prowadzonych w kontekście napraw blacharsko-lakierniczych jest zorientowana wokół ich wymiaru ekonomicznego, przez co odnosi się wrażenie, że jakość naprawy, a tym samym bezpieczeństwo, które element nadwozia po naprawie ma zapewniać, spada na drugi plan. W prezentowanej publikacji przedstawiono tematykę napraw blacharsko-lakierniczych z perspektywy zakładu realizującego naprawę na przykładzie naprawy panelowej istotnego elementu konstrukcji nadwozia, jakim jest słupek C pojazdu.

Słowa kluczowe: narzędzia blacharskie, uszkodzenia karoserii, metody naprawy blacharskiej, ocena efektywności naprawy

1. WPROWADZENIE

W naprawach blacharsko-lakierniczych jednym z ważniejszych etapów, jest klasyfikacja uszkodzenia, dzięki której możliwe jest zaplanowanie całego procesu naprawy. Nie da się ukryć, że klasyfikacja ta pozostaje mocno uzależniona od doświadczenia osoby, która ją przeprowadza. Istnieją procedury napraw przygotowane przez producentów poszczególnych pojazdów, które mają w pewnym sensie wspomagać blacharzy w podjęciu właściwej decyzji. Jak się jednak można domyślić, żadna z tych procedur nie jest dostępna za darmo oraz nie odpowiada w całości każdemu rodzajowi uszkodzenia, tak więc doświadczenie pracownika zakładu naprawczego ma w tym przypadku kluczowe znaczenie. Ów pracownik mierzy się z jeszcze jednym wyzwaniem, jakim są możliwości technologiczne i organizacyjne zakładu, a w szczególności z dostępnymi [6, 8, 9]:

- systemami montażu i demontażu adekwatnymi do istniejącego problemu,
- systemami pomiarowymi umożliwiającymi weryfikację przeprowadzanych czynności naprawczych,
- narzędziami zarówno do napraw profili otwartych, jak i zamkniętych,
- technologiami łączenia, tj.: lutospawanie, zgrzewanie itp.,
- formami organizacji pracy w zakładzie blacharsko-lakierniczym.

* adres korespondencyjny: michal.liss@pbs.edu.pl

2. TECHNOLOGIA NAPRAWY BLACHARSKIEJ ZA POMOCĄ METODY PANELOWEJ

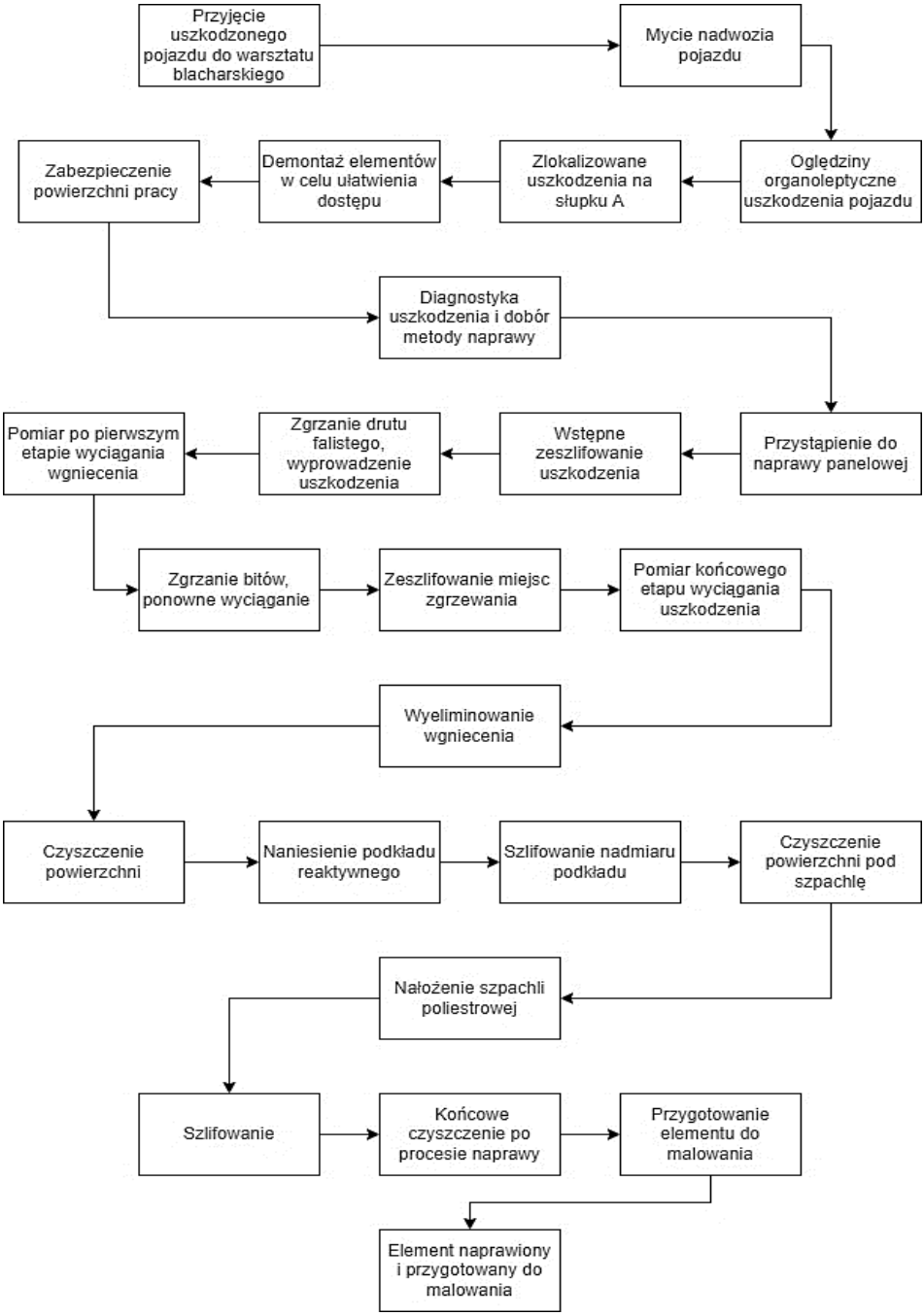
W środowisku branżowym, jak i naukowym utarło się przekonanie, że współczesna technologia napraw blacharskich sprowadza się w głównej mierze do wymiany uszkodzonych elementów. Współczesne rozwiązania przemysłu motoryzacyjnego przyczyniły się do tego, że naprawa oparta na wymianie w wielu przypadkach nie jest konieczna, a i jednocześnie zdecydowanie mniej korzystna pod względem ekonomicznym. Wymianie podlegają zwykle profilowane elementy wykonane ze stali o podwyższonej wytrzymałości, stopów metali lekkich, takich jak aluminium, oraz wszystkie elementy nadwozia, których podstawowym zadaniem jest pochłanianie energii uderzenia [6, 9]. Bardzo poważnym błędem popełnianym podczas napraw blacharskich elementów wykonanych z blach o podwyższonej wytrzymałości, a bardzo często też wynikającym z braku doświadczenia lub świadomości możliwych skutków, jest obróbka poprzez ich intensywne podgrzewanie. Wynikiem oddziaływania wysokiej temperatury na naprawiany materiał jest utrata jego skrupulatnie ukształtowanych w trakcie produkcji własności. Dotyczy to w szczególności elementów nadwozia pojazdu, będących profilami zamkniętymi, takimi jak: drzwi, maska, pokrywa bagażnika, słupki itp. Stąd jakiejkolwiek naprawie blacharskiej przypisuje się dwa zasadnicze cele [1, 5]:

- przywrócenie pierwotnych cech geometrycznych uszkodzonego elementu,
- przywrócenie pierwotnych bądź tolerowanych własności naprawianemu elementowi.

Uzyskanie jednego z wyszczególnionych powyżej celów nie stanowi problemu, nawet dla niedoświadczonego blacharza, natomiast spełnienie dwóch jest już nie lada wyzwaniem. Technologie usuwania wgnieceń nadwozia dzieli się na dwa rodzaje [4, 7]:

- wypychanie od wewnątrz,
- wyciąganie od zewnątrz.

To właśnie wyciąganie od zewnątrz jest cechą charakterystyczną napraw panelowych. Do elementu naprawianego mocowane są specjalne uchwyty, których połączenie jest na tyle trwałe, że można je wykorzystać do wyciągania jakiegokolwiek wgniecenia. Elementem wyciągającym mogą być różne narzędzia, np.: młotek bezwładnościowy, wyciągarka dźwigniowa lub pneumatyczna. Urządzenia do prowadzenia tego typu napraw to spottery blacharskie, które umożliwiają naprawę przy maksymalnym zachowaniu własności elementu. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy wybranej procedury naprawy blacharskiej za pomocą metody panelowej, na przykładzie uszkodzonego słupka A w pojeździe Jeep Grand Cherokee. W dalszej części publikacji wskazane etapy procedury naprawy poddano szczegółowej analizie.



Rys. 1. Schemat blokowy procedury naprawy słupka A za pomocą metody panelowej (opracowanie własne)

2.1. Proces technologiczny naprawy panelowej

Naprawa blacharska uszkodzonego słupka A rozpoczyna się od wstępnych oględzin. Oprócz dokładnego określenia elementu konstrukcji nadwozia, który uległ uszkodzeniu, istotne jest również jego dokładne umycie, aby właściwie ocenić wielkość szkody. W analizowanym przypadku oprócz wyraźnego trwałego odkształcenia fragmentu słupka dostrzeżono również powierzchniową korozję. Następnie w celu poprawienia ergonomii pracy zdemontowano elementy pojazdu: prawe drzwi oraz osłonę słupka A znajdującą się wewnątrz pojazdu. Zabezpieczono powierzchnie poza obszarem naprawy i przygotowano pole pracy wokół uszkodzonego obszaru, co szczegółowo przedstawiono na rysunku 2.

Rys. 2. Przygotowanie uszkodzenia do naprawy (opracowanie własne)

Następnym etapem procesu naprawy było zeszlifowanie uszkodzonego obszaru za pomocą szlifierki kątowej z napędem pneumatycznym, z wykorzystaniem papieru ściernego o gradacji 80. Po zakończeniu szlifowania przystąpiono do dokładnej diagnostyki uszkodzenia, która miała na celu wybór odpowiedniej metody naprawy. Zdecydowano się na naprawę panelową.

W ramach diagnostyki uszkodzenia wykonano szereg działań, w tym zaznaczenie linii oryginalnego kształtu słupka za pomocą miarki konturowej oraz dokonanie pomiarów głębokościomierzem cyfrowym i suwmiarką. Pomiar różnicy głębokości między nieuszkodzoną częścią słupka a najgłębszym wgnieceniem wykazał różnicę wynoszącą 15 mm. Dokonano ponadto pomiaru przesunięcia wgniecenia w kierunku szyby, korzystając z wymiarowania słupka w porównaniu z elementem nienaruszonym, co wykazało odchyłkę przesunięcia o 1,5 mm. Rezultaty tych czynności przedstawiono na rysunku 3.

Rys. 3. Uszkodzenie po szlifowaniu i diagnostyce (opracowanie własne)

Kontynuując proces naprawy, do zaznaczonej wcześniej linii oryginalnego kształtu na słupku A zastosowano spoter blacharski. Urządzenie to ustawiono na 50% swojej mocy, z czasem przygrzewania wynoszącym 0,3 sekundy. Na tym etapie do uszkodzonego elementu (do słupka A) przygrzano drut falisty, co przedstawiono na rysunku 4.

Rys. 4. Przymocowanie do słupka A drutu falistego (opracowanie własne)

W kolejnym etapie naprawy wykorzystano młotek bezwładnościowy z tzw. multihakiem mającym osiem zaczepów, aby rozpocząć proces wyciągania wgniecenia. Po zakończeniu tej czynności dokonano zmiany końcówki na multihak z sześcioma zaczepami i kontynuowano pracę nad wyciąganiem uszkodzonego obszaru.

Pomiary po pierwszym etapie wyciągania wykazały, że mniejsze uszkodzenie w środkowej części słupka zostało skutecznie wyciągnięte. W miejscu głównego wgniecenia zmierzono jednak dalszą różnicę wynoszącą 7 mm. Dodatkowo odnotowano, że odchyłka wybrzuszenia wgniecenia w stronę szyby zmniejszyła się do 0,5 mm, co świadczyło o efektywnym postępie w procesie naprawy. Aby dalej zminimalizować pozostałe wgniecenie, zastosowano młotek bezwładnościowy wyposażony w elektrodę, co zostało zilustrowane na rysunku 5. Niemniej jednak efekt po przeprowadzaniu tej czynności okazał się niesatysfakcjonujący. W związku z tym podjęto decyzję o zgrzaniu 7 bitów prostych za pomocą spotera, ustawionego na moc 55% i czas 0,2 sekundy, bezpośrednio w miejscu wgniecenia. Na rysunku 6 ukazano, w jaki sposób zostały przymocowane bity proste. Korzystając ponownie z młotka bezwładnościowego z hakiem, podjęto dalsze działania mające na celu wyprowadzenie wgniecenia do pierwotnego poziomu.

Rys. 5. Wyciąganie wgniecenia za pomocą młotka bezwładnościowego podłączonego pod spoter (opracowanie własne)

Rys. 6. Umieszczenie bitów (opracowanie własne)

Po zakończeniu tego etapu przystąpiono do wyszlifowania elementu, co miało na celu usunięcie pozostałości po bitach na karoserii. Pomiar końcowy przeprowadzony za pomocą miarki kształtowej i głębokościomierza, potwierdził skuteczność działań naprawy – wszystkie uszkodzenia zostały w pełni wyprowadzone. Następnie wykorzystując zmywacz silikonowy, dokładnie oczyszczono powierzchnię, przygotowując ją do dalszych prac. Efekty tych działań przedstawiono na rysunku 7.

Rys. 7. Obiekt badań po wyciągnięciu, zeszlifowaniu i wyczyszczeniu (opracowanie własne)

Kolejnym krokiem było naniesienie podkładu reaktywnego, który wyrównał powierzchnię i zapewnił antykorozyjne zabezpieczenie miejsca pracy. Po wyschnięciu i zeszlifowaniu ręcznie nadmiaru podkładu, za pomocą papieru o gradacji 180, powierzchnia została ponownie przygotowana do dalszej obróbki z użyciem zmywacza silikonowego, co zilustrowano na rysunku 8.

Rys. 8. Obiekt badań po naniesieniu podkładu reaktywnego i szlifowaniu (opracowanie własne)

Kolejnym etapem procesu naprawy było wymieszanie utwardzacza ze szpachlą poliestrową, z zastosowaniem proporcji zalecanych przez producenta. Po nałożeniu warstwy szpachli oczekiwano, aż ta wyschnie. Następnie przystąpiono do procesu szlifowania powierzchni, używając papieru ściernego o gradacji 220. Po zakończeniu szlifowania powierzchnię dokładnie umyto zmywaczem wodnym.

Ostatnią czynnością przed malowaniem było przygotowanie elementu, co obejmowało użycie taśmy maskującej i papieru malarskiego. Element po wykonaniu naprawy panelowej i przygotowaniu do malowania zaprezentowano na rysunku 9.

Rys. 9. Skończony proces naprawy blacharskiej (opracowanie własne)

3. ANALIZA I OCENA EFEKTYWNOŚCI NAPRAWY

Wyniki analizy efektywności naprawy blacharskiej słupka A Jeepa Grand Cherokee koncentrują się na jakości wykonanych prac oraz trafności doboru metody naprawy. Głównym celem analizy było zidentyfikowanie stopnia uszkodzenia i jakości przeprowadzonej naprawy. Analiza ta uwzględnia zarówno techniczne aspekty pracy, jak i strategiczne podejście do wyboru najbardziej odpowiedniej metody naprawy w odniesieniu do charakteru i zakresu uszkodzenia.

1) **Skuteczność i jakość przeprowadzonej naprawy:** Proces naprawczy słupka A w Jeepie Grand Cherokee osiągnął wysoką skuteczność i jakość wykonania. Udało się osiągnąć cel, którym było przywrócenie uszkodzonego elementu do stanu zbliżonego do oryginalnego zarówno pod względem strukturalnym, jak i estetycznym. Przebieg naprawy charakteryzował się dokładnością i starannością na każdym etapie, od demontażu, przez precyzyjne wyciąganie wgnieceń, aż po etap wykończeniowy.
2) **Odpowiedni Dobór Metody Naprawy:** Zastosowanie metody naprawy panelowej w przypadku powierzchniowego wgniecenia słupka A w Jeepie Grand Cherokee okazało się działaniem w pełni zasadnym. Zgodnie z wcześniejszą analizą wybranych metod naprawczych, odnoszącą się do konkretnych rodzajów uszkodzeń, metoda panelowa była rekomendowana do uszkodzeń o mniejszym zakresie. Ta technika umożliwiła efektywne przywrócenie

uszkodzonego elementu do jego pierwotnego stanu, bez potrzeby ingerowania w głębsze warstwy struktury pojazdu. Taki wybór metodologii naprawy, zgodny z ustalonymi wcześniej kryteriami, podkreśla celowe i przemyślane podejście do procesu naprawczego. Na rysunku 10 zaprezentowano porównanie stanu przed i po wykonaniu naprawy blacharskiej elementu. Na zdjęciu a) można zobaczyć stan słupka A przed przystąpieniem do procesu naprawczego. Na zdjęciu b) przedstawiono natomiast element po zakończeniu prac naprawczych, w których zastosowano metodę naprawy panelowej, a następnie przeprowadzono lakierowanie podkładem. Rysunek ten ilustruje efektywność zastosowanych technik naprawczych oraz umiejętności zespołu przeprowadzającego naprawę.

Rys. 10. Stan przed i po procesie naprawy blacharskiej samochodu (opracowanie własne)

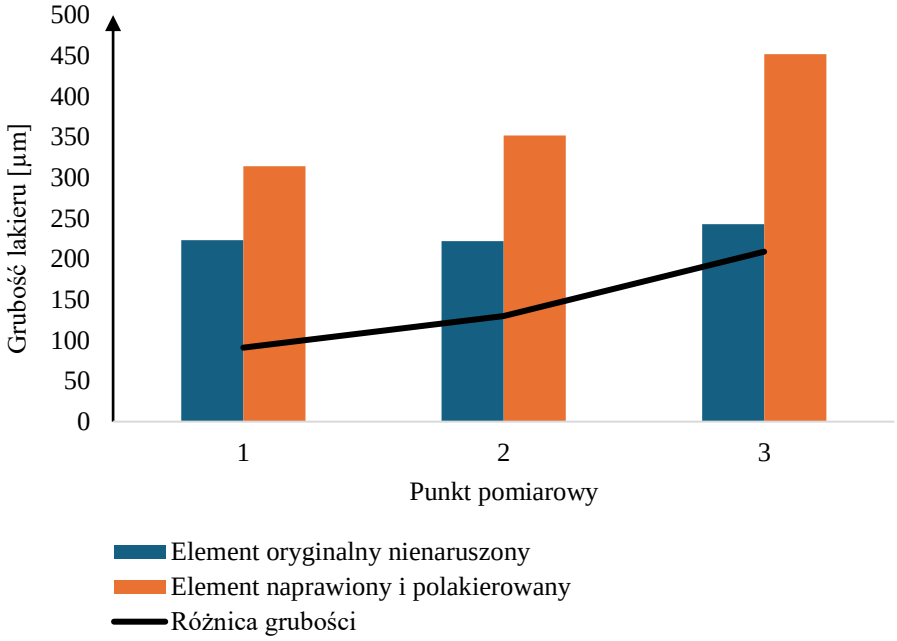
3) **Ocena efektywności naprawy blacharskiej:** W ramach dokonanej oceny efektywności naprawy blacharskiej słupka A w pojeździe Jeep Grand Cherokee uwzględniono szczegółową analizę trzech decydujących aspektów: przywrócenia oryginalnych wymiarów i kształtu elementu, jakości wykończenia powierzchni oraz grubości warstwy ochronnej elementu po malowaniu elementu.
4) **Przywrócenie oryginalnych wymiarów i kształtu naprawianego słupka:** W trakcie naprawy stosowano głębokościomierz, suwmiarkę oraz miarę konturową do ścisłego odwzorowania kształtu i linii nieuszkodzonego słupka A. Dokonane pomiary potwierdziły efektywne zredukowanie różnicy głębokości i odchyłki wybrzuszenia wgniecenia, co świadczy o wysokim stopniu precyzji naprawy.

5) **Jakość wykończenia powierzchni elementu po procesie naprawy:** Analiza etapów szlifowania i szpachlowania, a także końcowy wygląd powierzchni wskazują na wysoki poziom jakości wykończenia elementu naprawianego. Usunięcie wszelkich śladów po narzędziach użytych do naprawy przy zastosowaniu odpowiednich gradacji papieru ściernego oraz staranne przygotowanie powierzchni pod malowanie podkreślają rzetelność wykonania naprawy blacharskiej.
6) **Grubość warstwy ochronnej po malowaniu elementu:** W kontekście oceny efektywności naprawy blacharskiej istotnym parametrem jest grubość warstwy lakieru między elementem stalowym a miernikiem lakieru. Wskaźnik ten pozwala na dokładną ocenę jakości wykonanej pracy na naprawianym elemencie. Do zmierzenia grubości powłoki lakierniczej użyto miernika Prodig-Tech GL-PRO-2-F. Przed przystąpieniem do pomiarów miernik został skalibrowany z użyciem standardowej płytki wzorcującej [3]. Pomiary wykonano na nieuszkodzonym słupku A pojazdu oraz na naprawionym elemencie, mierząc grubość lakieru w trzech wybranych miejscach. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Porównanie grubości warstwy ochronnej na oryginalnym i naprawionym elemencie (opracowanie własne)

Lp. pomiarów	Element oryginalny nienaruszony	Element naprawiony i polakierowany	Różnica grubości
1	223 μm	314 μm	91 μm
2	222 μm	352 μm	130 μm
3	243 μm	452 μm	209 μm

Na oryginalnym, nienaprawianym słupku wartości były następujące: 223, 222, 243 μm. Według miernika pomiar kwalifikuje się na drugą warstwę lakieru. Przyczyną takiego wyniku jest rodzaj lakieru użytego przez producenta. Lakier to *Deep Cherry Red Crystal*, o kodzie *PRP*, charakteryzuje się perłową głębią, co oznacza, że w fabryce jest on kładziony grubymi warstwami [2]. Po naprawie i lakierowaniu elementu naprawionego wartości zmierzone wyniosły: 314, 352, 452 μm. Największa różnica w pomiarze wynosiła 209 μm w tym samym miejscu pomiaru. Różnica w grubości jest typowa dla elementów poddanych naprawie blacharskiej z wykorzystaniem szpachli. Po przeliczeniu jednostek różnica 0,209 mm jest bardzo dobrym wynikiem w ocenie efektywności, gdy weźmie się pod uwagę grubość warstwy ochronnej po malowaniu elementu, i świadczy o wysokiej jakości wykonanej naprawy (rys. 11).



Rys. 11. Grubość lakieru w poszczególnych punktach pomiarowych słupka A (opracowanie własne)

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki potwierdzają, że naprawa panelowa może być zastosowana w przypadkach uszkodzeń elementów istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa biernego pojazdu, takich jak słupek. Na podstawie przedstawionego procesu technologicznego naprawy panelowej słupka A zobrazowano, czego dotyczą poszczególne czynności. Na tej podstawie można określić te czynności, które chociażby oddziałują termicznie na naprawiany materiał, a jak wiadomo, wielkość tego oddziaływania ma istotne przełożenie na własności naprawianego elementu nadwozia. Publikacja powstała w celu zwrócenia uwagi na to, że nie tylko walory estetyczne są istotne z punktu widzenia naprawy blacharskiej, lecz także procesy współtowarzyszące realizowanym czynnościom. Dokładność w przywracaniu oryginalnych wymiarów i kształtu słupka A, potwierdzona pomiarami, wskazuje na skuteczność i efektywność wybranej metody naprawy. Pomiar grubości warstwy lakieru po naprawie wykazał niewielkie różnice w stosunku do oryginalnych wartości, co jest typowe dla procesów napraw blacharskich, natomiast na ich podstawie nie można twierdzić, że nie wpływa ona negatywnie na trwałość bądź wytrzymałość naprawionego elementu.

LITERATURA

[1] Gałdyński D., Lisowski M., 2015. Ocena wybranych technologii napraw nadwozi samochodów. Autobusy, Eksploatacja i testy 6, 92–95.
[2] https://eagleeyepaintsupply.com/products/chrysler-prp-jrp-deep-cherry-red-metallic-low-voc-basecoat-paint (dostęp: 23.01.2024).
[3] https://www.prodig-tech.pl/produkt/miernik-lakieru-gl-pro-2/ (dostęp:23.01.2024).
[4] Lewicki W., 2017. Analiza wymiaru ekonomicznego wpływu zastosowania systemów napraw panelowych na redukcję kosztów napraw blacharsko--lakierniczych. Autobusy, Eksploatacja i testy 12, 1035–1039.
[5] Livesey A., Robinson A., 2019. The Repair of Vehicle Bodies. Routledge, Nowy Jork.
[6] Raatz B., 2020. Blacharstwo samochodowe. Wydawnictwo RG MEDIA, Bydgoszcz.
[7] Szada-Borzyszkowski W., 2014. Wpływ technologii odbudowy powypadkowej karoserii samochodowej na bezpieczeństwo użytkowania pojazdu. Autobusy, Eksploatacja i testy 6, 266–271.
[8] Weinhuber K., Auer K., 2022. Podstawy lakiernictwa samochodowego. WKiŁ, Sulejówek.
[9] Wielgołaski W., 2024. Pomiędzy blacharstwem a lakiernictwem. Wydawnictwo RG MEDIA, Bydgoszcz.

DIAGNOSTYKA WOLNOOBROTOWYCH SYSTEMÓW NAPĘDOWYCH Z UŻYCIEM TECHNIK ML

Emil Golonka[1*], Michał Pająk[1], Davor Kolar[2]

[1] Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Mechaniczny, ul. Stasieckiego 54, 26-600 Radom
[2] University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lucica Street 5, 10002 Zagreb, Croatia

Streszczenie. Diagnostyka maszyn wolnoobrotowych jest często trudniejsza i bardziej skomplikowana niż diagnostyka maszyn pracujących w wyższych prędkościach. W związku z tym kluczowym elementem w nowoczesnych strategiach konserwacji jest dokładna diagnostyka i szybka analiza tych danych. W celu określania stanu niezawodnościowego urządzenia wymagane jest zastosowanie zaawansowanych technik, w tym analizy drgań, termografii, badań ultradźwiękowych oraz systemów monitorowania stanu maszyn. W pracy przedstawiono strategie identyfikowania stanu niezawodnościowego maszyny za pomocą analizy drgań. Metoda ta wykorzystuje techniki nadzorowanego uczenia maszynowego (*Machine Learning*). Wykorzystano klasyfikator *Random Forest Classifier* (RFC) dostępny w bibliotece modułu *scikit-learn*. *Scikit-learn* jest biblioteką, która umożliwia w języku Python przeprowadzać algorytmy klasyfikacji, regresji i klastrowania. Umożliwia to otrzymanie zadowalających wyników klasyfikacji nawet przy niekompletnym zbiorze danych uczących lub danych niskiej jakości.

Słowa kluczowe: diagnostyka maszyn wolnoobrotowych, *Random Forest Classifier* (RFC), *scikit-learn*, silnik, *Machine Learning*

1. WSTĘP

To, czy maszyna jest uważana za wolnoobrotową, zależy od branży, rodzaju maszyny i jej zastosowania. Nie istnieje jedna konkretna definicja określająca prędkość, z którą obracają się takie maszyny. Prędkość 600 obr·min^{-1} jest ogólnie uważana za minimum dla maszyn obracających się ze średnią prędkością. Z tego powodu maszyny o prędkości obrotowej mniejszej niż 600 obr·min^{-1} są powszechnie klasyfikowane jako maszyny wolno obracające się [11]. W literaturze pojawiają się również definicje, zgodnie z którymi maszyny o niskich prędkościach to takie, których prędkość obrotowa nie przekracza kilkudziesięciu obrotów na minutę [6]. W tej publikacji opisano badania przeprowadzone dla prędkości obrotowych: 150 obr·min^{-1}.

Diagnostyka maszyn obracających się z niską prędkością jest procesem często trudnym i bardzo skomplikowanym. Pierwszym z powodów jest generowana niska częstotliwość drgań, co powoduje, że trudno je wykryć za pomocą standardowych metod. Kolejny powód to zwykle duża masa i spore rozmiary takich urządzeń technicznych, które mają wpływ na trudność dostępu do pewnych obszarów maszyny [18]. Tymczasem skomplikowana geometria i struktura maszyny sprawiają, że poszczególne elementy maszyny mogą mieć różne

[*] adres korespondencyjny: emil.golonka@uthrad.pl

właściwości dynamiczne, a przez to ocena stanu tych maszyn jest bardziej złożona [8]. Badania silników wolnoobrotowych mogą wymagać długoterminowego monitorowania i gromadzenia danych. Dzieje się tak, ponieważ niektóre problemy mogą występować tylko w określonych warunkach pracy lub po długim okresie pracy. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę ekstremalne warunki pracy, które wpływają na diagnostykę, np. wysokie temperatury, dużą wilgotność lub duże obciążenie [10]. Wady mogą rozwijać się bardzo powoli, dopóki nie zostaną ujawnione (do zauważalnej awarii) – wówczas możliwe jest zastosowanie tylko środków naprawczych, a nie zapobiegawczych [15].

W związku z rozwojem technologii i rosnącym zapotrzebowaniem przemysłu na wydajne i niezawodne urządzenia techniczne diagnostyka stanu maszyn stała się kluczowym czynnikiem utrzymania niezawodności i zapobiegania awariom. W szczególności maszyny wolnoobrotowe stanowią wyzwanie dla tradycyjnych metod diagnostycznych ze względu na ich specyfikę i wymagania diagnostyczne. W odpowiedzi na te wyzwania coraz więcej firm i badaczy zwraca się ku metodom uczenia maszynowego w celu identyfikacji stanu maszyn. Sztuczna inteligencja rewolucjonizuje podejście do diagnostyki maszyn, wykorzystując zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego i analizę bardzo dużej ilości danych do identyfikowania wzorców, przewidywania błędów i ich klasyfikacji [13].

Uczenie maszynowe to metoda analizy danych, która polega na tworzeniu algorytmów, które uczą się na podstawie zbioru danych. Można wyróżnić dwa główne typy uczenia maszynowego: nienadzorowane i nadzorowane. Uczenie nadzorowane opiera się na trenowaniu modelu danymi zawierającymi rozwiązanie problemu, tzw. etykietę. Proces ten przebiega w następujący sposób: zbiór danych dzieli się w odpowiedniej proporcji na dane treningowe i dane testowe. Dane testowe zawierają cechy, czyli dane wejściowe i odpowiadające im etykiety. Algorytm podczas trenowania uczy się zależności pomiędzy etykietami a cechami. W ten sposób powstaje model, który następnie jest testowany na danych testowych i na tej podstawie ocenia się jego skuteczność. Klasyczne zadania uczenia nadzorowanego to klasyfikacja i regresja [9].

Uczenie nienadzorowane polega na analizie i grupowanych danych wejściowych, które nie zawierają rozwiązania problemu, czyli tzw. etykiet. Algorytm stara się znaleźć ukryte wzorce lub struktury w danych. Proces ten przebiega w następujący sposób: dane treningowe bez etykiet są analizowane przez algorytm, aby znaleźć ukryte wzorce. Następnie tworzy się model na podstawie odkrytych po analizie struktur i wzorców. Typowe techniki uczenia nienadzorowanego to: analiza skupień, wykrywanie anomalii, nowości i wizualizacja oraz redukcja wymiarowości [12].

W pracy przedstawiono strategie identyfikowania stanu niezawodnościowego obiektu technicznego za pomocą analizy drgań. Używając tej metody, wykorzystuje się techniki nadzorowanego uczenia maszynowego. Wykorzystano klasyfikator *Random Forest Classifier* (RFC) dostępny w bibliotece modułu *scikit-learn*. Zastosowaną metodę szczegółowo omówiono w dalszej części publikacji.

2. OBIEKT BADAŃ I BADANIA EKSPLOATACYJNE

Problemy powodowane awariami elementów wirujących są bardzo dużym obszarem badań, dlatego też w celu ograniczenia zakresu pracy przeprowadzono badania przemysłowe i analizę literatury. W ich wyniku zidentyfikowano najczęściej występujące usterki w wolnoobrotowych systemach napędowych.

W większości wypadków awarii ulegają łożyska, powodując defekt w postaci uszkodzenia elementu tocznego, uszkodzenia bieżni wewnętrznej lub uszkodzenia bieżni zewnętrznej. Zużycie bieżni i elementów tocznych prowadzi do ubytków materiału, nierówności, zwiększenia luzów, hałasu i w konsekwencji do zwiększonych wibracji. Niewyważenie elementów wirujących można wyszczególnić jako kolejną powszechną awarię. Elementy wirujące w maszynach wolnoobrotowych mogą ulec niewyważeniu na skutek zużycia, korozji lub uszkodzeń mechanicznych. Niewyważenie masy wirującej powoduje powstawanie wibracji i wpływa na przyspieszone zużycie np. łożysk i innych komponentów. Długotrwałe niewyważenie może powodować uszkodzenia strukturalne i zmniejszenie ogólnej żywotności maszyny. Niewspółosiowość można również zidentyfikować jako kolejną powszechną awarię. Powstawanie niewspółosiowości w urządzeniach technicznych można podzielić na dwie główne grupy: niewspółosiowość powstającą podczas eksploatacji i niewspółosiowość wynikającą z błędów montażowych. Głównymi czynnikami eksploatacyjnymi są: zmiany termiczne, np. nieuwzględnienie rozszerzalności termicznej materiałów, zmęczenie materiału, czyli trwałe odkształcenie elementów, które powoduje zmianę ich geometrii, uszkodzenie mechaniczne powstałe np. wskutek uderzenia w efekcie kolizji elementów współpracujących. Kolejną zidentyfikowaną usterką jest zdeformowany lub odkształcony wirnik. Odkształcenie wirnika może powstać z powodu bardzo wielu przyczyn. Najczęściej wpływ na powstanie deformacji mają: nadmierne obciążenie, które prowadzi do przekroczenia granicy wytrzymałości materiału, błędy konstrukcyjne, np. niewłaściwy materiał, wady powstałe w procesie produkcyjnym, np. niewłaściwa obróbka materiału, zużycie materiału na skutek długotrwałej eksploatacji [5, 15].

Bardzo ważny jest fakt, że wady nie wykluczają się wzajemnie, mimo że zostały sklasyfikowane do kilku kategorii. Istnieją również widoczne zależności między niektórymi błędami. Należy zatem prowadzić badania również złożonych stanów uszkodzenia.

Obiektem przeprowadzonych badań jest wybrany przez autorów wolnoobrotowy system napędowy. Badania wykonano na stanowisku laboratoryjnym dla prędkości obrotowej 150 obr·min^{-1}. Podczas badania zasymulowano powyżej wymienione stany niezdatności oraz normalny stan pracy sprawnego systemu napędowego. Na potrzeby badań oznaczono je: 0 –stan normalny (sprawny), 1 – uszkodzenie elementu tocznego, 2 – złożony stan uszkodzenia, 3 – zgięty wirnik, 4 – niewspółosiowość, 5 – niewyważenie, 6 – uszkodzenie bieżni wewnętrznej, 7 – uszkodzenie bieżni zewnętrznej.

3. IDENTYFIKACJA STANÓW NIEZAWODNOŚCIOWYCH

Autorzy publikacji przeprowadzili analizę sygnałów drgań w dziedzinie czasu. Badania polegały na rejestrowaniu sygnałów drganiowych generowanych przez układ napędowy. Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone dla prędkości obrotowej 150 obr·min^{-1}. Częstotliwość próbkowania wynosiła 12800 Hz. Pomiary drgań rejestrowano w trzech osiach X, Y, Z z tym, że dla osi Z rejestrowano dodatkowo drgania przy wstępnym obciążeniu systemu masą 5 kg. Podczas badań dla każdego stanu zarejestrowano przebiegi czasowe 4 sygnałów: X, Y, Z i Z1. Następnie każdy przebieg czasowy podzielono na przedziały po 12800 próbek. Otrzymano w ten sposób 2020 zestawów danych pomiarowych dla stanu zdatności i każdego stanu niezdatności. Kolejnym etapem analizy otrzymanych danych było obliczenie 16 charakterystyk dla każdego z przebiegów (wszystkie charakterystyki zostały wyszczególnione poniżej) [16].

$$[vs_i] = \int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt \tag{1}$$

$$\langle vs_i \rangle = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt \tag{2}$$

$$E_{vsi} = \int_{t_0}^{t_k} vs_i^2(t)\,dt \tag{3}$$

$$P_{vsi} = \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} vs_i^2(t)\,dt \tag{4}$$

$$\overline{m_{vsi}^1} = \int_{t_0}^{t_k} t \cdot vs_i(t)\,dtp\,(RS_i) \tag{5}$$

$$\overline{m_{vsi}^2} = \int_{t_0}^{t_k} t^2 \cdot vs_i(t)\,dt \tag{6}$$

$$\left(\overline{t - \overline{m_{vsi}}}\right)^1 = \int_{t_0}^{t_k} (t - \overline{m_{vsi}}) \cdot vs_i(t)\,dt \tag{7}$$

$$\left(\overline{t-\overline{m_{vsi}}}\right)^2 = \int_{t_0}^{t_k} (t-\overline{m_{vsi}})^2 \cdot vs_i(t)\,dt \tag{8}$$

$$\overline{t_{vsi}^1} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} t \cdot vs_i(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt} \tag{9}$$

$$\overline{t_{vsi}^2} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} t^2 \cdot vs_i(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt} \tag{10}$$

$$\left(\overline{t-\overline{t_{vsi}}}\right)^1 = \frac{\int_{t_0}^{t_k}\left(t-\overline{t_{vsi}}\right) \cdot vs_i(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt} \tag{11}$$

$$\left(\overline{t-\overline{t_{vsi}}}\right)^2 = \frac{\int_{t_0}^{t_k}\left(t-\overline{t_{vsi}}\right)^2 \cdot vs_i(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt} \tag{12}$$

$$\overline{t_{vsi^2}} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} t \cdot vs_i^2(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i^2\,(t)\,dt} \tag{13}$$

$$\sigma_{vsi^2}^2 = \frac{\int_{t_0}^{t_k}\left(t-\overline{t_{vsi^2}}\right)^2 vs_i^2(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i^2\,(t)\,dt} \tag{14}$$

$$\Delta t_{vsi} = \frac{\int_{t_0}^{t_k} vs_i(t)\,dt}{vs_i(0)} \tag{15}$$

$$\Delta T_{vsi} = \sqrt{\frac{\int_{t_0}^{t_k}\left(t-\overline{t_{vsi^2}}\right)^2 vs_i^2(t)\,dt}{\int_{t_0}^{t_k} vs_i^2\,(t)\,dt}} \tag{16}$$

gdzie:

- vs_i – jest i-tym zarejestrowanym sygnałem drgań,
- t_0 – czas początku sygnału *vs*,
- t_k – czas końca sygnału *vs*,
- 1 – całka sygnału,
- 2 – średnia wartość sygnału,

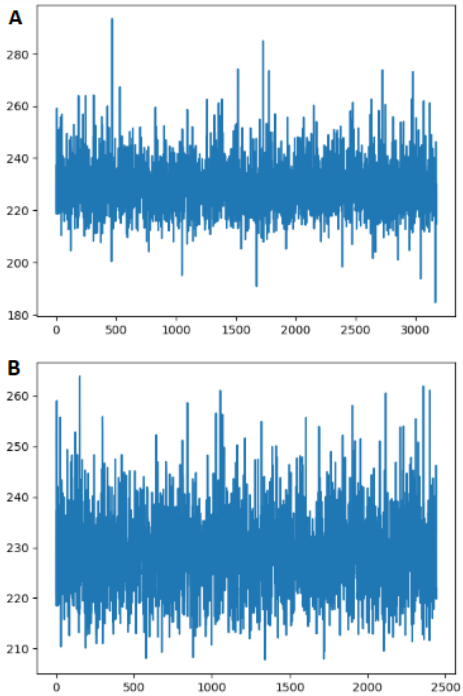
3 – energia sygnału,
4 – średnia moc sygnału,
5 – pierwszy moment prosty rzędu,
6 – moment prosty drugiego rzędu,
7 – moment centralny pierwszego rzędu,
8 – moment centralny drugiego rzędu,
9 – znormalizowany moment prosty pierwszego rzędu,
10 – znormalizowany moment prosty drugiego rzędu,
11 – znormalizowany moment centralny pierwszego rzędu,
12 – znormalizowany moment centralny drugiego rzędu,
13 – odcięta środka ciężkości kwadratu sygnału,
14 – wariancja kwadratu sygnału,
15 – równoważna średnica sygnału,
16 – średnia szerokość sygnału.

Zastosowano wybraną metodę, za pomocą której zidentyfikowano stan techniczny w celu sklasyfikowania go jako stan zdatności lub niezdatności. Klasyfikacja odbywa się na podstawie analogii przebiegów czasowych sygnałów diagnostycznych, które zostały zarejestrowane podczas badań. Następnie dane zostają podzielone na dwie grupy danych: uczących i testowych. Zarówno dane testowe, jak i uczące zawierają charakterystyki analizowanych stanu zdatności i stanów niezdatności. W kolejnym etapie badań należy przeprowadzić przygotowanie i analizę danych do modelu uczenia maszynowego, a następnie je zweryfikować za pomocą danych testowych [4].

Kolejnym krokiem jest obliczenie i sprawdzenie korelacji pomiędzy charakterystykami każdego z zarejestrowanych stanów. Wykorzystano do tego współczynnik korelacji Pearsona. Jest on najczęściej stosowanym wskaźnikiem siły liniowej zależności pomiędzy dwiema cechami mierzalnymi. Współczynnik korelacji liniowej mówi o sile i kierunku związku między cechami. Wartości współczynnika określa się w przedziale [-1,1]. Wartości zbliżone do -1 lub 1 uznaje się za silnie skorelowane ujemnie lub dodatnio [3]. Inną metodą identyfikacji i usuwania kolinearności jest macierz korelacji. Generuje ona macierz każdego atrybutu wobec pozostałych atrybutów. Wartości współczynnika korelacji interpretuje się analogicznie jak w przypadku współczynnika Pearsona. W badaniach charakterystyki, których współczynnik korelacji był poniżej -0,9 lub powyżej 0,9, zostały usunięte ze zbioru uczącego. Usunięto silnie skorelowane dane, ponieważ kolinearność może prowadzić do dużych wariancji estymatorów współczynników regresji, co oznacza, że są one bardzo wrażliwe na zmiany w danych. Usunięcie nadmiarowych danych może zmniejszyć złożoność modelu obliczeniowego, co się przekłada na szybsze i bardziej efektywne analizy, może ponadto zapobiegać przeuczeniu modelu i polepszać interpretację nowych, niezawartych wcześniej w zbiorze uczącym danych [7].

Następny etap przygotowania modelu to sprawdzenie i redukcja wartości odstających. Wykonuje się to za pomocą funkcji *LocalOutlierFactor* dostępnej

w bibliotece *scikit-learn* [4]. Jest to narzędzie do wykrywania wartości odstających w danych poprzez ocenę anomalii punktów danych na podstawie lokalnej gęstości. Określanie anomalii punktu wykonywane jest poprzez porównanie jego gęstości z gęstością jego sąsiadów. Im wyższy wynik, tym większe prawdopodobieństwo, że są to wartości odstające. Wartości odstające wpływają niekorzystnie na proces trenowania modelu, powodując zakłócenia. Głównie modele liniowe są wrażliwe na takie dane. Prowadzi to do niskiej wydajności na nowych danych. Redukcja tych wartości poprawia generalizację i zmniejsza podatność modelu na zakłócenia [1]. Na wykresie poniżej przedstawiono dane przed redukcją wartości odstających i po tej redukcji.



Rys. 1. Wykresy danych przed usunięciem danych odstających (A) i po usunięciu (B) (opracowanie własne)

Dane po redukcji wartości odstających poddano standaryzacji w celu zrównania wpływu każdej z charakterystyk na wartość wynikową modelu. Przeprowadzono ją za pomocą funkcji *Standard Scaler* dostępnej w bibliotece *scikit-learn*. Polega ona na przekształceniu danych tak, aby miały one określone właściwości statystyczne, co poprawia wydajność modeli. Uzyskuje się to przez przekształcenie danych wejściowych tak, aby ich rozkład miał średnią wartość równą 0, a odchylenie standardowe równe 1. Oblicza się to, odejmując od każdej wartości w kolumnie danych średnią wartość tej kolumny, a następnie wynik tej różnicy dzieli się przez odchylenie standardowe kolumny danych. Opi-

sane działania przeprowadza się dla każdej komuny danych oddzielnie. Standaryzacja zapewnia, że wszystkie cechy mają podobny zakres, co pozwala algorytmom szybciej i efektywniej dążyć do optymalnych rozwiązań. Procesowi standaryzacji poddano zbiór danych uczących i testowych. Proces ten często jest nazywany normalizacją i wyrażany wzorem:

$$z = \frac{X-\mu}{\sigma} \tag{17}$$

gdzie:

X – wartość oryginalna,
μ – średnia wartość dla danego atrybutu,
σ – odchylenie standardowe dla danego atrybutu [17].

Mając tak przygotowane dane, można przystąpić do trenowania modelu uczenia maszynowego. Autorzy publikacji na podstawie swoich badań wybrali klasyfikator *Random Forest Classifier* (RFC), który również jest dostępny w bibliotece *scikit-learn. Random Forest Classifier* (RFC) jest klasyfikatorem, który można określić jako zbiór drzew decyzyjnych, które tworzą las. Każde drzewo decyzyjne trenowane jest na innych próbkach danych treningowych, w tym losowo wybranych podzbiorach cech.

Drzewo decyzyjne to model predykcyjny, który mapuje cechy wejściowe na wartości wyjściowe za pomocą struktury drzewa. Zaczyna się od korzenia, gdzie rozpoczyna się podejmowanie decyzji, dalej są węzły, gdzie dane są testowane, a na końcu liście, czyli wyniki. Z liści już nie wychodzą kolejne węzły. Moduł *scikit-learn* wykorzystuje algorytm generujący wyłącznie drzewa binarne. Oznacza to, że węzły, które nie są liśćmi, zawsze mają dwoje potomków. Algorytm *Random Forest Classifier* wprowadza losowość do wzrostu drzew. Wyszukuje on najlepsze cechy w losowym podzbiorze cech, zamiast szukania najlepszej cechy w czasie podziału na podrzędne węzły. RFC ma wiele hiperparametrów, które można dostosować w celu optymalizacji modelu. Hiperparametry to parametry algorytmu uczenia maszynowego, które można ustawić przed procesem trenowania modelu (w odróżnieniu od parametrów modelu, które są optymalizowane podczas uczenia). Strojenie algorytmu za pomocą hiperparametrów może znacząco wpłynąć na wydajność i wyniki modelu. Hiperparametry, które można modyfikować w algorytmie RFC, to: n_estimators, który określa liczbę drzew w lesie, większa liczba drzew zwiększa dokładność, ale także czas obliczeń, criterion to funkcja mierząca jakość podziału ('gini' lub 'entropy'), max_depth określa maksymalną głębokość drzew, ograniczenie głębokości może zapobiec przeuczeniu modelu, min_samples_split określa minimalną liczbę próbek wymaganą do podziału węzła, min_samples_leaf określa minimalną liczbę próbek, która musi znaleźć się w liściu, max_features to liczba cech brana pod uwagę przy podziale węzła, bootstrap określa, czy używać próbkowania bootstrap do budowy drzew i oob_score określa, czy używać próbek out-of-bag do oszacowania błędu generalizacji. Klasyfikator RFC ma kilka istotnych zalet. Do najważniejszych korzyści można zaliczyć: wysoką wydaj-

ność, odporność na przeuczenie, radzenie sobie z brakującymi danymi, wysoką wydajność przy dużych zbiorach danych, odporność na szum i dane odstające, łatwość w użyciu [2, 4].

Model *Random Forest Classifier* został wytrenowany na zestawie danych uczących. Dokładność modelu dla zestawu treningowego wyniosła kolejno: 0,96, 0,95, 0,95. Kolejnym etapem było sprawdzenie za pomocą zestawu danych testowych dokładności klasyfikacji wytrenowanego modelu. Dokładność uzyskana na zestawie danych uczących wyniosła 0,96. Sprawdzenia dokonano za pomocą funkcji *accuracy_score* dostępnej w bibliotece *scikit-learn*. W dalszej części badań wykonano analizę wydajności klasyfikatora poprzez obliczanie macierzy pomyłek. Dzięki temu można dokonać porównania przewidywanych etykiet klas z rzeczywistymi etykietami klas. Macierz pomyłek została obliczona z użyciem funkcji *confusion_matrix* z modułu *scikit-learn* i przedstawiono ją poniżej.

```
[390,   0,   0,   0,   1,   4,   0,   0],
[  0, 394,   0,   0,   0,   0,   0,   0],
[  0,   0,  53,   0,   0,   0,  21,   0],
[  0,   0,   0, 346,   0,  35,   0,   0],
[  0,   0,   0,   2, 400,   4,   0,   0],
[  6,   0,   0,  50,   3, 388,   0,   0],
[  0,   0,   0,   0,   0,   0, 404,   0],
[  0,   0,   0,   0,   0,   0,   0, 393]],
```

Rys. 2. Macierz pomyłek dla zestawu danych testowych (opracowanie własne)

Macierz pomyłek jest przydatna zarówno do analizy ogólnej wydajności modelu, jak i do identyfikacji konkretnych obszarów, w których model może popełniać błędy [14]. Na podstawie uzyskanej macierzy przeprowadzono obliczenia wskaźników: dokładności (*accuracy*), precyzji (*precision*), czułości (*recall*) oraz f1-score – to średnia harmoniczna pomiędzy precyzją (*precision*) a czułością (*recall*). Wyniki wskaźników przedstawiono poniżej.

	precision	recall	f1-score
0	0.98	0.99	0.99
1	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.72	0.83
3	0.87	0.91	0.89
4	0.99	0.99	0.99
5	0.90	0.87	0.88
6	0.95	1.00	0.97
7	1.00	1.00	1.00
accuracy			0.96

Rys. 3. Wyniki wskaźników oceny klasyfikatora (opracowanie własne)

4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

W przeprowadzonych badaniach przedstawiono uniwersalną metodę identyfikacji stanu niezawodnościowego. Warto zaznaczyć, że ta metoda jest zgodna z podejściem systemowym do rozpatrywanego zagadnienia. Daje to możliwość zastosowania jej do identyfikacji stanu niezawodnościowego i rodzaju stanu niezdolności dowolnego układu wirującego.

Prezentowana metoda polega na analizie zarejestrowanych sygnałów drganiowych dla różnych stanów niezdatności i stanu zdatności za pomocą nadzorowanego uczenia maszynowego (*Machine Learning*). W pierwszej kolejności oblicza się charakterystyki dla każdego przebiegu sygnału i dzieli zbiór danych na dane testowe 20% i dane uczące 80%. Następnie bada się korelację charakterystyk za pomocą współczynnika Pearsona i redukuje te, które są silnie skorelowane. Kolejnym etapem jest sprawdzenie za pomocą *Local Outlier Factor* (LOF) i redukcja danych odstających. Następnie wykonuje się standaryzację danych przed wykonaniem trenowania modelu uczenia maszynowego. Z tak przygotowanymi danymi wykonuje się trenowanie klasyfikatora *Random Forest Classifier* (RFC) na zestawie danych uczących i testuje algorytm na zestawie danych testowych. W przeprowadzonych badaniach dokładność modelu dla zestawu uczącego wyniosła 0,96, 0,95, 0,95, a dla zestawu testowego 0,96.

Przekątna główna macierzy błędów wskazuje wszystkie przypadki stanu poprawnie zaklasyfikowane. Na podstawie macierzy błędów można też stwierdzić, że w 6 przypadkach stan awarii został zaklasyfikowany jako stan zdatności. Jest to błąd klasyfikacyjny, którego w największym stopniu należy unikać, ponieważ ważne jest, żeby stan niezdatności zawsze był klasyfikowany poprawnie. Mniejszej wagi błędem jest zakwalifikowanie awarii jako stanu niezdatności ze wskazaniem niepoprawnej usterki niż jej niewykrycie. W stanach oznaczonych 0, 2, 3, 4, 5 występują błędne klasyfikacje, co wskazuje na potencjalne trudności w odróżnieniu tych klas. Dodatkowo można zauważyć, że największe problemy klasyfikator miał z usterką oznaczoną numerem 5. W stanach 1, 6 i 7 uzyskuje się bardzo wysoką precyzję i czułość (brak błędnych klasyfikacji). Wskaźniki oceny klasyfikatora wynoszą: średnia dla precyzji 0,96, średnia dla czułości 0,93, średnia dla F1-score 0,94.

W celu poprawy dokładności modelu należy zidentyfikować przyczyny błędnych klasyfikacji i wdrożyć środki zaradcze, takie jak ulepszenie selekcji cech, dostrojenie hiperparametrów modelu lub użycie zaawansowanych technik klasyfikacji.

Przeprowadzone badania pozytywnie zweryfikowały przydatność zaproponowanej metody w analizowanym obiekcie badawczym. Uzyskano bardzo dobry wyniki klasyfikacji. Badania były przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych, w dalszych etapach planowane są badania na rzeczywistym obiekcie pozostającym w użytkowaniu.

LITERATURA

[1] Aggarwal C.C., 2017. Outlier Analysis. Springer, Switzerland.
[2] Breiman L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45(1), 5–32.
[3] Buda A., Jarynowski A., 2010. Life-time of correlations and its applications vol. 1. Wydawnictwo Niezależne, Głogów.
[4] Géron A., 2020. Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Helion, Gliwice.
[5] Golonka E., Pająk M., 2021. Selected faults of low-speed machines, analysis of diagnostic signals. MATEC Web Conf. 351, 01025.
[6] Gwiżdż W., Lisowski D., 2016. Vibrodiagnostics of slow-speed machines. Śląskie Wiadomości Elektryczne 1(124), 11–16.
[7] James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., 2013. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python. Springer, Switzerland.
[8] Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D., 2013. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing 29(7), 1483–1510.
[9] Kotsiantis S.B., 2007. Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. Informatica 31, 249–268.
[10] Lee J., Wu F., Zhao W., Ghaffari M., Liao L., Siegel D., 2014. Prognostics and health management design for rotary machinery systems-reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing 42(1–2), 314–334.
[11] Mba D., Bannister R.H., Findlay G.E., 1999. Condition monitoring of low-speed rotating machinery using stress waves. Part 1. Proceedings of the Institution Mechanical Engineers Part E – Journal of Process Mechanical Engineer 213(3), 153–170.
[12] Murphy K.P., 2022. Probabilistic Machine Learning: An Introduction. MIT Press, USA.
[13] Pająk M., Kluczyk M., Muślewski Ł., Lisjak D., Kolar D., 2023. Ship Diesel Engine Fault Diagnosis Using Data Science and Machine Learning. Electronics 12(18), 3860.
[14] Powers D.M., 2010. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. Journal of Machine Learning Technologies 2(1), 37–63.
[15] Stamboliska Z., Rusiński E., Moczko P., 2015. Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines. Springer, Switzerland.
[16] Szabatin J., 2007. Fundamentals of the Signal Theory. WKŁ, Warszawa.
[17] Vasques X., 2024. Machine Learning Theory and Applications: Hands-on Use Cases with Python on Classical and Quantum Machines. Wiley, USA.
[18] Wang F., Liu C., Su W., Xue Z., Li H., Han Q., 2017. Condition monitoring and fault diagnosis methods for low-speed and heavy-load slewing bearings: a literature review. Journal of Vibroengineering 19(5), 3429–3444.

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH W NAPRAWACH POJAZDÓW

Karolina Karolewska*, Sebastian Karolewski

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania wytwarzania przyrostowego w procesach naprawy i regeneracji uszkodzonych obiektów. W publikacji omówiono najczęściej wykorzystywane metody addytywne wraz z podaniem ich zalet i wad. Omówiono i wskazano przykłady zastosowań każdej z nich.

Słowa kluczowe: regeneracja, wytwarzanie przyrostowe, *Powder Bed Fusion*, *Direct Energy Deposition*

1. WPROWADZENIE

Pojazdy mechaniczne – do których zalicza się m.in.: samochody, pojazdy szynowe, samoloty, statki czy też maszyny rolnicze – w trakcie eksploatacji narażone są na oddziaływanie wielu czynników (tj. losowe obciążenia eksploatacyjne, wibracje, drgania, tarcie, erozja oraz praca w wysokich temperaturach itp.), które doprowadzają do uszkodzenia kluczowych dla ich funkcjonowania elementów. W związku z tym może dochodzić do wycofania z użytku niesprawnych pojazdów, które poddawane są utylizacji, i zastąpienia ich nowymi urządzeniami [23]. Przekłada się to na duże straty materialne, a także na zwiększoną produkcję odpadów [16]. W ostatnich latach odnotowano znaczący wzrost zużycia surowców, który może prowadzić do wyczerpania się ich złóż, co przełoży się na wzrost cen materiałów. Nadmierna i nieracjonalna eksploatacja zasobów doprowadza do wystąpienia negatywnych oddziaływań na środowisko [29].

Jednym ze sposobów na odzyskanie materiałów ze zużytych pojazdów jest ich recykling, w procesie którego złom ulega przekształceniu na gotowe produkty. Innymi przyjaznymi dla środowiska metodami pozwalającymi na zmniejszenie ilości wytwarzanych odpadów są: renowacja i regeneracja. Procesy te pozwalają na naprawę uszkodzonych pojazdów, przywrócenie im zdatności i wydłużenie czasu użytkowania. Proces renowacji dotyczy przywrócenia uszkodzonego lub zużytego elementu do stanu pozwalającego na jego ponowne użytkowanie, jednak odbiega on standardem od produktu nowego. Często gwarancja na taki produkt jest dużo krótsza w porównaniu z elementem nowym lub regenerowanym, który zostaje naprawiony, a jego właściwości użytkowe (np. żywotność) są takie same jak w przypadku nowego produktu [5, 8, 18].

* adres korespondencyjny: karolina.karolewska@pbs.edu.pl

Tradycyjna ręczna regeneracja obejmuje cztery fazy: kontrolę, spawanie, szlifowanie lub frezowanie z użyciem obrabiarki CNC oraz polerowanie. Niestety jest ona stosunkowo czasochłonna, mało precyzyjna, a ponadto możliwa do wykonania jedynie przez wykwalifikowanego operatora. Ten rodzaj regeneracji charakteryzuje się także ograniczonym zakresem przeprowadzanej naprawy. W związku z tym poszukiwane są możliwości zautomatyzowania tego procesu. Popularne w ostatnich latach wytwarzanie przyrostowe (AM), które pozwala nie tylko na produkcję gotowych elementów, lecz także na ich naprawę, jest zaliczane do zaawansowanych metod regeneracji obejmujących zautomatyzowane procesy naprawcze [3, 6, 12].

Zastosowanie inżynierii odwrotnej pozwala na zeskanowanie uszkodzonego elementu oraz jego rekonstrukcję w środowisku CAD, a następnie jego odbudowę dzięki warstwowemu wytwarzaniu poprzez zastosowanie AM zgodnie z modelem 3D [15]. Technologie przyrostowe są w stanie odbudować uszkodzony element i przywrócić jego pierwotne właściwości. Regenerację za pomocą metod addytywnych wykorzystuje się w różnych gałęziach przemysłu, co zilustrowano na rysunku 1 [11].

Rys. 1. Przykłady zastosowania wytwarzania przyrostowego w procesach regeneracji zużytych elementów w różnych gałęziach przemysłu [11]

Proces wytwarzania przyrostowego z powodzeniem może być stosowany w wielu dziedzinach gospodarki. W sektorze transportowym metoda ta umożliwia regenerację części silników czy przekładni, w tym wałów oraz łopat wirników. Znane są również sposoby naprawy trakcji kolejowej z wykorzystaniem metod addytywnych. W sektorze energetycznym metoda pozwala na przywrócenie zdolności użytkowych uszkodzonym łopatom turbin wiatrowych. Z kolei

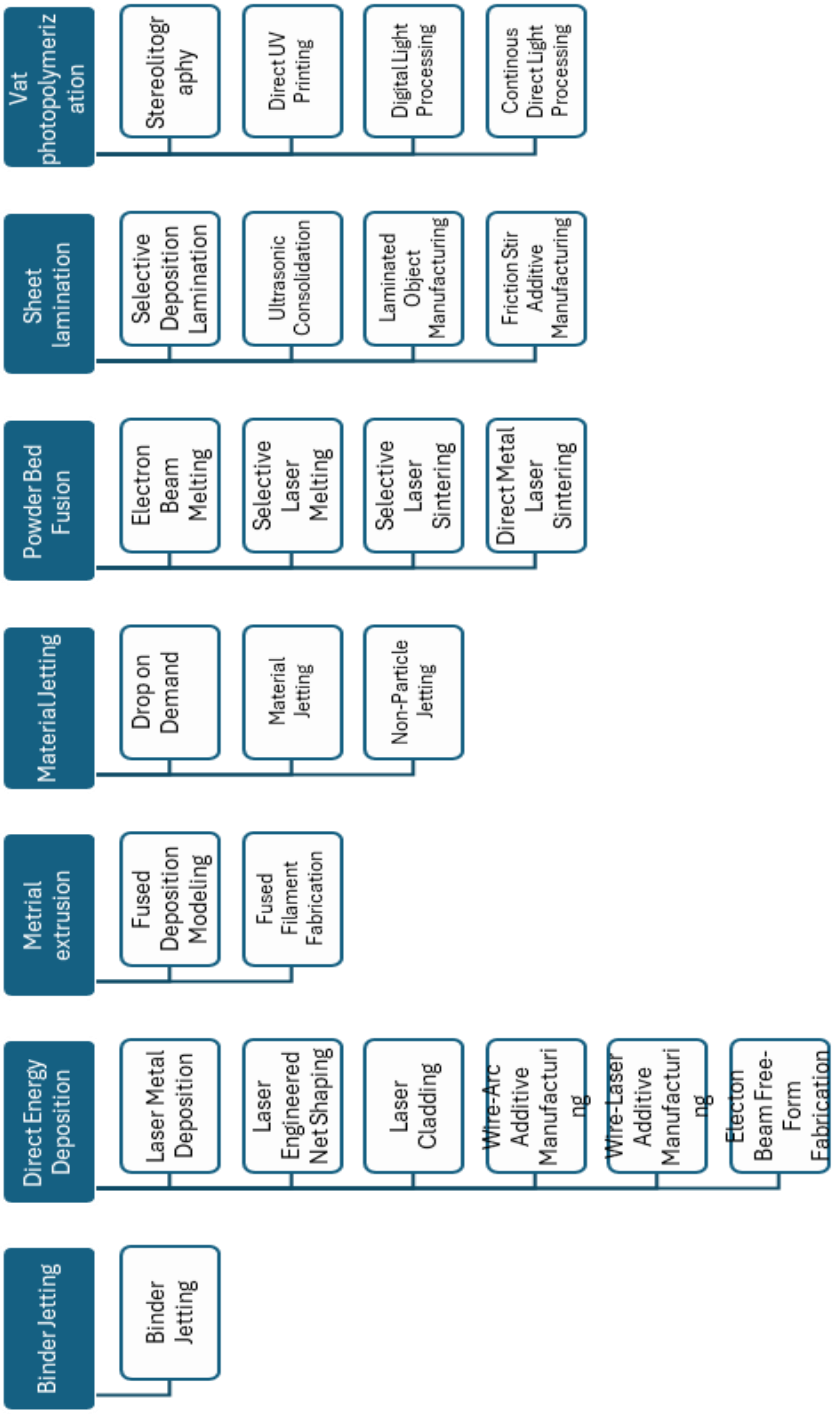
przemysł odlewniczy stosuje wspomniane sposoby naprawy do regeneracji form i matryc. Poza sektorami przemysłowymi metody przyrostowej regeneracji można spotkać w medycynie, gdzie wykorzystywane są do uzupełniania ubytków tkanki kostnej [34].

Jak podaje się w źródłach literaturowych, regeneracja z wykorzystaniem procesów addytywnych najczęściej spotykana jest w sektorze lotniczym (35%), motoryzacji (34%), morskim (10%), w odlewnictwie (9%), w procesach produkcji i obróbki materiałów (9%), w energetyce (5%), w transporcie kolejowym (5%) oraz w medycynie (4%) [11].

Tymczasem wśród krajów, które najczęściej sięgają po tego typu sposoby naprawy, należy wymienić Chiny (27%), USA (18%), Niemcy (6%), Wielką Brytanię (5%), Indie (5%), Australię (5%), Kanadę (5%), Włochy (4%), Szwecję (2%) oraz Koreę Południową (2%) [11]. Powyższe dane oraz rosnąca liczba publikacji dotyczących możliwości wykorzystania technologii przyrostowych do naprawy uszkodzonych elementów konstrukcyjnych świadczą o aktualności tematyki.

Wytwarzanie przyrostowe, zgodnie z terminologią zawartą w ASTM, można podzielić na siedem głównych kategorii, co przedstawiono na rysunku 2 [2].

Pierwszą kategorię stanowi *Binder Jetting* (BJ) – natryskiwanie wiążące, tj. proces, w którym ciekły chemiczny środek spajający jest nakładany selektywnie w celu połączenia warstw sproszkowanego materiału. Następną kategorię stanowi *Direct Energy Deposition* (DED) – ukierunkowane osadzanie energii, w którego procesie do stopienia materiału w warstwie wykorzystuje się skupioną energię cieplną. Wśród procesów DED można wyróżnić kilka technologii wykorzystujących do stapiania warstw laser lub łuk elektryczny. Metoda ta jest w szczególności wykorzystywana do naprawy uszkodzonych elementów. Kolejną grupę stanowią procesy nazywane *Material Extrusion* (ME), tj. wytłaczanie materiału – to metoda wytwarzania przyrostowego, w której materiał jest selektywnie dozowany przez dyszę lub otwór. Metoda ME swoją zasadą działania przypomina proces DED, jednak różnica polega na tym, że dysza w przypadku tej metody porusza się w określonej osi oraz w jednym kierunku. Inną kategorię stanowi *Material Jetting* (MJ) – natryskiwanie materiału, w którego procesie selektywnie stapia się krople materiału za pomocą światłoczułego wosku lub fotopolimerów utwardzanych poprzez promieniowanie UV. *Powder Bed Fusion* (PBF) – spajanie w złożu proszkowym jest procesem wytwarzania, w którym energia cieplna selektywnie łączy obszary złoża proszkowego. W procesach tych element wytwarzany jest warstwowo poprzez spiekanie lub topienie wiązką lasera bądź elektronów proszku metalowego [2].



Rys. 2. Klasyfikacja procesów AM według ASTM [11]

Kolejną kategorię wytwarzania przyrostowego stanowi *Sheet Lamination* (SL) – laminowanie arkuszy. To proces, w którym arkusze materiału są ze sobą łączone w celu wytworzenia elementu. Do przykładowych technologii opartych na SL zaliczają się: proces ultradźwiękowego wytwarzania addytywnego (UAM) i proces wytwarzania obiektów laminowanych (LOM). Ostatnią kategorią AM jest *Vat Photopolymerization* (VP) – fotopolimeryzacja kadzi. Podczas tego procesu – fotoreaktywne polimery w formie cieczy są utwardzane poprzez światło, promieniowanie UV lub wiązkę lasera. Do najpopularniejszych technologii opartych na procesie fotopolimeryzacji zalicza się m.in. stereolitografię (SLA), *Direct UV Printing*, *Digital Light Process* (DPL) [2].

AM staje się jedną z najważniejszych metod wykorzystywanych w procesach naprawczych, tj. regeneracji. Mnogość procesów addytywnych pozwala na dobór odpowiedniego z nich w przypadku produkcji nowych lub naprawy zużytych elementów. Największym mankamentem wytwarzania lub naprawy elementów wykonanych drukiem 3D jest konieczność ich obróbki w celu otrzymania optymalnych własności wytrzymałościowych. W literaturze można odnaleźć wiele pozycji, które dotyczą wykorzystania wytwarzania przyrostowego w celach regeneracji uszkodzonych części. W następnej części publikacji omówiono metody wytwarzania przyrostowego, które są najczęściej wykorzystywane do wykonywania napraw zużytych elementów różnego rodzaju maszyn i pojazdów.

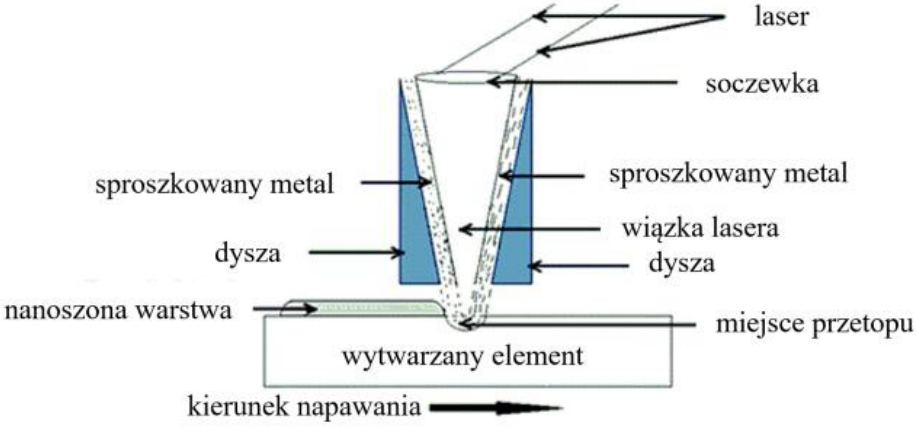
2. NAJPOPULARNIEJSZE METODY AM WYKORZYSTYWANE W NAPRAWACH

Badacze wskazują, że do regeneracji uszkodzonych części najczęściej wykorzystywaną kategorią wytwarzania przyrostowego jest *Direct Energy Deposition*. Jej wykorzystanie w naprawach zużytych elementów szacuje się na ponad 60%. Naprawy oparte na *Powder Bed Fusion* zajmują natomiast około 10% wszystkich procesów przywracania zdatności z wykorzystaniem AM. Nieco mniej wykorzystywaną metodą jest *Material Extrusion*, która stanowi około 5% liczby napraw wykonywanych AM [11].

2.1. *Laser Metal Deposition*

Jedną z najpopularniejszych metod addytywnych wykorzystywanych w procesach napraw, regeneracji i renowacji jest *Laser Metal Deposition* (LMD), który zaliczany jest do *Direct Energy Deposition*. W procesie tym zespawane struktury można nałożyć na gotowe części lub wytworzyć w ten sposób całkowicie nowe elementy. Metoda LMD polega na warstwowym budowaniu elementu z wykorzystaniem ruchomej, 3-osiowej dyszy, w której laser topi materiał dostarczany w postaci drutu lub proszku. Wytwarzanie elementów w procesie LMD odbywa się w komorze wypełnionej helem lub argonem, które

mają za zadanie ograniczyć powstawanie tlenków i zmniejszyć kruchość wytworzonych elementów. Wiązka lasera zostaje skupiona na fragmencie przedmiotu obrabianego, co doprowadza do powstania jeziorka ciekłego materiału. Poprzez dyszę do fragmentu przedmiotu dozowany jest materiał (w postaci proszku lub drutu), który po stopieniu łączący się z materiałem podstawowym. Materiał nakładany jest warstwowo. Grubość jednej warstwy to 0,2÷1,0 mm. Na rysunku 3 przedstawiono sposób działania technologii LMD [9].



Rys. 3. Budowa i zasada działania LMD [17]

Można odnaleźć wiele publikacji dotyczących zastosowania metody LMD do naprawy uszkodzonych obiektów. Jednym z przykładów jest wykorzystanie wyżej wspomnianej technologii do naprawy łopatki silnika lotniczego, która wykonana została ze stopu tytanu Ti6Al4V. Badacze wskazali, że nałożone w procesie regeneracji łopatek warstwy charakteryzowały się niską porowatością i brakiem mikropęknięć, a ponadto dobrym wiązaniem międzywarstwowym [7, 26]. Proces naprawy odbywał się w kontrolowanych szybkościach chłodzenia w celu otrzymania zbliżonej mikrostruktury do elementu naprawianego. W naprawianym obszarze uzyskano przemianę fazową β do martenzytycznej mikrostruktury α′. Przełożyło się to na otrzymanie wyższych twardości oraz wystąpienie kruchego pękania dla części wykonanej w procesie LMD [26].

Autorzy innych prac wskazują na otrzymane właściwości mechaniczne oraz metalurgiczne naprawianych obiektów, które w niektórych przypadkach są wyższe niż właściwości elementów nienaprawianych. Wiązka lasera koncentruje ciepło tylko na wybranym obszarze, pozwalając jednocześnie na zminimalizowanie możliwości uszkodzenia mikrostruktury materiału, z którego wykonany jest naprawiany element. Wpływa to na powstanie dobrego wiązania międzywarstwowego, co przekłada się na wydłużenie zdatności naprawianej części [27].

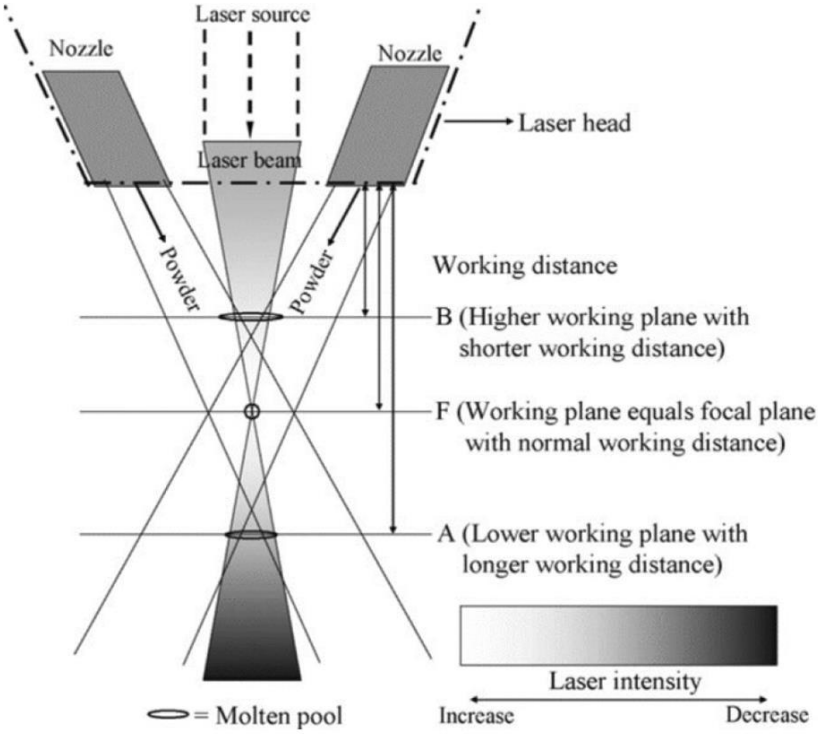
Publikacje wskazują na pewną niedoskonałość procesu LMD, która przejawia się spadkiem wytrzymałości elementów naprawianych w tym procesie aż o 16%, ale za to charakteryzowała się wzrostem wydłużenia. Zastosowanie LMD w naprawach obejmujących do 10% objętości naprawianej części pozwala na redukcję emisji CO_2 aż o 45% w porównaniu z produkcją części nowej oraz wprowadza oszczędności w zużyciu energii na poziomie 36% [28, 31]. Uważa się, że tego typu naprawy z wykorzystaniem LMD dają dużo więcej korzyści niż te wykorzystujące spawanie lub napawanie plazmowe. Wykazano także wyższą jakość elementów wykonywanych LMD oraz lepszą jakość powierzchni, prowadzącą do mniej wymagającej końcowej obróbki powierzchniowej w porównaniu z elementami spawanymi.

Z tego względu technologia LMD jest powszechnie wykorzystywana w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza do naprawy i regeneracji różnego rodzaju komponentów oraz sprzętu. Najczęściej naprawom z wykorzystaniem tych metod poddawane są: narzędzia do formowania wtryskowego, palniki turbin gazowych, formy i matryce, narzędzia do kucia na gorąco, łopatki turbin i łopatki, piasty, wsporniki i kołnierze kompresora wysokociśnieniowego. W przemyśle morskim za pomocą LMD regeneruje się wały korbowe silników wysokoprężnych, wały napędowe czy pierścienie dyszowe do turbosprężarek. Naprawione w taki sposób części wyróżniają się dobrą przyczepnością materiału bazowego do nanoszonej warstwy, zwiększoną twardością, zwiększoną wytrzymałością zmęczeniową. Metoda LMD wykorzystywana jest ponadto w marynarce wojennej, gdzie używa się jej do naprawy elementów okrętów, a także pocisków torpedowych oraz luf cylindrów. Takie rozwiązanie znacznie ogranicza liczbę napraw i koszty konserwacji oraz wprowadza wyższą jakość uzyskanych części, jak i większą powtarzalność [20–22].

Można zatem stwierdzić, że technologia LMD jest zrównoważoną alternatywą dla konwencjonalnych procesów regeneracji produktów i jej rozwój może zrewolucjonizować procesy napraw pojazdów i innych obiektów technicznych.

2.2. *Laser Engineered Net Shaping*

Kolejną z metod addytywnych, wykorzystywanych w procesach regeneracji części, jest metoda *Laser Engineered Net Shaping* (LENS). W procesie tym do stopienia warstwy materiału wykorzystuje się skupioną wiązkę lasera, do której współosiowo dostarczany jest sproszkowany materiał. Po wyrzuceniu materiału przez dyszę następuje jego stopienie i osadzenie na podłożu. W technologii tej ruchomy element stanowi stół drukarki, przemieszczający się w dwóch osiach, natomiast dysza przesuwa się pionowo w jednej osi. W przeciwieństwie do metody SLS/SLM, zgodnie z którą wykorzystuje się technologię łoża proszkowego, metodę LENS charakteryzuje proces nakładania proszku w chwili, gdy następuje jego stopienie [14]. Na rysunku 4 przedstawiono zasadę działania technologii LENS.



Rys. 4. Budowa i zasada działania LENS [32]

Przykładami uszkodzonych elementów, które można poddać naprawie z użyciem metody LENS, są obudowy łożysk, wały napędowe, turbiny gazowe, sprężarki czy też sprzęgła napędowe. Regeneracja elementów za pomocą metody LENS może być stosowana do elementów, które zostały uszkodzone na skutek zatarcia, ścierania, erozji, kawitacji, frettingu, oraz do pęknięć i odprysków powierzchniowych. Jednym z najpoważniejszych rodzajów uszkodzenia elementu są uszkodzenia ścierne, które powstają poprzez wnikanie i wgniatanie w powierzchnię materiału niewielkich cząstek. W porównaniu z tradycyjną obróbką skrawaniem regeneracja elementów charakteryzujących się złożonością modelu lub geometrii przeprowadzona z wykorzystaniem metody AM zajmuje mniej czasu i nie generuje żadnych odpadów. Metodę LENS wykorzystuje się do naprawy elementów w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle lotniczym, przemyśle wydobywczym, przemyśle samochodowym, a także w medycynie [10].

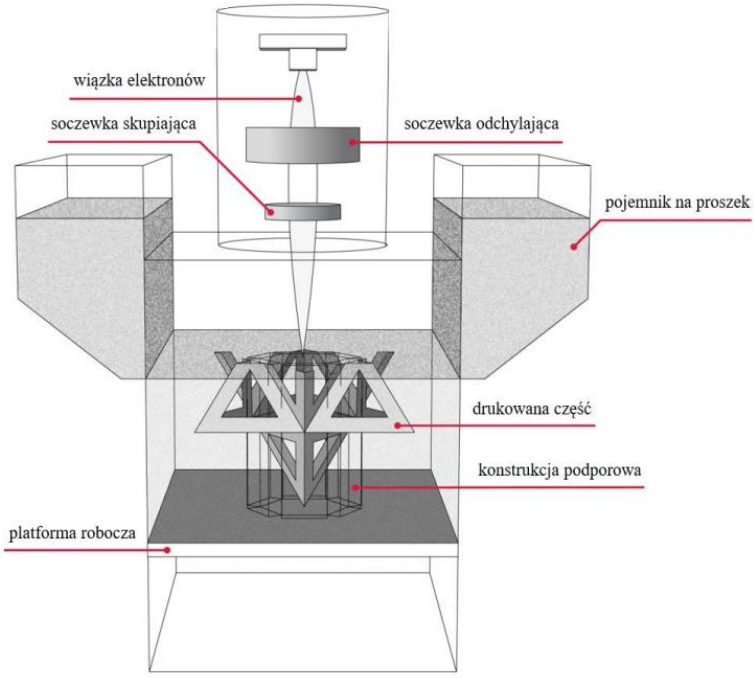
2.3. *Electron Beam Melting*

Kolejną z popularnych metod addytywnych używanych do naprawy lub regeneracji elementów wchodzących w skład pojazdów lub maszyn stanowi technologia *Electron Beam Melting* (EBM). Zgodnie z tą metodą wykorzystuje się

wiązkę elektronów w celu stopienia warstwy proszku, który jest rozprowadzany na ruchomej platformie roboczej drukarki. Wiązka elektronów zostaje skupiona poprzez soczewkę i skierowana w precyzyjnie określone miejsce, w którym dochodzi do stopienia proszku metalu. Zachodzi efekt termiczny, który poddaje pojedynczy kryształ lub wolframowe włókno różnicy potencjałów, co skutkuje przepłynięciem przez szereg soczewek określonej intensywności prądu. Wiązka elektronów porusza się z dużą prędkością, co przy zderzeniu z proszkiem powoduje zmianę energii kinetycznej na energię cieplną, która z kolei przyczynia się do wzrostu temperatury powyżej punktu topienia sproszkowanego materiału. Wzrost temperatury skutkuje stopieniem się warstwy proszku [9].

Proces druku przeprowadzany jest w próżniowej komorze, w której ciśnienie nie przekracza początkowo 0,01 Pa, związane jest to z koniecznością uniknięcia strat energii poruszających się elektronów. Próżnia powoduje ponadto ograniczenie powstawania szkodliwych dla wytwarzanych części tlenków.

W fazie topienia w komorze następuje zwiększenie ciśnienia do 1 Pa i dodatkowo wprowadzany zostaje hel, którego zadaniem jest zminimalizowanie ładowania elektrycznego proszku metalu, a także zwiększenie jego przewodnictwa cieplnego. Po stopieniu jednej warstwy platforma robocza ulega obniżeniu i cały proces jest powtarzany, aż do momentu ukończenia elementu. Na rysunku 5 przedstawiono zasadę działania EBM [9].



Rys. 5. Budowa i zasada działania EBM [9]

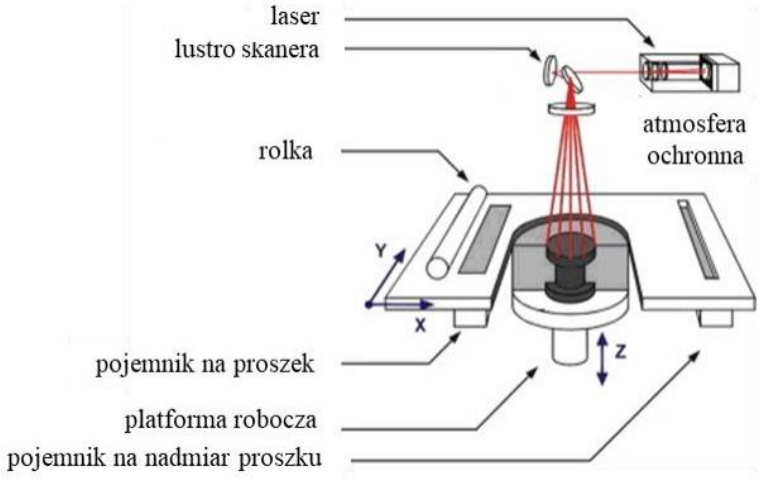
Według źródeł literaturowych metodę EBM można stosować do napraw m.in. łopatek turbin gazowych zbudowanych z nadstopów na bazie niklu. Technologia ta pozwala ponadto na wytwarzanie struktur wielomateriałowych, które używane są w produkcji i regeneracji elementów poprzez nakładanie na uszkodzony obiekt warstw materiału o różnym składzie. Badania wskazują, że energia liniowa występująca w procesie EBM wpływa na uzyskaną mikrostrukturę głównie poprzez zachodzące procesy termiczne w trakcie wstępnego podgrzewania oraz ochładzania materiału. Energia ta wpływa ponadto w znaczącym stopniu na twardość uzyskanego elementu oraz jego właściwości mechaniczne. Metodę EBM z powodzeniem stosuje się podczas napraw części statków powietrznych, które spełniają wymagania certyfikacji. Technologia EBM znajduje swoje zastosowanie także w branży medycznej, m.in. do wytwarzania implantów do naprawy szkieletu, rekonstrukcji czaszkowo-szczękowo-twarzowej czy wymiany kręgów [33].

2.4. *Selective Laser Melting/Selective Laser Sintering*

Selektywne spiekanie laserowe SLS oraz selektywne topienie laserowe SLM to dwie bliźniacze technologie oparte na *Powder Bed Fusion*. Różnica między procesami SLM a SLS polega na wykorzystywaniu procesu spiekania w przypadku pierwszej z metod, natomiast druga z nich opiera się na topieniu. Proces spiekania ogrzewa (ale nie topi) proszek do etapu, w którym ziarna proszku mogą zostać ze sobą złączone na poziomie molekularnym [13].

W przypadku SLM istnieje natomiast możliwość uzyskania pełnego przetopu sproszkowanego materiału, który tworzy jednorodną całość [13]. Dobór optymalnych parametrów oraz typu lasera przyczynia się do uzyskania różnych mechanizmów wiązania, m.in. spiekania w fazie stałej, spiekania w fazie ciekłej, częściowego topienia i pełnego topienia oraz wiązania chemicznego [24].

Zasada obu metod jest taka sama i polega na warstwowej budowie drukowanego elementu. Proces druku lub naprawy rozpoczyna się od utworzenia modelu CAD, wczytywanego do drukarki, w której zostaje przetworzony oraz podzielony na warstwy. Drukarka tworzy program sterujący pozwalający na spiekanie lub stapianie (w zależności od metody) wybranego fragmentu warstwy. Sproszkowany metal, dozowany w odpowiedniej objętości przez dyspenser, rozprowadzany jest warstwowo na ruchomej platformie roboczej za pomocą rolki lub zgarniacza. Sproszkowany materiał zostaje rozprowadzony poprzez zgarniacz na platformę budowy elementu, gdzie zostaje stopiony. Budowę i zasadę działania technologii SLS/SLM przedstawiono na rysunku 6 [24].



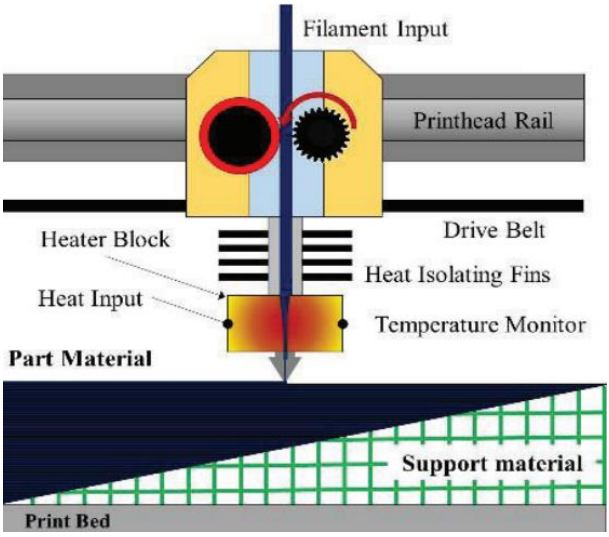
Rys. 6. Budowa i zasada działania SLM/SLS [24]

Procesy SLS, ze względu na swoje zalety, mogą służyć naprawie i regeneracji różnego rodzaju uszkodzonych elementów. W artykule [30] omówiono wykorzystanie selektywnego topienia laserowego do naprawy uszkodzonych elementów maszyny do szycia. Cały proces naprawy obejmował wygenerowanie trójwymiarowego modelu w oprogramowaniu CAD, który powstał dzięki zastosowaniu inżynierii odwrotnej. Wskazano, że zastosowana metoda SLM pozwoliła na idealne odtworzenie i dopasowanie zużytego elementu, co jednocześnie przełożyło się na wydłużenie zdatności całej maszyny.

Elementy naprawione z użyciem technologii topienia lub spiekania laserowego charakteryzują się wysoką wytrzymałością na obciążenia. Tę technologię stosuje się głównie do regeneracji elementów, których wymiana jest utrudniona ze względu na niską dostępność części zamiennych lub gdy części te nie są już produkowane. W artykule [4] przedstawiono zakończone sukcesem wykorzystanie metody SLM do regeneracji pokrywy zaworów silnika diesla. Poza tym technologię topienia lub spiekania laserowego stosowano również do naprawy końcówek palników turbin gazowych. Badacze wskazują, że zastosowanie AM w postaci metody SLM/SLS pozwoliło na 10-krotne skrócenie czasu naprawy w porównaniu z tradycyjnymi procesami. W porównaniu z obróbką skrawaniem SLM wykazuje wyższą wydajność pod względem zużycia energii oraz emituje mniej CO_2. Metoda SLM pozwala także na uzyskanie wysokiej, niemal 100% gęstości wytwarzanych obiektów oraz wysokich właściwości mechanicznych; to powoduje, że jest ona jedną z najlepszych metod PBF stosowanych do przywracania właściwości funkcjonalnych części pojazdów i maszyn.

2.5. *Fused Deposited Modelling*

Ostatnią z najpopularniejszych metod przyrostowych, wykorzystywanych w procesach napraw, regeneracji i renowacji, jest metoda *Fused Deposited Modelling* (FDM). W procesie tym materiał podawany jest do drukarki poprzez podgrzaną dyszę topiącą materiał. Następnie stopiony materiał nanoszony jest w sposób warstwowy na platformie roboczej, gdzie ulega ochładzaniu i zestala się, tworząc gotowy wyrób. Drukarka FDM jest złożona z dyszy, wytłaczarki, komory drukującej i mechanizmu podającego żarnik [1]. W porównaniu z wcześniej przedstawionymi procesami materiał budulcowy w przypadku metody FDM to wosk lub tworzywo termoplastyczne. Na rysunku 7 przedstawiono budowę i zasadę działania drukarki opartej na procesie FDM.



Rys. 7. Budowa i zasada działania FDM [25]

FDM może stanowić także metodę do regeneracji elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Jednak proces takiej naprawy powinien być odpowiednio przygotowany i uwzględniać określone warunki. Jako najważniejszy warunek określa się odpowiednie przygotowanie powierzchni naprawianej części. W przypadku jego spełnienia możliwa jest naprawa uszkodzeń w postaci pęknięć czy odprysków elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Dobrze przygotowany proces naprawczy pozwala na przywrócenie żywotności np. cylindrów pneumatycznych, łopatek turbin wykonanych z tworzywa ABS; skutecznie wykorzystano tę metodę do naprawy zużytej części łopatki turbiny. Metodę FDM wykorzystuje się także do naprawy plastikowych części pojazdów. FDM pozwala na odbudowę tkanki kostnej oraz wytworzenie polimerowych bioimplantów. Proces FDM jest także ekologiczny, ponieważ może wykorzystywać w procesach wytwarzania oraz naprawy włókna polimerowe pochodzące z recyklingu [25].

3. PODSUMOWANIE

Wytwarzanie przyrostowe, stosowane jako alternatywa dla tradycyjnych metod, wykorzystywane jest w procesach naprawy i regeneracji części wykorzystywanych w różnych sektorach przemysłu. Procesy AM są mniej energochłonne i bardziej przyjazne dla środowiska niż metody tradycyjne. Przedstawione technologie pozwalają na uzyskanie pożądanych właściwości mechanicznych regenerowanych części, które z powodzeniem można stosować w pojazdach, maszynach czy nawet w medycynie. Odpowiednio dobrane parametry procesów AM pozwalają ponadto na wytworzenie się silnych wiązań międzywarstwowych pomiędzy zużytą częścią a drukowanym ubytkiem. Najczęściej wykorzystywane są metody oparte na DED, w tym liderem jest metoda LMD. Metoda ta pozwala na odbudowanie uszkodzonej części. Metody oparte na PBF, tj. SLM, SLS, EBM, częściej wykorzystuje się natomiast do wytworzenia nowych, precyzyjnie dostosowanych części zamiennych. W niektórych przypadkach część naprawioną za pomocą metod AM trzeba poddać obróbce cieplnej w celu uzyskania optymalnych właściwości użytkowych.

LITERATURA

[1] Altıparmak S., Yardley V., Shi Z., Lin J., 2022. Extrusion-based additive manufacturing technologies: state of the art and future perspectives. Journal of Manufacturing Processes 83, 607–636.

[2] ASTM F2792-12A, Additive manufacturing – general principles terminology.

[3] Bin Du Y., Liao L., 2017. Failure mode, effects and criticality analysis of remanufactured machine tools in service. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 18(3), 425–434.

[4] Buican G., Oancea G., Manolescu A., 2014. Remanufacturing of damaged parts using selective laser melting technology. Applied Mechanics and Materials 693, 285–290.

[5] Du Y., Li C., 2014. Implementing energy-saving and environmental-benign paradigm: machine tool remanufacturing by OEMs in China. Journal of Cleaner Production 66, 272–279.

[6] Fan X., Zhang Z., Jin X., Yuan W., Guo N., 2010. Technology of reconfigurable multiprocess combined machining for remanufacturing. 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 1–4.

[7] Gandini E., Agnesone F., Taricco F., Arrighi L., 2014. Advances in gas turbine Blade repair by laser welding. Proceedings of the ASME turbo expo, 1–4.

[8] Hazen B., Mollenkopf D., Wang Y., 2017. Remanufacturing for the circular economy: an examination of consumer switching behavior. Business Strategy and the Environment 6(4), 451–464.

[9] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., 2016. Additive manufacturing of metals. Acta Materialia 117, 371–392.

[10] Kamrani A., 2014. Direct laser deposition for re-manufacturing of components. 2014 World Automation Congress (WAC), 1–5.
[11] Kanishka K., Acherjee B., 2023. A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. Journal of Manufacturing Processes 89, 220–283.
[12] Kim H., Park H., Koo J., Seok C., Yang S., Kim M., 2012. Evaluation of welding characteristics for manual overlay and laser cladding materials in gas turbine blades. Journal of Mechanical Science and Technology 26, 2015–2018.
[13] Kruth J.P., Mercelis P., van Vaerenbergh J., Froyen L., Rombouts M., 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal 11, 26–36.
[14] Liu D., Lippold J., Li J., Rohklin S., Vollbrecht J., Grylls R., 2014. Laser engineered net shape (LENS) technology for the repair of ni-base superalloy turbine components. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Material Science 45(10), 4454–4469.
[15] Liu R., Wang Z., Sparks T., Liou, F., 2014. Stereo vision based hybrid manufacturing of Ti-6Al-4V in component repair process. Proceedings of the 2014 Solid Freeform Fabrication Symposium, 1425–1431.
[16] Madhu N., Erfani H., Jadoun S., Amir M., Thiagarajan Y., Chauhan N., 2022. Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: a review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 122, 2125–2138.
[17] Mahamood R., Akinlabi E., Shukla M., Pityana S., 2013. Scanning velocity influence on microstructure, microhardness and wear resistance performance of laser deposited Ti6Al4V/TiC composite. Materials & Design 50, 656–666.
[18] Matsumoto M., Yang S., Martinsen K., Kainuma Y., 2016. Trends and research challenges in remanufacturing. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology 3(1), 129–142.
[19] Montero J., Paetzold K., Bleckmann M., Holtmannspoetter J., 2018. Re-design and remanufacturing of discontinued spare parts implementing additive manufacturing in the military field. Proceedings of international design conference DESIGN, 1269–1278.
[20] Petrat T., Graf B., Gumenyuk A., Rethmeier M., 2016. Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of inconel 718. Physics Procedia 83, 761–768.
[21] Pinkerton A., Wang W., Li L., 2012. Component repair using laser direct metal deposition. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 222(7), 827–836.
[22] Rabiey M., Schiesser P., Maerchy P., 2020. Direct metal deposition (DMD) for tooling repair of DIN 1.2343 steel. Procedia CIRP 95, 23–28.
[23] Rusiński E., Czmochowski J., Pietrusiak D., 2012. Problemy identyfikacji modeli modalnych stalowych ustrojów nośnych. Eksploatacja i Niezawodność 14(1), 54–61.

[24] Shahzad K., Deckers J., Zhang Z., Kruth J., Vleugels J., 2014. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. Journal of the European Ceramic Society 34(1), 81–89.
[25] Shanmugam V., 2020. Polymer recycling in additive manufacturing: an opportunity for the circular economy. Materials Circular Economy 2, 11.
[26] Shim D., Lee H., Son Y., Oh W., 2021. Effects of pre- and post-repair heat treatments on microstructure and tensile behaviors of 630 stainless steel repaired by metal additive manufacturing. Journal of Materials Research and Technology 13, 980–999.
[27] Sun G., 2018. Microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel repaired by laser metal deposition. Surface and Coatings Technology 351, 198–211.
[28] Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S., 2015. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: a review of important aspects. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 229(11), 2132–2147.
[29] Velte C., Scheller K., Steinhilper R., 2018. Circular Economy through Objectives–Development of a Proceeding to Understand and Shape a Circular Economy Using Value-focused Thinking. Procedia CIRP 69, 775–780.
[30] Weißmann V., Bader R., Hansmann H., Laufer N., 2016. Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open-porous scaffolds. Materials & Design 95, 188–197.
[31] Wilson J., Piya C., Shin Y., Zhao F., Ramani K., 2014. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. Journal of Cleaner Production 80, 170–178.
[32] Xiong Y., Smugeresky J., Schoenung J., 2009. The influence of working distance on laser deposited WC-Co. Journal of Materials Processing Technology 209(10), 4935–4941.
[33] Yan R., 2018. Electron beam melting in the fabrication of three-dimensional mesh titanium mandibular prosthesis scaffold. Scientific Reports 8(1), 750.
[34] Yang S., Raghavendra M., Kaminski J., Pepin H., 2018. Opportunities for industry 4.0 to support remanufacturing. Applied Sciences 8(7), 1177.

WPŁYW URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH STOSOWANYCH W MOTOCYKLACH NA BEZPIECZEŃSTWO JAZDY

Joanna Wilczarska[1*], Mateusz Klemens[1], Oleh Polishchuk[2]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i. J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Khmelnitskyi National University, 11 Instytutska Street, Khmelnytskyi, 29000, Ukraine

Streszczenie. W pracy przedstawiono systemy elektroniczne monitorujące i wspomagające bezpieczną jazdę na motocyklu. Przeanalizowano również najczęstsze usterki tych systemów. Przeprowadzono badania pomiaru drogi hamowania wybranych obiektów.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo, motocykl, urządzenia elektryczne

1. ELEKTRONICZNE SYSTEMY BEZPIECZEŃSTWA W MOTOCYKLACH

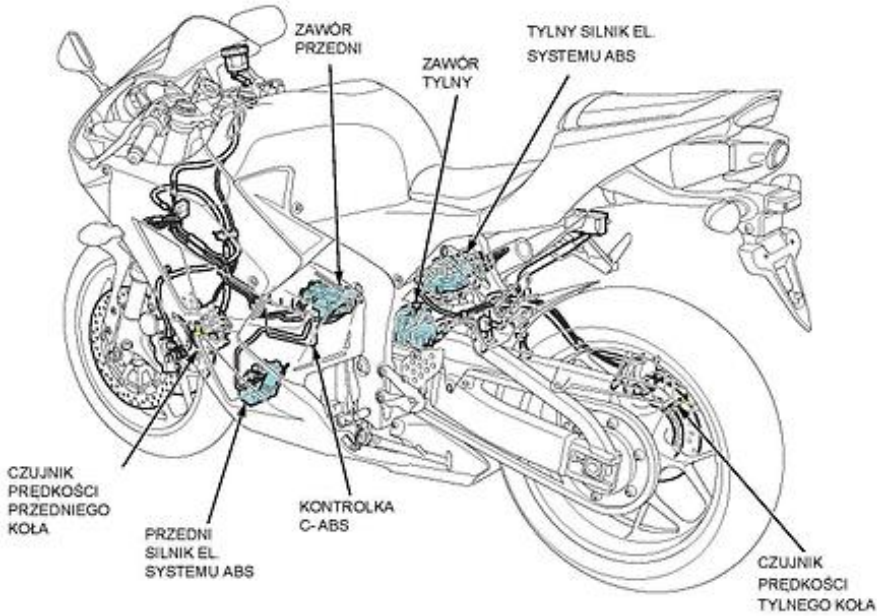
Motocykliści są chronieni przede wszystkim przez systemy elektroniczne. Nie ma możliwości, aby zastosować większe strefy zgniotu czy też wzmocnić konstrukcję w takim stopniu jak w samochodach osobowych, które same w sobie są pewnego rodzaju „klatkami bezpieczeństwa" dla kierowcy. Na motocyklu kierowca jest narażony na wszelkie zagrożenia, przed którymi jedynie częściowo chronią go urządzenia elektroniczne.

1.1. Układ przeciwpoślizgowy ABS

Układy, które najczęściej montowano w motocyklach, to tradycyjne, ręcznie sterowane hamulce przednie oraz niezależny nożny hamulec tylny. Hamowanie za pomocą takiego układu wymaga od kierowcy doświadczenia i odpowiedniego dozowania siły różnej na obu dźwigniach ze względu na trudność jego wykonania oraz duże niebezpieczeństwo uślizgu jednego z kół. Już we wczesnych latach 30. zbudowano mechaniczny układ hamulcowy, który wykorzystywał cięgna w celu hamowania parą kół za pomocą jednej dźwigni. Największy problem w tamtych latach stanowiło wyregulowanie systemu. Podczas hamowania przednie koło jest dociążane, a tylne odciążane, co w przypadku zastosowania takiej samej siły hamującej powodowało zablokowanie się tylnego koła, a w konsekwencji skutkowało uślizgiem i wywrotką motocykla. Sytuację wzmacniały późniejsze, bardziej wydajne systemy, w których bęben zastąpiono tarczą [1, 17].

[*] adres korespondencyjny: joanna.wilczarska@pbs.edu.pl

Kolejnym problemem, z którym borykali się konstruktorzy, było zróżnicowanie nawierzchni, które w wielu miejscach jest niejednorodne w dwóch punktach styku kół jednośladu z podłożem [1, 17]. Idealnym rozwiązaniem wcześniejszych problemów był wykorzystywany w samochodach osobowych system ABS. W motocyklach system został wzbogacony o elektroniczne sterowanie [1, 17]. Motocyklowy system ABS pierwszej generacji składa się z modułu kontrolnego ABS, z czujników kontroli prędkości obrotowej przedniego i tylnego koła oraz z modulatora ciśnienia sterującego pracą zacisków hamulcowych przedniego i tylnego koła (rys. 1).



Rys. 1. System ABS w motocyklu [1]

Działanie takiego systemu nie polegało na analizowaniu czynników zewnętrznych, które wpływały na proces hamowania, lecz na kontroli prędkości obrotowej każdego z kół, zapobiegając ich blokowaniu poprzez dobranie odpowiedniej siły hamowania. Jednostka centralna otrzymywała sygnał z czujnika zainstalowanego przy jednym z kół z informacją o jego zablokowaniu lub nagłym spadku prędkości obrotowej, następnie impuls przekazywany był do sterownika uruchamiającego zawór, który obniżał ciśnienie w tym segmencie układu do chwili ustania blokowania koła. W tym samym czasie firma BMW, w swoim BMW R1100RS, zastosowała pierwszy częściowo zintegrowany z układem hamulcowym system ABS. Działał on w momencie hamowania ręcznym hamulcem. Hamowanie przednim hamulcem wywoływało uruchomienie się hamulca tylnego [1, 17].

1.2. Combined ABS (C-ABS)

W celu zrozumienia omawianego systemu postanowiono krótko opisać system CBS. Jest to mechaniczny system, uruchamiający przy wciśnięciu jednej z dźwigni obydwa hamulce. System, który opisano, łączy w sobie korzyści systemu ABS, który zapobiega blokowaniu kół, oraz systemu CBS, który gwarantuje lepszą kontrolę i stabilność motocykla podczas hamowania. Jest to elektroniczny system wykonany w technologii *brake by wire*, który pozwala na gwałtowne hamowanie bez ryzyka zablokowania jednego z kół oraz podskakiwania tylnego, co umożliwia zachowanie optymalnego toru jazdy. Jedną z najważniejszych cech systemu C-ABS jest niezależna kontrola ciśnienia w przednim i tylnym układzie hamulcowym. Krótko mówiąc, jeśli kierowca, zbliżając się do zakrętu, chce delikatnie zwolnić jedynie za pomocą hamulca nożnego, nie zostanie aktywowany hamulec przedni. Elektroniczne sterowanie zapewnia optymalną siłę hamowania przekazywaną pomiędzy każdym z kół oraz umożliwia neutralne zachowanie motocykla [4, 15, 17–19].

Poniżej przedstawiono podzespoły, które tworzą układ C-ABS. Pierwszym z nich jest pompa, dla każdego z hamulców po jednej. Zbudowana jest z silnika elektrycznego oraz mechanizmu modulującego wyposażonego w śrubę oraz nakrętkę kulową. Pompa odpowiedzialna jest za regulację płynu hamulcowego w całym układzie (rys. 2) [4, 15, 17–19].

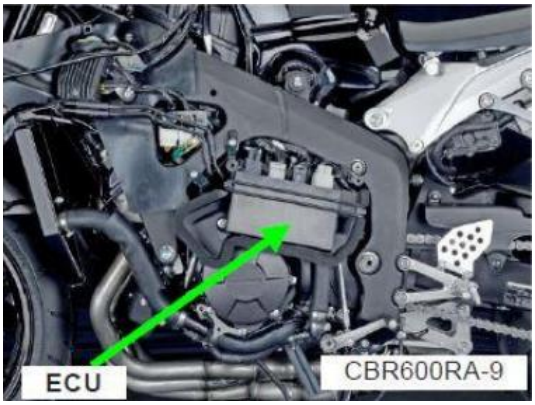
Rys. 2. Pompa instalowana w systemie Honda CBR 600RRA C-ABS [18]

Kolejnym elementem całego systemu jest zespół zaworów. W tym przypadku dla przedniego i tylnego układu hamulcowego instaluje się elementy o innej specyfikacji, ze względu na różne opory pracy każdej z dźwigni, jednak konstrukcyjnie nie różnią się od siebie. Składają się z tłoczka symulatora, trzech

elektrozaworów, trzech czujników ciśnienia oraz dwóch zaworów jednokierunkowych (rys. 3). Zadaniem zaworów jest dostosowanie ciśnienia płynu hamulcowego w zaciskach poprzez jego zmniejszenie, utrzymanie na tym samym poziomie lub zmniejszenie o odpowiednią wartość [4, 15, 17–19].

Rys. 3. Zawory instalowane w Honda CBR600RRA C-ABS [18]

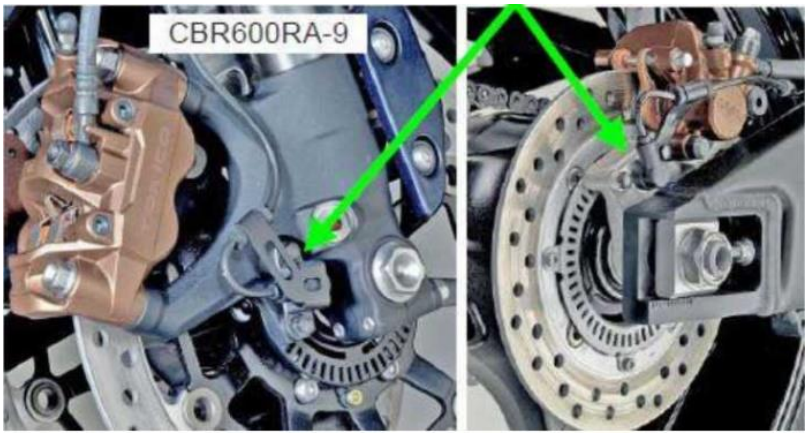
Najważniejszy element całego systemu to jednostka ECU, która nadzoruje odbierane informacje z czujników (rys. 4). Urządzenie porównuje prędkości obrotowe obu kół. Reakcja następuje w przypadku zarejestrowanej różnicy w prędkości obrotowej pomiędzy przednim a tylnym kołem. Nagła zmiana omawianego parametru może być spowodowana uślizgiem lub nagłym hamowaniem [4, 15, 17–19].



Rys. 4. Jednostka sterująca ECU Honda CBR 600RRA [18]

Ostatni element układu, który zaprezentowano, to hallotronowe czujniki prędkości obrotowej (rys. 5). Niewielkie urządzenie pomiarowe wykorzystujące zjawisko występowania różnic potencjałów w przewodniku, przez który przepływa prąd elektryczny. W przypadku układu C-ABS obracający się podczas jazdy pierścień ze szczelinami, zlokalizowany w środku tarczy hamulcowej, „przecina linie pola magnetycznego oddziałujące na czujnik” [2]. Napięcie wy-

stępuje, gdy pomiędzy magnesami nie znajduje się przeszkoda. W przypadku przysłonięcia pola magnetycznego oddziałującego na czujnik Halla napięcie jest bliskie zeru. W ten sposób określana jest prędkość obrotowa kół. Jeżeli występują różnice w odczytach zmian pola magnetycznego z czujników, następuje uruchomienie się systemu C-ABS [4, 15, 17–19].



Rys. 5. Czujniki hallotronowe instalowane w motocyklu Honda CBR600RRA [18]

System C-ABS, w porównaniu ze zwykłym systemem ABS, zapewnia większą kontrolę nad pojazdem podczas wykonywania procesu hamowania. Jednoczesne użycie hamulca tylnego i przedniego pozwala na sprawne zatrzymanie oraz zachowanie stabilności motocykla [4, 15, 17–19].

1.3. Elektroniczny amortyzator skrętu

W celu zrozumienia omawianego systemu postanowiono przedstawić definicje następujących zagadnień: shimmy oraz amortyzator skrętu.

Shimmy – „to zjawisko narastania drgań pewnych elementów konstrukcji, aż do zniszczenia tych elementów i/lub całej konstrukcji” [5]. W przypadku motocykla tym elementem jest kierownica, która podczas shimmy drga z jednego skrajnego położenia do przeciwnego z ogromną częstotliwością, co uniemożliwia utrzymanie jej w rękach przed kierującego motocyklem. Najczęściej występuje podczas poruszania się z dużymi prędkościami po nierównych drogach, szczególnie na tych, na których występują koleiny, podczas gwałtownego przyśpieszania, gdy przednie koło jest odciążane oraz w przypadku złego stanu ogumienia lub wyważenia [5, 6, 9].

Amortyzator skrętu – urządzenie, którego zadaniem jest niwelowanie drgań oraz utrzymanie przedniego koła podczas odciążania przy przyspieszaniu lub utraty kontaktu z podłożem w linii prostej z kołem tylnym. Pierwsze amortyzatory skrętu były wykonane z dwóch tarcz przykręconych w okolicy główki ramy, następnie zaczęto stosować stabilizatory olejowe oraz gazowo-olejowe, aż do elektronicznych [5, 6, 9].

W przedstawionej pracy skupiono się na innowacyjnym, elektrohydraulicznym urządzeniu zbudowanym przez inżynierów marki Honda – HESD (*Honda Electronic Steering Damper*) (rys. 6), które zainstalowano w pierwszym CBR 1000RR. Siła tłumienia wzrasta wraz z prędkością odczytywaną przez czujnik, który przekazuje cyfrowy sygnał do ECU – jednostki kontrolnej, która przeistacza odebraną informację na sygnał analogowy, czyli napięcie o wartości proporcjonalnej do ilości dostarczonych impulsów. Przepływ oleju kontrolowany jest poprzez odpowiednie otwarcie elektrozaworu. Takie rozwiązanie zapewnia lekkość poruszania się przy niewielkiej prędkości oraz stabilność motocykla wraz z jej wzrostem. Poniżej przedstawiono fotografię prezentującą lokalizację urządzenia w okolicy główki ramy [5, 6, 9].

Rys. 6. Elektroniczny amortyzator skrętu HESD [9]

1.4. System kontroli trakcji TCS oraz *anti-wheelie*

Traction System Control to system zapobiegający poślizgowi lub utracie przyczepności koła napędzanego podczas przyśpieszania, natomiast układ *anti-wheelie* zapobiega unoszeniu się przedniego koła. Omawiane systemy są ściśle ze sobą związane. Wykorzystują dane z czujników zawartych w układzie C-ABS, które są wspierane przez dodatkowe komponenty takie jak: moduł obliczeniowy, który mierzy przyśpieszenia motocykla oraz czujnika kontrolującego kąt pochylenia jednośladu [11, 20].

Podczas jazdy gdy kierowca otworzy przepustnicę, rośnie moment napędowy. System TCR wkracza, gdy moment obrotowy nie może być w pełni przeniesiony na nawierzchnię jezdni przez koło napędzane, które zaczyna się ślizgać i traci przyczepność. Układ rozpoczyna korektę wartości momentu występującego na tylnym kole, gdy moment przekracza wartość maksymalną. W przypadku motocykli wyposażonych w system TCS istnieją trzy możliwości realizacji kontroli trakcji [11, 20].

Pierwszą z nich jest opóźnienie punktu zapłonu – mieszanka paliwa z powietrzem jest zapalana w innym położeniu tłoka w cylindrze. Najczęściej wtedy, gdy tłok znajduje się już w GMP. Drugi sposób polega na zmniejszaniu lub odcinaniu dawek paliwa przez układ wtryskowy. Trzecia metoda może być wykorzystywana w przypadku motocykli wyposażonych w elektronicznie sterowaną przepustnicę. W zależności od aktualnych odczytów jest ona przymykana lub zamykana [11, 20].

System *anti-wheelie* działa na tej samej zasadzie co TCS. Sygnały z czujników o różnicy prędkości obrotowych na każdym z kół docierają do ECU – jednostki kontrolnej, która ogranicza wzrost momentu obrotowego w jeden z wyżej opisanych sposobów, czego skutkiem jest utrzymanie kontaktu przedniego koła z nawierzchnią. Poniżej przedstawiono wizualizację działania systemu *anti-wheelie* (rys. 7) [11, 20].

Rys. 7. Działanie systemu *anti-wheelie* [11]

1.5. Zmienne mapy zapłonu S-DMS Suzuki

W przedstawionym podrozdziale skupiono się na systemie marki Suzuki – *Drive Mode Selector* (S – DMS). Zapewnia on wybór pomiędzy trzema mapami zapłonu, które kierowca może zmieniać w zależności od potrzeb lub panujących warunków atmosferycznych. Pozostali producenci motocykli czasami dodają czwartą mapę, w której użytkownik może w dowolny sposób manipulować ustawieniami zapłonu, dopasowując moc do osobistych preferencji [10, 14].

Tryby pracy silnika w motocyklach Suzuki opisano za pomocą następujących liter [10, 14]:

A – zapewnia ostrą reakcję przepustnicy, w każdym zakresie otwarcia przepustnicy w celu uzyskania maksymalnej mocy silnika,

B – zapewnia łagodniejszą reakcję przepustnicy niż tryb A do środkowego zakresu jej otwarcia,

C – zapewnia łagodną reakcję przepustnicy przy każdym jej otwarciu poprzez zmniejszenie mocy silnika.

Mapy zapłonu zmienia się w łatwy sposób przy włączonym zapłonie za pomocą przełącznika zlokalizowanego przy lewej manetce, który przedstawiono poniżej (rys. 8).

Rys. 8. Przełącznik trybu pracy silnika Suzuki GSX-R 1000 [3]

Komputer pokładowy resetuje wybrane ustawienie do seryjnego przy każdym przekręceniu kluczyka. Wybrany tryb pracy silnika jest prezentowany w lewym dolnym rogu wyświetlacza zlokalizowanego w kokpicie (rys. 9) [10, 14].

Rys. 9. Kokpit z wybraną mapą zapłonu A [8]

2. USTERKI ELEKTRONICZNYCH SYSTEMÓW BEZPIECZEŃSTWA

Ze względu na jakość wykonania oraz pełnioną funkcję – bezpieczeństwo – systemy ABS oraz C-ABS są niezwykle niezawodne. Usterki pojawiają się z powodu niewłaściwej eksploatacji pojazdu oraz w jednośladach z przeszłością powypadkową [12].

Do najczęstszych usterek ww. systemów zaliczono [12]:
– brak komunikacji ze sterownikiem – niesprawny element,
– uszkodzenie czujników prędkości obrotowej kół,
– przerwanie przewodów (awaria mechaniczna),
– zapowietrzenie zespołu elektrozaworów.

Awaria jednego z podzespołów może doprowadzić do utraty kontroli podczas nagłego hamowania w nieprzewidzianych warunkach poprzez zablokowanie się jednego z kół, co może skutkować wywrotką jednośladu.

W przypadku systemu TCS oraz *anti-wheelie* uszkodzenia elementów pokrywają się, ponieważ wykorzystują te same podzespoły. W razie awarii kontroli trakcji zauważono tendencję tylnego koła, szczególne na drogach gruntowych, do znacznej podsterowności oraz szybkiej utraty przyczepności, natomiast w przypadku systemu *anti-wheelie* przednie koło w momencie gwałtownego przyśpieszania odrywa się i traci kontakt z nawierzchnią drogi.

Do defektów elektronicznych amortyzatorów skrętu zaliczono [5, 6, 9]: uszkodzenie czujnika odczytującego prędkość motocykla, uszkodzenie jednostki kontrolnej ECU, uszkodzenie elektrozaworów kontrolujących przepływ oleju wewnątrz urządzenia.

Następstwem uszkodzenia jednego z podzespołów amortyzatora skrętu jest utrata stabilności jednośladu wraz ze wzrostem prędkości oraz możliwość wystąpienia shimmy, które może doprowadzić do utraty kontroli nad motocyklem.

W przypadku zmiennych map zapłonu nie odnotowano uszkodzeń systemu.

3. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W celu przedstawienia wpływu elektronicznych systemów instalowanych w motocyklach na wzrost bezpieczeństwa postanowiono przeprowadzić badania długości drogi hamowania trzech jednośladów. Jeden motocykl wyposażono w standardowy układ hamulcowy, drugi w układ hamulcowy wyposażony w ABS, natomiast trzeci w układ hamulcowy wyposażony w C-ABS. Zbiorniki motocykli wypełniono maksymalną ilością paliwa. Próbę wykonywał jeden operator o wadze 85 kg.

Badania przeprowadzono w słoneczny dzień w temperaturze około 22°C na prostym odcinku asfaltowej jezdni. Pomiar długości drogi hamowania zrealizowano trzykrotnie dla następujących prędkości: 40 $km \cdot h^{-1}$, 50 $km \cdot h^{-1}$ oraz 60 $km \cdot h^{-1}$ z wykorzystaniem tylko hamulca przedniego.

3.1. Warunki badań

Stanowisko pomiarowe wyznaczono w miejscowości Ruda, na odcinku drogi dojazdowej do pól znajdującej się przy DKS10 łączącej Lubieszyn z Płońskiem. Elementy wykorzystane w budowie przestrzeni pomiarowej to:

– taśma miernicza o długości 20 m – odczytanie drogi hamowania motocykla (rys. 10),
– dwie flagi sygnalizacyjne,
– biała linia wyznaczająca miejsce rozpoczęcia hamowania (rys. 11).

Rys. 10. Taśma miernicza służąca do pomiaru drogi hamowania (opracowanie własne)

Rys. 11. Stanowisko pomiarowe (opracowanie własne)

3.2. Obiekty badań

W badaniach wykorzystano dwa motocykle marki Honda model CB600 „Hornet" kolejno z lat 2006 i 2012 oraz jednoślad Kawasaki Z750 z 2011 roku (rys. 12–16).

Rys. 12. Obiekt I Honda Hornet 600 (opracowanie własne)

Rys. 13. Przedni i tylny układ hamulcowy Honda Hornet 600 (opracowanie własne)

Rys. 14. Obiekt II Kawasaki Z750 ABS (opracowanie własne)

Rys. 15. Przedni i tylny układ hamulcowy Honda Hornet 600 C-ABS [16]

Rys. 16. Obiekt III Honda Hornet 600 C-ABS [16]

Wszystkie wykorzystane obiekty mają opony o tym samym rozmiarze, z przodu 120/70/17, z tyłu 180/55/17, oraz o podobnym stopniu zużycia (pomimo różnic w okresach produkcji). Przednie tarcze hamulcowe w obiektach numer I oraz numer III mają taką samą średnicę 296 mm, natomiast w obiekcie II wzrosła ona o 4 mm i wyniosła 300 mm. Tylnego hamulca nie wykorzystywano w badaniu. Pomiary przeprowadzono w taki sposób, że w jednośladach wyposażonych w ABS lub C-ABS system uruchamiał się przy każdym hamowaniu. Największą różnicą wśród badanych obiektów jest waga, która w przypadku motocykli Honda (198 kg i 207 kg) jest niewielka, bo wynosi tylko 9 kg, natomiast w przypadku Kawasaki Z750 waga liczy aż 230 kg. Może mieć to znaczny wpływ na długość drogi hamowania. Kolejną zaobserwowaną różnicą jest wykorzystanie przez producentów dwutłoczkowych zacisków w obiekcie I oraz II, gdzie w przypadku obiektu III zainstalowano trzytłoczkowe zaciski (tab. 1, 2).

Tab. 1. Dane techniczne Honda CB600 Hornet 2006 [13]

OBIEKT I		
Marka		Honda
Model		CB600 „Hornet”
Rok produkcji		2006
Waga		198kg
Klasyczny układ hamulcowy	Przód	Podwójne tarcze 296mm wyposażone w dwutłoczkowe zaciski
	Tył	Pojedyńcza tarcza 220mm wyposażona w jednotłoczkowy zacisk
Ogumienie	Przód	Pirelli Diablo Strada
	Tył	Pirelli Diablo Strada
	Przód rozmiar	120/70/17
	Tył rozmiar	180/55/17
	Produkcja	3411

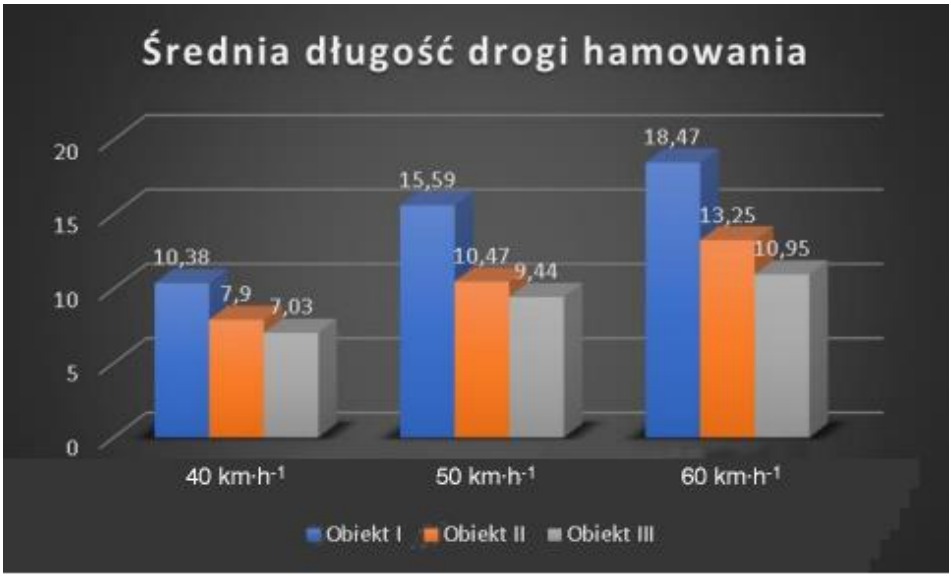
Tab. 2. Dane techniczne Honda CB600 Hornet C-ABS 2012 [15]

OBIEKT III		
Marka		Honda
Model		CB600 „Hornet” C-ABS
Rok produkcji		2012
Waga		207kg
Układ hamulcowy wyposażony w C-ABS	Przód	Podwójne tarcze 296mm wyposażone w trzytłoczkowe zaciski
	Tył	Pojedyńcza tarcza 240mm wyposażona w jednotłoczkowy zacisk
Ogumienie	Przód	Pirelli Diablo Rosso 3
	Tył	Pirelli Diablo Rosso 3
	Przód rozmiar	120/70/17
	Tył rozmiar	180/55/17
	Produkcja	4317

W tabeli 3, którą zamieszczono poniżej, można zauważyć, że długości drogi hamowania jednego motocykla dla konkretnej prędkości wahają się o kilka metrów. Związane jest to z trudnością utrzymania wymaganej prędkości, z odpowiednią reakcją operatora oraz z niewielkimi różnicami związanymi miejscem rozpoczęcia hamowania. Na podstawie wykresów zauważono, że pomimo najmniejszej wagi obiekt I długość drogi hamowania dla prędkości 40 km·h^{-1} ma o 23,9% większą, przy 50 km·h^{-1} różnica wynosi 32,8% oraz 28,3% przy 60 km·h^{-1} w porównaniu z pozostałymi obiektami. Kawasaki Z750 niezależnie od wagi o ponad 20 kilogramów większej niż Honda Hornet, którą wyposażono w system C-ABS oraz trzytłoczkowe zaciski, nie wykazuje znacznych różnic w długości drogi hamowania. Kolejno dla 40 km·h^{-1} to 11%, dla 50 km·h^{-1} – 9,8% oraz przy 60 km·h^{-1} – 17,3%. Porównując motocykl z konwencjonalnym układem hamulcowym z motocyklami wyposażonymi w elektroniczne systemy bezpieczeństwa wspomagające proces hamowania, stwierdzono, że mogą one mieć wpływ na zredukowanie liczby zdarzeń drogowych. Znacznie skracają drogę hamowania pojazdu, co może umożliwiać uniknięcie kolizji z innym uczestnikiem ruchu oraz uderzenia w pieszego, a także odpowiadają za stabilizację w celu zabezpieczenia kierowcy i pasażera przed utratą równowagi. W przypadku jednośladu z C-ABS zauważono, że pomimo mniejszej wagi oraz tego, że dźwignia hamulca przedniego uruchamia także hamulec tylny, droga hamowania jest nieznacznie krótsza od drogi motocykla z ABS. Jak wcześniej pisano, ten system odpowiedzialny jest za stabilizację pojazdu w momencie gwałtownego zatrzymania.

Tab. 3. Zestawienie wyników przeprowadzonych badań (w metrach) (opracowanie własne)

km·h^{-1}	**Obiekt**	**Obiekt I**			**Obiekt II**			**Obiekt III**		
40 km·h^{-1}		10,34	11,60	9,20	8,28	7,69	7,73	7,44	6,59	7,07
Średnia		10,38			7,90			7,03		
50 km·h^{-1}		16,82	16,65	14,50	11,28	9,67	10,47	8,79	10,44	9,10
Średnia		1559			10,47			9,44		
60 km·h^{-1}		17,15	20,15	18,10	12,10	15,25	12,40	11,50	10,90	10,45
Średnia		18,47			13,25			10,95		



Rys. 17. Średnia długość drogi hamowania badanych obiektów (opracowanie własne)

4. PODSUMOWANIE

W latach 2013–2017 zanotowano liczbę 11262 wypadków z udziałem użytkowników jednośladów, w których ucierpiało 11476 motocyklistów. Najczęściej sprawcami wypadków spowodowanych przez innych uczestników ruchu są kierujący samochodami osobowymi, w latach 2013–2017 spowodowali blisko 6000 zdarzeń. Motocykliści w omawianych okresie sprokurowali 4672 wypadki, w których zginęło 579 osób, a 4788 zostało rannych. Najczęściej do zdarzeń drogowych dochodziło ze względu na przekroczenie dozwolonej prędkości.

W celu zwiększenia bezpieczeństwa podczas jazdy na motocyklu producenci zaczęli instalować systemy bezpieczeństwa. Najbardziej popularnym jest ABS, który w 2013 roku ze względu na przepisy wprowadzone przez Unię Europejską musiał znajdować się w wyposażeniu standardowym motocykli o pojemności większej niż 125 cm^3, a od roku 2017 ww. należy instalować w każdym nowym jednośladzie. Producenci coraz więcej elektronicznych systemów bezpieczeństwa, które dotychczas spotykano wyłącznie w motocyklach przeznaczonych na tor, przenoszą do maszyn użytku publicznego, w znacznym stopniu podnosząc poziom ich bezpieczeństwa. W nowoczesnych maszynach obok ABS występuje szereg elektronicznych systemów wspomagających kierowcę, jakimi są m.in.: kontrola trakcji, zmienne mapy zapłonu, elektryczny amortyzator skrętu oraz system *anti-wheelie*.

Odpowiednie ustawienia oraz skupiony kierowca dają możliwość uniknięcia zdarzenia drogowego. Najważniejsze czynniki to skrócenie drogi hamowania, a także stabilna pozycja motocykla podczas hamowania, która ułatwia jego utrzymanie w celu zapobiegnięcia utraty równowagi, co prowadzi do zerwania przyczepności opon z nawierzchnią drogi. Obecnie już w motocyklach o pojemości 125 cm^3 wykorzystuje się ABS, rzadziej C-ABS. Pozostałe systemy, takie jak kontrola trakcji, system *anti-wheelie* czy zmiennie mapy zapłonu, przypisane są do motocykli *stricte* sportowych, które charakteryzują się mocą trudną do opanowania, a także w motocyklach typu *naked*, które najczęściej są wersjami jednośladów sportowych rozebranych z owiewek. Najczęściej spotykanym systemem w motocyklach turystycznych jest ABS, częste są też C-ABS oraz kontrola trakcji. Podsumowując powyższe rozważania, stwierdzono, iż założony cel został zrealizowany. Przedstawiono i opisano najważniejsze urządzenia elektroniczne stosowane w motocyklach mające wpływ na ochronę podróżujących jednośladami, usterki i ich wpływ na bezpieczeństwo jazdy. Zestawiono dane dotyczące wypadków z udziałem motocyklistów, ich przyczyny i skutki. Opisano wyniki przeprowadzonych badań oraz ankiety, które dopełniają tę pracę.

LITERATURA

[1] Dmowski R., 2003. Motocyklowe instalacje elektryczne. WKŁ, Warszawa.
[2] Herner A., Riehl H.-J., 2003. Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych. WKŁ, Warszawa.
[3] http://bikereview.com.au/review-2017-suzuki-gsx-r1000r/(dostęp: 7.05.2024).
[4] http://fireblade.pl/sc59_opis_combined_abs.php (dostęp: 05.05.2024).
[5] http://motormag.pl/2016/08/amortyzator-skretu-w-motocyklu/(dostęp: 05.05.2024).
[6] http://motormania.com.pl/newsy/swiat/elektroniczny-aktywny-amortyzator-skretu-koniecz-shimmy/ (dostęp: 05.05.2024).
[7] http://photos.motogp.com/2017/04/21/3003_03_2017_ame_mgp_fri_3d_antiwheelie_en.gallery_full_top_lg.jpg (dostęp: 05.05.2024).
[8] http://www.mcnews.com.au/suzuki-gsx-r1000-2017/2/(dostęp: 5.05.2024).
[9] http://www.motocyklizm.pl/artykuly/technika-jazdy/item/1256-shimmy-amortyzatorskretu-wszystko-na-ten-temat (dostęp: 05.05.2024).
[10] http://www.suzukigsxr.org/drive_mode_selector_description-372.html (dostęp: 05.05.2024).
[11] http://www.swiatmotocykli.pl/Motocykle/56,113811,17715473,Kontrola_trakcji_i_hamulcow ___Elektroniczni_straznicy.html (dostęp: 05.05.2024).
[12] https://autokult.pl/28771,awarie-systemu-abs,all (dostęp: 05.05.2024).
[13] https://pl.wikipedia.org/wiki/Honda_CB_600F_Hornet (dostęp: 22.05.2018).
[14] https://suzuki.pl/pdf/moto/katalogi/motocykle2018.pdf (dostęp: 05.05.2024).

[15] https://www.scigacz.pl/Honda,CB600F,Hornet,szerszen,bez,zadla,16523.html (dostęp: 05.05.2024).
[16] https://www.otomoto.pl/oferta/honda-hornet-cb-600-abs-zarezerwowany-ID6A5qPx.html (dostęp: 05.05.2024).
[17] Leiter R., 1998. Hamulce samochodów osobowych i motocykli. WKŁ, Warszawa.
[18] Literatura szkoleniowa HONDA RACING CORPORATION.
[19] Literatura szkoleniowa RENAULT.
[20] Radzimierski M., Wieczorek M., 2010. Konstrukcja pojazdów samochodowych. WSiP, Warszawa.

ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO NA TERENIE UNII EUROPEJSKIEJ

Marcin Łukasiewicz[1*], Valeriy Martynyuk[2], Serhii Matiukh[2]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Khmelnytsky National University, 11 Instytutska Street, Khmelnitsky, 29016, Ukraine

Streszczenie. Transport samochodowy zarówno ciężarowy, jak i osobowy, realizowany na terenie krajów Unii Europejskiej, należy do najpopularniejszej formy transportu. Zmieniające się wytyczne dotyczące bezpieczeństwa konstrukcji pojazdów, przepisów drogowych oraz wprowadzania innowacyjnych systemów elektronicznych powodują zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Niestety nawet najlepsze przepisy prawne, najlepsze rozwiązania konstrukcji pojazdów nie wyeliminują błędów ludzkich. Człowiek i jego zachowanie na drodze to przyczyny licznych wypadków i zdarzeń drogowych, które pociągają za sobą rosnące koszty społeczne oraz ekonomiczne. W pracy przedstawiono wybrane analizy dotyczące bezpieczeństwa ruchu pojazdów na drogach Unii Europejskiej na podstawie danych statystycznych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo transportu, transport samochodowy, zdarzenia drogowe

1. WSTĘP

Wśród wszystkich gałęzi transportu w Polsce transport samochodowy jest najczęściej wybierany przez ludzi ze względu na fakt wysokiej dostępności sieci drogowej, charakteryzującej się wysoką gęstością i spójnością. Zamiłowanie Polaków do posiadania własnego pojazdu przejawia się faktem, iż obecnie szacunkowo na jeden tysiąc mieszkańców Polski przypada około siedemset zarejestrowanych pojazdów. Taka liczba pojazdów na drogach wymusza na administracji państwowej usilny rozwój sieci drogowej, aby móc pomieścić zwiększający się ruch pojazdów i zapewnić odpowiednie przepustowości dróg. Szczególnie po dołączeniu Polski do Unii Europejskiej zaobserwowano szereg inwestycji drogowych, które odmieniły mapy drogowe kraju. Jednakże duża liczba pojazdów wiąże się ze zwiększoną częstością występowania różnych zdarzeń drogowych, które w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do ofiar śmiertelnych.

Zachowanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa na drogach jest priorytetem Unii Europejskiej, która poprzez zmiany w prawodawstwie wymusza wprowadzanie stosownych reform przepisów dotyczących podniesienia poziomu bezpieczeństwa na drogach. Przepisy te odnoszą się zarówno do zmian wytycznych dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji pojazdów samochodowych, stosowanych materiałów konstrukcyjnych, jak i instalowania szeregu systemów

[*] adres korespondencyjny: marcin.lukasiewicz@pbs.edu.pl

elektronicznych w pojazdach podnoszących poziom ich bezpieczeństwa. Kolejna grupa przepisów dotyczących modernizacji dróg i ich wpływu na środowisko naturalne przyczyniła się do powstania w Polsce wielu kilometrów autostrad i dróg ekspresowych. Na tych drogach ruch odbywa się w sposób szybki oraz zapewniający wysoki poziom ochrony uczestników ruchu drogowego przed możliwością zaistnienia tragicznych zdarzeń drogowych.

2. PODSTAWY TEORII BEZPIECZEŃSTWA

Teoria bezpieczeństwa jest dziedziną nauki zajmującą się teorią badań zależności występujących na styku eksploatacji obiektów technicznych, zagrażających zdrowiu i życiu człowieka współpracujących w określonym środowisku naturalnym. Teoria bezpieczeństwa umożliwia przeprowadzenie analizy systemów technicznych z punktu widzenia szeroko pojętego bezpieczeństwa systemu jako całości [4, 10]. Bezpieczeństwo wywodzi się z teorii niezawodności, na podstawie której definiowane są podstawowe pojęcia związane z tym obszarem wiedzy.

Wg Żółtowskiego [13] bezpieczeństwo definiowane może być jako „zdolność wytworu techniki w założonych warunkach eksploatacji do pozostawania w stanie ryzyka nie większego od wartości kryterialnej".

Najprostszą zależność badania bezpieczeństwa w transporcie samochodowym można rozpatrywać w systemie wzajemnych relacji pomiędzy trzema podstawowymi elementami systemu rozpatrywanymi jako człowiek – pojazd – środowisko. Schemat systemu przedstawiono na rysunku 1.

Rys. 1. Układ wzajemnych relacji pomiędzy elementami systemu [13]

Badania nad tym rodzajem systemu sprowadzają się do wyznaczania negatywnych skutków istnienia pojazdu z bezpośrednim wpływem na otaczające go środowisko oraz życie człowieka [13].

W omawianym systemie pod pojęciem zagrożenia definiować należy wszystkie negatywne źródła, przyczyny i skutki powodujące możliwość pojawienia się strat. Zagrożenie może być funkcją warunków eksploatacji, wpływu warunków naturalnych, stanu psychofizycznego człowieka oraz innych czynników powodujących wzrost zagrożenia systemu.

Pod pojęciem ryzyka należy rozumieć możliwość pojawienia się negatywnych zjawisk i strat w systemie relacji człowiek – pojazd – środowisko. W teorii badania ryzyka najczęściej prowadzi się badania strat, mające określić wielkość straty i prawdopodobieństwo jej wystąpienia [13].

Z analizy tak przedstawionego systemu można wymienić podstawowe przesłanki w postaci [13]:

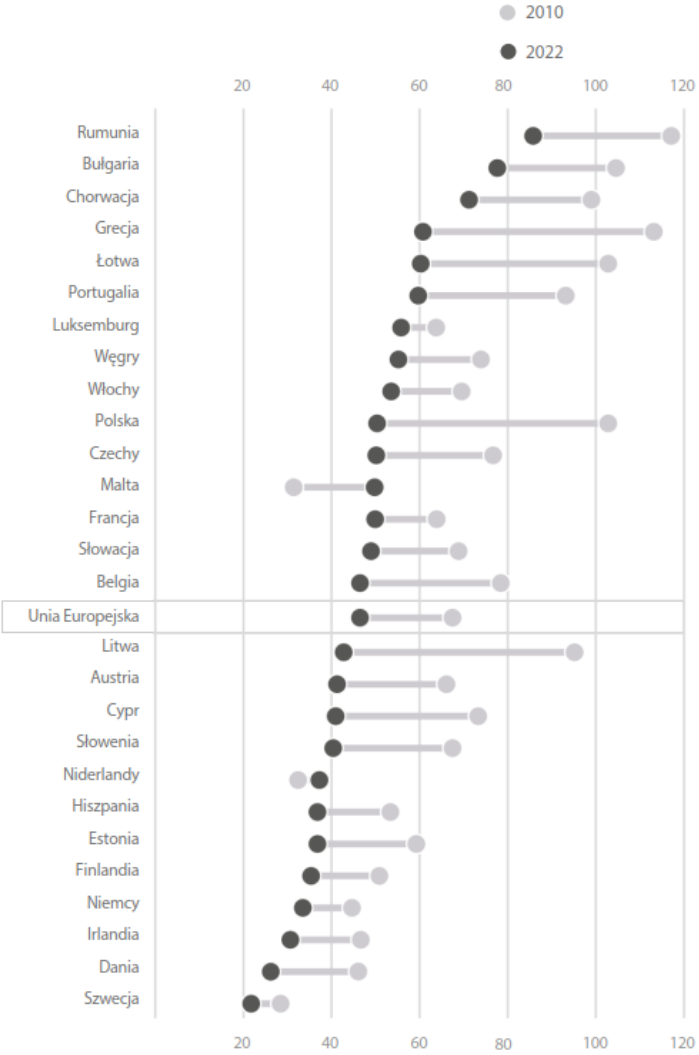
- straty mogą pojawiać się na każdym etapie istnienia pojazdu – nie da się ich uniknąć, a w procesie eksploatacji pojazdu dąży się do minimalizacji ich wielkości i czasu ich występowania;
- bezpieczeństwo pojazdu należy kształtować już na etapie jego projektowania i wytwarzania, a sterować bezpieczeństwem należy w procesie jego eksploatacji;
- bezpieczeństwem przedstawionego systemu w określonych warunkach ryzyka można zarządzać;
- kwantyfikacja bezpieczeństwa systemu możliwa jest poprzez wprowadzenie pojęcia zagrożenia i ryzyka dla wzajemnych relacji w systemie;
- optymalizacja bezpieczeństwa pojazdu możliwa jest do przeprowadzenia z wykorzystaniem procesu optymalizacji efektywności systemu.

Na podstawie tak przeprowadzonych rozważań oraz współoddziaływań w systemie człowiek – pojazd – środowisko nie da się całkowicie wyeliminować niebezpiecznych zdarzeń na styku tych trzech elementów. Nowoczesna technika w postaci zaawansowanych systemów projektowania nowych bezpiecznych konstrukcji pojazdów, stosowania innowacyjnych materiałów konstrukcyjnych, systemów elektronicznych i zabezpieczeń zaimplementowanych jako bezpieczeństwo czynne i bierne pojazdów prowadzi jedynie do zniwelowania negatywnych skutków istnienia pojazdu do racjonalnego i akceptowalnego przez człowieka minimum.

Zagrożeniem dla bezpieczeństwa mogą zatem być różne zjawiska i czynniki wpływające na poprawność działania systemu. Do najczęściej wymienianych czynników zalicza się błędy działania popełniane przez człowieka, niesprawności elementów technicznych obiektów mechanicznych oraz negatywne oddziaływanie środowiska naturalnego i otoczenia na poprawność działania zarówno pojazdu, jak i człowieka.

3. BEZPIECZEŃSTWO RUCHU DROGOWEGO W UNII EUROPEJSKIEJ

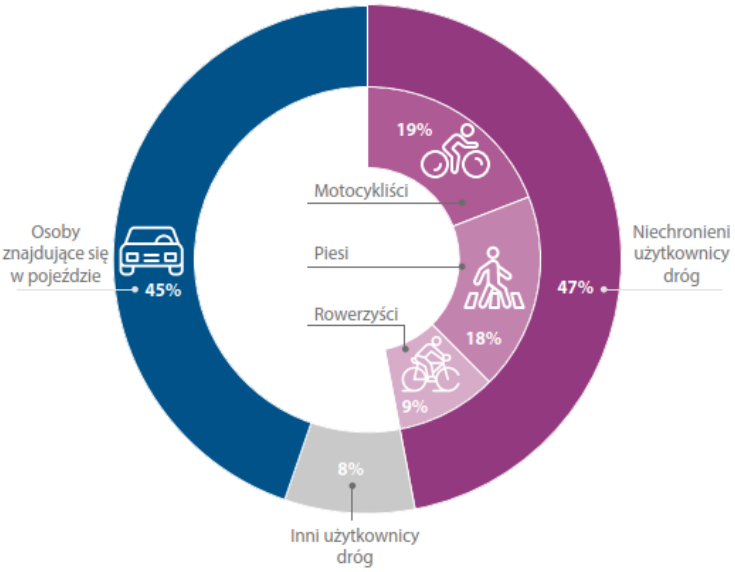
W 2018 r. Unia Europejska wyznaczyła po debacie dotyczącej bezpieczeństwa na drogach cel ograniczenia liczby ofiar śmiertelnych wypadków drogowych o 50% do roku 2030. Jest to istotne, gdyż wypadki drogowe są częstą przyczyną przedwczesnych zgonów w UE: w 2022 r. według Europejskiego Trybunału Obrachunkowego na drogach zginęło 20 640 osób [3, 7]. Zmiany liczby ofiar śmiertelnych w latach 2010–2022 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Liczba ofiar śmiertelnych na milion mieszkańców w państwach członkowskich wg Europejskiego Trybunału Obrachunkowego [3]

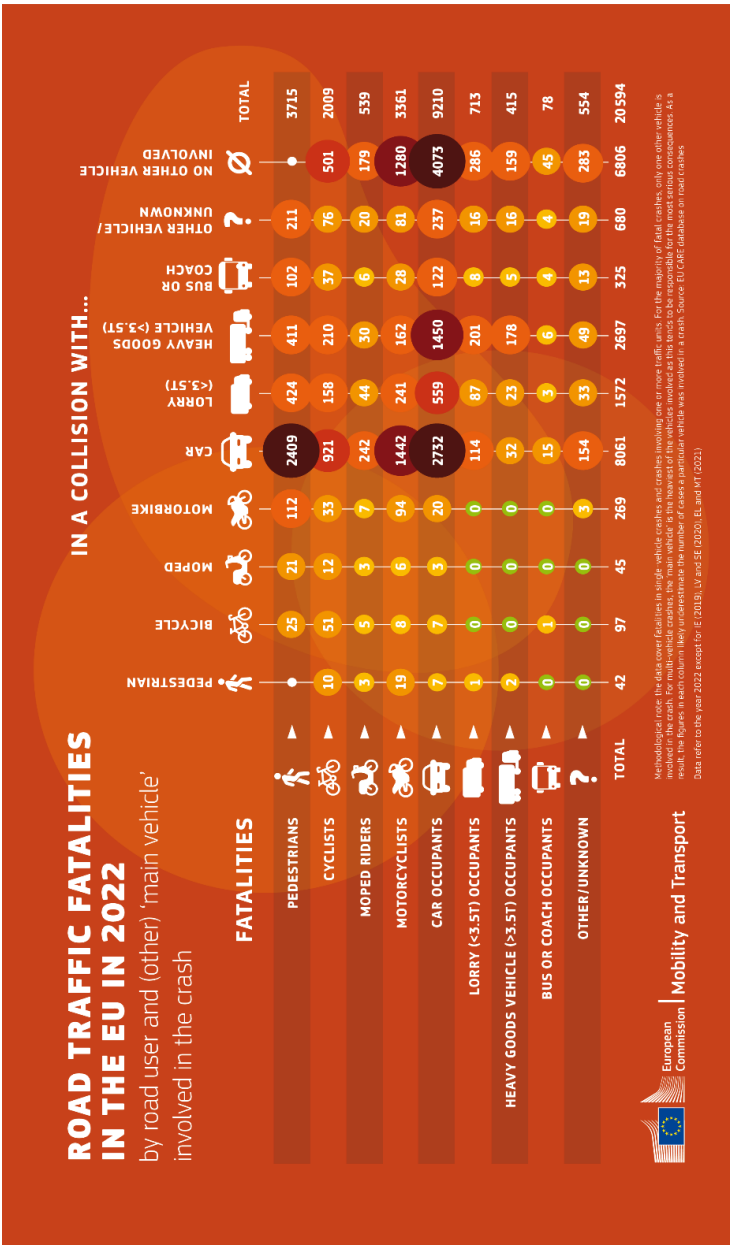
Według obliczeń szacunkowych przyjmuje się, że na każdą ofiarę śmiertelną na drogach Unii Europejskiej przypada pięć osób, które w wypadkach doznają poważnych urazów [7]. Analizując dostępne dane dostarczane przez organy Unii Europejskiej, można stwierdzić, że od 2019 r. liczba ofiar śmiertelnych na drogach spadła w Hiszpanii, Francji i we Włoszech, natomiast wzrosła w Irlandii, na Łotwie, w Niderlandach oraz na Słowacji i w Szwecji. Z szacunków dostępnych w statystykach w okresie ostatnich czterech lat w krajach, takich jak Belgia, Czechy, Dania, Węgry i Polska, widoczne są przesłanki mówiące o tym, iż przy zachowaniu obecnego trendu zmian cel redukcji liczby wypadków śmiertelnych o 50% jest możliwy do osiągnięcia do 2030 r. – jak zapisano to w założeniach programu strategicznego działania Komisji Europejskiej na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego na lata 2021–2030 [7].

Niechronieni uczestnicy ruchu drogowego są najbardziej zagrożeni możliwością zaistnienia zdarzenia drogowego, w wyniku którego skutkiem będzie śmierć. Na podstawie danych Trybunału Obrachunkowego UE grupą wysokiego ryzyka są osoby młode w wieku od 18. do 24. roku życia [5], wśród których notowany jest najwyższy wskaźnik śmiertelności w wyniku zdarzeń drogowych. Kolejną grupą ponoszącą śmierć na drogach są osoby w wieku 65+ [6]. O ile osoby młode giną głównie w wypadkach samochodowych jako pasażerowie pojazdów (co stanowi około 65% globalnej liczby zgonów), to wśród osób starszych głównymi ofiarami zdarzeń drogowych są rowerzyści i piesi uczestnicy ruchu. Odsetek osób w różnych grupach niechronionych uczestników ruchu drogowego na podstawie [3] przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Odsetek ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w UE w różnych grupach użytkowników dróg (2021) wg Europejskiego Trybunału Obrachunkowego [3]

Na rysunku 4 przedstawiono najnowsze dane Komisji Europejskiej wskazujące liczbę poszczególnych typów pojazdów biorących udział w zdarzeniach drogowych. Według danych statystycznych 77% ofiar uczestników zdarzeń w ruchu drogowym stanowią mężczyźni.



Rys. 4. Matryca kolizji – główne pojazdy uczestniczące w śmiertelnych wypadkach drogowych wg Europejskiego Trybunału Obrachunkowego [9]

Użytkownicy pojazdów samochodowych według danych Trybunału Obrachunkowego (kierowcy i pasażerowie) stanowili 45% wszystkich ofiar śmiertelnych, podczas gdy piesi stanowili 18%, użytkownicy dwukołowych pojazdów silnikowych (motocykle i motorowery) 19%, a rowerzyści – 10% [7]. Dane zawarte w matrycy jednoznacznie wskazują, iż pojazdy samochodowe stanowią główną grupę czynników powodujących kolizje zarówno z innymi pojazdami, jak i pieszymi uczestnikami ruchu drogowego. Ochrona pieszych staje się zatem priorytetem działań, dzięki którym istnieje realna możliwość zmniejszenia liczby ofiar na drogach. Wytyczne Komisji Europejskiej dotyczące zmian przepisów zwiększających bezpieczeństwo na drogach ukierunkowane są na następujące aspekty [9]:

- zwiększenie okresu próbnego do dwóch lat po otrzymaniu prawa jazdy przez początkującego kierowcę, aby w tym okresie utrwalać bezpieczne nawyki i zachowania za kierownicą. Jest to istotne, ponieważ nawet jeśli młodzi kierowcy stanowią jedynie 8% wszystkich kierowców samochodów, w 2 na 5 śmiertelnych kolizji uczestniczy kierowca lub pasażer w wieku poniżej 30 lat;
- umożliwienie młodym ludziom przystąpienia do egzaminu i rozpoczęcia prowadzenia samochodów osobowych i ciężarowych pod opieką od 17. roku życia w celu zdobycia doświadczenia w prowadzeniu pojazdu;
- dostosowanie szkoleń i testów kierowców, aby lepiej przygotować ich na obecność niechronionych użytkowników na drodze. Pomoże to poprawić bezpieczeństwo pieszych, rowerzystów, a także użytkowników hulajnóg i rowerów elektrycznych w miarę przechodzenia UE na bardziej zrównoważoną mobilność miejską;
- precyzyjnie ukierunkowana ocena stanu zdrowia, biorąca pod uwagę postęp w leczeniu chorób, takich jak cukrzyca. Kierowcy będą również zachęcani do aktualizowania swoich umiejętności i wiedzy w zakresie prowadzenia pojazdów, aby nadążać za rozwojem technologicznym.

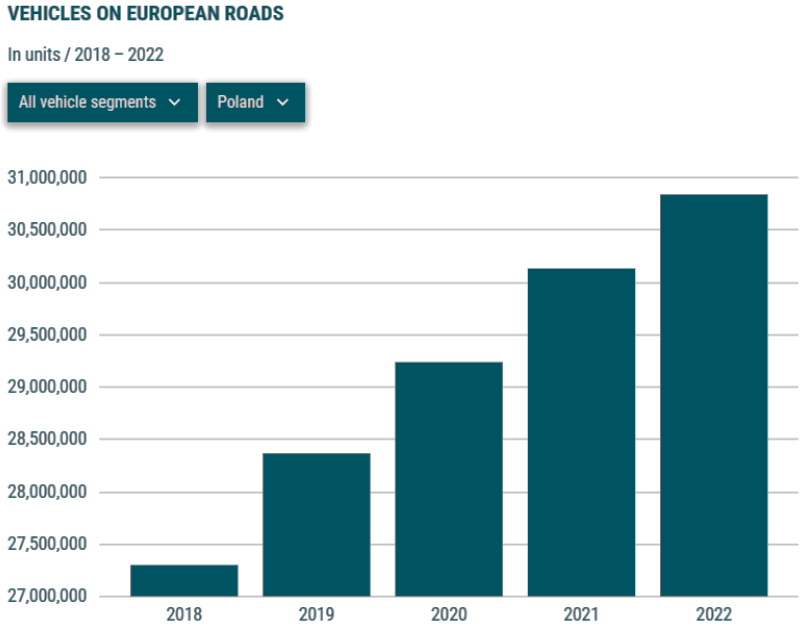
Komisja proponuje rozszerzenie zakresu wykroczeń drogowych o:

- niezachowanie wystarczającej odległości od pojazdu poprzedzającego;
- niebezpieczne wyprzedzanie;
- niebezpieczne parkowanie;
- przekroczenie jednej lub więcej białych linii ciągłych;
- jazda drogą pod prąd;
- nieprzestrzeganie zasad korzystania z korytarzy ratunkowych;
- korzystanie z przeciążonego pojazdu.

Obecne przepisy UE dotyczące transgranicznego egzekwowania przepisów pomogły zapewnić, że przestępcy drogowi niebędący rezydentami nie pozostaną anonimowi. Niemniej jednak w 2019 r. około 40% przestępstw transgranicznych popełniono bezkarnie albo z powodu niezidentyfikowania sprawcy, albo z powodu płatności, która nie została wyegzekwowana [9].

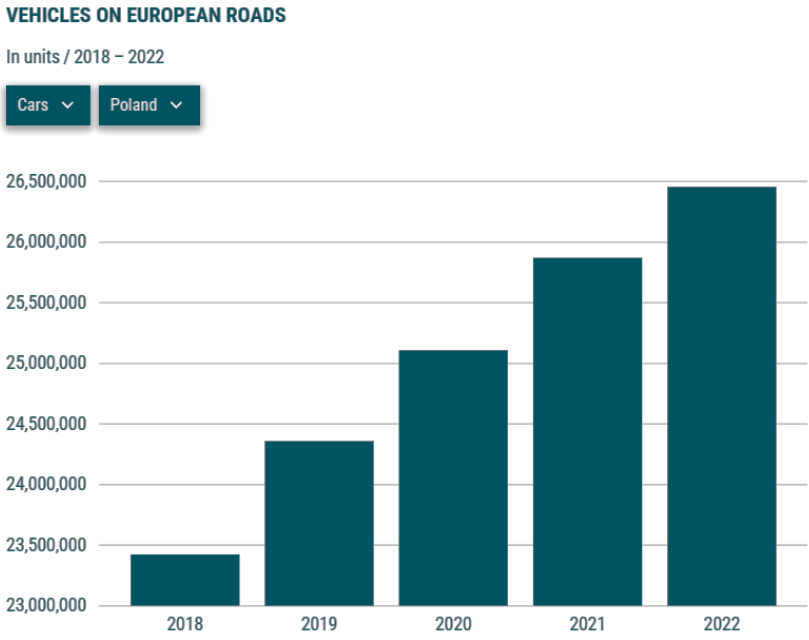
4. BEZPIECZEŃSTWO RUCHU DROGOWEGO W POLSCE

Polska jako członek Unii Europejskiej jest krajem, w którym zamiłowanie do motoryzacji jest bardzo silne, stąd w przeliczeniu na 1000 mieszkańców liczba pojazdów jest jedną z najwyższych w krajach Unii Europejskiej. Liczba samochodów niestety nie przekłada się na „wiek" pojazdów, gdyż według statystyk około 80% wszystkich zarejestrowanych samochodów w Polsce ma powyżej 10 lat, a średni „wiek" statystycznego samochodu to 15 lat [1]. Jak podaje szczegółowo Raport ACEA na rok 2022, w Polsce całkowita liczba wszystkich zarejestrowanych pojazdów wynosiła 30 837 562, co przedstawiono na rysunku 5 [2].



Rys. 5. Zmiana liczby wszystkich zarejestrowanych pojazdów w Polsce w latach 2018–2022 wg ACEA [2]

Na podstawie rysunku 5 można wnioskować, iż liczba pojazdów wzrasta nieustannie w ostatnich latach. Jeszcze ciekawiej wygląda sytuacja w przypadku samych pojazdów osobowych zarejestrowanych w Polsce i użytkowanych przez obywateli. Z raportu wynika, iż pod koniec 2022 roku w Polsce było zarejestrowanych 26 457 659 samochodów. To czwarty najwyższy wynik w Unii Europejskiej zaraz po takich krajach, jak Niemcy, Włochy i Francja. W Polsce na 1000 mieszkańców przypadają 703 samochody, co jest najwyższym wynikiem w krajach Unii Europejskiej. Tendencje zmian liczby samochodów osobowych w Polsce przedstawiono na rysunku 6 [2].



Rys. 6. Zmiana liczby pojazdów osobowych zarejestrowanych w Polsce w latach 2018–2022 wg ACEA [2]

Z przedstawionych danych statystycznych wynika, że infrastruktura drogowa w Polsce musi się rozwijać i zmieniać, gdyż tak wielka liczba uczestników ruchu drogowego będzie generować różnego typu zdarzenia drogowe, począwszy od kolizji, na ciężkich wypadkach drogowych wraz z ofiarami śmiertelnymi kończąc. Jak podają Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego w raporcie „Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz działania realizowane w tym zakresie w 2022 r." [8] oraz Polskie Obserwatorium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego [11] – organizacja działająca w ramach Instytutu Transportu Samochodowego, liczba ofiar śmiertelnych w Polsce w wyniku zdarzeń drogowych sukcesywnie maleje.

W 2023 roku na polskich drogach doszło do 20 936 wypadków drogowych, w których śmierć poniosły 1 893 osoby, a 24 125 zostało rannych, w tym 7 545 odniosło poważne obrażenia. Szczegółowe zmiany trendu wypadków i zdarzeń drogowych na podstawie danych z Polskiej Policji oraz danych opracowanych przez Instytut Transportu Samochodowego przedstawiono w tabeli 1 [11]. Bardzo często w medialnej przestrzeni występują informacje, że sprawca wypadku drogowego nie dostosował prędkości do panujących warunków i spowodował kolizję. Ogólne przeświadczenie w tym temacie wskazuje na fakt, iż polscy kierowcy zbytnio przekraczają prędkość i stanowi to poważne zagrożenie. Dane statystyczne Instytutu Transportu Samochodowego przedstawiono w tabeli 2 [11].

Tab. 1. Wskaźniki zagrożenia w Polsce w latach 2011–2023 [11]

Rok	Wypadki	Ofiary śmiertelne	Ranni	W tym: ciężko ranni	Ofiary śmiertelne na 1 mln mieszkańców	Ciężko ranni na 1 mln mieszkańców	Samochody osobowe na 1 tys. mieszkańców
2011	40 069	4 189	49 506	12 585	109	327	470
2012	37 043	3 570	45 790	12 047	93	313	487
2013	35 845	3 357	44 056	11 669	87	303	504
2014	34 970	3 202	42 545	11 696	83	304	520
2015	32 967	2 938	39 778	11 200	76	291	539
2016	33 664	3 026	40 766	12 078	79	314	564
2017	32 760	2 831	39 466	11 103	74	289	575
2018	31 674	2 862	37 359	10 963	75	285	610
2019	30 288	2 909	35 477	10 633	76	277	635
2020	23 540	2 491	26 463	8 805	65	230	656
2021	22 816	2 245	26 415	8 276	59	218	682
2022	21 322	1 896	24 743	7 541	50	200	701
2023	20 936	1 893	24 124	7 594	50	201	721

Tab. 2. Wskaźniki zagrożenia: prędkość niedostosowana do warunków ruchu Polsce w latach 2017–2020 [11]

Rok	Wypadki		Ofiary śmiertelne		Ciężko ranni	
	liczba	% ogółu	liczba	% ogółu	liczba	% ogółu
Obszar: ZABUDOWANY, Prędkość niedostosowana do warunków ruchu						
2017	3569	10,9%	266	9,4%	1251	11,3%
2018	3247	10,3%	279	9,7%	1123	10,3%
2019	3265	10,8%	258	8,9%	1153	10,8%
2020	2777	11,8%	296	11,9%	1080	12,3%
Obszar: NIEZABUDOWANY, Prędkość niedostosowana do warunków ruchu						
2017	3326	10,2%	536	18,9%	1367	12,3%
2018	3031	9,6%	491	17,2%	1269	11,6%
2019	3046	10,1%	529	18,2%	1273	12,0%
2020	2783	11,8%	571	22,9%	1260	14,3%

Do kolejnych istotnych przyczyn wypadków w Polsce zalicza się jazdę pod wpływem alkoholu. Dane statystyczne Instytutu Transportu Samochodowego przedstawiono w tabeli 3 [11].

Tab. 3. Alkohol jako przyczyna wypadku w latach 2018–2023 [11]

Rok	Wypadki		Ofiary śmiertelne		Ciężko ranni	
	liczba	%	liczba	%	liczba	%
alkohol u uczestników (kierujący, piesi, pasażerowie) ogółem*						
2018	2747	9%	337	12%	1154	11%
2019	2717	9%	326	11%	1158	11%
2020	2540	11%	327	13%	1169	12%
2021	2488	11%	331	15%	1063	13%
2022	2248	11%	268	14%	909	12%
2023	2074	10%	290	15%	815	11%
2023/2022	-8%		+8%		-9%	
alkohol u kierujących						
2018	1864	6%	227	8%	786	7%
2019	1914	6%	225	8%	818	8%
2020	1852	8%	243	10%	797	9%
2021	1805	8%	242	11%	801	10%
2022	1580	7%	188	10%	662	9%
2023	1465	7%	226	12%	581	8%
2023/2022	-7%		+17%		-12%	

Przedstawione tabelarycznie dane zdecydowanie wskazują, że liczba wypadków drogowych sukcesywnie z biegiem lat maleje. Kolejne mity, które są obalane przez dane statystyczne, to przeświadczenia, iż większość wypadków spowodowana była nadmierną prędkością kierującego (około 12% ogółu wypadków) lub spożyciem alkoholu przez kierowcę (około 10% ogółu wypadków). Te dwa typy wypadków bywają jednak najbardziej tragiczne w swoich skutkach. Gdzie jest zatem główne źródło powstawania zdarzeń drogowych? Według statystyk Polskiej Policji aż 97,6% wypadków jest spowodowanych przez człowieka. Nadmierna brawura za kierownicą, nieznajomość przepisów oraz nieustępowanie pierwszeństwa przejazdu są głównymi czynnikami większości kolizji samochodowych w Polsce.

5. WNIOSKI

Zmieniające się wytyczne dotyczące bezpieczeństwa konstrukcji pojazdów, przepisów drogowych oraz wprowadzania innowacyjnych systemów elektronicznych powodują zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Niestety nawet najlepsze przepisy prawne, innowacyjne rozwiązania konstrukcji pojazdów czy nowoczesny układ drogowy nie wyeliminują błędów ludzkich.

Na podstawie przedstawionych danych statystycznych różnych instytucji zajmujących się analizą bezpieczeństwa ruchu drogowego można stwierdzić, że problem zapewnienia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa w ruchu drogowym jest przedsięwzięciem trudnym i skomplikowanym. Wpływ na to ma wiele czynników, takich jak: człowiek i jego stan psychofizyczny, typ i konstrukcja pojazdu, rodzaj nawierzchni i typ drogi, prędkość maksymalna pojazdu, kierowanie pod wpływem alkoholu lub środków odurzających, brawura za kierownicą, nieudzielanie pierwszeństwa przejazdu i brak znajomości przepisów. To główne przyczyny powstawania zdarzeń drogowych w krajach Unii Europejskiej. Kolejne zmiany przyczyniają się sukcesywnie do zmniejszania liczby ofiar. Przykładem takich zmian idących w stronę przekształcenia mentalności kierowców i ich zachowania na drodze są przepisy dotyczące ochrony pieszych w Polsce. Po wprowadzeniu bezwzględnego pierwszeństwa pieszego na przejściach pomimo wzrostu zdarzeń z udziałem pieszych na drodze sumaryczna liczba osób zabitych znacząco zmalała (około 10% wg ITS [11]). Aby osiągnąć założenia Unii, czyli do 2030 roku zmniejszyć liczbę tragicznych zdarzeń o 50%, nadal potrzebne są determinacja i wola polityczna we wprowadzaniu stosownych przepisów zarówno międzynarodowych, jak i krajowych, rozwój najnowszych technologii z zakresu bezpieczeństwa w ruchu drogowym oraz edukacja i szkolenia dla kierowców poruszających się po drogach Unii Europejskiej i Polski.

LITERATURA

[1] ACEA report, 2024. Vehicles on European roads. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf

[2] ACEA strona internetowa. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads/

[3] Europejski Trybunał Obrachunkowy, 2024. Bezpieczny ruch drogowy w UE – aby osiągnąć cel, Unia musi przyspieszyć. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://www.eca.europa.eu/pl/publications/sr-2024-04

[4] Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., 1993. Bezpieczeństwo systemów. WNT, Warszawa.

[5] Komisja Europejska, 2021. Osoby młode. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/202201/-F%26F_young_people_20211221.pdf

[6] Komisja Europejska, 2023. Seniorzy. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://road-safety.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-02/ff_seniors_20230213.pdf

[7] Komisja Europejska, 2024. Śmiertelne wypadki na unijnych drogach. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://poland.representation.ec.europa.eu/news/-smiertelne-wypadki-na-unijnych-drogach-2024-03-08_pl

[8] Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, 2024. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://www.krbrd.gov.pl/wp-content/uploads/2023/05/Stan-bezpieczenstwa-ruchu-drogowego-oraz-dzialania-realizowane-w-tym-zakresie-w-2022-r.pdf
[9] Macierz kolizji drogowych, 2024. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://road-safety.transport.ec.europa.eu/sites/default/files/2024-03/collision_matrix_2024_update.png
[10] Mazur T., Małek A., 1993. Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych. WNT, Warszawa.
[11] Polskie Obserwatorium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, Instytut Transportu Samochodowego, 2024. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://obserwatoriumbrd.pl/
[12] Zasady ruchu drogowego, 2024. Dokument internetowy (czerwiec 2024): https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-proposes-updated-requirements-driving-licences-and-better-cross-border-2023-03-01_en
[13] Żółtowski B., 1996. Podstawy diagnostyki maszyn. ATR, Bydgoszcz.

ANALIZA I BADANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW OLEJU SILNIKOWEGO EKSPLOATOWANEGO W TURBODOŁADOWANYCH JEDNOSTKACH NAPĘDOWYCH (ZI) O NISKICH POJEMNOŚCIACH

Sebastian Kilimnik[1*], Bogdan Landowski[1], Łukasz Muślewski[1], Oleg Polishchuk[2]

[1] Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
[2] Khmelnytsky National University, 11 Instytutska Street, Khmelnitsky, 29016, Ukraine

Streszczenie. Turbodoładowane silniki o niskiej pojemności skokowej, znane jako *downsizing*, łączą małe rozmiary z technologią turbodoładowania, zwiększając moc i efektywność paliwową oraz redukując emisję CO_2. Kompaktowa budowa tych silników sprzyja lepszym właściwościom jezdnym, choć mogą wymagać wyższych kosztów serwisu i specjalistycznych olejów w porównaniu z silnikami tradycyjnymi. Nowoczesne oleje silnikowe, z zaawansowanymi dodatkami zmniejszającymi tarcie i zużycie, są odporne na utlenianie i chemiczne rozkłady, co utrzymuje silnik w czystości i wspiera zaawansowane technologie. Wymiana oleju jest kluczowa dla trwałości silników, a resursy wymian zależą od rodzaju oleju, typu silnika, warunków eksploatacji i specyfikacji producenta. Analiza przeprowadzona na próbkach olejowych z dziewiętnastu pojazdów KIA z silnikiem 1.5 T-GDI miała na celu określenie przebiegu kilometrowego, po którym klienci dokonują wymiany oleju. Porównano gęstość i lepkość kinematyczną olejów przepracowanych z nowym olejem.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, turbodoładowanie, pojemność skokowa, gęstość oleju silnikowego, lepkość oleju silnikowego, przepracowany olej silnikowy

1. WPROWADZENIE

Turbodoładowane silniki o niskiej pojemności skokowej, znane również jako *downsizing*, to nowoczesne jednostki napędowe, które łączą zalety mniejszych silników z technologią turbodoładowania, zwiększając ich moc i efektywność. Silniki te w porównaniu z tradycyjnymi charakteryzują się mniejszą pojemnością skokową, co oznacza, że mają mniejszą objętość cylindrów, w których spalana jest mieszanka paliwowo-powietrzna. Dzięki zastosowaniu turbodoładowania, które wtłacza dodatkowe powietrze do cylindrów, możliwe jest osiągnięcie wyższej mocy bez konieczności zwiększania pojemności silnika.

[*] adres korespondencyjny: sebastian.kilimnik@gmail.com

Jedną z głównych zalet tych silników jest wysoka efektywność paliwowa. Mniejsze silniki zużywają mniej paliwa w porównaniu z większymi jednostkami o podobnej mocy, co przekłada się na niższe koszty eksploatacji i mniejszą emisję CO_2 [2]. Dodatkowo turbodoładowanie pozwala na uzyskanie większej mocy i momentu obrotowego, co poprawia osiągi pojazdu, szczególnie przy niskich obrotach. Kompaktowe rozmiary i mała masa silnika pozwalają na korzystniejsze rozłożenie masy w pojeździe, co może pozytywnie wpłynąć na jego właściwości jezdne. Nowoczesne turbodoładowane silniki często spełniają surowe normy emisji spalin dzięki zastosowaniu zaawansowanych technologii, takich jak bezpośredni wtrysk paliwa i systemy kontroli spalin.

Turbodoładowane silniki o niskiej pojemności znajdują szerokie zastosowanie w motoryzacji osobowej. Wiele nowoczesnych samochodów osobowych zarówno kompaktowych, jak i luksusowych korzysta z takich silników, przykładem mogą być jednostki Ford EcoBoost, VW TSI czy BMW TwinPower Turbo.

Technologia turbodoładowania, w połączeniu z innymi zaawansowanymi rozwiązaniami, takimi jak systemy hybrydowe czy elektryfikacja, odgrywa kluczową rolę w przyszłości motoryzacji. Dążenie do redukcji emisji i poprawy efektywności paliwowej sprawia, że turbodoładowane silniki o niskiej pojemności stają się jednym z głównych kierunków rozwoju w branży motoryzacyjnej. Pomimo wyzwań ich liczne zalety sprawiają, że są coraz bardziej popularnym wyborem w nowoczesnych pojazdach, przyczyniając się do rozwoju ekologicznej i ekonomicznej motoryzacji.

Niemniej jednak turbodoładowane silniki o niskiej pojemności mają także swoje wady. Zaawansowana konstrukcja i dodatkowe komponenty, takie jak turbosprężarka, mogą prowadzić do wyższych kosztów serwisu i napraw. Silniki te często wymagają również specjalistycznych olejów silnikowych, aby zapewnić optymalną pracę i długowieczność.

2. OLEJE SILNIKOWE

Nowoczesne oleje silnikowe odgrywają kluczową rolę w zapewnianiu efektywnej pracy współczesnych silników samochodowych. Dzięki postępowi technologicznemu oleje te są znacznie bardziej zaawansowane niż ich starsze odpowiedniki, oferują szereg korzyści, które przyczyniają się do lepszej ochrony i wydajności silników. Współczesne oleje silnikowe zawierają zaawansowane dodatki przeciwzużyciowe, które tworzą warstwę ochronną na powierzchniach metalowych, zmniejszając tarcie i zapobiegając zużyciu silnika, co pozwala na dłuższą i bardziej niezawodną pracę silników.

Nowoczesne oleje są ponadto formułowane z myślą o odporności na utlenianie i rozkład chemiczny w wysokich temperaturach, dzięki czemu zachowują swoje właściwości ochronne przez długi czas, nawet w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Detergenty i dyspergatory zawarte w tych olejach pomagają

utrzymać wnętrze silnika w czystości, zapobiegając osadzaniu się zanieczyszczeń i tworzeniu się szlamu, co przyczynia się do utrzymania optymalnej wydajności silnika.

Nowoczesne oleje silnikowe zachowują stabilność zarówno w bardzo niskich, jak i bardzo wysokich temperaturach, zapewniając odpowiednie smarowanie podczas zimnego rozruchu oraz skuteczne chłodzenie i smarowanie podczas intensywnej pracy silnika. Wysokiej jakości oleje silnikowe pomagają również w redukcji emisji szkodliwych substancji, wspierając mniejsze wartości spalania paliwa i redukują emisje zanieczyszczeń, co jest kluczowe dla spełnienia coraz bardziej rygorystycznych norm ekologicznych.

Oleje te są także projektowane z myślą o współpracy z zaawansowanymi technologiami, takimi jak bezpośredni wtrysk paliwa, turbodoładowanie i systemy start-stop, zapewniają niezbędną ochronę i wydajność, której wymagają te nowoczesne systemy. Dzięki wysokiej stabilności termicznej i odporności na degradację nowoczesne oleje silnikowe pozwalają na wydłużenie okresów między wymianami oleju, co jest wygodne i ekonomiczne dla użytkowników pojazdów [5].

Nowoczesne oleje silnikowe to zaawansowane technologicznie produkty, które odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu efektywności i trwałości silników spalinowych. Oto kilka istotnych informacji na temat ich składu i właściwości:

a) baza olejowa:
   - mineralne – produkowane z ropy naftowej, mają dobrą smarowność, ale ograniczoną stabilność termiczną;
   - syntetyczne – wytwarzane chemicznie, oferują lepszą stabilność termiczną, ochronę w ekstremalnych warunkach i dłuższą żywotność;
   - półsyntetyczne – mieszanka olejów mineralnych i syntetycznych, oferująca kompromis między kosztami a wydajnością;

b) dodatki:
   - detergenty i dyspergatory – utrzymują wnętrze silnika w czystości, zapobiegając osadzaniu się zanieczyszczeń;
   - przeciwutleniacze – zmniejszają procesy utleniania, co zapobiega degradacji oleju;
   - modyfikatory lepkości – umożliwiają utrzymanie odpowiedniej lepkości oleju w różnych temperaturach;
   - inhibitory korozji – chronią metalowe części silnika przed rdzą i korozją;
   - modyfikatory tarcia – poprawiają efektywność smarowania, zmniejszając tarcie między ruchomymi częściami;

c) klasyfikacja lepkości – określana przez SAE (*Society of Automotive Engineers*) [4]. Przykłady: 0W-20, 5W-30, 10W-40. Pierwsza liczba (z literą W) określa lepkość oleju w niskich temperaturach, a druga liczba w wysokich temperaturach;

d) specyfikacje i normy:
   - API (*American Petroleum Institute*) – oznaczenia takie jak SN, SM, SL dla silników benzynowych i CJ-4, CI-4 dla silników diesla;
   - ACEA (*Association des Constructeurs Européens d'Automobiles*) – normy europejskie, np. A3/B4, C3;
   - OEM (*Original Equipment Manufacturer*) – specyfikacje producentów samochodów, np. VW 504 00/507 00, BMW LL-04;

e) zalety nowoczesnych olejów silnikowych:
   - lepsza ochrona silnika – redukcja zużycia i tarcia, co przedłuża żywotność silnika;
   - poprawa efektywności paliwowej – redukcja oporów wewnętrznych silnika, co prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa;
   - stabilność termiczna – wyższa odporność na ekstremalne temperatury, co zapobiega degradacji oleju w wysokich temperaturach;
   - czystość silnika – skuteczne dodatki detergencyjne i dyspergujące zapobiegają powstawaniu osadów i nagarów;
   - ochrona środowiska – niższa emisja spalin dzięki lepszemu smarowaniu i czystości pracy silnika;

f) nowoczesne technologie:
   - oleje o niskiej lepkości – takie jak 0W-20, są coraz częściej stosowane w nowoczesnych silnikach w celu poprawy efektywności paliwowej;
   - oleje syntetyczne o długim okresie użytkowania – mogą być używane przez dłuższy czas między wymianami, co jest korzystne zarówno dla użytkowników, jak i dla środowiska;
   - oleje z technologią Low SAPS – zmniejszona zawartość popiołu siarczanowego, fosforu i siarki, co jest szczególnie ważne dla pojazdów z filtrami cząstek stałych (DPF) i katalizatorami trójdrożnymi (TWC).

Podsumowując, stwierdza się, że nowoczesne oleje silnikowe są niezbędnym elementem w utrzymaniu efektywnej i trwałej pracy współczesnych silników spalinowych. Dzięki zaawansowanym technologiom oferują one znacznie wyższą ochronę, wydajność i ekologiczną odpowiedzialność w porównaniu ze starszymi środkami smarnymi silników spalinowych.

3. INTERWAŁ WYMIANY OLEJU

Wymiana oleju silnikowego jest kluczowym elementem utrzymania sprawności i trwałości nowoczesnych silników spalinowych. Resursy, czyli okresy między wymianami oleju, zależą od wielu czynników, takich jak typ silnika, rodzaj oleju, warunki eksploatacji oraz specyfikacje producenta pojazdu. Resursy wymian oleju to zalecane przez producenta okresy, po których należy dokonać wymiany oleju silnikowego, mające na celu zapewnienie opty-

malnej ochrony silnika, minimalizację zużycia oraz utrzymanie odpowiednich parametrów pracy [7].

Rodzaj oleju odgrywa kluczową rolę w określaniu resursów wymian. Oleje mineralne zazwyczaj wymagają częstszych wymian, co 5 000–7 500 km. Oleje syntetyczne oferują dłuższe okresy między wymianami, zwykle od 10 000 do 15 000 km, a czasem nawet do 20 000 km lub więcej. Oleje półsyntetyczne stanowią kompromis między olejami mineralnymi a syntetycznymi, z resursami wymian w granicach 7 500–10 000 km [3].

Typ silnika i specyfikacje producenta również wpływają na resursy wymian oleju. Nowoczesne silniki są często zaprojektowane z myślą o dłuższych okresach między wymianami oleju, co jest uwzględniane w zaleceniach producentów. Specyfikacje OEM (*Original Equipment Manufacturer*) mogą różnić się między producentami, dlatego warto zawsze zweryfikować dane z instrukcją obsługi pojazdu.

Warunki eksploatacji to kolejny ważny czynnik. Intensywne użytkowanie, takie jak jazda w trudnych warunkach (krótkie trasy, jazda miejska z częstym zatrzymywaniem się, wysokie obciążenia, jazda w ekstremalnych temperaturach), może wymagać częstszych wymian oleju. Z kolei łagodne warunki, takie jak jazda na długich dystansach przy stałych prędkościach i umiarkowanych temperaturach, pozwalają na wydłużenie okresu między wymianami oleju [1, 6].

Współczesne pojazdy często wyposażone są w systemy monitorowania stanu oleju, które dostarczają kierowcy informacji o konieczności wymiany oleju. Systemy te bazują na różnych parametrach, takich jak przebieg, czas eksploatacji, warunki jazdy i jakość oleju. W przypadku oleju KIA 0W20, stosowanego w silnikach 1.5 T-GDI (*Turbo Gasoline Direct Injection*), producent zaleca wymianę oleju co roku lub co 15 000 km w zależności od tego, co nastąpi szybciej.

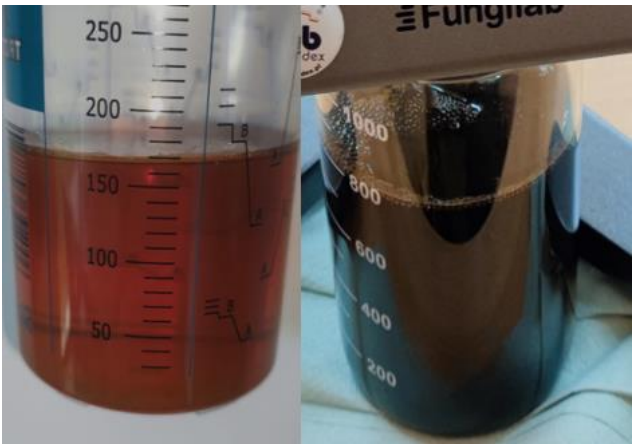
4. BADANIA OLEJU SILNIKOWEGO KIA 0W20

4.1. Pobieranie materiału do badań

W celu ustalenia wstępnych resursów wykonywania wymian oleju silnikowego przez klientów marki KIA dokonano analizy próbek olejowych z dziewiętnastu kolejnych pojazdów z silnikiem 1.5 T-GDI. Takie działanie miało na celu określenie przebiegu kilometrowego, po jakim użytkownicy trafiają do serwisu na wymianę oleju silnikowego. Oleje pobrane do badań użytkowane były w pojazdach przez 12 miesięcy. Próbki pobierano w sposób zgodny z zaleceniami normy PN-EN-ISO 3170:2006, do jednorazowych pojemników, sztywnych oraz szczelnie zamykanych. Na rysunku 1 przedstawiono proces pobierania próbki.

Rys. 1. Przykład pobrania próbki olejowej (opracowanie własne)

Nastąpiły: pełna identyfikacja próbek oraz ich opis. Uzyskano również próbkę oleju nowego w celu porównania olejów przepracowanych ze wzorcem. Następnie dokonano badania gęstości olejów oraz lepkości kinematycznej. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie barwy oleju nowego z olejem przepracowanym.



Rys. 2. Porównanie barwy oleju nowego po stronie lewej z olejem przepracowanym po stronie prawej (opracowanie własne)

4.2. Badania gęstości oleju silnikowego

W badaniu gęstości płynów określono cel: ustalenie gęstości płynu poprzez pomiar jego masy i objętości. Do realizacji zadania wykorzystano następujące narzędzia i materiały: cylindry miarowe, wagę laboratoryjną oraz termometr do kontrolowania temperatury, ponieważ gęstość płynów zależy od temperatury. Najpierw przygotowano narzędzia pomiarowe, upewniając się, że były czyste i suche. Następnie zmierzono masę pustego naczynia, które miało służyć do pomiaru objętości płynu. Masa pustego naczynia została zapisana jako m_1. Kolejnym krokiem był pomiar objętości płynu poprzez wlanie odmierzonej objętości do cylindra miarowego, a następnie odczytanie objętości z podziałki (V). Po zmierzeniu objętości zważono naczynie z płynem i zanotowano jego masę jako m_2. Następnie obliczono masę płynu, odejmując masę pustego naczynia (m_1) od masy naczynia z płynem (m_2), co dało masę płynu ($m_{płynu}$). Kolejnym etapem było obliczenie gęstości płynu poprzez podzielenie masy płynu przez jego objętość według zależności:

$$\rho = \frac{m_{płynu}}{V} \tag{1}$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu,
$m_{płynu}$ – masa płynu,
V – objętość płynu.

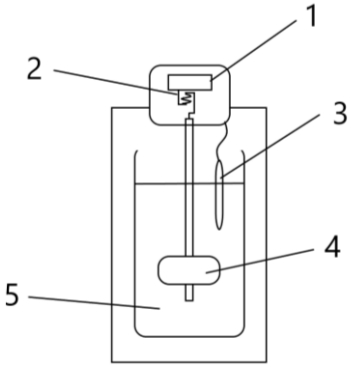
Podczas pomiaru kontrolowano temperaturę płynu za pomocą termometru i zanotowano ją, ponieważ gęstość płynów zmienia się wraz z temperaturą. W razie potrzeby dokonano przeliczenia wyników na przyjętą temperaturę bazową 20°C. W trakcie całego procesu dbano o dokładność pomiarów, używając precyzyjnych narzędzi i minimalizując potencjalne błędy.

4.3. Badania lepkości oleju silnikowego

W badaniu lepkości za pomocą wiskozymetru rotacyjnego określono cel jako ustalenie lepkości płynu. Do realizacji zadania użyto wiskozymetru rotacyjnego, cylindrycznego wrzeciona, próbki płynu, naczynia i podgrzewacza indukcyjnego oraz termometru. Poniżej przedstawiono budowę wiskozymetru rotacyjnego (rys. 3).

W pierwszej kolejności przygotowano próbki olejowe, upewniając się, że były one dobrze wymieszane, a ich temperatura ustabilizowana, ponieważ lepkość zmienia się wraz z temperaturą. Przed przystąpieniem do pomiaru skalibrowano wiskozymetr rotacyjny zgodnie z instrukcją producenta, aby zapewnić dokładność wyników. Pomiary wykonano w trzech temperaturach 20°C, 40°C oraz 100°C.

Następnie wlano próbkę płynu do naczynia pomiarowego. Zamocowano odpowiednie wrzeciono do urządzenia, wybierając je w zależności od lepkości płynu. Dla olejów, które charakteryzują się niską lepkością, użyto wrzeciona o większej powierzchni.



Rys. 3. Schemat budowy wiskozymetru rotacyjnego: 1 – silnik, 2 – kalibrowana sprężyna, 3 – czujnik temperatury, 4 – wrzeciono, 5 – zlewka z badaną cieczą (opracowanie własne)

Po przygotowaniu oprzyrządowania rozpoczęto pomiar. Wiskozymetr rotacyjny obracał wrzeciono w próbce płynu, mierząc moment obrotowy potrzebny do utrzymania stałej prędkości obrotowej. Moment obrotowy był bezpośrednio związany z lepkością płynu. Wartości lepkości odczytano bezpośrednio z wyświetlacza wiskozymetru, który automatycznie przeliczał moment obrotowy na jednostki lepkości, takie jak cSt (Centystokes), czego odpowiednikiem jest $mm^2 \cdot s^{-1}$ (milimetr kwadratowy na sekundę).

Podczas całego procesu pomiarowego monitorowano i kontrolowano temperaturę płynu, ponieważ zmiany temperatury mogły wpływać na dokładność wyników. W przypadku konieczności dokonano podgrzania lub schłodzenia oleju. Wyniki pomiarów lepkości wraz z temperaturą próbki zanotowano. Pomiar lepkości powtarzano dla różnych prędkości obrotowych wrzeciona, aby dostosować prędkość obrotową wrzeciona do zaleceń producenta. W rezultacie dzięki pomiarowi lepkości za pomocą wiskozymetru rotacyjnego określono właściwości reologiczne płynów. Wyniki te pozwoliły na ocenę własności oleju nowego oraz oleju przepracowanego w różnych temperaturach.

5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW

Poniżej w tabelach przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów według interwału wymiany oleju. Tabela 1 zawiera wyniki pomiaru gęstości oleju KIA 0W20, w tabeli 2 przedstawiono wyniki lepkości w temperaturze 20°C, w tabeli 3 – wyniki pomiaru lepkości w temperaturze 40°C, natomiast w tabeli 4 – wyniki pomiaru lepkości w temperaturze 100°C.

Tab. 1. Wyniki pomiaru gęstości oleju KIA 0W20 (opracowanie własne)

Numer zlecenia	Przebieg wymiany (w km)	Interwał (w km)	Gęstość g·cm^{-3}	Różnica gęstości względem oleju nowego w %
Nowy KIA	0	0	0,7502	0,00%
ZLEC.3254	31057	5667	0,7614	1,49%
ZLEC.3981	6781	6781	0,7754	3,36%
ZLEC.4043	19528	7373	0,7779	3,69%
ZLEC.3983	26862	13367	0,7719	2,89%
ZLEC.3673	111261	13370	0,8024	6,96%
ZLEC.3534	70645	13611	0,7615	1,51%
ZLEC.3888	13643	13643	0,7934	5,76%
ZLEC.3684	55952	13787	0,7974	6,29%
ZLEC.3354	43189	14039	0,777	3,57%
ZLEC.4022	42674	14150	0,7956	6,05%
ZLEC.3509	28365	14166	0,7774	3,63%
ZLEC.3705	74317	14524	0,7655	2,04%
ZLEC.3875	14655	14655	0,7697	2,60%
ZLEC.3412	14672	14672	0,7858	4,75%
ZLEC.3428	29068	14681	0,7938	5,81%
ZLEC.4017	145211	14747	0,7764	3,49%
ZLEC.3470	44477	14790	0,7985	6,44%
ZLEC.4038	41948	14882	0,761	1,44%
ZLEC.3881	25626	14951	0,7397	-1,40%

Tab. 2. Wyniki pomiaru lepkości oleju KIA 0W20 o temperaturze 20°C (opracowanie własne)

Numer zlecenia	Przebieg wymiany (w km)	Interwał (w km)	Lepkość 20°C w cSt	Lepkość 20°C różnica w %
Nowy KIA	0	0	78,1	0,00%
ZLEC.3254	31057	5667	90,9	16,39%
ZLEC.3981	6781	6781	104,7	34,06%
ZLEC.4043	19528	7373	59,8	-23,43%
ZLEC.3983	26862	13367	69,0	-11,65%
ZLEC.3673	111261	13370	72,0	-7,81%
ZLEC.3534	70645	13611	72,3	-7,43%
ZLEC.3888	13643	13643	45,7	-41,49%
ZLEC.3684	55952	13787	71,5	-8,45%
ZLEC.3354	43189	14039	76,4	-2,18%
ZLEC.4022	42674	14150	66,3	-15,11%
ZLEC.3509	28365	14166	66,2	-15,24%
ZLEC.3705	74317	14524	49,9	-36,11%
ZLEC.3875	14655	14655	54,4	-30,35%
ZLEC.3412	14672	14672	60,3	-22,79%
ZLEC.3428	29068	14681	76,2	-2,43%
ZLEC.4017	145211	14747	49,5	-36,62%
ZLEC.3470	44477	14790	69,7	-10,76%
ZLEC.4038	41948	14882	75,6	-3,20%
ZLEC.3881	25626	14951	62,7	-19,72%

Tab. 3. Wyniki pomiaru lepkości oleju KIA 0W20 o temperaturze 40°C (opracowanie własne)

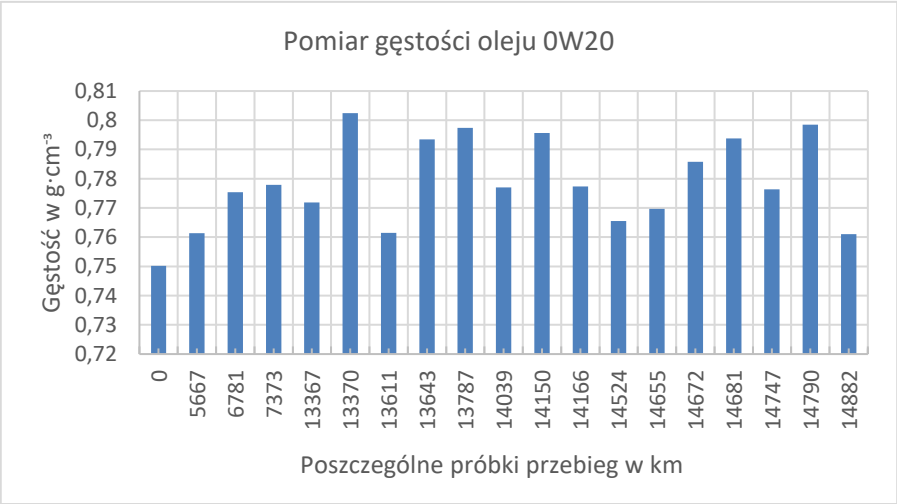
Numer zlecenia	Przebieg wymiany (w km)	Interwał (w km)	Lepkość 40°C w cSt	Lepkość 40°C różnica w %
Nowy KIA	0	0	32,7	0,00%
ZLEC.3254	31057	5667	37,6	14,98%
ZLEC.3981	6781	6781	42	28,44%
ZLEC.4043	19528	7373	32,8	0,31%
ZLEC.3983	26862	13367	38,3	17,13%
ZLEC.3673	111261	13370	40	22,32%
ZLEC.3534	70645	13611	38,1	16,51%
ZLEC.3888	13643	13643	22,6	-30,89%
ZLEC.3684	55952	13787	42	28,44%
ZLEC.3354	43189	14039	36,5	11,62%
ZLEC.4022	42674	14150	32	-2,14%
ZLEC.3509	28365	14166	35,3	7,95%
ZLEC.3705	74317	14524	23,6	-27,83%
ZLEC.3875	14655	14655	23,8	-27,22%
ZLEC.3412	14672	14672	24,5	-25,08%
ZLEC.3428	29068	14681	69,3	111,93%
ZLEC.4017	145211	14747	22,8	-30,28%
ZLEC.3470	44477	14790	41,3	26,30%
ZLEC.4038	41948	14882	44,1	34,86%
ZLEC.3881	25626	14951	33,2	1,53%

Tab. 4. Wyniki pomiaru lepkości oleju KIA 0W20 o temperaturze 100°C (opracowanie własne)

Numer zlecenia	Przebieg wymiany (w km)	Interwał (w km)	Lepkość 100°C w cSt	Lepkość 100°C różnica w %
Nowy KIA	0	0	5,4	0,00%
ZLEC.3254	31057	5667	5,8	7,41%
ZLEC.3981	6781	6781	9,5	75,93%
ZLEC.4043	19528	7373	7,8	44,44%
ZLEC.3983	26862	13367	9,4	74,07%
ZLEC.3673	111261	13370	10	85,19%
ZLEC.3534	70645	13611	9,8	81,48%
ZLEC.3888	13643	13643	5,8	7,41%
ZLEC.3684	55952	13787	9,6	77,78%
ZLEC.3354	43189	14039	9	66,67%
ZLEC.4022	42674	14150	9,2	70,37%
ZLEC.3509	28365	14166	8,5	57,41%
ZLEC.3705	74317	14524	8,1	50,00%
ZLEC.3875	14655	14655	6,9	27,78%
ZLEC.3412	14672	14672	3,8	-29,63%
ZLEC.3428	29068	14681	8,2	51,85%
ZLEC.4017	145211	14747	5,1	-5,56%
ZLEC.3470	44477	14790	8,9	64,81%
ZLEC.4038	41948	14882	5	-7,41%
ZLEC.3881	25626	14951	9,1	68,52%

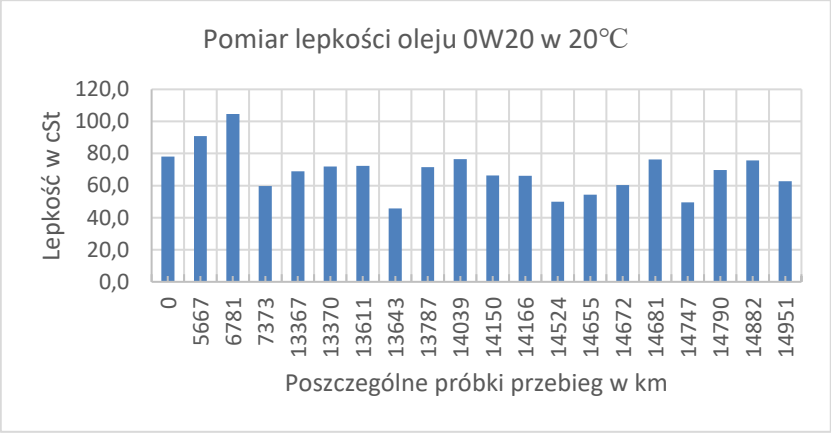
6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W przypadku badań gęstości oleju KIA 0W20 nowy olej silnikowy charakteryzował się gęstością 0,7502 g·cm^{-3}. Analizując właściwości przepracowanych olejów, stwierdzono, że 18 z badanych próbek charakteryzowało się wyższą gęstością od oleju nowego, a tylko jedna z próbek wykazała niższą gęstość. Najwyższą z gęstości – 0,8024 g·cm^{-3} – wykazano dla oleju o interwale 13370 km z pojazdu o przebiegu całkowitym 111261 km. Najniższą gęstością – 0,7397 g·cm^{-3} – charakteryzował się olej o interwale 14951 km z pojazdu o przebiegu 25626 km. Maksymalne odchylenie względem oleju nowego wyniosło 7%, a minimalne 1,4%. Na poniższym wykresie przedstawiono gęstość oleju względem kilometrowej eksploatacji oleju w pojeździe (rys. 4).



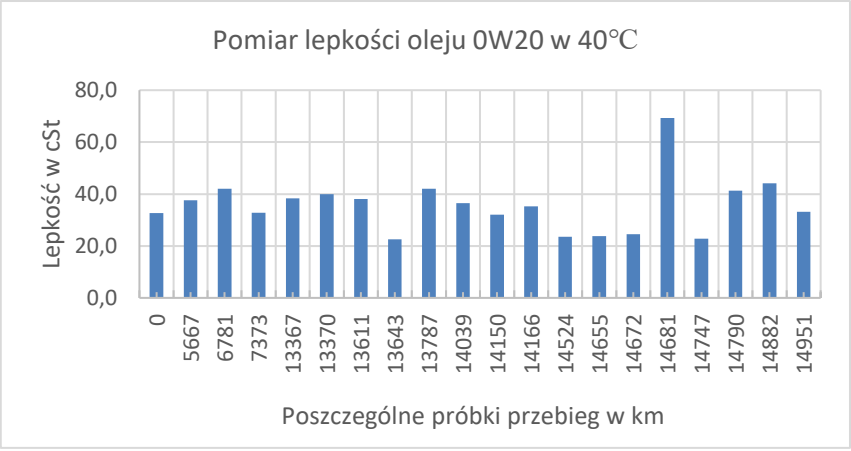
Rys. 4. Wykres wartości gęstości oleju względem interwału (opracowanie własne)

W przypadku badań lepkości oleju KIA 0W20 w temperaturze 20°C nowy olej silnikowy charakteryzował się lepkością 78,1 cSt. Analizując właściwości przepracowanych olejów, stwierdzono, że 2 z próbek charakteryzowały się wyższą lepkością od oleju nowego, a 17 wykazało niższą lepkość. Najwyższą lepkość – 104,7 cSt – wykazano dla oleju o interwale 6781 km z pojazdu o takim samym przebiegu, oznacza to, że była to pierwsza wymiana oleju w tej jednostce. Najniższą lepkością – 45,7 cSt – charakteryzował się olej o interwale 13643 km z pojazdu o takim samym przebiegu, co również oznacza pierwszą wymianę środka smarnego w tej jednostce. Maksymalne odchylenie względem oleju nowego wyniosło 41,49%, a minimalne 2,18% z silnika o interwale 14039 km, z pojazdu o całkowitym przebiegu 43189 km. Na wykresie poniżej przedstawiono wartość lepkości oleju w 20°C, względem przebiegu pojazdu (rys. 5).



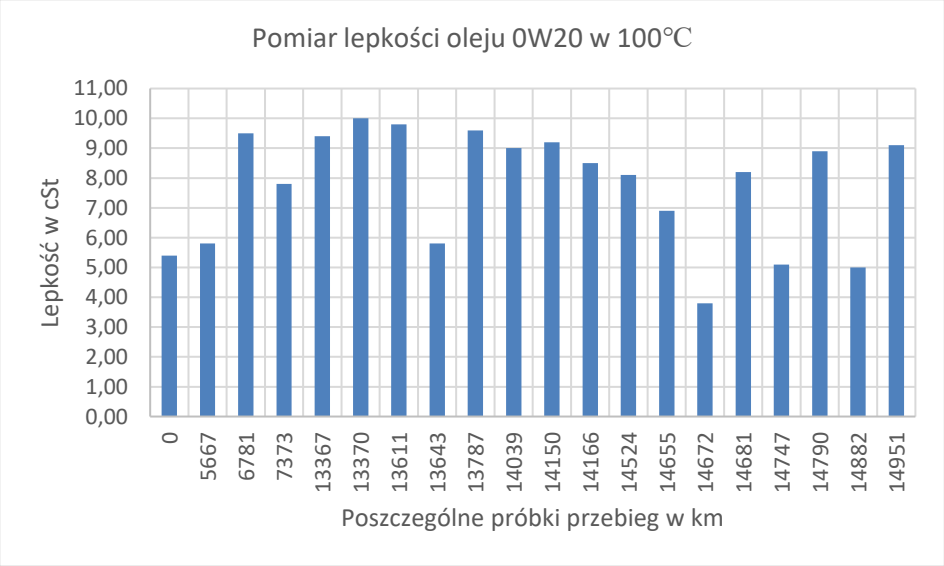
Rys. 5. Wykres wartości lepkości oleju w 20°C względem interwału (opracowanie własne)

W przypadku badań lepkości oleju KIA 0W20 w temperaturze 40°C nowy olej silnikowy charakteryzował się lepkością 32,7 cSt. Analizując własności przepracowanych olejów, stwierdzono, że 10 z analizowanych próbek charakteryzowało się wyższą lepkością od oleju nowego, 3 próbki nieznacznie odbiegały od oleju nowego, a 6 wykazało niższą lepkość. Najwyższą lepkość – 69,3 cSt – wykazał olej o interwale 14681 km z pojazdu o przebiegu całkowitym 29068 km. Najniższą lepkością – 22,6 cSt – charakteryzował się olej o interwale 13643 km z pojazdu o takim samym przebiegu. Jest to olej, który najniższą lepkość wykazywał w 20°C. Maksymalne odchylenie względem oleju nowego wyniosło 112%, a minimalne 0,31% z silnika o interwale 7373 km z pojazdu o całkowitym przebiegu 19528 km. Wykres na rysunku 6 odzwierciedla wartość lepkości oleju w 40°C względem interwału.



Rys. 6. Wykres wartości lepkości oleju w 40°C względem interwału (opracowanie własne)

W przypadku badań lepkości oleju KIA 0W20 w temperaturze 100°C nowy olej silnikowy charakteryzował się lepkością 5,4 cSt. Analizując własności przepracowanych olejów, stwierdzono, że 14 z analizowanych próbek charakteryzowało się wyższą lepkością od oleju nowego, natomiast 4 próbki nieznacznie odbiegały od oleju nowego, a 1 z nich wykazała niższą lepkość. Najwyższą lepkość 10,0 cSt wykazano dla oleju o interwale 13370 km, z pojazdu o przebiegu całkowitym 111261 km. Najniższą lepkością 3,8 cSt charakteryzował się olej o interwale 14672 km z pojazdu o takim samym przebiegu. Oznacza to, że była to pierwsza wymiana oleju w tej jednostce. Maksymalne odchylenie względem oleju nowego wyniosło 85,19%, a minimalne 5,56% z silnika o interwale 14747 km z pojazdu o całkowitym przebiegu 145221 km. Zgodnie z normą SAE J300 lepkość kinematyczna w wysokich temperaturach (100°C) powinna wynosić w cSt od 3,8 do 9,2. Oznacza to, że 14 z próbek oleju przepracowanego mieści się w normie, a 5 nieznacznie ją przekracza. Na poniższym wykresie przedstawiono wartość lepkości oleju w 100°C względem interwału (rys. 7).



Rys. 7. Wykres wartości lepkości oleju w 100°C względem interwału (opracowanie własne)

7. WNIOSKI

Turbodoładowane silniki o niskiej pojemności skokowej oraz nowoczesne oleje silnikowe stanowią kluczowe elementy współczesnej motoryzacji, przyczyniając się do zwiększenia efektywności paliwowej, podniesienia wartości parametrów eksploatacyjnych i redukcji emisji. Pomimo że zaawansowane

technologie mogą prowadzić do podwyższenia kosztów serwisowych, ich zalety w kontekście ochrony środowiska i ekonomii eksploatacji sprawiają, że stają się coraz bardziej popularnym wyborem w nowoczesnych pojazdach. Przeprowadzone badania wskazują, że wszyscy użytkownicy wymienili olej przed wskazanym przez producenta przebiegiem 15000 km, aby zapewnić optymalną ochronę i funkcjonowanie silnika. Ze względu na zachowanie przez przepracowany olej właściwości lepkości w wysokiej temperaturze 100°C, zgodnej z normą SAE J300 lub nieznacznie odbiegającej od niej, właściwe będzie rozszerzenie badań o próbki oleju z większym interwałem oraz przeprowadzenie dodatkowych badań smarności i składu chemicznego przepracowanego oleju silnikowego.

LITERATURA

[1] Baskov V., Ignatov A., Polotnyanschikov V., 2020. Assessing the influence of operating factors on the properties of engine oil and the environmental safety of internal combustion engine. XIV International Conference 2020 SPbGASU Organization and safety of traffic in large cities.

[2] Idzior M., 2021. Aging of engine oils and their influence on the wear of an internal combustion engine. Combustion Engines 185(2), 15–20.

[3] Kilimnik S., Sójka M., Muślewski Ł., 2020. Eksploatacja pojazdów samochodowych – przedstawienie zakresu wykonywanych czynności podczas przeglądu serwisowego. Developments in Mechanical Engineering 15(8), 49–58.

[4] Kumbár V., Votava J., 2014. Differences in engine oil degradation in spark-ignition and compression-ignition engine. Maintenance and Reliability 16(4), 622–628.

[5] Macián V., Tormos B., Bastidas S., Pérez T., 2020. Improved fleet operation and maintenance through the use of low viscosity engine oils: fuel economy and oil performance. Maintenance and Reliability 22(2), 201–211.

[6] Stępień Z., 2021. Premature Degradation of Lubricating Oil during the Service Life of the Positive-Ignition Engine. Tribology Online 16(1), 31–37.

[7] Wolak A., Zając G., 2019. An Empirical Study of the Variables Affecting the Frequency of Engine Oil Change in the Environmental Aspect. Rocznik Ochrona Środowiska Tom 21, cz. 1, 738–766.

ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY SILNIKÓW SPALINOWYCH W ASPEKCIE ZASILANIA ICH PALIWEM ALTERNATYWNYM

Marietta Markiewicz*

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie. Zagadnienia związane z oddziaływaniem silników spalinowych na środowisko dotyczą problematyki aktualnie rozważanej przez Komisję Europejską. Rozwiązania proponowane w tym zakresie dotyczą wielu czynników, w tym zastosowania paliw z odnawialnych źródeł energii jako dodatku do paliwa konwencjonalnego. Celem tego działania jest nie tylko ograniczenie zużycia zasobów kopalnych, lecz także znaczne obniżenie emisji zanieczyszczeń pochodzących z sektora transportu. Opracowanie dotyczy wpływu oddziaływania silników spalinowych na środowisko naturalne. W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia związane z zasilaniem silników spalinowych paliwami alternatywnymi. Problematykę rozszerzono o aspekty mechaniczne i eksploatacyjne dotyczące silników spalinowych. Tematykę pracy podjęto z uwagi na szerokie zastosowanie silników spalinowych oraz wprowadzane ograniczenia ich emisyjności. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz ich analizy można stwierdzić, że eksperyment wykazał, że dodatek estrów metylowych kwasów tłuszczowych do oleju napędowego ma wpływ na składowe spalin emitowanych przez badane silniki o zapłonie samoczynnym. Analiza wybranych parametrów wykazała najwyższe wyniki dla mieszanki BIO10, natomiast najniższe dla BIO50.

Słowa kluczowe: jednostki napędowe środków transportu, paliwa, biopaliwa, parametry silnika

1. WPROWADZENIE

Stopień wykorzystywania transportu drogowego prowadzi do degradacji środowiska, zostało to zauważone i unormowane regulacjami prawnymi. Zmiany wprowadzane w prawie krajowym i europejskim mają na celu ograniczenie negatywnego wpływu oddziaływania transportu na środowisko naturalne. Wprowadzone zostały strategie, których priorytetem jest uzyskanie zrównoważonego rozwoju. Celem ich wprowadzenia jest tworzenie gospodarki, która będzie ekologiczna, skuteczna i konkurencyjna. Koncepcja zrównoważonego rozwoju, którą przedstawiono w komunikacie Komisji Europejskiej zatytułowanym „Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości", określa wizje i założenia dotyczące sektora transportu. Obecnie obowiązująca strategia z 2020 roku wprowadziła główne filary, dotyczące [7]:

– inteligentnego rozwoju, czyli rozwoju gospodarki, który oparty jest na innowacji oraz wiedzy,
– zrównoważonego rozwoju, który obejmuje promowanie gospodarki efektywnie wykorzystującej naturalne zasoby, bardziej „zielone",

* adres korespondencyjny: marmar000@pbs.edu.pl

– rozwoju sprzyjającego włączeniu społecznemu, czyli wzmocnienia gospodarki poprzez wysokie zatrudnienie oraz spójność ekonomiczną, społeczną i terytorialną.

Wyzwaniem dla polityki transportowej Unii Europejskiej jest to, że nie ma równowagi w zakresie rozwoju różnych gałęzi transportu. Jednym z założeń strategii jest przeniesienie transportu drogowego na kolejowy, morski lub śródlądowy, w celu ochrony środowiska naturalnego przed zanieczyszczeniami.

Wizja przyszłości sektora transportu, zapisana w strategii, zakłada [7]:
– wzrost sektora transportu oraz wspieranie mobilności, przy jednoczesnym obniżeniu emisji zanieczyszczeń o 60%,
– efektywną sieć multimodalnego podróżowania i transportu między miastami,
– równe szanse na całym świecie dla podróżowania na dalekie odległości oraz międzykontynentalnego transportu towarów,
– ekologiczny transport miejski i dojazdy do pracy.

Zanieczyszczenia pochodzące z sektora transportu są bardziej niebezpieczne niż zanieczyszczenia pochodzące z przemysłu, gdyż rozpowszechniane na niskich wysokościach [15]. Wprowadzanie zmian w funkcjonowaniu sektora transportu ma na celu zwiększenie świadomości społeczeństwa na zagrożenie, jakie niesie wciąż rosnąca emisja toksycznych związków pochodzących z transportu oraz ograniczenie jej do minimum. Do negatywnego wpływu transportu drogowego należą [3, 4, 15]:
– emisja gazów cieplarnianych,
– emisja zanieczyszczeń powietrza,
– zajmowanie terenów przyrodniczych i przerywanie ich ciągłości w celu budowy infrastruktury drogowej.

Emisja zanieczyszczeń powietrza mierzona jest za pomocą stężenia poszczególnych związków spalin, które powstają podczas jazdy, należą do nich: tlenki węgla, tlenki azotu, dwutlenki siarki, cząstki stałe, ołów i sadza.

Istnieje wiele sposobów na ograniczenie negatywnego wpływu transportu na środowisko, należą do nich przede wszystkim wprowadzane regulacje prawne dotyczące ekologicznej polityki transportowej, ochrony zasobów naturalnych, programów ochrony środowiska oraz przeciwdziałania zanieczyszczeniom. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie paliw odnawialnych. Stosowanie odnawialnych źródeł energii do zasilania silników spalinowych umożliwia uniezależnienie gospodarki od paliw kopalnych oraz ogranicza emisję toksycznych składników znajdujących się w spalinach. Wśród paliw alternatywnych pochodzenia roślinnego wyróżnić można: olej rzepakowy, olej arachidowy, olej słonecznikowy, olej sojowy oraz tłuszcze zwierzęce. Paliwa te poddawane są procesom chemicznym w celu uzyskania właściwości fizykochemicznych zbliżonych do oleju napędowego. Ze względów konstrukcyjnych, technicznych, technologicznych i ekonomicznych najczęściej stosowany jest olej rzepakowy. Drugim najczęściej wykorzystywanym surowcem do produkcji biopaliw są tłuszcze zwierzęce. Do zasilania silników z zapłonem samoczynnym stosowany

może być również biogaz wytwarzany z odpadów z przetwórstwa owoców i warzyw oraz olej popirolityczny, jak również mikroalgi, odpady komunalne, ściekowe oraz odpady resztkowe z przemysłu rolniczego. Silniki z zapłonem samoczynnym zasilać można również zużytym olejem roślinnym, czyli odpadem posmażalniczym. Z uwagi na technologię produkcji oraz konstrukcyjne uwarunkowania jednostek napędowych najbardziej popularnym rozwiązaniem jest produkcja biopaliwa z olejów roślinnych lub tłuszczów zwierzęcych.

Zasilanie silników spalinowych mieszankami paliw kopalnych i biopaliw powoduje obniżenie parametrów użytkowych jednostek napędowych, takich jak moc oraz moment obrotowy. Przeprowadzane testy pojazdów z silnikami spalinowymi zasilanymi tego typu paliwem wykazują spadek o około 7–8% w porównaniu z zasilaniem standardowym paliwem. Oprócz zmniejszonej mocy i spadku ogólnej sprawności silnika zauważalne są również zamiany parametrów roboczych silnika, wzrost oporów przepływu paliwa, wzrost gęstości paliwa. Rozwiązaniem, które pozwoli utrzymać odpowiednią sprawność silnika i obniży ilość emitowanych składników spalin, jest odpowiednia regulacja układu wtryskowego jednostki napędowej.

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu zasilania silników spalinowych biopaliwami na ich parametry użytkowe. Analizowanymi parametrami były: moc, moment obrotowy, emisja dźwięku generowanego przez silnik, cząstki stałe oraz pozostałe składniki spalin, takie jak dwutlenki węgla, tlenki węgla, tlenki azotu, węglowodory oraz tlen. W opracowaniu przedstawiono analizę parametrów użytkowych silników spalinowych, które mają wpływ na środowisko naturalne. Analizę przeprowadzono dla określonych mieszanek paliwowych o różnym udziale biokomponentu oraz modyfikacji oprogramowania układu sterowania silnikiem. Na podstawie analizy literaturowej stwierdzono, że dotychczas nie rozpatrzono dostatecznie wpływu zasilania silników mieszankami paliw pochodzenia naturalnego i biokomponentu oraz modyfikacji oprogramowania układu sterowania silnikiem na parametry użytkowe jednostek napędowych. Dotyczy to zarówno podstawowych parametrów opisujących osiągi silnika, takich jak moc oraz moment obrotowy, jak i składników spalin, które mają negatywny wpływ na środowisko naturalne. Przeprowadzono również analizę emisji dźwięku generowanego przez silniki spalinowe, gdyż według raportów Komisji Europejskiej jest to parametr określany jako uciążliwy dla społeczeństwa.

2. BADANIA JEDNOSTEK NAPĘDOWYCH ZASILANYCH PALIWEM ALTERNATYWNYM

Na potrzeby tego opracowania wykonano analizę literatury dotyczącą poszczególnych parametrów użytkowych silników spalinowych. Jako kryteria oceny jednostek napędowych określono cechy, których istnienie jest podstawą do nadania im określonych wartości. Kryteria oceny używane były w celu weryfikacji efektywności oraz podejmowania decyzji. Na podstawie analizy literatury wyszczególniono cztery grupy kryteriów oceny tłokowych silników spali-

nowych, takie jak: kryterium materiałowe, ekonomiczne, użytkowe oraz ekologiczne. Wybrane najistotniejsze kryteria oceny jednostek napędowych wyszczególniono w tabeli 1.

Tab. 1. Kryteria oceny jednostek napędowych [8]

KRYTERIA OCENY	Materiałowe	smarność liczba cetanowa lepkość gęstość wartość opałowa zawartość wody
	Użytkowe	moc moment obrotowy ogólna sprawność silnika temperatura zapłonu rozruch silnika ciśnienie spalania
	Ekologiczne	emisja dwutlenku węgla emisja tlenku węgla emisja węglowodorów emisja siarki emisja tlenków azotu cząstki stałe zadymienie spalin hałas
	Ekonomiczne	zużycie paliwa koszty produkcji paliwa

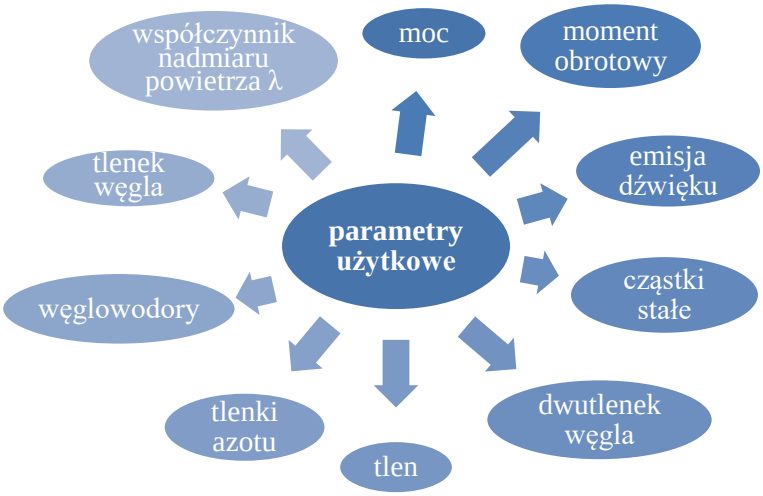
Materiałem badawczym były mieszanki oleju napędowego i estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME (tab. 2). Olej napędowy pozyskiwano bezpośrednio z rafinerii, przez co pozbawiony był dodatków biokomponentów.

Tab. 2. Mieszanki paliwowe stosowane do badań (opracowanie własne)

Skład mieszanki	**Oznaczenie mieszanki**
olej napędowy	**ON**
90% olej napędowy 10% estry metylowe kwasów tłuszczowych	BIO10
70% olej napędowy 30% estry metylowe kwasów tłuszczowych	BIO30
50% olej napędowy 50% estry metylowe kwasów tłuszczowych	BIO50

Obiektami badań były silniki spalinowe z zapłonem samoczynnym. Obiekty badań usytuowane były na hamowni podwoziowej symulującej warunki drogowe.

Wykorzystywanym w badaniach silnikiem był 1.6 HDi charakteryzujący się bezpośrednim wtryskiem paliwa, realizowanym za pomocą systemu *Common Rail* z zastosowanymi wtryskiwaczami elektromagnetycznymi. Jednostka napędowa współpracowała z dwumasowym kołem zamachowym i turbosprężarką o zmiennej geometrii łopatek, co miało wpływ na jej generowane osiągi. Silnik nie był wyposażony w filtr cząstek stałych. W silnikach wykonana została adaptacja układu zasilania, pozwalająca na zmianę paliwa podczas prowadzenia eksperymentów. Parametry użytkowe silników spalinowych wybrane do badań eksploatacyjnych wyszczególniono na rysunku 1.



Rys. 1. Parametry użytkowe silników spalinowych wybrane do badań [8]

Parametry użytkowe badano podczas symulowania warunków drogowych na obciążeniowej hamowni podwoziowej z hamulcem elektrowirowym. Wykonywane w ten sposób badania umożliwiły uzyskanie danych niezbędnych do wyznaczania charakterystyki osiągów silnika, takich jak moc oraz moment obrotowy. Pomiar parametrów użytkowych silnika polegał na poddawaniu pojazdu odpowiednim obciążeniom. Pomiar stężenia składników spalin wykonywano z wykorzystaniem analizatora spalin. Przeprowadzone testy umożliwiały określenie ilości składników spalin, które wydalane są do otoczenia w postaci gazów spalinowych. Analizator mierzył stopień toksyczności spalin i określał wartości, takie jak: węglowodory (HC), tlen (O_2), tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla (CO_2), tlenki azotu (NO_2) oraz współczynnik nadmiaru powietrza λ. Pomiar emisji cząstek stałych wykonywany był za pomocą licznika cząstek stałych z zastosowaniem metody optycznej, polegającej na pomiarze natężenia wiązki światła przechodzącej przez strumień spalin. Pomiar emisji dźwięku generowanego przez silnik mierzony był sonometrem z wbudowanym analizatorem spektralnym, którego działanie polega na badaniu sygnału akustycznego, dobiegającego do mikrofonu pojemnościowego w postaci fali ciśnienia.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ JEDNOSTEK NAPĘDOWYCH ZASILANYCH PALIWEM ALTERNATYWNYM

Uzyskane wyniki poddano analizie i na jej podstawie zbudowano model ocenowy. Za pomocą modelu wybrano parametry mające najistotniejszy wpływ na zmianę mieszanki paliwowej. Opracowanie dotyczy takich parametrów, jak moc, moment obrotowy, składniki spalin (tlenki węgla, dwutlenki węgla, tlenki azotu, tlen, węglowodory), cząstki stałe zawarte w spalinach oraz emisja dźwięku generowanego przez jednostkę napędową. Analizę parametrów użytkowych przeprowadzono dla różnych konfiguracji mieszanek paliwowych. Do opracowania modelu oceny funkcjonowania silnika z zapłonem samoczynnym wykorzystano analizę wielokryterialną MOA (*Multi-criteria Otpimizations Analysis*).

Z wykorzystaniem opracowanego modelu porównywano wyniki badań uzyskane dla poszczególnych mieszanek paliwowych oraz poszczególnych regulacji oprogramowania układu sterowania silnika z punktem odniesienia. Za punkt odniesienia przyjęto paliwo konwencjonalne oraz standardowe oprogramowanie silnika określone przez producenta. Wykorzystanie metody MOA umożliwiło określenie kryteriów ilościowych oraz jakościowych składających się na wielokryterialny model oceny, ustalenie systemu wag dla poszczególnych kryteriów, realizację procesu obliczenia całkowitej oceny dla danego wariantu oraz interpretację otrzymanych ocen.

W celu porównania wartości parametrów użytkowych poszczególnych mieszanek paliwowych z punktem odniesienia (w tym przypadku był to olej napędowy pozbawiony dodatku biokomponentu) określono znormalizowane wartości składowych wektorów (tab. 4). Wektory jednowymiarowe oznaczone zmienną X były to zmienne losowe przedstawiające wartości poszczególnych parametrów użytkowych. Wartości wag poszczególnych parametrów użytkowych oraz objaśnienie dotyczące składowych wektora postaci przedstawiono w tabeli 3.

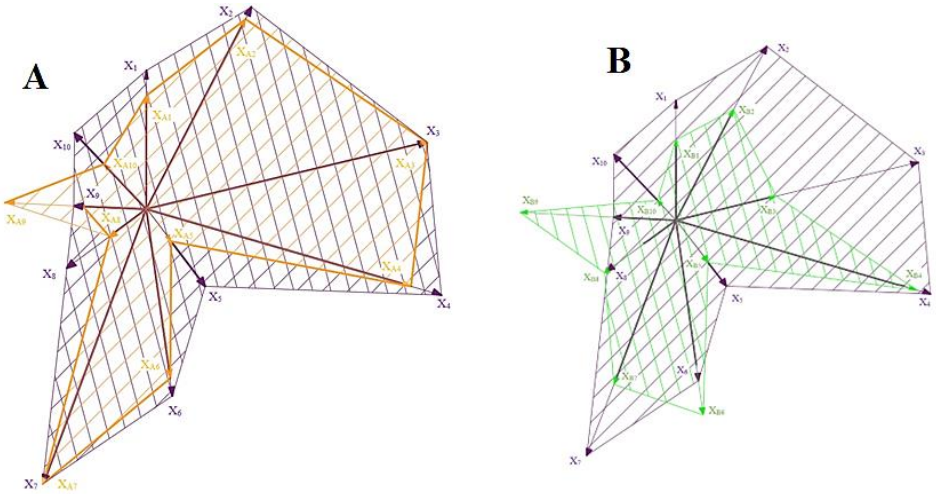
Tab. 3. Wartości wag oraz składowe wektora postaci (opracowanie własne)

Symbol składowej wektora	Objaśnienie składowej wektora	Symbol wagi	Waga składowej wektora
X_1	moc [kW]	α_1	0,2616
X_2	moment obrotowy [Nm]	α_2	0,45547
X_3	emisja dźwięku generowanego przez silnik [sB]	α_3	0,01239
X_4	cząstki stałe zawarte w spalinach [ppm]	α_4	0,2616
X_5	tlenek węgla [% obj.]	α_5	0,00044
X_6	dwutlenek węgla [% obj.]	α_6	0,00235
X_7	tlen [% obj.]	α_7	0,00046
X_8	tlenki azotu [ppm]	α_8	0,00539
X_9	współczynnik nadmiaru powietrza λ	α_9	0,00019
X_{10}	węglowodory [ppm]	α_{10}	0,00011

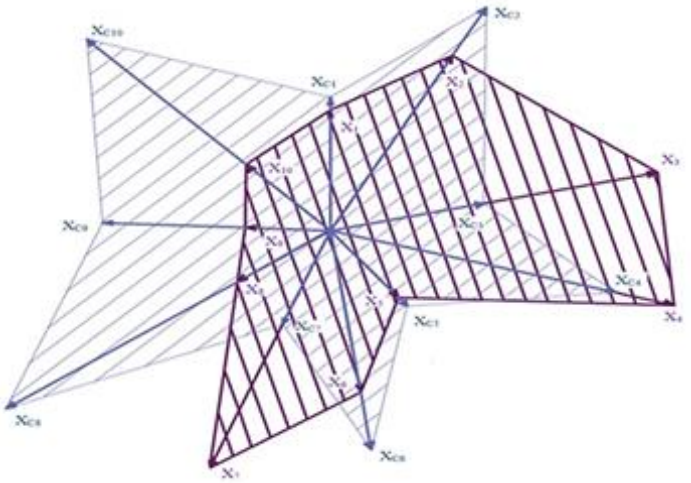
Tab. 4. Unormowane wielkości składowych wektora (opracowanie własne)

Składowa wektora	Rodzaj mieszanki paliwowej			
	ON	BIO10	BIO30	BIO50
X_1	3,906	3,207	2,61	4,328
X_2	6,397	6,031	4,077	8,155
X_3	8,122	8,121	3,351	3,783
X_4	8,639	7,751	8,199	7,181
X_5	2,713	1,133	1,733	3,067
X_6	5,299	4,789	6,411	7,156
X_7	8,241	8,255	5,725	3,245
X_8	2,719	1,305	2,919	9,735
X_9	2,049	4,000	5,100	5,533
X_{10}	2,948	1,756	0,896	8,567

Unormowane wyniki pomiarów parametrów użytkowych silnika z zapłonem samoczynnym dla poszczególnych mieszanek oleju napędowego i biokomponentu w odniesieniu do oleju napędowego przedstawiono na rysunkach 2, 3.



Rys. 2. Interpretacja graficzna składowych wektora: A – mieszanka BIO10, B – mieszanka BIO30 (opracowanie własne)



Rys. 3. Interpretacja graficzna składowych wektora: mieszanka BIO50 (opracowanie własne)

W metodologii procesu ocenowego jednym z problemów jest wyznaczenie tylko tych parametrów, które mają najistotniejszy wpływ na realizowaną ocenę i będą podstawą do dalszych analiz. W zbudowanym modelu wyróżniono zbiór dziesięciu parametrów użytkowych, które poddane były eksperymentom badawczym. W celu weryfikacji zbudowanego modelu zastosowano metodę wykresów średnich rozmytych. Ocenie podlegały wartości średnie dla poszczególnych wariantów. W analizie skupiono się na wyborze odpowiedniej mieszanki paliwowej, dlatego wyniki uzyskane dla zmian wprowadzanych w oprogramowaniu układu sterowania silnika uśredniono. Wyniki uzyskane z oceny przedstawiono w tabelach 5–8.

Tab. 5. Ocena wartości przyjętych wariantów dla mieszanki ON (opracowanie własne)

Parametr	**Numer regulacji**				
	I	**II**	**III**	**IV**	**V**
Moc	10015	10099	9997	10149	10095
Moment obrotowy	23360	23950	23726	24687	23889
Emisja dźwięku	12098	12024	12082	12173	12157
Cząstki stałe	7503	6643	6587	8573	9400
Tlenek węgla	6	6	9	16	13
Dwutlenek węgla	1189	1200	1194	1199	1196
Węglowodory	903	6500	2450	2210	5147
Tlen	1025	789	856	1578	1727
Tlenki azotu	23777	28040	26007	23717	22723
Lambda	153	144	150	143	136
Jakość	6,64073	6,39188	6,33801	6,19236	6,00339

Tab. 6. Ocena wartości przyjętych wariantów dla mieszanki BIO10 (opracowanie własne)

Parametr	Numer regulacji				
	I	II	III	IV	V
Moc	10466	10011	10077	10356	10422
Moment obrotowy	24567	22976	23529	24372	24175
Emisja dźwięku	12134	12076	12094	12137	12108
Cząstki stałe	6723	8997	9370	9593	8678
Tlenek węgla	2	8	4	10	9
Dwutlenek węgla	1198	1210	1170	1214	1241
Węglowodory	2413	863	1773	3083	6943
Tlen	734	698	656	581	746
Tlenki azotu	24473	25367	23723	25040	34683
Lambda	147	141	140	132	142
Jakość	6,76812	6,63981	6,61777	6,57599	6,24870

Tab. 7. Ocena wartości przyjętych wariantów dla mieszanki BIO30 (opracowanie własne)

Parametr	Numer regulacji				
	I	II	III	IV	V
Moc	10548	10479	10417	10552	10491
Moment obrotowy	24422	24149	24226	24881	24832
Emisja dźwięku	12173	12052	12094	12117	12116
Cząstki stałe	8667	9323	9067	9043	9437
Tlenek węgla	6	12	8	10	11
Dwutlenek węgla	1178	1240	1203	1235	1211
Węglowodory	1953	1237	1677	2753	5067
Tlen	684	861	723	881	746
Tlenki azotu	25460	23663	23200	23310	24077
Lambda	137	144	141	154	151
Jakość	6,65933	6,65378	6,65094	6,41359	6,33549

Tab. 8. Ocena wartości przyjętych wariantów dla mieszanki BIO50 (opracowanie własne)

Parametr	Numer regulacji				
	I	II	III	IV	V
Moc	10465	10574	10613	10682	10442
Moment obrotowy	24421	24689	25421	25398	24130
Emisja dźwięku	12252	12054	12123	12113	12896
Cząstki stałe	12392	12035	12105	12138	12890
Tlenek węgla	2	8	4	10	6
Dwutlenek węgla	1127	1224	1231	1240	1184
Węglowodory	1830	1783	4413	2900	1900
Tlen	642	768	746	853	646
Tlenki azotu	23563	25310	23547	26533	24813
Lambda	144	148	146	153	140
Jakość	6,73701	6,62146	6,54713	6,41306	6,37453

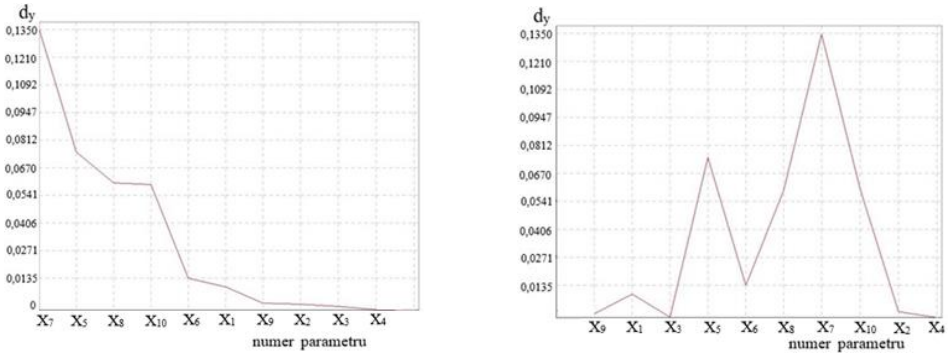
Ustalenie równych wag dla wszystkich analizowanych parametrów pozwoliło określić, który z nich jest najistotniejszy w kontekście przeprowadzanego eksperymentu. Uzyskane wyniki poddano analizie w celu ustalenia, które parametry użytkowe są najbardziej wrażliwe na zmianę mieszanki paliwowej. Wartości rozrzutów poszczególnych parametrów, które określają ich wrażliwość na zmianę mieszanki paliwowej, oraz modyfikacje układu sterowania przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 9. Wartości rozrzutu poszczególnych parametrów użytkowych (opracowanie własne)

Rodzaj parametru	Oznaczenie	Wartość rozrzutu średniej rozmytej
Moc [kW]	X_1	0,0035
Moment obrotowy [Nm]	X_2	0,0019
Hałas [dB]	X_3	0,0012
Cząstki stałe [ppm]	X_4	0,0002
Tlenek węgla [% obj.]	X_5	0,0755
Dwutlenek węgla [% obj.]	X_6	0,0138
Tlen [% obj.]	X_7	0,1353
Tlenki azotu [ppm]	X_8	0,0605
Współczynnik nadmiaru powietrza	X_9	0,0029
Węglowodory [ppm]	X_{10}	0,0596

Dane zawarte w tabeli stanowią podstawę wnioskowania, który parametr był wrażliwy na wprowadzane zmiany i czy w dalszych analizach może zostać pominięty. Postać gradientową oraz widmową średnich rozmytych zaprezentowano na rysunku 4. Zgodnie z wartością rozrzutu badane parametry przedstawiono w sposób malejący.

Na podstawie analizy danych przyjęto, że parametry o wartości rozrzutu mniejszej od 0,04 nie są wrażliwe na zmiany. Największy wpływ na ocenę jakości miało sześć parametrów: moc, tlenek węgla, dwutlenek węgla, tlen, tlenki azotu oraz węglowodory.



Rys. 4. Postać gradientowa i widmowa średnich rozmytych (opracowanie własne)

4. WNIOSKI

Ograniczenia emisyjności silników spalinowych przy zachowaniu ich sprawności prowadzą do poszukiwania nowych rozwiązań w ich zasilaniu. Wykorzystanie paliw ze źródeł odnawialnych powoduje spadek składników spalin niebezpiecznych dla środowiska naturalnego, co potwierdzone zostało przez wielu autorów [1, 2, 5, 7, 9–13] oraz w tej pracy. W literaturze brakuje danych w zakresie regulacji parametrów sterownika wtrysku paliwa silników zasilanych biopaliwami, które umożliwiłyby dopasowanie określonego ustawienia do optymalnej pracy jednostki napędowej. Regulacje oprogramowania komputera pojazdu pozwoliłyby na efektywną pracę silnika (utrzymanie mocy oraz momentu obrotowego) przy jednoczesnym obniżeniu wartości poszczególnych składników spalin. Na podstawie studiów literaturowych określono istotne parametry użytkowe jednostek napędowych, które poddano badaniom eksploatacyjnym. Wieloaspektowe ujęcie tematu oraz analiza szerokiego spektrum badań spowodowały konieczność wyróżnienia celów: badawczego, naukowego oraz utylitarnego.

Zastosowanie metody wykresów średnich rozmytych pozwoliło na zweryfikowanie postaci wynikowej modelu ocenowego. Na tej podstawie do dalszych badań przyjęto sześć parametrów użytkowych. Charakteryzowały się one znaczącym rozrzutem wartości wyników. Wartości pozostałych parametrów, takich jak: moment obrotowy, poziom emisji dźwięku, cząstki stałe oraz współczynnik nadmiaru powietrza, zostały pominięte w dalszych rozważaniach. Metoda wykresów średnich rozmytych stanowiła istotne narzędzie w procesie ocenowym badanej jednostki napędowej. Wstępna weryfikacja parametrów, która miała wpływ na ich wybór, nie odzwierciedliła ich wrażliwości na wprowadzane zmiany. Jednak wyniki uzyskane podczas badań umożliwiły ustalenie ważności analizowanych parametrów, ograniczenie wymiarowości analizowanej przestrzeni oraz wyznaczenie postaci wynikowej modelu.

Zastosowanie logiki rozmytej oraz intuicyjne wnioskowanie umożliwiły zbudowanie systemu rozmytego sterowania. Stanowiło to alternatywę dla złożonego modelu matematycznego. W przedstawionym przykładzie istnieją zależności przyczynowo-skutkowe, dlatego wykorzystana metoda pozwoliła na opracowanie modelu wyboru najodpowiedniejszej mieszanki paliwowej do danego silnika spalinowego.

LITERATURA

[1] Curkowski A., Mroczkowski P., Oniszk-Ppławska A., Wiśnieski G., 2009. Biogaz rolniczy, produkcja i wykorzystanie. Mazowiecka Agencja Energetyczna Sp. z o.o., Warszawa.

[2] Hoekman S., Robbins C., 2012. Review Of The Effects Of Biodiesel On Nox Emissions. Fuel Processing Technology 96, 237–249.

[3] Jacyna M., Wasiak M., Lewczuk K., Chmier-Gliszczyński N., Dąbrowski T., 2018. Decision problems in developing proecological transport system. Annual Set The Environment Protection 20, 1007–1025.
[4] Jacyna-Gołda I., Gołębiewski P., Izdebski M., Kłodowski M., Jachimowski R., Szczepański E., 2017. The evaluation of the sustainable transport system development with the scenario analyses procedure. Journal of Vibroengineering 19(7), 5627–5638.
[5] Karthickeyan V., 2020. Experimental Investigation On Combined Effect Of Ignition Promoters And Ceramic Coating Fuelled With Papaya Seed Oil Methyl Ester. DI Diesel Engine, Renewable Energy 148, 772–789.
[6] Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego I Komitetu Regionów, Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości, Bruksela, dnia 9.12.2020, COM(2020) 789 final.
[7] Man X., Cheung C., Ning Z., Wei L., Huang Z., 2016. Influence Of Engine Load And Speed On Regulated And Unregulated Emissions Of A Diesel Engine Fueled With Diesel Fuel Blended With Waste Cooking Oil Biodiesel. Fuel 180, 41–49.
[8] Markiewicz M., 2023. Wybrane zagadnienia zasilania silników spalinowych paliwem alternatywnym. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej, Bydgoszcz.
[9] Markiewicz M., Pająk M., Muślewski Ł., 2021. Analysis of Exhaust Gas Content for Selected Biofuel-Powered Combustion Engines with Simultaneous Modification of Their Controllers. Materials 14, 1–17.
[10] Markiewicz-Patalon M., Muślewski Ł., Kaszkowiak J., Knopik L., 2018. Analysis Of Selected Operating Parameters Of Engine Powered By A Mixture Of Biocomponents And Diesel Oil. Jurnal Of Kones Powertrain And Transport 25, 239–244.
[11] Muślewski Ł., Markiewicz M., Pająk M., Kałaczyński T., Koral D., 2021. Analysis of the Use of Fatty Acid Methyl Esters as an Additive to Diesel Fuel for Internal Combustion Engines. Energies 14, 1–17.
[12] Necati A., Canakci O., 2011. Determination Of Performance And Combustion Characteristics Of A Diesel Engine Fueled With Canola And Waste Palm Oil Methyl Esters. Energy Conversion And Management 52, 108–116.
[13] Ozener O., Yuksek L., Ergenç T., Ozkan M., 2014. Effects Of Soybean Biodiesel On A DI Diesel Engine Performance, Emission And Combustion Characteristics. Fuel 115, 875–883.
[14] Pyza D., 2019. Systemy przewozowe – problemy obsługi, potencjał i jego utrzymanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
[15] Pyza D., Jacyna-Gołda I., Gołda P., Gołębiewski P., 2018. Alternative fuels and their impact on reducing pollution of the natural environment. Annual Set The Environment Protection 20, 819–836.

POLITECHNIKA
BYDGOSKA
Wydawnictwa Uczelniane

ISBN 978-83-68285-15-4