

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Nauki techniczne i inżynieryjne

Część V



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2018

Redakcja naukowa

dr inż. Jędrzej Nyckowiak, UPP

dr hab. Jacek Leśny prof. UPP

Wydawca

Młodzi Naukowcy

www.mlodzinaukowcy.com

wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com

ISBN (całość 978-83-65677-93-8)

ISBN (wydanie online 978-83-66139-16-9)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66139-17-6)

Ilość znaków w książce: 412 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 10.3

Data wydania: czerwiec 2018

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów, spis recenzentów zamieszczono na końcu książki. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

Spis treści

1. Dobór współczynnika emisyjności w termowizyjnych pomiarach temperatury złącza diody półprzewodnikowej (cz.1)	7
<i>Dziarski Krzysztof</i>	
2. Dobór współczynnika emisyjności w termowizyjnych pomiarach temperatury złącza diody półprzewodnikowej (cz.2)	14
<i>Krzysztof Dziarski</i>	
3. Badanie wpływu światła na zmiany zachodzące w próbkach RME	21
<i>Grabowski Paweł, Sitkiewicz Marta</i>	
4. Przemysłowe metody prowadzenia procesu transestryfikacji – przegląd	28
<i>Grabowski Paweł, Liberek Oliwia</i>	
5. Warunki transportu węgla drogą morską	36
<i>Kruszelnicka Weronika, Bałdowska-Witos Patrycja</i>	
6. Analiza możliwości wykorzystania wodoru w pojazdach mechanicznych	44
<i>Kruszelnicka Weronika, Bałdowska-Witos Patrycja</i>	
7. Eksperymentalne wyznaczenie częstotliwości drgań własnych elastycznych przewodów mikrohydraulicznych	52
<i>Marek Lubecki</i>	
8. Przemysłowy Internet Rzeczy w monitorowaniu stanu obiektów technicznych	59
<i>Marek Lubecki</i>	
9. Etapy procesu identyfikacji ryzyka	65
<i>Łój-Pilch Magdalena, Zakrzewska Anita, Zielewicz Ewa</i>	
10. Ocena niezawodności sieci wodociągowej	71
<i>Magdalena Łój-Pilch, Anita Zakrzewska</i>	
11. Przegląd i analiza nowoczesnych systemów bezpieczeństwa w pojazdach	78
<i>Piotr Malesa</i>	
12. P-jednostajna wypukłość i q-jednostajna gładkość w przestrzeniach Banacha	87
<i>Markowicz Joanna</i>	
13. Detekcja uszkodzeń izolatorów linii elektroenergetycznej z wykorzystaniem pojazdów UAV	95
<i>Osuchowski Jakub</i>	
14. Diagnostyka farm fotowoltaicznych z wykorzystaniem metod wizyjnych	101
<i>Osuchowski Jakub</i>	
15. Indukcja opony samochodowej - stan wiedzy	106
<i>Agnieszka Szegda</i>	
16. Magnetyzm koła a eksploatacja	113
<i>Agnieszka Szegda</i>	
17. Hydrauliczne układy napędowe w dzielarkach do butek	120
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	
18. Hydrauliczne układy napędowe w miesiarkach do ciasta	128
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	

Przedmowa

Szanowni Państwo, wydawnictwo „Młodzi Naukowcy” oddaje do rąk czytelnika pięć monografii dotyczących nauk technicznych i inżynierskich. W prezentowanych monografiach poruszane jest bardzo szeroki przekrój zagadnień, jednak każda z osobna składa się z kilkunastu rozdziałów, spójnych tematycznie i dających jednocześnie bardzo dobry przegląd tematyki naukowej jaką zajmują się studenci studiów doktoranckich lub ich najmłodszy absolwenci, którzy uzyskali już stopień doktora.

Pierwszą z monografii poświęcono w części rewitalizacji dawnych dworów i pałaców, wiele z nich przez lata funkcjonowało w ramach Państwowych Gospodarstw Rolnych, po ich upadku te, które szybko nie znalazły nowego gospodarza zaczęły popadać w ruinę. Obecnie część z nich, ale głównie duże rezydencje jest przekształcana w obiekty hotelarskie, ale niestety wiele mniejszych wkrótce zamieni się w ruiny, które już nigdy nie odzyskają dawnej świetności. Duża część z tych obiektów kształtowała w przeszłości kanony piękna, w monografii rozważa się rolę piękna w architekturze współczesnej jak i przyciągającą wzrok architekturę Las Vegas.

Druga z monografii traktuje o zagadnieniach technicznych i materiałach wykorzystywanych w produkcji przemysłowej. Znajdziemy tu szereg rozdziałów o produkcji stali, różnego typu stopów, oraz tworzyw sztucznych. Do tych ostatnich zalicza się przykładowo poliaktyd, który należy do grupy tworzyw biodegradowalnych z udziałem mikroorganizmów, ale jego zbyt niskie właściwości wytrzymałościowe ograniczały jego stosowanie. Obecnie cały czas intensywnie pracuje się nad polepszeniem właściwości tego typu materiałów, tak aby spełniały różnego typu wymagania, a jednocześnie w przyszłości ulegały pełnej degradacji.

Trzecia monografia zawiera rozdziały dotyczące efektywności pracy ogniw fotowoltaicznych, analizy sposobów otrzymywania paliw do silników pochodzenia roślinnego oraz opis metod stosowanych w badaniach związanych z ochroną środowiska w tym detekcji węglowodorów. Dodatkowo, część rozdziałów dotyczy zarządzania produkcją, jakością i problematyki optymalizacji.

Czwarta z monografii rozpoczyna się rozdziałami dotyczącymi odnawialnych źródeł energii. Rozważa się tu bezpieczeństwo energetyczne i wpływ OZE na jego zachowanie w skali kraju. Kolejne rozdziały dotyczą roli miejskich centrów logistycznych, których budowa może zmniejszyć ciężarowy ruch w obrębie miasta, co z wielu powodów byłoby niezwykle korzystne. Podobna tematyka poruszana jest w aspekcie funkcjonowania komunikacji nocnej na przykładzie Krakowa oraz komunikacyjnej dostępności ważnych miejsc w miastach.

W ostatniej, piątej monografii poruszono techniczne zagadnienia związane z pomiarami laboratoryjnymi. Ponadto. W kilku rozdziałach zajmowano się sposobami wykrywania uszkodzeń i oceny ryzyka w różnego typu sieciach przesyłowych. Analizowano tu sieci wodociągowe wraz z oczyszczalnią ścieków oraz linie elektroenergetyczne. W pierwszym przypadku trudno o bezpośredni monitoring, natomiast analiza dokumentów i dotychczas występujących usterek może posłużyć do oceny ryzyka i niezawodności tego typu sieci. Dla linii elektroenergetycznych oraz paneli fotowoltaicznych analizowano możliwości ich oceny wizualnej za pomocą dronów i specjalistycznego oprogramowania, które w sposób automatyczny może rozpoznawać uszkodzenia.

Powyżej przedstawiłem tylko wybrane zagadnienia poruszane w pięciu monografiach z zakresu nauk technicznych i inżynierskich. Czytelnikom życzę wielu przemyśleń związanych z tematyką zaprezentowanych prac badawczych. Ja uważam, że doktoranci i młodzi badacze z pasją i bardzo profesjonalnie podchodzą do swojej pracy, a doświadczenie jakie nabierają publikując prace w monografiach wydawnictwa Młodzi Naukowcy, pozwoli im udoskonalać swój warsztat pracy.

dr hab. Jacek Leśny
prof UPP

1. Dobór współczynnika emisyjności w termowizyjnych pomiarach temperatury złącza diody półprzewodnikowej (cz.1)

Selection of emissivity factor in thermovision measurement of semiconductor junction temperature (part 1)

Dziarski Krzysztof

Zakład Metrologii i Optoelektroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński

Dziarski Krzysztof: krzysztof.dziarski@doctorate.put.poznan.pl

Słowa kluczowe: dioda prostownicza, bezkontaktowy pomiar temperatury

Streszczenie

Część pierwsza – cel i metodyka przeprowadzonych prac badawczych, parametry badanych elementów oraz budowa układu pomiarowego. W artykule zaproponowano metodę doboru wartości współczynnika emisyjności ε umożliwiającej wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej zamkniętej w obudowie przeznaczonej do montażu powierzchniowego (SMD). W przeprowadzonych badaniach użyto diod podwójnych BAS40-06 DIO oraz 1PS300.115 zamkniętych w obudowach SOT-23 i SOT-323. Przedstawiono cel przeprowadzonych badań i omówiono metodykę zastosowaną w przeprowadzonych pracach badawczych. Dodatkowo przedstawiono szczegółowe parametry diod użytych w przeprowadzonych badaniach. Omówiono zależność wiążącą spadek napięcia na badanych złączach półprzewodnikowych UF i temperaturę złącza ϑ_j . Przedstawiono skonstruowany układ pomiarowy.

1. Wstęp

W trakcie wykonywania układów elektronicznych ważną informacją jest temperatura poszczególnych elementów, zwłaszcza złącz półprzewodnikowych. W przypadku dużych elementów przyłożenie czujnika temperatury do obudowy nie spowoduje znaczącej zmiany jej temperatury. W przypadku elementów zamkniętych w obudowach przeznaczonych do montażu powierzchniowego (SMD) sytuacja jest odmienna. Z uwagi na niewielkie wymiary elementu (rzędu milimetrów) przyłożenie czujnika do obudowy może spowodować znaczącą zmianę jej temperatury. Dodatkowo w przypadku tak małych elementów nie jest możliwe uzyskanie właściwego połączenia termicznego pomiędzy obiektem i czujnikiem. Dlatego w przypadku pomiaru temperatury elementów przeznaczonych do montażu powierzchniowego metoda stykowa jest nieskuteczna. Skutecznym sposobem wykonania pomiaru temperatury tych niewielkich elementów może być obserwacja termowizyjna (Dziarski, Wiczyński 2017). Użycie tej bezstykowej metody powoduje wyeliminowanie problemów związanych z wpływem czujnika na temperaturę elementu oraz z uzyskaniem właściwego połączenia termicznego. Z uwagi na specyfikę pomiarów termowizyjnych w celu uzyskania poprawnego wyniku konieczna jest znajomość m.in. wartości współczynnika emisyjności będącego stosunkiem natężenia promieniowania obserwowanego obiektu do natężenia promieniowania ciała czarnego znajdującego się w tej samej temperaturze (Minkina 2004). Wartość błędu pomiaru temperatury wynikającego z niewłaściwego doboru współczynnika emisyjności zwiększa się wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy poprawną i dobraną wartością współczynnika emisyjności. Należy wspomnieć, że większość ciał (w tym obudowy SMD) to ciała promieniujące selektywnie. W przypadku ciał promieniujących selektywnie (w przypadku których kształt widma ulega zmianie) wartość współczynnika emisyjności jest funkcją temperatury. W celu zapewnienia najmniejszej różnicy pomiędzy wartością rzeczywistą i zmierzoną temperatury elementu należałoby zmieniać wartość współczynnika emisyjności wielokrotnie w trakcie trwania pomiarów zgodnie z charakterystyką $\varepsilon=f(\vartheta)$. W praktyce wielokrotna zmiana nastawy wartości współczynnika emisyjności w trakcie trwania pomiarów jest uciążliwa. Z tego powodu przeprowadzono badania mające na celu zaproponowanie sposobu doboru wartości współczynnika emisyjności. Uzyskano

w ten sposób taki dobór wartości współczynnika emisyjności, by wartość błędu wynikającego z jej nastawy była możliwie najmniejsza.

2. Metodyka doboru współczynnika emisyjności obudowy

Dobór takiej wartości współczynnika emisyjności, aby wartość błędu spowodowanego jego nastawą była najmniejsza, pozwala na wykonanie wiarygodnego pomiaru temperatury złącza diody półprzewodnikowej. Z kolei wiarygodny pomiar temperatury złącza pozwala na taką eksploatację diody, by złącze nie uległo termicznemu uszkodzeniu. Poszukiwanie wartości współczynnika emisyjności pozwalającego na wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej przeprowadzono w pięciu etapach:

- wybór diod półprzewodnikowych
- wyznaczenie zależności napięcia przewodzenia od temperatury złącza $\mathcal{G}_j=f(U_F)$ wybranych złącz diod półprzewodnikowych
- termowizyjne obserwacje rozkładu temperatur na powierzchni obudów badanych diod przy zmiennej wartości współczynnika emisyjności
- analiza otrzymanych zależności zmian współczynnika emisyjności w funkcji temperatury złącza $\varepsilon=f(\mathcal{G}_j)$
- termowizyjne obserwacje rozkładu temperatur na powierzchni obudów badanych diod przy stałej wartości współczynnika emisyjności (ε)

W przeprowadzonych pracach badawczych używano diod podwójnych (dwa złącza półprzewodnikowe zamknięte w jednej obudowie). Jedno ze złącz zostało użyte do pomiaru temperatury we wnętrzu obudowy. Wartość temperatury wewnątrz obudowy wyznaczano na podstawie spadku napięcia U_F na tym złączu półprzewodnikowym za pomocą otrzymanej wcześniej charakterystyki $\mathcal{G}_j=f(U_F)$. Przyjęto, że wyznaczona w ten sposób wartość temperatury złącza \mathcal{G}_j jest wartością poprawną. W trakcie trwania badań dokonano termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy \mathcal{G}_c . Temperatura wyznaczona za pomocą termowizji została odniesiona do temperatury wyznaczonej na podstawie spadku napięcia na złączu półprzewodnikowym. Porównując obie wyznaczone wartości temperatur określono różnicę pomiędzy wartością temperatury złącza a wartością temperatury obudowy przy danej nastawie współczynnika emisyjności.

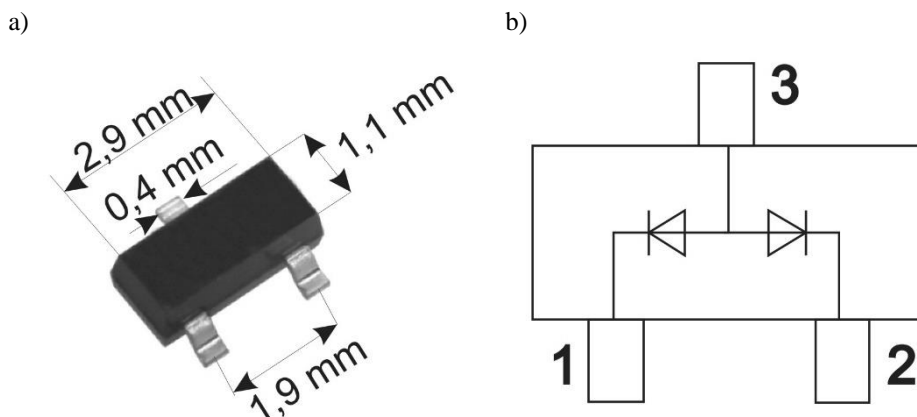
3. Wybór diod półprzewodnikowych

W trakcie planowania eksperymentu zdecydowano się na użycie diod podwójnych zamkniętych w obudowach przeznaczonych do montażu powierzchniowego SMD (Surface Mounted Devices). Użycie takich diod pozwoliło na jednoczesne zadawanie temperatury jednego złącza (za pomocą prądu płynącego przez to złącze) i pomiar temperatury wnętrza obudowy za pomocą spadku napięcia na drugim ze złącz. Założono, że oba złącza półprzewodnikowe zostały umieszczone na jednej płycie półprzewodnikowej lub że w przypadku umieszczenia obu złącz na różnych fragmentach półprzewodnika oba złącza znajdują się na tyle blisko, że rezystancja termiczna pomiędzy złączami nie powoduje znaczącej różnicy temperatur obu złącz (wartości temperatur obu złącz są zbliżone). Mając na uwadze powyższe założenia wybrano diodę BAS 40-06 DIO zamkniętą w obudowie SOT - 23 oraz diodę 1PS300.115 zamkniętą w obudowie SOT-323.

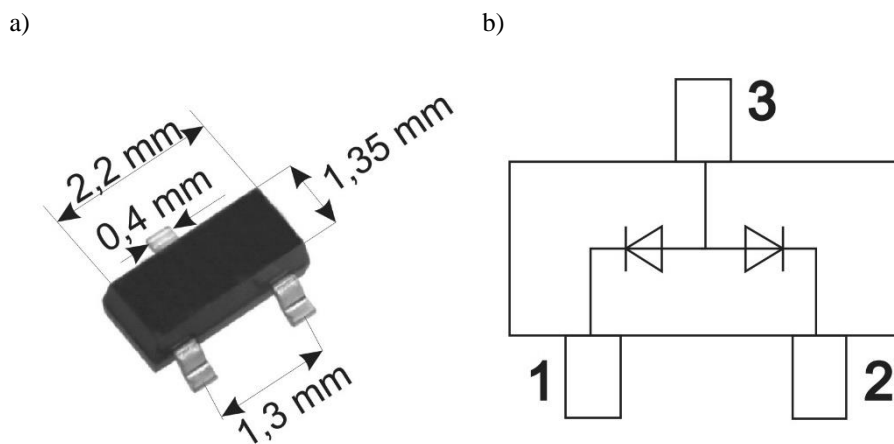
Podstawowe dane katalogowe diody BAS40-06DIO (Diodtec Semiconductor 2017):

- maksymalne napięcie wsteczne: 40 V
 - maksymalny ciągły prąd przewodzenia: 200 mA
 - maksymalna temperatura złącza: 150 °C
 - rezystancja termiczna złącze-otoczenie: < 400 K/W
 - napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 1mA: 380 mV
 - napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 10 mA: 500 mV
- Podstawowe dane katalogowe diody 1PS300.115 (Nexperia 2017):
- maksymalne napięcie wsteczne: 85 V
 - maksymalny ciągły prąd przewodzenia: 200 mA

- maksymalna temperatura złącza: 150 ° C
- rezystancja termiczna złącze-otoczenie: 415 K/W
- napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 1mA: 610 mV
- napięcie przewodzenia dla prądu przewodzenia 10 mA: 740 mV



Rys. 1. Widok i wymiary obudowy SOT 23 (a) , oraz układ połączeń diody BAS 40 – 06 DIO (b) (Diodtec Semiconductor 2017).

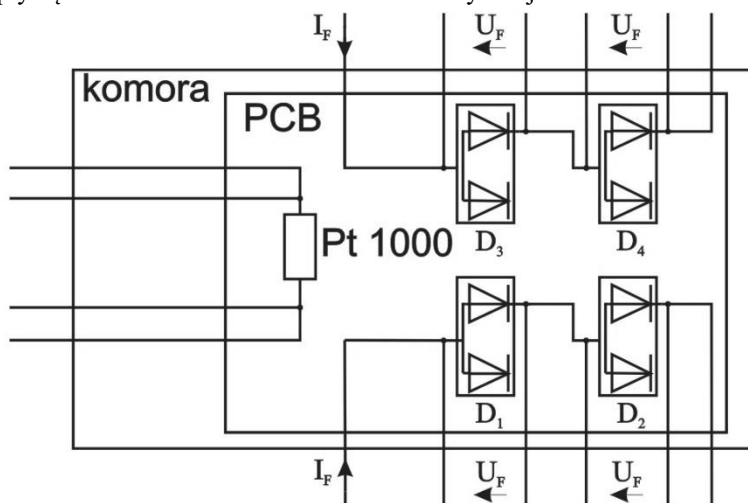


Rys. 1. Widok i wymiary obudowy SOT 323 (a) , oraz układ połączeń diody BAS 40 – 06 DIO (b) (Nexperia 2017).

4. Wyznaczanie zależności napięcia przewodzenia od temperatury złącza $U_F = f(\theta_j)$.

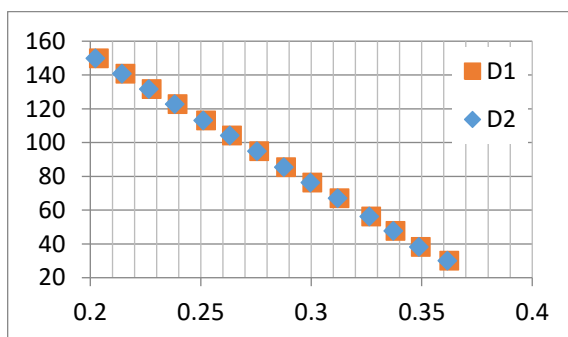
Spośród diod zamkniętych w obu typach obudowy wybrano losowo po dwie diody z każdego typu. Wybrane elementy zostały umieszczone na jednej płytce PCB, w taki sposób, by złącza służące do pomiaru temperatury we wnętrzu obudowy były połączone szeregowo. Dodatkowo na przygotowanej płytce umieszczono czujnik temperatury PT1000 zasilony zgodnie z zaleceniem producenta prądem pomiarowym o natężeniu 100 μ A. Jest to wartość natężenia prądu, przy której nie występuje samonagrzewanie czujnika. Brak widocznego podgrzania obudowy przy tej wartości natężenia prądu potwierdzono eksperymentalnie. Poprzez użycie czteroprzewodowej konfiguracji

połączeń zminimalizowano wpływ rezystancji doprowadzeń na wynik pomiaru temperatury. Tak przygotowaną płytkę PCB umieszczono w komorze klimatycznej.

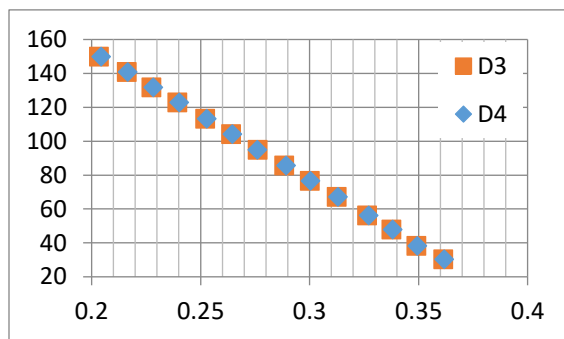


Rys. 3. Schemat układu pomiarowego. D₁, D₂ – BAS 40-06 DIO. D₃, D₄ – 1Ps300.115.

Każde ze złącz pomiarowych służących do pomiaru temperatury we wnętrzu obudowy zostało zasilone przez specjalnie skonstruowane źródło prądowe o wartości 100 μ A. Wartość tę wyznaczono na podstawie wcześniejszej obserwacji termowizyjnej badanych obudów jako natężenie prądu niepowodujące widocznego podgrzania obudowy. Należy wspomnieć, że dobrana wartość natężenia prądu nie powodowała również znaczących spadków napięcia na przewodach łączących badane elementy z miernikami. Wartość spadku napięcia U_F na każdym ze złącz mierzono za pomocą multimetru Agilent 34401. Źródła prądowe i multimetr zostały umieszczone poza komorą klimatyczną. Schemat połączeń został przedstawiony na rys. 3. Zmieniając zakres temperatur w komorze od 30 $^{\circ}$ C do 160 $^{\circ}$ C. Rejestrowano wartości spadków napięcia uzyskanych przy danej wartości temperatury. Założono, że po odpowiednio długim czasie (dłuższym niż 45 minut) temperatura wnętrza komory \mathcal{G}_k jest równa temperaturze we wnętrzu obudowy \mathcal{G}_u i temperaturze złącza \mathcal{G}_j . Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na Rys 4 i 5. Z uwagi na wysoką temperaturę wnętrza komory w układzie pomiarowym zastosowano silikonowe przewody wysokotemperaturowe SIF. Ze względu na czasochłonność procesu wynikającą z dużej bezwładności cieplnej zadano 13 wartości temperatury wnętrza komory \mathcal{G}_k . Z uwagi na opisywaną w literaturze (Hauser 2006) liniowość charakterystyki $U_F = f(\mathcal{G}_j)$ uznano, że wyniki otrzymane przy tej liczbie zadanych wartości temperatur \mathcal{G}_k pozwolą na wystarczająco dokładne odwzorowanie prostej przechodzącej przez otrzymane punkty.



Rys.4. Wyznaczone zależności $\mathcal{G}_j = f(U_F)$ z naniesionymi wykresami funkcji aproksymujących dla diod BAS 40-06 DIO.



Rys.5. Wyznaczone zależności $G_j=f(U_F)$ z naniesionymi wykresami funkcji aproksymujących dla diod 1PS300.115.

Równanie prostej otrzymano za pomocą aproksymacji funkcją liniową $G_j = aU_F + b$. Współczynniki równań obliczono oddzielnie dla każdego z badanych złącz. Obliczone wartości tych współczynników przedstawiono w tabeli 1.

Tab.1. Otrzymane współczynniki funkcji aproksymujących.

l.p	Oznaczenie	Dioda	a [°C/V]	b[°C]
1	D1	BAS40-06 DIO	-760,90	305,04
2	D2	BAS40-06 DIO	-757,15	303,13
3	D3	1PS 300.115	-763,75	305,60
4	D4	1PS 300.115	-765,15	306,54

5. Układ pomiarowy przeznaczony do obserwacji termowizyjnych

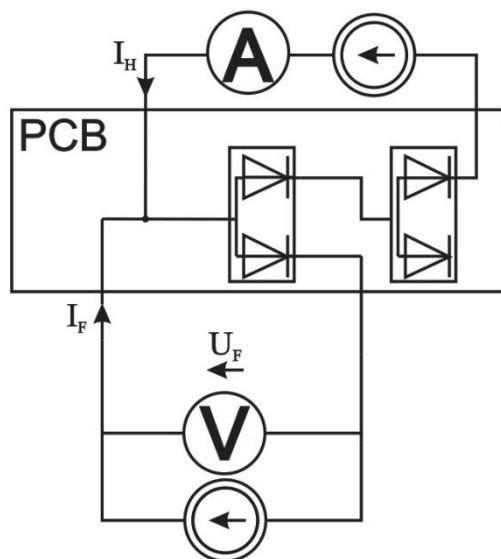
W celu wyznaczenia wartości współczynnika emisyjności ε umożliwiającej wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej konieczne było skonstruowanie odpowiedniego układu pomiarowego. Układ pomiarowy powinien umożliwić termowizyjną obserwację elementów o wymiarach przedstawionych na rys. 1 i 2. Jego najważniejszym elementem była kamera termowizyjna Flir E50 wyposażona w dodatkowy obiektyw Close 2x. Poniżej przedstawiono parametry użytej kamery (Flir 2017):

- zakres widmowy: 7,5 μ m - 13 μ m,
- rozdzielczość: (240 x 180) pikseli,
- zakresy mierzonej temperatury: -20°C do 120°C lub 0°C do 650°C,
- dokładność: \pm 2°C lub \pm 2% odczytu,
- FOV: 25° x 19°,
- minimalna ogniskowa: 0,4 m,
- wartość F: 1,3.

Skonstruowany układ pomiarowy zawierał także zestaw mierników i dwa regulowane źródła prądowe. Jedno z nich powodowało wymuszenie prądu o wartości około 100 μ A (I_F). Był to prąd przepływający przez złącze, za pomocą którego wyznaczano wartość temperatury we wnętrzu obudowy. Wystarczająco dokładna wartość prądu I_F była dostosowana do każdego ze złącz. Dostosowanie polegało na dokładnym wymuszeniu takiej wartości prądu I_F , przy której wyznaczono indywidualną charakterystykę $G_j = f(U_F, I_F=\text{const})$ danego złącza. Zależnie od złącza wystarczająco dokładne wartości prądu I_F różniły się o kilka μ A. Precyzyjne wymuszenie prądu I_F było konieczne ze względu na właściwość złącza półprzewodnikowego. Zadanie prądu o natężeniu różnym od natężenia, przy którym wyznaczono charakterystykę $G_j=f(U_F)$ dla danego złącza półprzewodnikowego spowodowałoby wykorzystanie do wyznaczenia temperatury złącza innej charakterystyki $G_j=f(U_F)$. W konsekwencji wykonano błędny pomiar temperatury złącza G_j . Drugie źródło o zmiennej wartości prądu wyjściowego I_H służyło do zadawania temperatury we wnętrzu

obserwowanej obudowy \mathcal{G} . Ważnym elementem układu był specjalnie skonstruowany statyw umożliwiający zamocowanie używanej kamery termowizyjnej nad badanymi diodami. Dzięki zastosowaniu śrub mikrometrycznych możliwe było precyzyjne ustalenie odległości dzielącej obserwowaną obudowę od obiektywu. Odległość ta była dobierana dla każdej z obserwowanych obudów. Było to istotne z uwagi na niewielką głęboką ostrości. Zmiana odległości za pomocą śruby mikrometrycznej wynosząca około 0,5 mm już powodowała opisaną w literaturze (Rudkowski 1978) pogorszenie ostrości obrazu i znacznie utrudniała obserwację. Dodatkowo statyw wyposażono w stolik precyzyjny pozwalający regulować kąt pomiędzy płaszczyznami wyznaczonymi przez badaną obudowę i soczewkę obiektywu. Schemat stanowiska pomiarowego oraz zdjęcie wykonanego statywu przedstawiono na rys. 6 i 7.

a)



b)



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe z widoczną kamerą, dodatkowym obiektywem, płytką PCB z obserwowanymi diodami oraz odległością pomiędzy diodami i obiektywem ($A \approx 23$ mm)

Dodatkowo statyw wyposażono w stolik precyzyjny pozwalający regulować kąt pomiędzy płaszczyznami wyznaczonymi przez badaną obudowę i soczewkę obiektywu. Schemat stanowiska pomiarowego oraz zdjęcie wykonanego statywu przedstawiono na Dodatkowo statyw wyposażono w stolik precyzyjny pozwalający regulować kąt pomiędzy płaszczyznami wyznaczonymi przez badaną obudowę i soczewkę pomiędzy

6. Podsumowanie

W artykule zaproponowano czynności pozwalające na dobór wartości współczynnika emisyjności ϵ umożliwiającej wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej. Do przeprowadzenia prac badawczych wybrano podwójne diody półprzewodnikowe BAS 40-06 DIO oraz 1PS300.115. Dla wybranego złącza każdej z diod wyznaczono indywidualną charakterystykę $U_F = f(\mathcal{G})$. Można stwierdzić, że na podstawie spadku napięcia na złączu za pomocą wyznaczonej charakterystyki możliwe jest wyznaczenie temperatury złącza półprzewodnikowego \mathcal{G} znajdującego się we wnętrzu obudowy. Założono, że jest to poprawna wartość temperatury złącza. Warto pamiętać, że do wyznaczenia temperatury złącza należy użyć indywidualnej charakterystyki wyznaczonej dla danego złącza. W przeciwnym wypadku uzyskana wartość temperatury złącza może okazać się

błędna. Współczynniki równań opisujących zależność $\mathcal{G}_j=f(U_F)$ każdego ze złącz różnią się. Jest to spowodowane indywidualnymi właściwościami złącz wynikającymi z różnej budowy kryształów krzemu użytych do ich wykonania. Omawiane różnice są również spowodowane błędami pomiarowymi, którymi obciążone są wykonane pomiary temperatury i spadków napięć. Z uwagi na parametry (głównie zakres spektralny i rozdzielczość matrycy detektorów) użyta kamera termowizyjna pozwoli na obserwacje elementów o wymiarach przedstawionych na rys. 1 i 2. Należy jednak pamiętać o dołączeniu dodatkowego obiektwu. Bardzo ważne jest również zachowanie odpowiedniej odległości pomiędzy obiektywem i obserwowaną diodą oraz wyznaczenie odpowiedniego kąta pomiędzy płaszczyznami wyznaczonymi przez obserwowaną diodę i obiektyw. W trakcie obserwacji termowizyjnych należy wymusić dokładnie taką wartość prądu pomiarowego I_F , przy której wyznaczano charakterystykę $\mathcal{G}_j = f(U_F, I_F = \text{const})$ złącza zamkniętego w obserwowanej obudowie. W przeciwnym wypadku zostanie określona błędna wartość temperatury złącza. Spowoduje to odniesienie temperatury wyznaczonej za pomocą termowizji do niewłaściwej temperatury złącza. Uniemożliwi to dobór współczynnika emisyjności ε pozwalającej na wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej.

7. Bibliografia

Diodtec Semiconductor, Karta katalogowa BAS40-06 DIO

Dostęp: www.tme.eu/pl/Document/c8b66a44b24a6d3276e8814b54124b5f/bas40.pdf
[5.12.2017]

Dziarski Krzysztof, Wiczyński Grzegorz. 2017 Poznań University of Technology Academic Journals, Termowizyjny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej: Poznań University of Technology Academic Journals, Issue 92, s. 295-305.

Flir, Instrukcja kamery E50 Dostęp: <http://kameryir.com.pl> [9.02.2017]

Hauser Jacek, 2006, *Elektrotechnika podstawy elektrotermii i techniki świetlnej*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej

Minkina Waldemar, 2004, *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*, Częstochowa, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej

Nexperia, Karta katalogowa 1PS300.115

Dostęp: www.tme.eu/pl/Document/c48042aa327806fdd6d8cf57a52323dc/1PS300.pdf [5.12.2017]

Rudkowski Grzegorz, 1978, *Termowizja i jej zastosowanie*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności

2. Dobór współczynnika emisyjności w termowizyjnych pomiarach temperatury złącza diody półprzewodnikowej (cz.2)

The choice of emissivity factor in thermovision temperature measurement of silicone junction (part 2)

Krzysztof Dziarski

Zakład Metrologii i Optoelektroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński

Krzysztof Dziarski: krzysztof.dziarski@doctorate.put.poznan.pl

Słowa kluczowe: dioda półprzewodnikowa, termowizja, temperatura, pomiary

Streszczenie

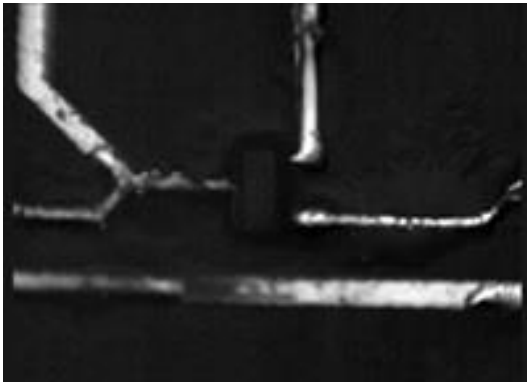
W części pierwszej artykułu (Dziarski 2018) przedstawiono cel i metodykę przeprowadzonych prac badawczych, parametry badanych elementów oraz budowę układu pomiarowego. Ponadto omówiono zależność wiążącą spadek napięcia na badanych złączach półprzewodnikowych U_F i temperaturę złącza \mathcal{G} . W niniejszej części drugiej artykułu przedstawiono termowizyjne obserwacje rozkładu temperatury na powierzchni obudów badanych diod, analizę otrzymanych zależności zmian współczynnika emisyjności w funkcji temperatury złącza $\varepsilon=f(\mathcal{G}_j)$, wnioski dotyczące otrzymanych wyników oraz dobór wartości współczynnika emisyjności ε pozwalającej na wystarczająco wiarygodny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w celu wyznaczenia współczynnika emisyjności ε . W badaniach użyto diod podwójnych BAS40-06 DIO oraz 1PS300.115 (Nexperia 2017 i Diodtec Semiconductor 2017), zamkniętych w obudowach (odpowiednio) SOT-23 i SOT-323. Przedstawiono związek pomiędzy temperaturą obudowy \mathcal{G}_c zmierzoną za pomocą termowizyjnie i temperaturą złącza \mathcal{G}_j wyznaczoną za pomocą indywidualnej charakterystyki $U_F = f(\mathcal{G}_j, I_F = \text{const})$. Dodatkowo zaprezentowano szczegółowy sposób wyznaczania zależności $\varepsilon=f(\mathcal{G}_j)$. Omówiono sposób doboru wiarygodnej wartości współczynnika emisyjności ε dla obu obudów oraz konsekwencje wykonania pomiaru wartości temperatury złącza za pomocą termowizji przy niepoprawnie wyznaczonej wartości współczynnika emisyjności ε .

1. Wprowadzenie

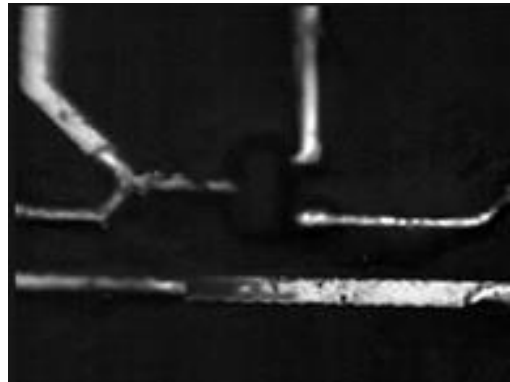
W trakcie eksploatacji elementów zawierających złącza półprzewodnikowe warto znać temperaturę wykorzystywanych złącz. Przekroczenie dopuszczalnej wartości temperatury złącza \mathcal{G}_j może spowodować jego nieodwracalne termiczne uszkodzenie. Uszkodzenie złącza półprzewodnikowego może skutkować nieprawidłowym działaniem układu, w skład którego wchodzi element zawierający to złącze. Warto pamiętać, że złącza półprzewodnikowe pracujące przy maksymalnych dopuszczalnych wartościach temperatury mają krótszy czas eksploatacji. W przeprowadzonych badaniach zdecydowano się na wyznaczenie wartości temperatury złącza półprzewodnikowego na podstawie wartości temperatury obudowy. Temperaturę obudowy wyznaczano metodą termowizyjną. Zastosowanie tej bezkontaktowej metody pozwoliło na wyeliminowanie problemów związanych z pomiarem wartości temperatury przy zastosowaniu czujnika przyłożonego bezpośrednio do obudowy. Niestety, wykorzystanie tej metody spowodowało konieczność rozwiązania innego problemu. Wykonanie wiarygodnego termowizyjnego pomiaru temperatur wymaga znajomości współczynnika emisyjności ε obserwowanej powierzchni. W przypadku obu obudów (SOT-23 i SOT-323) wartość współczynnika emisyjności ε nie jest znana. Błędny dobór współczynnika emisyjności ε powoduje, że zmierzona wartość temperatury może w skrajnym przypadku różnić się od rzeczywistej wartości nawet o kilkadziesiąt °C. Dodatkowym problemem jest zależność współczynnika emisyjności powierzchni obserwowanej obudowy od kilku czynników. Jako najważniejsze z nich należy wymienić stan obserwowanej obudowy (czysta lub

zabrudzona) oraz wartość jej temperatury. Rzeczywista wartość współczynnika emisyjności zmienia się wraz ze zmianą wartości temperatury obudowy. W rzeczywistości w trakcie pomiarów należałoby dobierać współczynnik emisyjności ε przy każdym pomiarze wartości temperatury. Byłoby to uciążliwe. Ponadto uciążliwością byłaby konieczność analizy rozbudowanych tabel zawierających sugerowane wartości współczynnika emisyjności ε . Zastosowanie takiego podejścia nie zapobiegłoby powstaniu różnic pomiędzy rzeczywistą i zmierzoną wartością temperatury na skutek różnic pomiędzy rzeczywistą i dobraną wartością współczynnika emisyjności ε . Są one nieuniknione (Rudkowski 1978, Minkina 2004). W celu wyeliminowania tej uciążliwości konieczny był dobór stałej wartości współczynnika emisyjności na początku pomiarów. Taki dobór wartości współczynnika emisyjności ε oznacza uzyskanie różnic pomiędzy zmierzoną i rzeczywistą wartością temperatury. Różnice te mogą być szczególnie widoczne w niektórych przedziałach przedziałach wartości rejestrowanej temperatury. Z tego powodu przeprowadzono prace badawcze mające na celu taki dobór wartości współczynnika emisyjności, aby możliwy był wiarygodny pomiar wartości temperatury złącza diody półprzewodnikowej. Wyznaczono zależności $\varepsilon=f(\theta_j)$ dla każdej z obserwowanych obudów. Następnie, analizując otrzymaną zależność, dobierano stałą wartość współczynnika emisyjności.

a)



b)



Rys.1 Termogramy uzyskane przy poprawnej odległości (a) i różnej o 0,5 mm (b).

2. Termowizyjne obserwacje rozkładu temperatury na powierzchni obudów badanych diod przy zmiennej wartości współczynnika emisyjności

Termowizyjne obserwacje rozkładu temperatur na powierzchni obu obudów przeprowadzono za pomocą skonstruowanego wcześniej układu pomiarowego. Z uwagi na parametry zastosowanej kamery, w celu wykonania poprawnych obserwacji konieczne było uzyskanie możliwie największej ostrości obrazu (Flir 2017). Niespełnienie tego warunku mogło spowodować wykonanie pomiaru w niewłaściwym punkcie. Z uwagi na niewielkie wymiary obserwowanych elementów oraz małą głębokość ostrości zastosowanego obiektywu konieczne było dokładne wyznaczenie odległości pomiędzy obserwowanymi obudowami i obiektywem. Odległość ta była wyznaczona doświadczalnie dla obu rodzajów obserwowanych obudów przed rozpoczęciem pomiarów. Nawet niewielka (wynosząca około 0,5 mm) zmiana odległości pomiędzy obiektywem i obserwowanymi diodami powodowała spadek ostrości obrazu. Na rysunku 1 przedstawiono termogramy

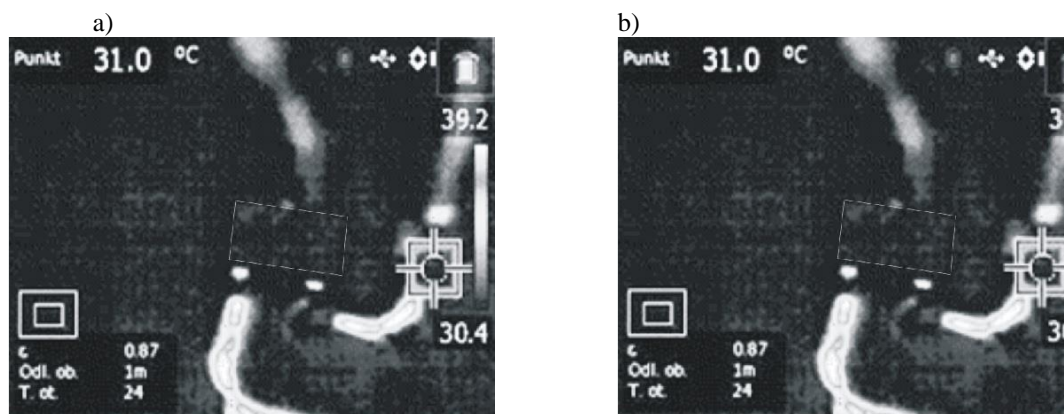
wykonane przy poprawnie wyznaczonej odległości pomiędzy diodami i obiektywem oraz przy odległości zmniejszonej o około 0,5 mm.

W trakcie przeprowadzonych obserwacji należało czekać na ustalenie wartości temperatury we wnętrzu obserwowanej obudowy. W tym celu po wymuszeniu odpowiedniej wartości natężenia prądu przepływającego przez złącze służące do podnoszenia wartości temperatury we wnętrzu obudowy I_H należało poczekać pięć minut. Na podstawie wartości spadków napięcia na złączu

służącym do wyznaczenia wartości temperatury we wnętrzu obudowy U_F wywnioskowano, że w tym czasie zachodzą istotne zmiany wartości temperatury wnętrza obudowy ϑ_a . W ciągu pierwszych trzech minut temperatura we wnętrzu obudowy ϑ_a wzrastała. Następnie w ciągu kolejnych dwóch minut opadała. Rejestrowane wartości spadków napięć świadczą, że w czasie t dłuższym niż pięć minut od chwili wymuszenia wartości prądu grzewczego I_H temperatura złącza wyznaczona za pomocą spadku napięcia na złączu pomiarowym U_F ulega ustaleniu. Nieuwzględnienie tego zjawiska mogło spowodować wyznaczenie błędnej wartości temperatury złącza. Należy wspomnieć, że pomimo deklarowanej przez obu producentów tej samej konfiguracji złącz w przypadku obu typów obudów otrzymano różne rozkłady temperatury. Przykładowe termogramy obrazujące to zjawisko przedstawiono na rys.3.

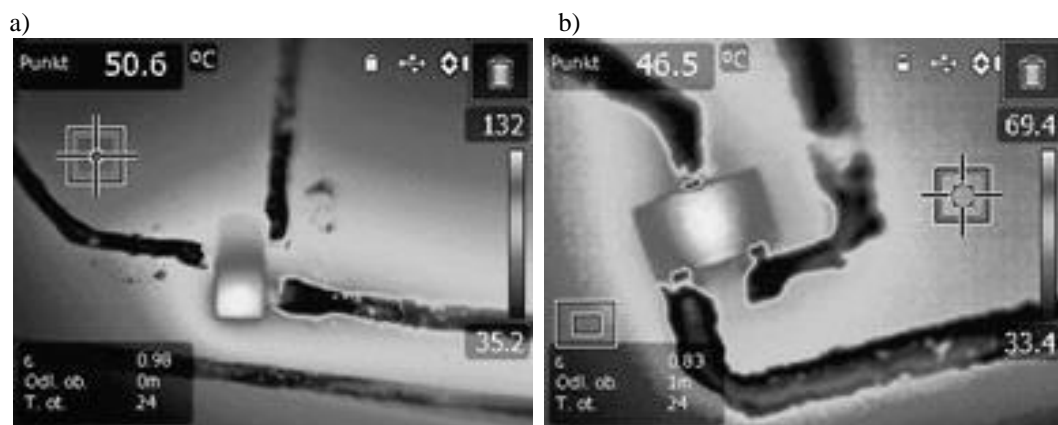
Termogramy przedstawione na rys.2 pokazują rozkład temperatury na powierzchni obudowy SOT- 323 przy $I_F=100 \mu\text{A}$. Dowodzą, że przepływ prądu o tej wartości nie powoduje widocznego podgrzania obudowy. Z tego powodu uznano, że przepływ prądu I_F o tej wartości przez złącze służące do pomiaru wartości temperatury w trakcie trwania badań będzie pomijalny. Z uwagi na mniejsze wymiary obudowy SOT-323 w porównaniu z obudową SOT-23 uznano, że wpływ prądu $I_F=100\mu\text{A}$ będzie pomijalny w przypadku obu obudów.

Na podstawie termogramów przedstawionych na rys. 3 można sądzić, że złącza zamknięte w obudowie SOT-23 zostały umieszczone na różnych płytkach półprzewodnika. Można również domyślać się, że złącza zamknięte w obudowie SOT-323 zostały umieszczone na jednym podłożu półprzewodnikowym. W trakcie przeprowadzonych obserwacji wymuszano różne wartości prądu przepływającego przez złącze służące do podnoszenia wartości temperatury wnętrza obudowy I_H . Wartość prądu I_H była dobierana empirycznie. Po wykonaniu próbnej serii pomiarowej zauważono, że zwiększenie natężenia prądu płynącego przez złącze, wykorzystywane do podnoszenia wartości temperatury we wnętrzu obudowy I_H o 30mA, powoduje wzrost wartości temperatury we wnętrzu obudowy o około 10 °C. Wykorzystanie tego zjawiska pozwoliło na zwiększanie wartości temperatury we wnętrzu obudowy ϑ_a o stałą wartość. Rejestrowane wartości temperatury wnętrza obudowy ϑ_a zmieniły się w zakresie od 27 °C do 158 °C, przy czym najniższa zarejestrowana wartość temperatury była bliska temperaturze otoczenia ($I_H = 0$). Po uzyskaniu zadanej wartości temperatury we wnętrzu obudowy wykonywano termowizyjny pomiar temperatury powierzchni obudowy. Obserwowano ten fragment obudowy, którego temperatura była najbardziej zbliżona z temperaturą złącza ϑ_j . Zbieżność tę stwierdzono na podstawie pomiarów próbnych, powtarzając doświadczenie opisane w literaturze (Dziarski i Wiczyński 2017). Obserwowano te fragmenty obudowy, dla których wartości temperatury wyraźnie się różnią. Wybrano ten fragment, którego wartości temperatury były najbliższe temperaturze złącza ϑ_j . Następnie obserwowano wybrany fragment ponownie zmieniając wartości temperatury złącza ϑ_j od 27 °C do wartości maksymalnej, jaką uzyskano dla danego złącza bez jego uszkodzenia (Rys. 4 i 5).

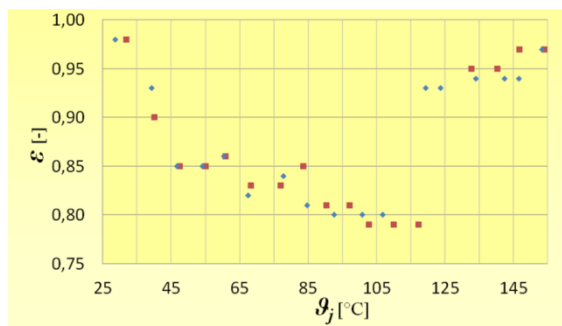


Rys.2 Termogramy obudowy SOT-323 przy $I_F = 0 \mu\text{A}$ (a) oraz $I_F = 100 \mu\text{A}$ (b).

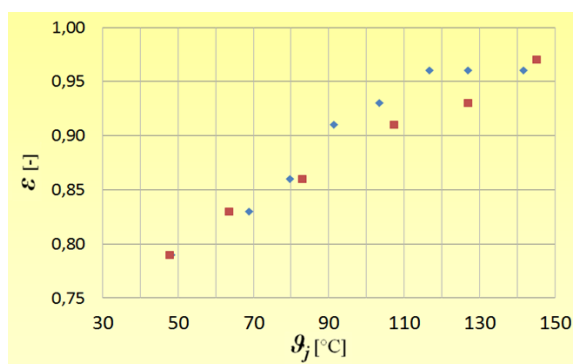
Wartość współczynnika emisyjności ε dobierano w taki sposób, by temperatura wybranego fragmentu obudowy zmierzona termowizyjnie była możliwie najbliższa temperaturze złącza ϑ_j . W ten sposób otrzymano charakterystyki $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ dla wszystkich obserwowanych diod. Wyniki przedstawiono na rys.4. i rys.5



Rys.3 Próbne termogramy obudów SOT-23 przy $I_H = 223$ mA (a) oraz SOT-323 przy $I_H = 112$ mA (b).



Rys.4 Wyznaczone zależności $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ dwóch diod 1BAS40-06DIO(obudowa SOT-23).



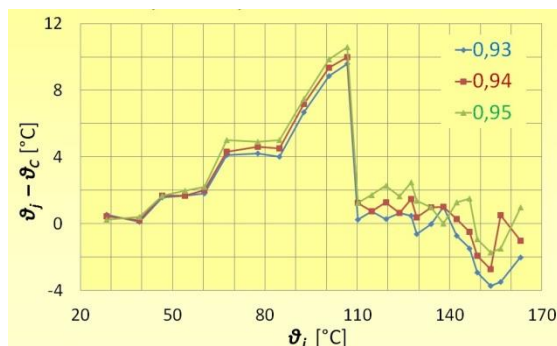
Rys.5 Wyznaczone zależności $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ dwóch diod 1PS300.115 (obudowa SOT-323).

3. Analiza otrzymanych zależności

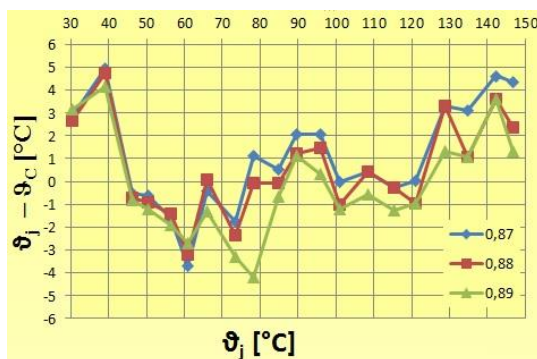
Obserwując wykresy przedstawione na Rys. 4 i Rys.5 można dostrzec, że zależności $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ otrzymane dla obu rodzajów obudów różnią się między sobą. Obserwowane różnice są prawdopodobnie spowodowane odmiennymi właściwościami promiennymi obu rodzajów obudów wyprodukowanych przez różnych producentów. Wartości współczynnika emisyjności ε zarejestrowane dla wartości temperatury bliskiej temperaturze pokojowej ($\vartheta_j \in <20\text{ }^\circ\text{C}; 35\text{ }^\circ\text{C}>$) są niewiarygodne, a więc należy traktować je jako błąd pomiarowy). Jest on spowodowany trudnościami w wiarygodnym wyznaczeniu współczynnika emisyjności ε elementów zamkniętych w obudowach SMD znajdujących się w tym zakresie temperatur. W przypadku diody BAS40-06DIO zaobserwowano silną niemonotoniczność, której przyczyny nie są znane. Aby to wyjaśnić, powstawania prowadzone są dalsze badania. Należy zauważyć, że wykresy otrzymane dla diod tego samego rodzaju pokrywają się. Wszystkie otrzymane zależności wykazują podobieństwo dla najwyższych wartości temperatury złącza ($\vartheta_j > 120\text{ }^\circ\text{C}$).

4. Termowizyjne pomiary wartości temperatury na powierzchni obudów badanych diod przy stałej wartości współczynnika emisyjności ε

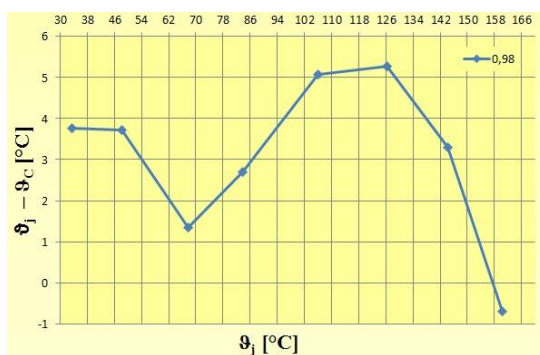
Po analizie zależności $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ otrzymanych dla każdego ze złącz postanowiono dobrać wartość współczynnika emisyjności ε tak, by możliwy był wystarczająco wiarygodny pomiar temperatur bliskich maksymalnej temperaturze złącza ($\vartheta_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$) pozwala zapobiec termicznemu uszkodzeniu złącza. Dobór stałej wartości współczynnika emisyjności ε spowoduje, że najbliższe rzeczywistej wartości temperatury będą te wartości, które zostały zmierzone przy współczynniku emisyjności ε najbliższym rzeczywistej wartości współczynnika emisyjności obserwowanej obudowy. W innych punktach różnice pomiędzy rzeczywistą i zmierzoną wartością temperatury będą zależne od różnicy pomiędzy rzeczywistą i dobraną wartością współczynnika emisyjności. Z uwagi na charakter zależności $\varepsilon=f(\vartheta_j)$ pokazanych na rys. 4 i 5 należało się spodziewać, że przy doborze stałej wartości współczynnika emisyjności ε wartości temperatury zmierzonych za pomocą metodą termowizyjną będą bliskie wartościom poprawnym jedynie w niektórych przedziałach. W celu określenia różnic pomiędzy temperaturą obudowy zmierzoną za pomocą termowizji z dobraną stałą wartością współczynnika emisyjności ε i temperaturą złącza ϑ_j wyznaczoną za pomocą indywidualnej charakterystyki $U_T=f(\vartheta_j)$, zdecydowano się powtórzyć obserwacje. Jako wartość współczynnika emisyjności ε dobrano wartość zaobserwowaną przy najwyższej zmierzonej wartości temperatury złącza ϑ_j . W przypadku diody BAS40-06 dobrano wartość współczynnika emisyjności $\varepsilon=0,95$, natomiast w przypadku diody 1PS300.115 dobrano $\varepsilon=0,98$. Wartość temperatury obudowy ϑ_c zmierzoną za pomocą termowizji ponownie odniesiono do wartości temperatury złącza ϑ_j . Otrzymane wykresy przedstawiono na rys. 6,7 i 8. W celu pokazania, jak ważny jest prawidłowy dobór współczynnika emisyjności ε , pomiar wartości temperatury dla obu obudów (diody BAS40-06 DIO oraz 1PS300.115) wykonano przyjmując różne wartości współczynnika emisyjności.



Rys.6. Zależności $\vartheta_j - \vartheta_c=f(\vartheta_j)$ dla obudowy SOT-23 (Diody BAS40-06 DIO).



Rys.7. Zależność $\theta_j - \theta_c = f(\theta_j)$ dla obudowy SOT-323 (Diody 1PS300.115).



Rys.8. Zależność $\theta_j - \theta_c = f(\theta_j)$ dla obudowy SOT-323 (Diody 1PS300.115) przy doborze stałej wartości współczynnika emisyjności ε równej wartości zanotowanej przy największej zarejestrowanej temperaturze złącza θ_j .

5. Podsumowanie

Podsumowując niniejszą drugą część artykułu, można stwierdzić co następuje:

- Eksperymentalnie wyznaczona wartość współczynnika emisyjności ε umożliwiająca wystarczająco wiarygodny pomiar wartości temperatury złącza θ_j diody półprzewodnikowej za pomocą termowizji przyjmowała wartości z zakresu 0,70 – 0,98. Tak duży zakres wartości współczynnika emisyjności ε potwierdza niemożność doboru jednej wartości współczynnika emisyjności ε pozwalającej na wystarczająco wiarygodny pomiar temperatury złącza θ_j w całym zakresie pracy diody półprzewodnikowej.
- Analizując zależności $\varepsilon = f(\theta_j)$ oraz $\theta_j - \theta_c = f(\theta_j)$ otrzymane dla diod BAS40-06 DIO (obudowa SOT-23 – rys. 4 i rys.6) można zauważyć, że zgodnie z przewidywaniami, wyniki pomiarów temperatury obudowy θ_c uzyskanych przy dobranym współczynniku emisyjności ε bliskim wartości poprawnej były najbliższe temperaturze złącza θ_j . Wraz ze wzrostem różnicy pomiędzy dobraną i poprawną wartością współczynnika emisyjności wzrasta różnica pomiędzy wynikami pomiarów θ_c i θ_j . Gdy dobrana wartość współczynnika emisyjności ε jest mniejsza od wartości poprawnej, wynik pomiaru θ_c jest wyższy od wartości θ_j .
- W przypadku obu typów diod (BAS40-06 DIO oraz 1PS300.115) najwyższe wartości współczynnika emisyjności ε zaobserwowano przy najwyższej zarejestrowanej temperaturze złącza θ_j . Gdy jako stałą wartość współczynnika emisyjności ε dobrano wartość zaobserwowaną przy najwyższej zarejestrowanej temperaturze złącza, najmniejsze różnice pomiędzy temperaturą obudowy θ_c i temperatura złącza θ_j

obserwowano przy tych wartościach temperatur złącza, które były bliskie wartości maksymalnej.

- Najwyższa zarejestrowana różnica pomiędzy temperaturą obudowy \mathcal{G}_c i temperaturą złącza \mathcal{G}_j wynosiła około 10 °C. Z powodu doboru współczynnika emisyjności ε równego wartości wyznaczonej przy najwyższej zarejestrowanej temperaturze złącza \mathcal{G}_j , wystąpiła ona w zakresie, w którym różnica pomiędzy dobraną i rzeczywistą wartością współczynnika emisyjności ε była największa (dla \mathcal{G}_j zawartego w przedziale od 70°C do 100°C.). Dowodzi to, że dobór stałej wartości współczynnika emisyjności ε odpowiadającej wartości zarejestrowanej przy temperaturze pracy złącza bliskiej najwyższej dopuszczalnej wartości (\mathcal{G}_{jmax}) spowoduje, że wiarygodny będzie jedynie pomiar tych wartości temperatur złącz, które są bliskie wartości maksymalnej. Taki dobór stałej wartości współczynnika emisyjności jest przydatny w przypadku pomiarów temperatury złącza \mathcal{G}_j mających na celu ochronę diody przed uszkodzeniem.
- Otrzymanie dużej rozbieżności wynoszącej 10 °C pomiędzy rzeczywistą i zarejestrowaną wartością temperatur złącz w zakresie od 70°C do 100°C ma mniejsze znaczenie. Niewłaściwy pomiar temperatury złącza w tym zakresie w praktycznych zastosowaniach nie spowoduje niebezpiecznych konsekwencji wynikających z jej przeszacowania.
- Również w przypadku obudowy SOT-323 (dioda 1PS300.115) dobór wartości współczynnika emisyjności ε zarejestrowanego przy najwyższej zmierzonej temperaturze złącza jako stałego współczynnika emisyjności pozwolił na uzyskanie małej różnicy pomiędzy temperaturą obudowy i maksymalną temperaturą złącza (ok. 2 °C).
- Zależność przedstawiona na rys.6 i 7 pokazuje, jak istotny jest prawidłowy dobór wartości współczynnika emisyjności ε . Błąd spowodowany jego nieprawidłowym doбором wzrasta wraz ze wzrostem temperatury obudowy \mathcal{G}_c i osiąga największą wartość przy maksymalnej temperaturze złącza \mathcal{G}_{jmax} . Potwierdza to, że jako stałą wartość współczynnika emisyjności ε należy dobierać wartość zarejestrowaną przy maksymalnej temperaturze złącza.

6. Literatura

Diodtec Semiconductor, Karta katalogowa BAS40-06 DIO Dostęp: www.tme.eu/pl/Document/c8b66a44b24a6d3276e8814b54124b5f/bas40.pdf [5.12.2017]

Dziarski K (2018) Dobór współczynnika emisyjności w termowizyjnych pomiarach temperatury złącza diody półprzewodnikowej (cz.2), 2018 (przyjęto do druku)

Dziarski K, Wiczyński G (2017) Poznań University of Technology Academic Journals: Termowizyjny pomiar temperatury złącza diody półprzewodnikowej. Issue 92: 295-305.

Flir, Instrukcja kamery E50 Dostęp: <http://kameryir.com.pl> [9.02.2017]

Minkina W (2004) Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa

Nexperia, Karta katalogowa 1PS300.115 Dostęp: www.tme.eu/pl/Document/c48042aa327806fdd6d8cf57a52323dc/1PS300.pdf [5.12.2017]

Rudkowski G (1978) Termowizja i jej zastosowanie. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa

3. Badanie wpływu światła na zmiany zachodzące w próbkach RME

Study of the influence of light on changes in RME samples

Grabowski Paweł, Sitkiewicz Marta

Instytut Chemii, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, Płock
Grabowski Paweł: pawel.grabowski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: FAME, utlenianie, magazynowanie, stabilność oksydacyjna

Streszczenie

FAME (ang. Fatty Acid Methyl Esters) – estry metylowe kwasów tłuszczowych są obecnie jednym z najważniejszych odnawialnych paliw ciekłych. Wykorzystuje się je jako ciekłe biopaliwo pierwszej generacji - popularny biodiesel. Ze względu na wiele istotnych kwestii, takich jak: ograniczenie wydobycia i sprzedaży ropy naftowej z przyczyn politycznych, możliwość wyczerpania jej zasobów, a szczególnie mając na uwadze dbałość o środowisko zainteresowano się szukaniem alternatywy dla popularnie stosowanego paliwa, jakim jest olej napędowy. Jednakże, by tak się stało, właściwości fizykochemiczne i użytkowe FAME muszą spełniać szereg wymagań jakościowych. Jest to ważne zarówno w czasie produkcji, jak również podczas eksploatacji i dystrybucji paliwa. Wpływ warunków przechowywania, w szczególności narażenie estrów na duże nasłonecznienie stanowi jeden z czynników negatywnie wpływających na ich właściwości. W pracy zbadano wpływ światła podczas magazynowania próbek FAME w czterech różnych warunkach. Łączny czas od rozpoczęcia do zakończenia badań wynosił 27 tygodni.

1. Wstęp

Estry metylowe kwasów tłuszczowych mają wiele zalet, szczególną uwagę zwraca ich dobra biodegradowalność i pochodzenie ze źródeł odnawialnych, a także możliwość ich produkcji w nieskomplikowanych przydomowych instalacjach. FAME jest paliwem do silników Diesla znajdujących się w maszynach rolniczych, takich jak traktory, czy też kombajny. W związku z powyższym przydomowe instalacje do produkcji RME są coraz częściej spotykanymi instalacjami na polskiej wsi. Poza występowaniem szeregu zalet wynikających z zastosowania FAME w transporcie drogowym, czy też rolnictwie, niektóre czynniki zewnętrzne, na których działanie estry są poddawane, odkrywają ich wady. FAME posiadają słabą stabilność oksydacyjną i nie najlepsze właściwości niskotemperaturowe. Zastosowanie w silnikach o zapłonie samoczynnym w postaci biokomponentu oleju napędowego odsłania wadę, jaką jest emisja szkodliwych związków chemicznych, co powoduje niszczenie silnika (Jakóbiec i Ambrozik 2008). Duża podatność na utlenianie oraz działanie, takich czynników jak światło słoneczne przyspiesza procesy starzenia zachodzące w estrach (Jakóbiec i Ambrozik 2009). W niniejszej pracy dyplomowej podjęto się badania działania światła słonecznego i przechowywania w warunkach bez dostępu światła na estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME), a konkretnie estry metylowe oleju rzepakowego (RME). Rozpatrując różne sposoby przechowywania FAME zauważa się, że bardzo trudne jest zachowanie warunków całkowicie pozbawionych dostępu tlenu i światła słonecznego.

Na świetle utlenianie jest wspierane przez działanie promieni słonecznych. W miejscu pozbawionym dostępu światła może natomiast zachodzić autooksydacja lipidów. Jest ona wolnorodnikową reakcją łańcuchową prowadzącą do wzrostu zawartości reaktywnych wolnych rodników, które zapoczątkowują dalsze reakcje. Okres, w którym tworzenie się nadtlenu jest niewykrywalne lub bardzo małe i nazywa się okresem indukcji. Utlenianie nienasyconego kwasu tłuszczowego określa się często jako reakcję autooksydacyjną, ponieważ poziom i szybkość utleniania wzrasta z trwaniem procesu (Szukalska 2003). Reakcja jest autokatalityczna: produkty utleniania kwasów tłuszczowych jednocześnie przyspieszają jej przebieg.

W fazie początkowej następuje oderwanie cząsteczki wodoru od cząsteczki nienasyconego kwasu tłuszczowego i utworzenie wolnego rodnika, który zawiera ugrupowania dienowe. Dzieje się tak w celu umożliwienia reakcji między lipidami a tlenem tripletowym. Podwyższona temperatura, obecność jonów metali oraz światła przyspieszają proces utworzenia rodników. Inicjację mogą

zapoczątkować rodniki hydroksylowe, nadtlenkowe i alkilowe oraz tlenek i ditlenek azotu. Podczas trwania reakcji propagacji wolne rodniki alkilowe reagują z tlenem dając wolne rodniki nadtlenkowe, a w efekcie nadtlenek kwasu tłuszczowego i inne rodniki tłuszczowe. Rodniki te są katalizatorami w kolejnych reakcjach, dlatego też proces ten określany jest jako wolnorodnikowa reakcja łańcuchowa (Eunok i Min 2006; Gwardiak i in. 2011).

Utlenianie olejów bogatych w wielonienasycone kwasy tłuszczowe jest nieuniknione, nie tylko w wysokich temperaturach. Pierwotne produkty utleniania (wodoronadtlenki i nadtlenki) przekształcane są do nieszkodliwych hydroksykwasów (Maszewska i Krygier 2005).

Cykliczna reakcja może się powtarzać wielokrotnie i doprowadzić do przekształcenia w nadtlenki nawet kilkuset cząsteczek kwasów tłuszczowych. Miejsce, gdzie powstaje nadtlenek uwarunkowane jest m.in. rodzajem kwasu tłuszczowego biorącego udział w oksydacji. Autooksydacja przebiega samoczynnie i spontanicznie do momentu aż wyczerpie się tlen w otoczeniu lub pojawi się specyficzny inhibitor zdolny do przerywania reakcji łańcuchowej i sprzyjający powstawaniu produktów nierodnikowych.

Terminacja może zająć poprzez połączenie się dwóch rodników alkilowych, nadtlenkowych lub dwóch różnych rodników występujących w układzie. Skutkiem wolnorodnikowej reakcji łańcuchowej są przekształcone cząsteczki lipidów. Kolejne przemiany produktów peroksydacji lipidów prowadzą do rozpadu reszt wielonienasyconych kwasów tłuszczowych i powstania bardziej niepożądanych – wtórnych produktów oksydacji, do których należą: aldehydy, ketony oraz kwasy. Oznaczają się one bardzo wysoką aktywnością biologiczną oraz powodują obniżanie stabilności oksydacyjnej tłuszczów.

Z uwagi na fakt, że wymienione czynniki mogą istotnie wpływać na biopaliwo i na reakcje zachodzące w ich obecności, w pracy zdecydowano się badać właśnie zmienność właściwości powodowanych tymi czynnikami. Próbkę przechowywano w miejscu pozbawionym światła oraz w miejscu najbardziej narażonym na działanie promieni słonecznych. W związku z tym oczekuje się, że produkty powstałe podczas przechowywania estrów metylowych oleju rzepakowego w sprzeczowanych wyżej warunkach, odgrywają istotną rolę w kontekście zmiany właściwości RME.

Celem pracy jest analiza zmian zachodzących we właściwościach przechowywanych estrów metylowych oleju rzepakowego, próba wykrycia produktów utleniania, które powstają na skutek zachodzących wówczas przemian oraz na tej podstawie oszacowanie zaawansowania tych zmian.

2. Materiał i Metody

Badaniom poddano estry metylowe oleju rzepakowego (RME) wyprodukowane w jednej z polskich rafinerii. Przed rozpoczęciem badań dwie kolby szklane oraz dwie butelki PET napełniono RME. Przygotowano odczynniki i roztwory potrzebne do okresowego monitorowania zmian zachodzących w próbkach przez założony czas magazynowania. Następnie przystąpiono do przeprowadzenia pierwszych pomiarów świeżego RME. Zbadano parametry, które są istotne z punktu widzenia cech jakościowych oleju rzepakowego, z którego otrzymano estry metylowe. Działaniu światła słonecznego poddawano jedną butelkę PET i jedną szklaną kolbę wypełnione RME, podobnie w ciemnym miejscu bez dostępu światła przechowywano pozostałe dwie próbki. Próbkę oznaczono w następujący sposób:

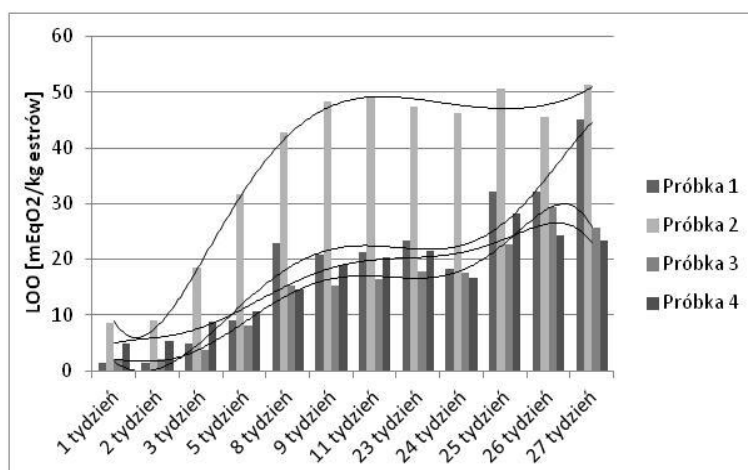
- Próbka 1 – próbka w kolbie szklanej przechowywana bez dostępu światła,
 - Próbka 2 – próbka w kolbie szklanej przechowywana na świetle,
 - Próbka 3 – próbka w pojemniku PET przechowywana bez dostępu światła,
 - Próbka 4 – próbka w pojemniku PET przechowywana na świetle.
- Wpływ działania powietrza i światła oceniono na podstawie:
- zmian liczby nadtlenkowej mierzonej metodą jodometryczną zgodnie z normą PN-ISO 3960:1996,
 - zmian liczby anizydynowej mierzonej zgodnie z normą PN-EN ISO 6885:2008,
 - zmian indeksu barwy mierzonej zgodnie z normą PN-A-86934:1995,
 - zmian lepkości kinematycznej mierzonych zgodnie z normą PN-EN ISO 14214+A1:2014-04,
 - zmian gęstości mierzonych zgodnie z normą PN-EN ISO 3838:2008.

3. Wyniki i dyskusja

W wyniku badań mających na celu określenie zawartości pierwotnych produktów utleniania estrów metylowych oleju rzepakowego, otrzymano liczbę nadtlenkowa badanych próbek. Na rysunku 1 przedstawiono wszystkie uzyskane wyniki.

Wzrost liczby nadtlenkowej nastąpił już w 3 tygodniu przechowywania (od rozpoczęcia badań). Należy zaobserwować, że wyraźny skok pojawia się również w przypadku próbki 4, nie jest on jednak tak wysoki jak w przypadku estrów przechowywanych na świetle w szkle.

Wartość LOO zmieniała się w bardzo szerokim zakresie, uzyskano różnice rzędu 50 mEq O₂/kg RME. Świadczy to o postępujących procesach degradacji kwasów tłuszczowych zawartych w estrach metylowych oleju rzepakowego. Zaobserwowano, że RME zamknięte w kolbie szklanej ustawione w miejscu pozbawionym dostępu światła, miały wielokrotnie niższą zawartość nadtlenków niż estry przechowywane na świetle. Stabilizacja LOO może oznaczać, że wszystkie narażone na utlenianie składniki już przereagowały i pozostały w badanych estrach jako końcowe produkty oksydacji (Jerzewska 1991). Skok liczby nadtlenkowej utożsamiany jest z końcem okresu indukcji, który charakteryzuje się powolną reakcją z tlenem, podczas której powstają nadtlenki. Wówczas zachodzi gwałtowna reakcja, w czasie której powstające nadtlenki ulegają dysocjacji pod wpływem działającego światła (fotodysocjacji), dając w efekcie lotne produkty.



Rys. 1. Zmiana Liczby nadtlenkowej.

W drugim etapie utleniania RME nastąpiła dekompozycja pierwotnych produktów utleniania, w wyniku której tworzyły się związki karbonylowe odpowiedzialne za niepożądane zmiany sensoryczne estrów w badanych próbkach. Analizowane próbki estrów metylowych oleju rzepakowego wykazały wysoki poziom liczby anizydynowej podczas 27 tygodni ich przechowywania co przedstawiono na rysunku 2. Najwyższy osiągnięty poziom liczby anizydynowej uzyskała próbka 2. Wyniósł on 4,46 jednostek w 11 tygodniu od rozpoczęcia badań.

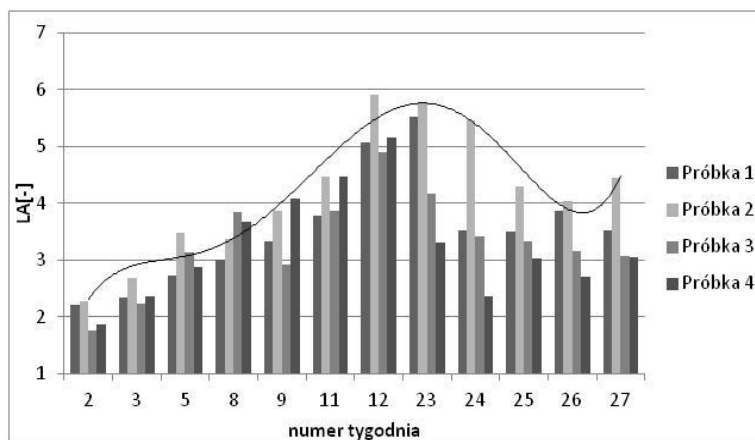
Jak pokazują wartości liczby anizydynowej przedstawione na rysunku 2, największa zmiana wystąpiła w próbkach 2 i 4 między 9 a 11 tygodniem przechowywania (badania).

Wtórne produkty utleniania pojawiły się z opóźnieniem względem pierwotnych produktów utleniania. Ich zawartość nieznacznie zaczęła wzrastać już po pierwszym tygodniu przechowywania. Dla próbek 1 i 3 zawartość aldehydów i ketonów również wzrastała, jednak w znacznie mniejszym stopniu. Co raz wyższa liczba anizydynowa jest związana ze wzrastającą liczbą nadtlenkową. Zmiany wartości LOO i LA w analizowanych próbkach RME postępowały równolegle.

Ocena barwy za pomocą metody spektrofotometrycznej polegała na pomiarze absorbancji próbek estrów metylowych oleju rzepakowego przy dwóch długościach fal w zakresie widzialnym

po ich uprzednim rozpuszczeniu w izooktanie. Odczytane wartości absorbancji zsumowano i wyrażono jako barwa w postaci liczby całkowitej, co ilustrują zamieszczone wykresy.

W celu oznaczenia indeksu barwy posłużono się wartościami absorbancji uzyskanymi podczas rejestrowania widm w zakresie światła widzialnego. Zasada wyznaczenia indeksu barwy polegała na odczytaniu dwóch absorbancji: dla długości fali 442 nm oraz dla 668 nm i przemnożeniu przez współczynnik przeliczeniowy, którego wartość wynosi 1000. Obie wyżej wymienione długości fal stanowią maksima absorpcji w zakresie odpowiednio barwników karotenoidowych oraz barwników chlorofilowych.



Rys. 2. Zmiana liczby anizydynowej.

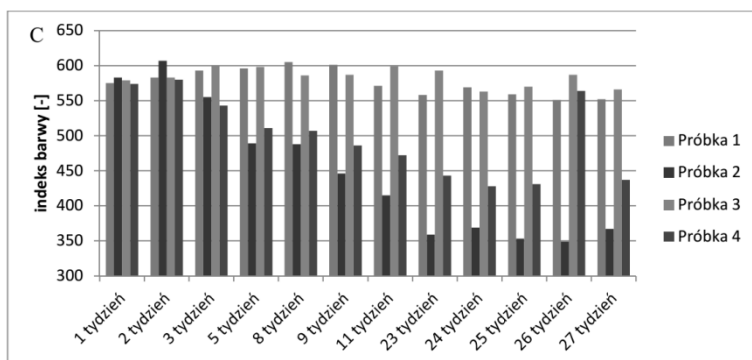
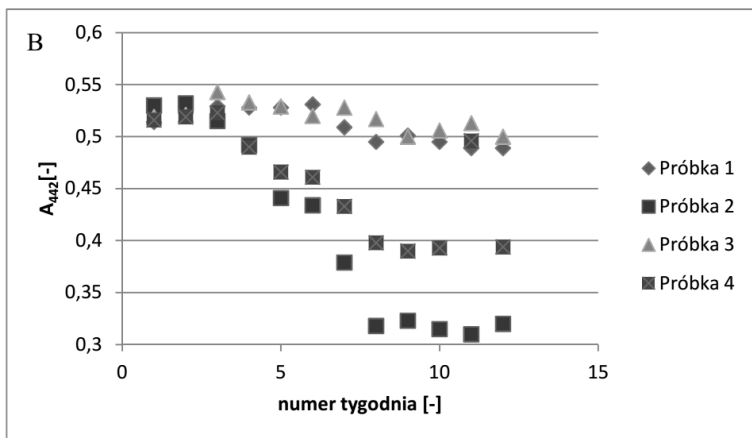
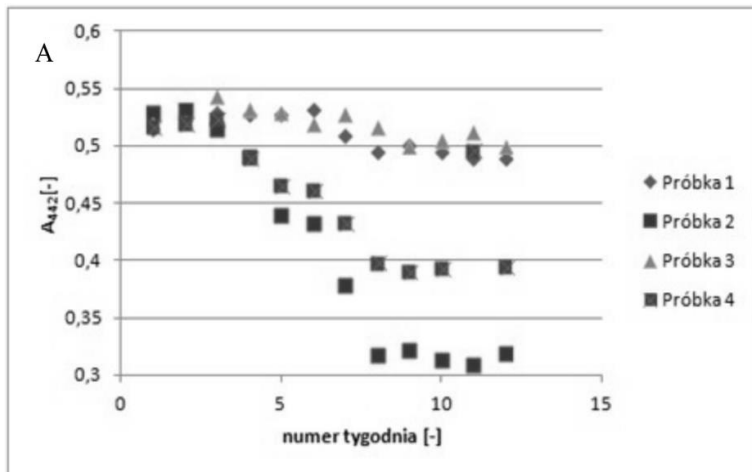
Jak wynika z rysunku 3 największa szybkość zmian barwy miała miejsce w przypadku próbki 2. Porównywalnie zmieniała się barwa RME w próbce 4. Obie te próbki były przechowywane w bezpośrednim działaniu światła. Karotenoidy i chlorofile są to barwniki organiczne. Na wykresach widać, że ich struktury były poddawane silnym modyfikacjom podczas przechowywania. Rysunek 18 przedstawia różnice dla absorbancji przy długości fali 442 nm (A) oraz przy długości 668 nm (B) przez cały czas przeprowadzania badań. Na rysunku 3 przedstawiono trend zmieniającej się barwy określony na podstawie indeksu barwy. W próbkach bez dostępu światła, zarówno przechowywanej w szkle jak i w butelce PET, barwa zmieniała się w niewielkim stopniu, zaś obie próbki narażone na działanie światła zaczęły gwałtownie zmieniać swoją barwę już w 3 tygodniu.

Chlorofil w dużym stopniu absorbuje tlen. Produkty utleniania chlorofilu i tłuszczów w większości są bezbarwne, co może stanowić uzasadnienie dla wizualnego rozjaśnienia próbek przechowywanych na świetle.

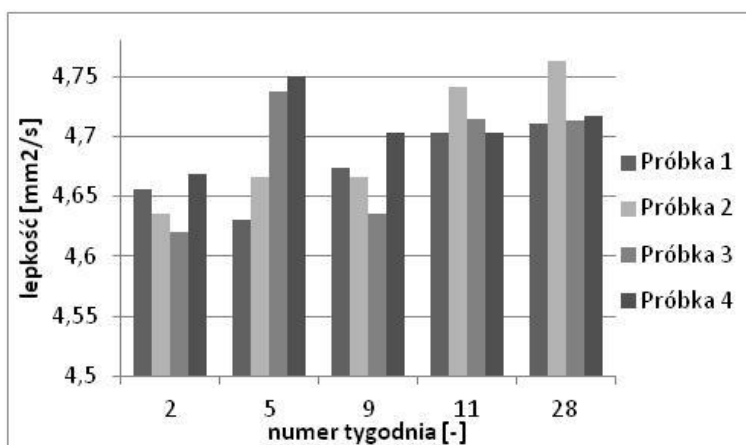
Lepkość we wszystkich czterech próbkach RME wzrosła po całkowitym czasie magazynowania przechowywania próbek. Mogło być to spowodowane zachodzącymi w próbkach reakcjami polimeryzacji składników o charakterze nienasyconym. Lepkość dla próbek przechowywanych na świetle w kolbie szklanej wzrosła najbardziej spośród wszystkich czterech próbek. Największy rozrzut wyników uzyskano dla próbki 3, przez co nie można precyzyjnie scharakteryzować zmian jej lepkości. Zmianę lepkości przedstawiono na rysunku 4.

Wyniki wszystkich przeprowadzonych pomiarów lepkości mieszczą się w zakresie normy 4,5 - 6,1 mm²/s, czyli dopuszczalnej lepkości kinematycznej dla FAME do zastosowań jako biopaliwo zgodnie z normą PN-EN ISO 14214+A1:2014-04.

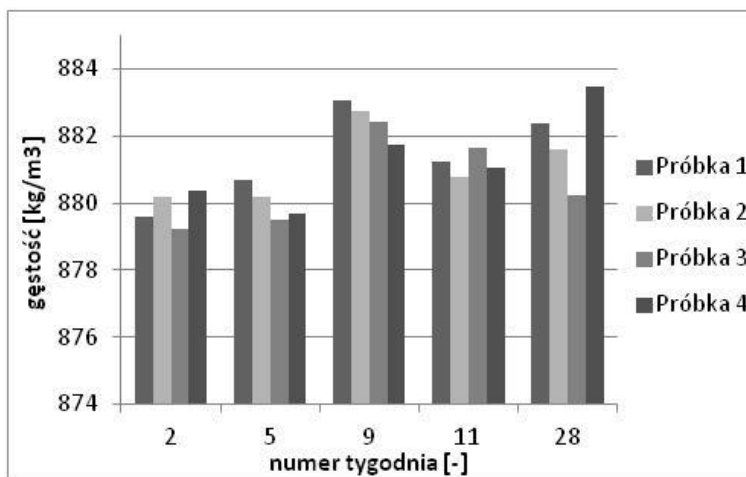
Gęstość nie może stanowić podstawy do oceny zasięgu zmian oksydacyjnych zachodzących w próbkach ze względu na duży rozrzut wyników. Można jednak zaobserwować delikatny wzrost gęstości postępujący z czasem przechowywania we wszystkich 4 próbkach co przedstawiono na rysunku 5. Przez cały czas trwania badań gęstość RME mieściła się w granicach normy PN-EN ISO 14214+A1:2014-04, czyli od 860 do 900 kg/m³.



Rys. 3. Zmiana indeksu barwy, A dla absorbancji przy długości fali 442 nm, B dla absorbancji przy długości fali 668 nm, C zmiana indeksu barwy w czasie przechowywania próbek.



Rys. 4. Zmiana lepkości w poszczególnych tygodniach badań.



Rys. 5. Zmiana gęstości.

4. Wnioski

RME zamknięte zarówno w kolbie szklanej, jak i w butelce PET pozbawione dostępu światła, miały wielokrotnie niższą zawartość niepożądanych produktów utleniania pogarszających ich parametry użytkowe, a w szczególności stabilność oksydacyjną, co może sugerować wybór optymalnego sposobu ich transportu i dystrybucji.

Badania wykazały istotny wpływ światła na autooksydację kwasów tłuszczowych zawartych w RME, natomiast wpływ rodzaju opakowania, w którym się je przechowuje okazał się znacznie mniejszy. Wiąże się on jedynie z większą przepuszczalnością tlenu przez PET niż przez szkło, co może dodatkowo przyspieszać zachodzenie reakcji rodnikowych.

Na podstawie zawartości nadtlenu jako jedynej cechy charakterystycznej, nie można wysnuć jednoznacznych wniosków o stanie utlenienia RME. Liczba anizydynowa (LA) określając zawartość aldehydów – produktów rozkładu nadtlenu i hydroksynadtlenu, pozwala stwierdzić faktyczny stan RME i wnioskować o jego stabilności.

Barwniki karotenoidowe zawarte w oleju mogą zainicjować utlenianie fotosensybilizowane, a tym samym zmniejszyć stabilność oleju.

Decydujący wpływ na degradację RME podczas magazynowania w określonych warunkach ma skład chemiczny lipidów, z których zostały wyprodukowane (skład kwasów tłuszczowych,

zawartość naturalnych przeciwutleniaczy i proutleniaczy) i w związku z tym podatność danego oleju na działanie czynników środowiska, takich jak światło.

Naturalnie występujące w olejach roślinnych nienasycone kwasy tłuszczowe posiadają konfigurację cis. Podwójne wiązania w nich obecne cechują się bardzo małą odpornością na działanie czynnika takiego, jak światło. Tak więc tłuszcze te podczas długiego i niewłaściwego przechowywania mogą ulegać różnym przemianom chemicznym, jak na przykład utlenieniu, polimeryzacji, cyklizacji – w wyniku czego powstają bardzo szkodliwe związki, w tym izomery trans.

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że największe zmiany właściwości występują w próbce RME przechowywanej pod wpływem światła słonecznego. Nastąpił w niej największy i najszybszy wzrost liczby nadtlenkowej oraz anizydynowej. Nieznaczne zmiany zaszły w próbkach przechowywanych bez dostępu światła, w których degradacja na skutek utleniania przebiegała wolniej.

Karotenoidy i chlorofile pełnią funkcje anty- lub prooksydacyjne w zależności od przechowywania RME na świetle lub w miejscu pozbawionym jego dostępu.

Złożone mechanizmy przemian, którym mogą ulegać estry w czasie długotrwałego przechowywania, prowadzą do powstania produktów polimerycznych i wymagają uważnego monitorowania jakości paliw zawierających estry metylole kwasów tłuszczowych.

5. Literatura

- Eunok Ch, Min DB (2006) Chemistry and Reactions of Reactive Oxygen Species in Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 46(1): 1-22.
- Gwardiak H, Różycki K, Ruskarska M (2011) Ocena estrów metylole kwasów tłuszczowych (FAME) uzyskanych z wybranych surowców. *Rośliny Oleiste XXXII*: 137-147.
- Jakóbiec J, Ambrozik A (2008) Wybrane właściwości fizykochemiczne i użytkowe estrów metylole kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego jako paliwa silnikowego. *Inżynieria Rolnicza* 9(107): 107-115.
- Jakóbiec J, Ambrozik A (2009) Procesy starzenia estrów metylole kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego. *Inżynieria Rolnicza* 5: 85-91.
- Jerzewska M (1991) Wprowadzenie metody oznaczania liczby anizydynowej i współczynnika Totox w olejach roślinnych i tłuszczach do krajowej praktyki laboratoryjnej, *Roczniki. Instytutu Przemysłu Mięsnego i Tłuszczowego XXVIII*: 107-118.
- Maszewska M, Krygier K (2005) Badanie zależności występowania pierwotnych i wtórnych produktów utleniania w rafinowanym oleju rzepakowym i słonecznikowym. *Rośliny Oleiste XXVI*: 61-620.
- PN-A-86934:1995 Oleje i tłuszcze roślinne oraz zwierzęce. Spektrofotometryczne oznaczanie barwy ogólnej.
- PN-ISO 3960:1996 – Oleje i tłuszcze roślinne oraz zwierzęce. Oznaczanie liczby nadtlenkowej.
- PN-EN ISO 3838:2008 – Ropa naftowa i ciekłe lub stałe przetwory naftowe Oznaczanie gęstości lub gęstości względnej Metody z użyciem piknometru z korkiem kapilarnym i piknometru dwukapilarnego z podziałką.
- PN-EN ISO 6885:2008 Oleje i tłuszcze roślinne oraz zwierzęce. Oznaczanie liczby anizydynowej.
- PN-EN ISO 14214+A1:2014-04 – Ciekłe przetwory naftowe – Estry metylole kwasów tłuszczowych (FAME) do użytku w silnikach samochodowych o zapłonie samoczynnym (Diesla) i zastosowań grzewczych – Wymagania i metody badań.
- Szukalska E (2003) Wybrane zagadnienia utleniania tłuszczów. *Tłuszcze Jadalne* 38: 42-61.

4. Przemysłowe metody prowadzenia procesu transestryfikacji – przegląd

Transesterification methods in industry – review

Grabowski Paweł, Liberek Oliwia

Instytut Chemii, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, Płock

Grabowski Paweł: Pawel.Grabowski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: biodiesel, FAME, technologia

Streszczenie

Wykorzystywany jako paliwo do silników Diesla olej napędowy produkowany jest podczas przerobu ropy naftowej. Z uwagi na działania proekologiczne rozpoczęto prace badawcze nad możliwością zastosowania alternatywnych paliw do zasilania tego rodzaju silników. Jedną z obecnie opracowanych alternatyw jest biodiesel, czyli paliwo powstające podczas transestryfikacji olejów roślinnych lub zwierzęcych. Do produkcji tego rodzaju paliwa można wykorzystywać oleje roślinne o różnej jakości. Jakość surowca bezpośrednio wpływa na technologię, którą należy dobrać, aby otrzymać dobrej jakości produkt końcowy. Dodatkowo stosowana technologia uzależniona jest od zapotrzebowania na biopaliwo. W związku z powyższym do celów rolniczych wykorzystuje się metodę okresową, natomiast do celów przemysłowych (produkcja biokomponentu dla rafinerii) wykorzystuje się metodę ciągłej produkcji FAME.

1. Wstęp

W transporcie publicznym (autobusy) oraz transporcie cargo (samochody ciężarowe) największą popularnością cieszą się pojazdy napędzane silnikami o zapłonie samoczynnym. Do ich zasilania stosuje się powszechnie olej napędowy pochodzący z przerobu ropy naftowej. Wraz z rozwojem silników Diesla oraz wzrostem ich liczby notuje się ciągły postęp w zakresie modyfikacji olejów napędowych, na przykład pod względem składu, tak aby spełniały one coraz bardziej restrykcyjne wymagania w zakresie ochrony środowiska. Dodatkowo rosnące zapotrzebowanie na ten typ paliwa spowodowało, że zwrócono uwagę na możliwość ograniczenia się złóż ropy naftowej, a co za tym idzie wzrost cen jej produktów (Baczewski i Kałdoński 2008). Czynniki te wpływają na wzrost popularności paliw alternatywnych, wśród których istotną grupę stanowią biopaliwa. Biopaliwa definiuje się jako ciekłe lub gazowe produkty otrzymywane z biomasy, czyli substancji całkowicie biodegradowalnych z przemysłu rolniczego, leśniczego oraz odpadów komunalnych i przemysłowych (Biernat 2007). Można je podzielić na trzy podstawowe grupy:

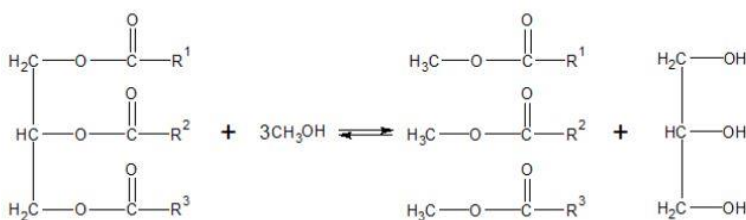
- Biopaliwa pierwszej generacji – wytwarzane z surowców żywnościowych,
- Biopaliwa drugiej generacji – produkowane z surowców niespożywczych,
- Biopaliwa trzeciej generacji – produkowane z surowców niespożywczych i modyfikowane przy zastosowaniu molekularnych technik biologicznych. (Lewandowski i Ryms 2013)

Ich stosowanie wiąże się z wieloma korzyściami takimi jak: zmniejszanie emisji szkodliwych związków oraz zanieczyszczeń powietrza, zapewnienie niezależności energetycznej kraju czy ochrona zasobów naturalnych i powstrzymanie degradacji środowiska przyrodniczego (Klimuk i in. 2012). Ponadto rozwój technologii otrzymywania biopaliw w Polsce jest koniecznością z uwagi na obowiązującą Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, która zobowiązuje kraje członkowie Unii Europejskiej do osiągnięcia 10% udziału energii ze źródeł odnawialnych w transporcie (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE).

2. Opis zagadnienia

Biodieslem nazywamy estry metylowe (ang. FAME – Fatty Acid Methyl Ester) bądź etylowe (ang. FAEE – Fatty Acid Ethyl Ester) kwasów tłuszczowych czyste lub w mieszaninie z olejem

napędowym, powstające wskutek chemicznego przetwarzania olejów roślinnych lub tłuszczów zwierzęcych. Najważniejszym czynnikiem podczas doboru surowca, szczególnie w dużych procesach przemysłowych, jest jego dostępność. W związku z czym jako oleje roślinne w poszczególnych regionach geograficznych wykorzystuje się różne rośliny oleiste. W większości krajów Unii Europejskiej do produkcji biodiesla najczęściej wykorzystuje się olej rzepakowy, podczas gdy w Hiszpanii głównym surowcem jest olej słonecznikowy. W zależności od rodzaju i czystości surowca można dobrać odpowiednią metodę produkcji. Najpopularniejszą w skali przemysłowej jest proces transestryfikacji, czyli reakcja wymiany glicerolu na alkohol małowcząsteczkowy. Reakcja jest odwracalna i wieloetapowa (Klimuk i in. 2012). Schemat reakcji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg reakcji transestryfikacji z użyciem metanolu

Transestryfikację można przyspieszyć stosując odpowiednie katalizatory. Najczęściej stosuje się katalizatory homogeniczne, rzadziej tworzące odrębną fazę – katalizatory heterogeniczne. W procesie, jako katalizatory można również wykorzystać enzymy. W przypadku prowadzenia reakcji bez użycia katalizatorów, wymagane jest zastosowania warunków nadkrytycznych w celu zwiększenia szybkości reakcji. Ze względu na szybkość reakcji oraz niski koszt, w skali technicznej, stosuje się głównie katalizatory zasadowe. Alkoholem wykorzystywanym w procesie jest najczęściej metanol, jednak można stosować też inne alkohole małowcząsteczkowe, takie jak etanol, propanol, izopropanol, butanol lub pentanol (Baczewski i Kałdoński 2008; Klimuk i in. 2012). Wybór metanolu do produkcji FAME wynika z względnie niskich kosztów jego produkcji oraz właściwości powstających estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych. Czynniki wpływające na wydajność i przebieg reakcji to:

- Stosunek molowy substratów,
- Temperatura reakcji,
- Ilość katalizatora,
- Czas reakcji,
- Czystość surowca.

3. Przegląd literatury

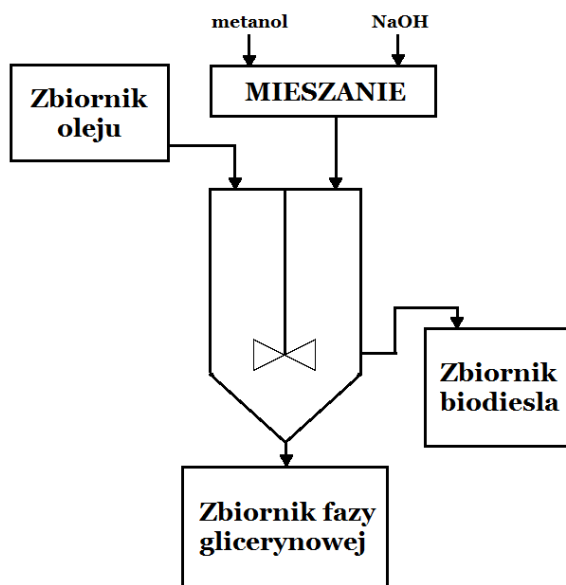
Najbardziej popularne w przemyśle instalacje do produkcji biodiesla (FAME) pracują w dwóch wariantach. Należą do nich:

- Metoda okresowa,
- Metoda ciągła.

3.1 Produkcja FAME metodą okresową

Produkcje w systemie okresowym dominują głównie w przypadku małych, indywidualnych instalacji, gdzie ilość pozyskanego biodiesla wynosi poniżej 20 tys. ton/ rok. Tak zwane nieprzemysłowe zakłady, które wytwarzają biopaliwo na potrzeby własne lub grupy lokalnych odbiorców (np. rolników) w większości posiadają własne prasy do tłoczenia oleju. Produkty uboczne powstające w skutek pozyskiwania oleju można wówczas zagospodarować na cele paszowe lub są wykorzystywane w biogazowniach coraz częściej budowanych w dużych gospodarstwach rolnych.

Instalacje wyposażone w reaktory okresowe wymagają stosowania oleju wysokiej jakości. Reakcja transestryfikacji przebiega na katalizatorze zasadowym, którym ze względu na niski koszt, jest zazwyczaj wodorotlenek sodu. Stosunek molowy metanol:olej wynosi 6:1, jednak w zależności od stosowanej technologii produkcji może się wahać w granicach od 4:1 do 20:1. Transestryfikację prowadzi się w temperaturze pokojowej w czasie od 4 do 8 godzin lub w temperaturze 60°C, co skraca czas reakcji do 1-2 h. Istotny wpływ na wydajność reakcji ma intensywne mieszanie. Schemat instalacji z reaktorem okresowym przedstawiono na rysunku 2.



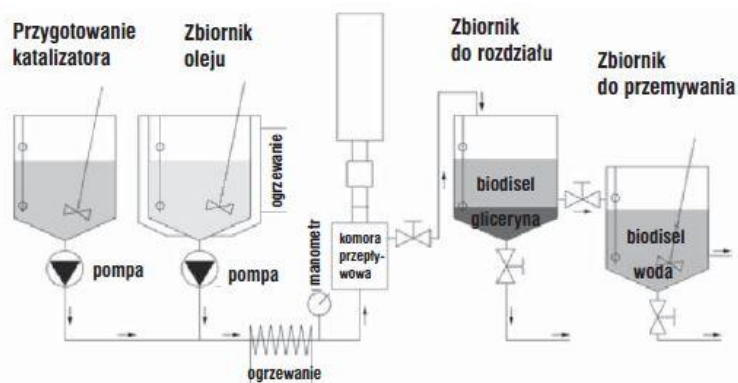
Rys. 2. Schemat instalacji do produkcji biodiesla metodą wsadową w reaktorze okresowym.

Do mieszalnika wprowadzany jest metanol i wodorotlenek sodu w celu utworzenia się metanolanu sodu, który jest rzeczywistym katalizatorem reakcji. Podgrzany olej oraz mieszaninę katalityczną wprowadza się do reaktora okresowego wyposażonego w mieszadło mechaniczne. Reakcje prowadzi się do uzyskania założonego stopnia przereagowania. Następnie wyłącza się mieszadło, aby umożliwić rozdział faz. Po upływie określonego czasu, dolną fazę zawierającą glicerynę odprowadza się zaworem spustowym do zbiornika, a fazę estrową przemywa się wodą i poddaje ponownej separacji.

Do zalet prowadzenia procesu produkcji biodiesla metodą okresową należą małe zużycie energii, niskie koszty inwestycyjne oraz jego prostota. Niestety jako produkt otrzymuje się estry średniej jakości, a wydajność reakcji jest niska (Lewandowski i Ryms 2013; Klimuk i in. 2012). W celu jej zwiększenia można zastosować transestryfikację dwustopniową. Wówczas do podgrzanego oleju dodaje się porcjami około 90% katalizatora. Po zakończeniu reakcji i rozdzieleniu fazy estrowej, zawraca się ją do reaktora i prowadzi reakcję z użyciem pozostałej objętości mieszaniny katalitycznej. Metoda dwustopniowa przesuwą równowagę w kierunku tworzenia się FAME zwiększając tym samym wydajność reakcji, niestety jest ona bardziej czasochłonna (Sulweski i in. 2014).

Niestety pomimo swojej prostoty otrzymywanie estrów metylowych metodą okresową posiada więcej wad niż zalet, dlatego też poszukiwano rozwiązań, które może ulepszyć metodę nie zwiększając znacząco jej kosztów. Klasycznie oleje poddawane są wymianie estrowej w dwóch szeregowo umieszczonych reaktorach, niezbędne do przeprowadzenia procesu jest podgrzanie surowca oraz użycie katalizatora. Alternatywną metodą jest trans estryfikacja z wykorzystaniem ultradźwięków. Używając specjalnego urządzenia dyspergującego możliwe jest prowadzenie procesu w sposób ciągły, redukując przy tym czas prowadzenia reakcji z kilku godzin nawet do kilku minut.

Dodatkową korzyścią jest to, że olej w tym wariancie nie musi zostać wstępnie ogrzewany. Ultrasonikacja zmniejsza także czas rozdziału faz i umożliwia ograniczenie ilości używanego katalizatora (do 50-60%) w wyniku zwiększonej aktywności chemicznej w obszarze kawitacji. Metodę tą można stosować zarówno w reaktorach periodycznych, jak i ciągłych, uzyskując FAME z wydajnością wynoszącą nawet 100% (Byrski 2006; Piñkowska 2008). Schemat instalacji do produkcji biodiesla z zastosowaniem ultradźwięków przedstawiono na rysunku 3. Jak wynika ze schematy po zmieszaniu oleju z mieszaniną metanolu i katalizatora mieszanina przepływa przez komorę przepływową, w której następuje działanie ultradźwiękami. Reakcja transestryfikacji przy udziale ultradźwięków przebiega w czasie poniżej jednej minuty, co umożliwia wyeliminowanie standardowego reaktora, który w tej metodzie został zastąpiony zbiornikiem do rozdziału mieszaniny poreakcyjnej. Mieszanina poreakcyjna zbierana jest i następnie po napełnieniu zbiornika następuje etap rozdziału fazy glicerynowej od fazy estrowej a następnie mycie wodne fazy estrowej. Po opróżnieniu zbiornika, w którym następuje rozdział ponownie przeprowadza się transestryfikację.



Rys. 3. Konwersja oleju do biodiesla pod działaniem ultradźwięków (Byrski 2006).

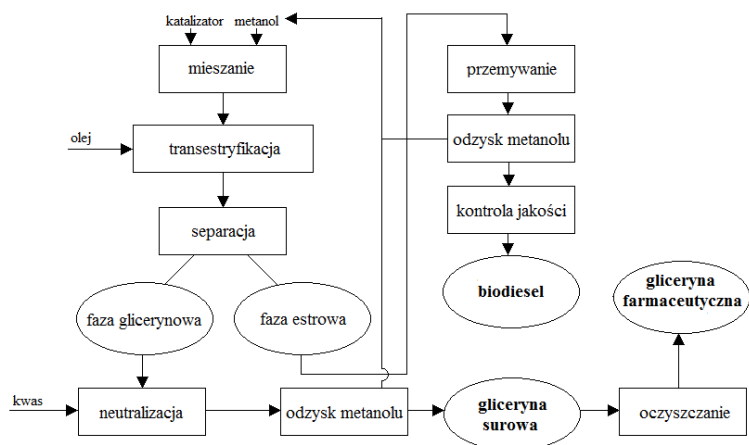
3.2 Produkcja FAME metodą ciągłą

Instalacje z przepływem ciągłym projektuje się dla obiektów przemysłowych wytwarzających biodiesla z dużą wydajnością. Są to instalacje znacznie bardziej złożone pod względem technologicznym. Proces ten można prowadzić metodę ciśnieniową, wymagającą zastosowania dużych ciśnień oraz bezciśnieniową, przebiegającą pod ciśnieniem atmosferycznym.

W metodzie bezciśnieniowej temperatura procesu w zależności od zastosowanej technologii może wynosić od 20°C do 70°C, przy czym niezbędna jest obecność katalizatora alkalicznego. Ilość katalizatora zależy od temperatury prowadzenia reakcji, im temperatura jest niższa, tym więcej należy dodać katalizatora. Warto uwzględnić fakt, że zmniejszenie ilości katalizatora ułatwia rozdział produktów oraz redukuje ilość produktów ubocznych, takich jak mydła. Schemat blokowy przykładowej instalacji działającej pod ciśnieniem atmosferycznym przedstawiono na rysunku 4.

Do reaktora wprowadza się mieszaninę katalityczną w postaci metanolanu sodu (lub potasu) oraz wpompowuje się olej roślinny ze zbiornika naporowego. Produkty reakcji odprowadza się w sposób ciągły do separatora faz. Fazę estrową kieruje się na mycie wodne w celu usunięcia nieprzereagowanego metanolu oraz mydeł. Z wody powstałej po przemywaniu FAME odparowuje się metanol, który po skropleniu zwraca się ponownie do procesu (obniża to koszt prowadzenia procesu). Oddzielone estry dodatkowo poddaje się suszeniu stosując bezwodny siarczan sodu lub żel krzemionkowy. Z fazy glicerynowej, podobnie jak z estrowej odzyskuje się metanol, dodatkowo faza ta podlega neutralizacji kwasem w celu usunięcia resztek katalizatora.

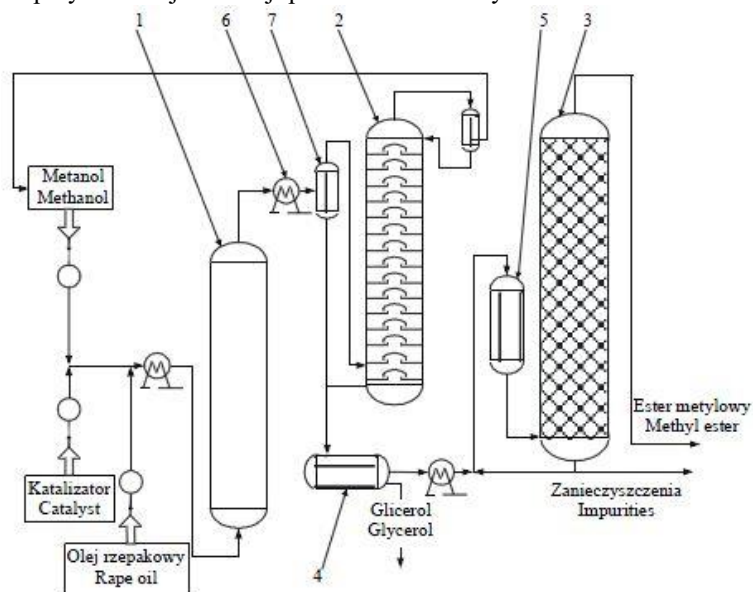
Dużą zaletą metody bezciśnieniowej jest możliwość jej realizacji w niewielkich przetwórnach. Niestety wymaga ona stosowania surowca o dużej czystości (o niskiej zawartości wolnych kwasów tłuszczowych), a otrzymany produkt końcowy jest niskiej jakości, co powoduje konieczność stosowania dodatkowych metod oczyszczania (Klimuk i in. 2012; Tys i in. 2003).



Rys. 4. Schemat instalacji do produkcji biodiesla w systemie z przepływem ciągłym bezciśnieniowym.

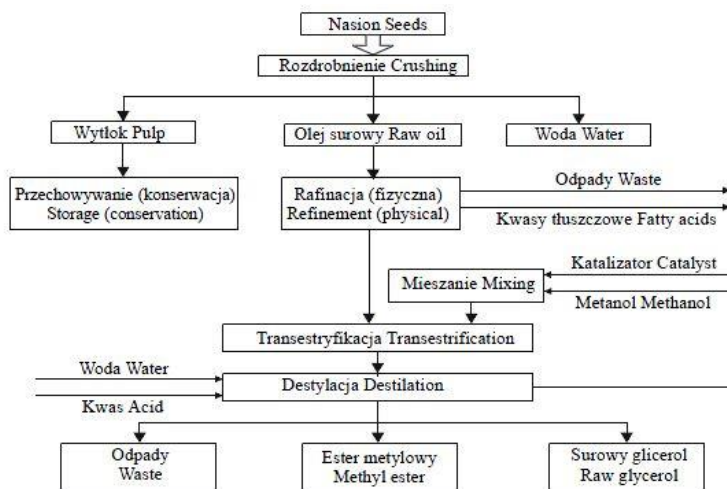
Metoda ciśnieniowa polega na prowadzeniu procesu w systemie ciągłym w temperaturze 240°C, pod ciśnieniem około 9 MPa. Substraty reakcji (olej, metanol i katalizator) są pompowane do kolektora, w którym odbywa się ich mieszanie. Powstała mieszanina kierowana jest do podgrzewacza, gdzie następuje inicjacja reakcji. W następnej kolejności podawana jest do reaktora ciśnieniowego, w którym przebiega zasadnicza reakcja transestryfikacji. Mieszanina opuszczająca reaktor jest rozprężana i rozdzielana w rozdzielaczu metanolowym na metanol oraz estry i glicerol. Alkohol oczyszcza się na kolumnie destylacyjnej i zwraca do procesu. Mieszaninę estrów i gliceryny kieruje się do rozdzielacza glicerynowego, gdzie pod wpływem różnicy gęstości następuje grawitacyjny rozdział faz. Dolna faza zawierająca glicerynę jest odprowadzana, a faza estrowa podawana jest do podgrzewacza, skąd trafia na kolumnę destylacyjną. Estry poddaje się destylacji frakcjonującej lub odpędowej w zależności od ich dalszego zastosowania.

Schemat przykładowej instalacji przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat linii technologicznej do produkcji estrów metylowych oleju rzepakowego metodą ciśnieniową: 1 – reaktor, 2 – kolumna destylacyjna metanolu, 3 – kolumna destylacyjna estrów, 4 – rozdzielacz glicerolu, 5 – wymiennik ciepła, 6 – podgrzewacz, 7 – rozdzielacz mieszaniny reakcyjnej. (Tys i in. 2003).

Ciekawym procesem zaliczanym do produkcji biodiesla metodą ciągłą jest bezpośrednia transestryfikacja w nasionach. Technologię produkcji znaną pod komercyjną nazwą BIO-DIESEL opracowała austriacka firma Vogel&Noot. Dzięki niej agro-rafinerie mogą wytwarzać nawet 1500 dm³ biodiesla w ciągu doby. W przypadku tej metody produkcję rozpoczyna się od odpowiedniego przygotowania nasion, które są rozdrabniane i wytłaczane na tłoczniach ślimakowych. Tam następuje rozdział produktów na wytlók, wodę i surowy olej. Z otrzymanego oleju usuwa się zanieczyszczenia stałe oraz wolne kwasy tłuszczowe, po czym kieruje się go do reaktora wraz z mieszaniną katalityczną (metanol + katalizator). Po zakończeniu reakcji transestryfikacji z mieszaniny oddestylowuje się nadmiarowy metanol, który jest zwracany do procesu. Następnie mieszaninę poddaje się neutralizacji i separacji. Instalacja pracuje w dwustopniowym systemie półciągłym i jest w pełni zautomatyzowaną wytwórnią, którą może obsługiwać jedna osoba. Najkorzystniejszymi warunkami procesu są: temperatura 30-60°C, ilość katalizatora w stosunku do wsadu oleju wynosząca 0,5-1,0% objętościowych oraz stosunek molowy metanolu do oleju wynoszący ponad 400:1. Takie warunki pozwalają na uzyskanie estrów z wydajnością powyżej 80%. Schemat ideowy procesu przedstawiono na rysunku 6.

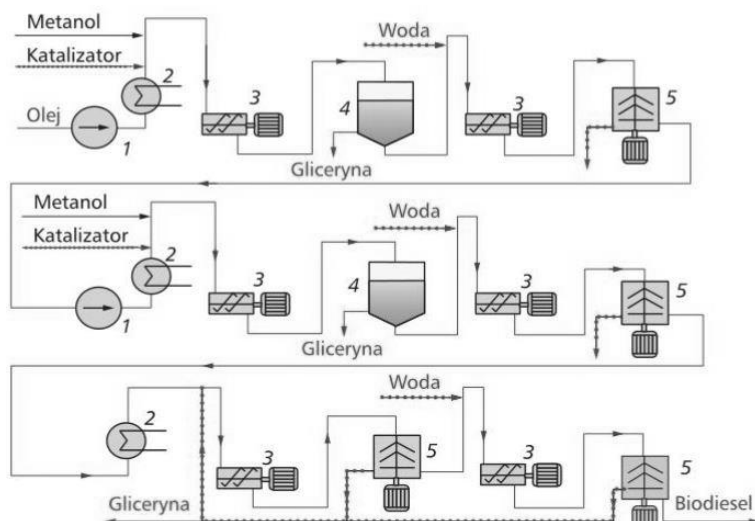


Rys. 6. Schemat produkcji estrów metylowych oleju rzepakowego według technologii BIO-DIESEL (Tys i in. 2003; Lewandowski i Ryms 2013; Zakaria i Harvery 2012).

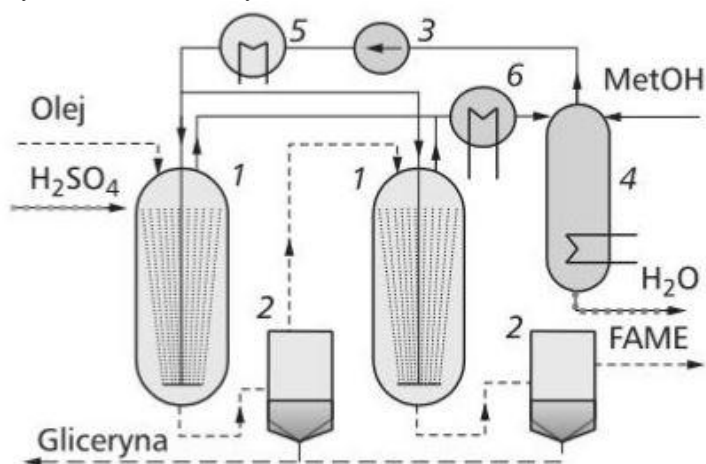
Technologia Connemanna, w literaturze znana również jako CD (Continuous Deglyceration) jest to technologia produkcji wysokiej jakości biodiesla. Proces przypomina klasyczny system ciągły becznienny, jednak dzięki wielostopniowemu odprowadzaniu produktów ubocznych i dodawaniu porcjami katalizatora otrzymuje się produkt wysokiej czystości ze znacznie większą wydajnością. Schemat prowadzenia procesu przedstawiono na rysunku 7.

Jedną z pierwszych technologii otrzymywania biodiesla, która pozwala na przerób surowca o dużej zawartości wolnych kwasów tłuszczowych jest technologia nazywana IChP, opracowana w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie. Jako katalizator stosuje się w niej kwas siarkowy (VI). Produkcja biodiesla odbywa się dwustopniowo i jest prowadzona w temperaturze 90-120°C. Schemat przedstawiono na rysunku 8.

Pary przegrzanego metanolu wprowadzane są w przeciwnym kierunku do oleju, od dołu pionowych reaktorów rurowych. W postaci pęcherzyków przemieszczają się w górę intensyfikując jednocześnie mieszanie. W rozdzielaczach następuje oddzielenie fazy estrowej od fazy glicerynowej, a nieprzereagowany metanol jest skraplany na chłodnicy i trafia na kolumnę rektyfikacyjną. Następnie po sprężeniu i przegrzaniu zwraca się go do ponownie do reaktora (Lewandowski i Ryms 2013).



Rys. 7. Schemat prowadzenia procesu transestryfikacji według technologii Connemanna: 1 – pompa, 2 – wymiennik ciepła, 3 – mieszalnik z mieszadłem mechanicznym, 4 – rozdzielnik, 5 – separator talerzowy. (Lewandowski i Ryms 2013).



Rys. 8. Schemat procesu według technologii IChP: 1 – reaktor kolumnowy, 2 – rozdzielnik, 3 – pompa, 4 – kolumna rektyfikacyjna, 5 – przegrzewacz par metanolu, 6 – chłodnica..

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metody otrzymywania biodiesla, w szczególności estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych. Porównane zostały dwa warianty prowadzenia procesu transestryfikacji. Metoda okresowa, wykorzystywana głównie do produkcji małych ilości biopaliwa charakteryzuje się niskimi kosztami prowadzenia procesu. Wadą tego wariantu produkcji jest jakość i czystość otrzymywanego produktu końcowego. W uwagi na ten fakt, może być wykorzystywany wyłącznie w rolnictwie do zasilania maszyn rolniczych. Zastosowanie tego paliwa w nowoczesnych samochodach mogłoby doprowadzić do uszkodzenia silnika. Drugi wariant, czyli metoda ciągła charakteryzuje się obniżeniem kosztów produkcji. Wynika to z faktu między innymi z odzyskiwania nieprzereagowanego metanolu oraz dużej skali produkcyjnej. W zależności od jakości dostępnego surowca możliwe jest dostosowanie warunków prowadzenia procesu oraz katalizatora. W przypadku zastosowania czystego oleju roślinnego stosuje się temperaturę około 60°C i katalizator alkaliczny, natomiast gdy jako surowiec stosowany jest olej zawierający dużą zawartość wolnych

kwasów tłuszczowych wykorzystuje się katalizator kwasowy, a reakcja przeprowadzana jest w temperaturze od 90 do 120°C.

5. Literatura

- Baczewski K, Kałdoński T (2008) Paliwa do silników z zapłonem samoczynnym. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa.
- Biernat K (2007) Biopaliwa drugiej generacji. *Studia Ecologiae et Bioethicae* 5: 281-294.
- Byrski W (2006) Technologia środowiska. Biopaliwa. Biodiesel. *Przemysł Chemiczny* 12: 1548-1549.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- Klimuk E, Pawłowska M, Pokój T (2012) Biopaliwa Technologie dla zrównoważonego rozwoju. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Lewandowski WM, Ryms M (2013) Biopaliwa Proekologiczne odnawialne źródła energii. Wydawnictwo WNT. Warszawa.
- Pińkowska H (2008) Techniczne aspekty produkcji biodiesla – nowe kierunki. *Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu* 30: 152-172.
- Sulweski M, Traczykowski A, Urbaniak W, Budzińska K (2014) Technologiczne aspekty produkcji biodiesla metodą okresową. *Przemysł Chemiczny* 4: 547-549.
- Tys J, Piekarski W, Jackowska I, Kaczor A, Zajac G, Starobac P (2003) Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa z rzepaku. *Acta Agrophysica* 99: 95-99.
- Zakaria R, Harvey AP (2012) Direct production of biodiesel from rapeseed by reactive extraction/in situ transesterification. *Fuel Processing Technology* 102: 53-60.

5. Warunki transportu węgla drogą morską

Conditions and transport of coal by sea

Kruszelnicka Weronika, Bałdowska-Witos Patrycja

Zakład Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich

w Bydgoszczy

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Andrzej Tomporowski, prof. nadzw. UTP

Andrzej Tomporowski: andrzej.tomporowski@utp.edu.pl

Słowa kluczowe: węgiel kamienny, transport morski, warunki transportu

Streszczenie

Obecnie uważa się iż przewóz towarów drogą morską jest jedną z najważniejszych form transportu na świecie. Właściwości ładunków masowych w tym węgla decydują o szeregu niekorzystnych procesów istotnych dla transportu. Węgiel w transporcie morskim stanowi potencjalne zagrożenie dla środowiska morskiego jak również dla jednostek ładunkowych. Statki przewożące stałe ładunki masowe zalicza się do grup jednostek o dużym ryzyku katastrofy, powodującej uszkodzenia konstrukcji oraz zatonięcia.

Wytyczne i zasady sformułowane w Kodeksie Bezpiecznego Przewozu Stałych Ładunków Masowych warunkują podjęcie decyzji o przynależność materiału węgla do odpowiedniej grupy ładunków klasy MHB.

Międzynarodowa Organizacja Morska jako wyspecjalizowana agenda Organizacji Narodów Zjednoczonych, zajmuje się wszystkimi aspektami prawidłowego funkcjonowania systemu bezpieczeństwa na morzu. Przestrzeganie szczegółowych przepisów i zaleceń, publikowanych przez Międzynarodową Organizację Morską, gwarantuje bezpieczeństwo przewozu towarów, zabezpieczenie środowiska naturalnego oraz zabezpieczenie przed negatywnymi skutkami ekonomiczno-prawnymi.

Celem pracy jest analiza właściwości oraz warunków przewozu ładunku węgla, który należy do podstawowych paliw kopalnych. W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące utrzymania właściwych warunków transportu węgla drogą morską. Omówiono również właściwości węgla jako ładunku masowego. Całość rozważań zakończono podsumowaniem oraz wnioskami.

1. Wstęp

Przewóz towarów drogą morską jest najważniejszą formą transportu na świecie. Znaczącą część ładunków przewożonych w transporcie morskim stanowią ładunki masowe. Statki przewożące stałe ładunki masowe należą do grupy jednostek o dużym ryzyku katastrofy, powodującej uszkodzenia konstrukcji, zatonięcia i poważne straty w ludziach (Popek 2012). Do najważniejszych ładunków masowych zaliczany jest węgiel kamienny. Węgiel wykorzystywany był już przez ludzi na przestrzeni wieku XVIII i XIX, a prawdziwy jego rozkwit nastąpił w wieku XX. Polska ma jeden z najstarszych przemysłów węglowych. Pierwsza kopalnia węgla kamiennego powstała w Szczykowej, dzielnicy miasta Jaworzna w 1767 roku. Węgiel został zaliczony do ładunków niebezpiecznych klas (MHB – Materials Hazardous Only In Bulk). Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO - International Maritime Organization), jako wyspecjalizowana agenda Organizacji Narodów Zjednoczonych, zajmuje się wszystkimi aspektami prawidłowego funkcjonowania systemu bezpieczeństwa na morzu. Przestrzeganie szczegółowych przepisów i zaleceń, publikowanych przez IMO, gwarantuje bezpieczeństwo przewozu towarów, zabezpieczenie środowiska naturalnego oraz zabezpieczenie przed negatywnymi skutkami ekonomiczno-prawnymi (Kolman 2009).

Celem pracy jest analiza właściwości oraz warunków przewozu ładunku węgla, który należy do podstawowych paliw kopalnych.

2. Charakterystyka ładunku węgla

Węgiel stanowi skałę osadową powstałą w wyniku gromadzenia się i późniejszego przeobrażenia szczątków roślinnych. Tworzenie się złóż węglowych było procesem zależnym od wielu czynników, wśród których do najważniejszych należą: materiał roślinny, temperatura, wilgotność, ciśnienie i rodzaje mikroorganizmów. W okresie powstawania węgla z organizmów roślinnych zachodziły zjawiska biochemiczne, chemiczne i fizyczne. Substancja organiczna węgla kamiennego składa się: w 76÷93% z węgla (C), 5% z wodoru (H), 2÷13% z tlenu (O), 1,5% azotu (N) i w 1% z siarki (S) (Krasowska i Popek 2006).

Do najważniejszych parametrów węgla, na których opiera się klasyfikacja węgla, należą:

- ciepło spalania (PN-G-04513:1981, PN-ISO 1928:2002),
- wskaźnik wolnego wydymania (PN-G-04515:1981),
- zawartość części lotnych w węglu (PN-G-04516:1998),
- wskaźniki dylatometryczne (PN-G-04517:1981),
- zdolność spiekania (PN-G-04518:1981).

Różnorodność użytkowania węgla jako źródła energii cieplnej i jako surowca chemicznego oraz odmienne wymagania stawiane węglowi przez różne urządzenia techniczne, spowodowała opracowania klasyfikacji węgla kamiennego charakteryzujących: typy, klasy oraz sortymenty.

Według Polskiej Normy (PN-68/G-97002) węgiel kamienny został podzielony na typy zgodnie z naturalnymi cechami, charakteryzującymi jego przydatność technologiczną, określoną następującymi wskaźnikami:

- zawartość części lotnych,
- zdolność spiekania,
- ciśnienie rozprężania,
- dylatacja,
- ciepło spalania.

Podstawą podziału węgla na klasy są dwa parametry:

- dla węgla zawierających poniżej 30% części lotnych parametrem zaliczenia do danej klasy jest zawartość części lotnych,
- dla węgla zawierających powyżej 30% części lotnych, jest ciepło spalania.

Podział węgla na klasy oparty jest o wskaźnik zawartości popiołu w stanie suchym.

Rozróżnia się pięć klas węgla o zawartości popiołu od 5 do 9%. Podział na klasy do celów energetycznych obejmuje węgle typu 31; 32 i 33:

- węgle płomienne,
- węgle gazowo-płomienne,
- węgle gazowe.

Podział na klasy do celów kokso-chemicznych obejmuje węgle typu 33; 34; 35; 36; 37 oraz 38:

- węgle gazowe,
- węgle gazowo-koksowe,
- węgle ortokoksowe,
- węgle metakoksowe,
- węgle semikoksowe,
- węgle chude.

Sortymenty węgla dzielą się na zasadnicze i połączone. Wymagania norm określają dla każdego ze wskazanych sortymentów dopuszczalne granice ilości podziarna i nadziarna.

Sortymenty zasadnicze dzieli się na:

- sortymenty grube - o granulacji ziaren powyżej 30mm,
- sortymenty średnie - o granulacji ziaren 30-10mm,
- sortymenty drobne - o granulacji ziaren <10mm.

Sortymenty połączone podzielone zostały na pięć grup:

- grube,

- średnie,
- drobne,
- miałowe,
- niesort.

Wyjątek stanowi niesort, czy tak zwany węgiel niesortowalny dla którego nie normalizuje się granic wielkości ziaren. Sortymenty połączone charakteryzują się szerokim przedziałem wymiarów ziaren stanowiących granicę dwóch, trzech bądź czterech sortymentów zasadniczych (Krasowska i Popek 2006).

Podczas transportu i składowania węgla kamiennego istotne znaczenie mają właściwości: skład pierwiastkowy, higroskopijność, zawartość wilgoci, gęstość rzeczywista i nasypowa, kąt nasypu i zsypu oraz skład ziarnowy. Właściwości te decydują o szeregu niekorzystnych procesów istotnych dla transportu, do których należą zamarzanie, wietrzenie, samozagrzewanie, samozapalenie oraz upłynnianie. Węgiel o zwiększonej wilgotności przy przewozie na znaczne odległości (ponad 5%) ulega zamarzaniu. Przeciwdziała się temu poprzez przesypywanie węgla warstwami wapna gaszonego, roztworem chlorku wapnia lub przekładanie węgla miałem torfowym. Zastosowanie tych środków powoduje wzrost ceny surowca, przy jednoczesnym obniżeniu jego jakości. Proces ten powoduje zanieczyszczenie węgla substancjami niepalnymi. W przypadku zastosowania substancji organicznych zwiększa się prawdopodobieństwo zajścia zjawiska samozagrzewania i samozapalenia. Najlepszym sposobem zapobiegania zamarzania jest utrzymywanie zawartości wilgoci poniżej poziomu 5%. Najbardziej podlegają zamarzaniu węgle porowate i o dużym rozdrobieniu (Bąkowska 1997). Kolejnym zjawiskiem powodującym obniżenie jakości węgla jest wietrzenie pod wpływem działania czynników atmosferycznych i wody. Kryterium decydującym o zakwalifikowaniu węgla kamiennego do ładunków niebezpiecznych klasy MHB jest jego samozapalność, która jest poprzedzona procesem samozagrzewania zachodzącego na skutek reakcji utleniania. Węgiel posiadający dostęp powietrza i tlenu jest samozapalny, przy czym niebezpieczeństwo samozapalenia jest tym większe w im większej masie jest przewożony i im dłużej trwa podróż. Węgiel miałki lub drobny jest bardziej podatny na samozapalenie niż węgiel gruby, a specjalnie łatwo ulega samozapaleniu pył węglowy (McGlinchey 2008). Upłynnienie jest jednym z podstawowych niebezpieczeństw występujących w czasie transportu morskiego koncentratów ładunku węgla. Interpretacja wartości granicy płynności (FMP - *flow moisture point*) i dopuszczalnej transportowej zawartości wilgoci (TML - *Transportable Moisture Limit*) otrzymywanych w warunkach laboratoryjnych wpływa na możliwość zakwalifikowania ładunków zdolnych do upłynniania podczas transportu morskiego i na bezpieczeństwo ich przewozu (IMO 2011).

Tab. 1. Sortymenty połączone węgla kamiennego (Krasowska i Popek 2006).

Grupa	Nazwa	Symbol	Wymiar ziarna [mm]
Grube	Gruby I	Gr	Ponad 60
Grube	Kostka	Ko	200-60
Grube	Gruby II	Gr II	Ponad 40
Grube	Orzech	O	80-25
Grube	Orzech średni	Ośr	80-16
Średnie	Orzech drobny	Odr	50-16
Średnie	Groszek	Gk	30-8
Drobne	Drobny I	Dr I	80-0
Drobne	Drobny II	Dr II	50-0
Drobne	Drobny III	Dr III	30-0
Miałowe	Miał I	M I	20-0
Miałowe	Miał II	M II	10-0
Inne	Niesort	Ns	120-0

3. Przygotowanie do transportu węgla

Węgiel jest ładunkiem niebezpiecznym, zatem aby jego transport przebiegał prawidłowo na uczestnikach procesu transportowego spoczywa szereg obowiązków już przed transportem.

Szczególne środki ostrożności dla stałych ładunków masowych

Przed załadunkiem stałego ładunku masowego, kapitan powinien posiadać wyczerpujące informacje dotyczące stateczności statku i rozmieszczenia ładunku. Właściciel ładunku powinien dostarczyć kapitanowi statku lub jego przedstawicielowi odpowiednich informacji dotyczących ładunku wystarczająco wcześniej przed dostawą ładunku na statek, tak aby umożliwić w sposób skuteczny wprowadzenie środków ostrożności niezbędnych, dla właściwego rozmieszczenia i przewozu ładunku. Informacje takie powinny być potwierdzone w formie pisemnej przed dostawą ładunku na statek (IMO 2011).

Przed załadunkiem lub rozładunkiem stałych ładunków masowych, kapitan statku i przedstawiciel terminalu powinni uzgodnić plan, który powinien zapewniać, że dopuszczalne wartości sił i momentów sił, działające na kadłub statku, nie będą przekroczone podczas załadunku i rozładunku. Powinien on zawierać również kolejność, ilość i ratę przeładunkową, ilość operacji wysypywania ładunku sypkiego oraz wydajność rozbalastowywania i balastowania statku. Plan i jakiegokolwiek poprawki do niego powinny być przedłożone odpowiednim władzom portowym danego kraju.

Jeśli podczas załadunku lub rozładunku statku zostaną przekroczone jakiegokolwiek ograniczenia, lub istnieje prawdopodobieństwo, że tak się stanie, kapitan ma prawo zawiesić operacje załadunku lub rozładunku i ma obowiązek poinformować właściwe władze portu danego kraju, z którymi plan został uzgodniony. Kapitan i przedstawiciel terminalu powinni zapewnić podjęcie odpowiednich działań korygujących. Podczas rozładunku kapitan i przedstawiciel terminalu powinni zastosować takie metody, które zabezpieczą konstrukcję statku przed uszkodzeniem.

Kapitan powinien upewnić się czy załoga statku w sposób ciągły nadzoruje operacje załadunku i rozładunku. Jeżeli to możliwe, podczas załadunku i rozładunku statku należy regularnie kontrolować jego zanurzenie. Każda wartość zanurzenia i tonażu powinna być zapisywana w książce ładunkowej. Jeżeli zostaną zauważone znaczące odstępstwa od planu, operacje załadunku i rozładunku lub balastowania lub obie naraz, powinny być tak skorygowane by zapewnić usunięcie tych odstępstw.

We wszystkich dokumentach dotyczących przewozu morzem stałych ładunków niebezpiecznych luzem, należy używać właściwej nazwy załadunkowej towarów (same nazwy handlowe nie mogą być używane). Na każdym statku przewożącym stałe ładunki niebezpieczne luzem powinien znajdować się specjalny wykaz lub manifest okrętowy zawierający ładunki niebezpieczne znajdujące się na statku i ich rozmieszczenie, zgodnie z klasyfikacją zamieszczoną w Kodeksie IMDG. Zamiast takiego specjalnego wykazu lub manifestu na statku może być sporządzony szczegółowy plan załadowania, na którym wszystkie towary niebezpieczne można zidentyfikować, zarówno pod względem ich klasy jak i rozmieszczenia. Kopia jednego z tych dokumentów powinna być dostępna przed odprawą wyjściową statku osobie lub organizacji wyznaczonej przez władze portu.

Przed załadunkiem kapitan powinien upewnić się, że:

- wszystkie pomieszczenia ładunkowe oraz studzienki żezowe są czyste i suche, a wszelkie pozostałości po poprzednich ładunkach zostały usunięte,
- wszystkie przewody elektryczne i elementy znajdujące się w pomieszczeniach ładunkowych oraz pomieszczeniach sąsiadujących są wolne od wad. Kable oraz elementy elektryczne są tak zabezpieczone, aby nie podgrzewały ładunku węgla.

Statek powinien być odpowiednio wyposażony i posiadać na pokładzie odpowiednie przyrządy do pomiaru parametrów ładunku (bez konieczności zejścia do ładowni):

- stężenia metanu w atmosferze,
- stężenia tlenu w atmosferze,
- stężenia tlenku węgla(II) w atmosferze,
- wartość pH.

Przyrządy te powinny być regularnie konserwowane i kalibrowane. Załoga statku musi być przeszkolona w zakresie korzystania z tych przyrządów. Zaleca się, by w ładowniach znajdowały się przyrządy do pomiaru temperatury w zakresie od 0°C do 100°C, aby umożliwić pomiar temperatury ładunku podczas ładowania jak i podczas podróży, bez konieczności wejścia do przestrzeni ładunkowej.

Palenie i używanie otwartego ognia, nie są dozwolone w obszarach przestrzeni ładunkowych i sąsiadujących pomieszczeniach. Odpowiednie napisy ostrzegawcze powinny być umieszczone w widocznych miejscach. Cięcie, rozdrabnianie, spawanie lub inne czynności powinny być wykonywane w odpowiednio wentylowanych pomieszczeniach, w których stężenie metanu zapewnia bezpieczeństwo.

Przed wypłynięciem kapitan powinien zapewnić, iż powierzchnia ładunku w ładowniach jest zgodna z wyznaczonymi granicami przestrzeni ładunkowej. Pokrywy ładowni powinny być odpowiednio uszczelnione.

Wolna przestrzeń znajdująca się nad ładunkiem powinna być w każdym pomieszczeniu regularnie monitorowana. Pomiar powinien dotyczyć stężenia metanu, tlenu i tlenku węgla(II), a z każdego pomiaru powinny być sporządzone oraz utrzymywane zapisy. Częstotliwość dokonywanych pomiarów regulowana jest na podstawie wyników analiz.

Wentylacja w ładowniach powinna być utrzymywana przez 24h od momentu wypłynięcia statku. W tym czasie powinien odbyć się pomiar gazów w ładowni, a wentylacja na okres pomiaru powinna zostać wstrzymana. Gdy stężenie metanu, monitorowane w ciągu 24 godzin od momentu wyjścia statku z portu, jest na dopuszczalnie niskim poziomie to proces wentylacji zostaje zakończony (IMO 2012).

Utrzymywany jest tylko pomiar podstawowych parametrów procesu. Jeśli stężenie metanu monitorowane w ciągu 24 godzin od wypłynięcia jest nie do zaakceptowania to wtedy wentylacja powinna być utrzymywana. Gdy stężenie metanu jest na niebezpiecznie wysokim poziomie zaleca się zachować środki ostrożności dla węgli emitujących metan. Kapitan powinien mieć pewność, iż wszystkie gazy, które mogą być emitowane z ładunku nie gromadzą się w sąsiednich pomieszczeniach zamkniętych. Powinien zapewnić również, iż wszystkie pomieszczenia pracy oraz magazyny są regularnie monitorowane na obecność metanu, tlenu i tlenku węgla(II), a ich wentylacja jest utrzymywana.

Konieczna jest regularna kontrola systemu żęzowego. Jeśli wartość pH wskazuje, iż istnieje ryzyko korozji to system żęzowy powinien być w sposób regularny przepompowywany podczas podróży, w celu uniknięcia ewentualnego gromadzenia się kwasów.

Jeżeli zachowanie ładunku podczas rejsu różni się od określonego w zgłoszeniu ładunku, kapitan powinien zgłosić takie różnice do dostawcy. Takie sprawozdanie pozwoli dostawcy do prowadzenia zapisów na temat zachowania ładunków węgla.

Przygotowanie ładowni do transportu węgla

- ładownie okrętowe powinny być oczyszczone, pozbawione resztek olejów lub tłuszczów, ziaren, kawałków drewna lub lin,
- zęży i studzienki żęzowe uszczelnione przed miałem węglowym,
- powierzchnie izolujące ciepło przenikające do węgla szczelnie izolowane, a niezabezpieczone przewody elektryczne pozbawione napięcia elektrycznego,
- wszelkie drzwi, otwory i włazy szczelnie zamknięte przed dostępem powietrza do ładowni.

Wymagania dotyczące warunków pogodowych

Ładunek węgla może upłynnić się podczas podróży w przypadku, gdy zawartość wilgoci w ładunku przekracza jego Transportable Moisture Limit (TML). Jeśli ładowane są towary zdolne do upłynniania to powinny być przestrzegane następujące zalecenia:

- zawartość wilgoci podczas transportu musi być mniejsza niż jego TML,
- jeżeli nie postanowiono inaczej w dokumencie sztauplan, ładunek nie może być sztauowany podczas opadów atmosferycznych,
- jeżeli nie postanowiono inaczej jak w dokumencie sztauplan, w czasie sztauwania ładunku wszystkie wolne ładownie, do których węgiel jest lub ma zostać załadowany powinny być zamknięte,

- ładunek w przestrzeni ładunkowej może być rozładowywany podczas opadów atmosferycznych pod warunkiem, że całkowita ilość ładunku w przestrzeni ładunkowej będzie rozładowana w porcie (IMO 2012).

Sztautowanie i trzymowanie ładunku węgla

- do przewozu dużych partii nie powinno się mieszać różnych asortymentów, typów i klas,
- węgiel silnie zsiarzony nie nadaje się do przewozu drogą morską,
- należy unikać kruszenia węgla (grube sortymenty zsypuje się z wysokości <1m zaś średnie z wysokości <2m),
- nie należy ładować węgla podczas silnych opadów deszczu lub śniegu,
- nie wolno przyjmować węgla o temperaturze >25°C,
- zabronione jest używanie źródeł otwartego ognia,
- podczas załadunku i rozładunku należy posiadać sprzęt przeciwpożarowy,
- do pomieszczeń z węglem należy wchodzić ze światłem elektrycznym lub z lampami górniczymi, które sygnalizują obecność gazu,
- w przypadku stwierdzenia, iż węgiel się tli należy zaistniałe ognisko odslonić i zagasić (np. gaśnicami pianowymi) bądź szczelnie pozamykać wszelki otwory, którymi może przedostawać się powietrze do pomieszczeni gdzie węgiel się pali. Ogień gasić za pomocą pary, wody, gazów lub kwasu węglowego,
- nie wolno przewozić węgla w tym samym pomieszczeniu z ładunkami palnymi lub kwasami,
- nie należy również przykrywać z wierzchu ładunku węgla innymi ładunkami, jeżeli to uniemożliwi wentylację powierzchniową lub znacznie ją utrudni,
- bezpośrednio po załadunku nie zamyka się natychmiast luków, lecz trzyma się je jak najdłużej otwarte celem odprowadzenia gazów,
- w przypadku stwierdzenia ognisk podwyższonej temperatury składowanego węgla (30°C÷35°C) stosuje się następujące środki zaradcze:
 - przerzucanie hałdy,
 - usunięcie rozgrzanych warstw ze stosu,
 - załadowany węgiel powinien być roztrzymowany do możliwie równego poziomu (Bąkowska 1997).

4. Warunki transportu

W transporcie węgla przyjęto szereg zasad, które mają zapewnić bezpieczeństwo transportowanego ładunku:

- w ładowniach monitoruje się temperaturę (co 4 godziny), a wynik odnotowuje się w dzienniku okrętowym,
- statek zgodnie z zaleceniami IMO powinien być wyposażony w urządzenia pozwalające mierzyć w ładowniach stężenie tlenu, tlenku węgla (II), metanu,
- ładownie powinny mieć zapewnioną stałą wentylację celem odprowadzenia gazów i dostarczenia świeżego powietrza,
- ciąg powietrza powinien przechodzić po wierzchu ładunku, nigdy przez ładunek,
- węgiel miałki lub drobny jest ładunkiem sypkim, który na skutek silnego kołysania statku może w czasie podróży przesypać się na jedną burtę i spowodować przechył statku, a nawet jego przewrócenie się stępką do góry (IMO 2012).

5. Nadzór nad transportem

IMO w transporcie morskim wyróżnia i podaje zalecenia dla dwóch rodzajów węgla: wydzielającego metan i podatnego na samozagrzewanie.

Węgiel wydzielający metan w ilościach niebezpiecznych

Węgiel w czasie transportu może wydzielać metan, który jest gazem palny. Metan oraz mieszanina metanu z powietrzem stanowi mieszaninę wybuchową, która może zapalić się przy kontakcie z iskrą lub płomieniem. Metan jest lżejszy od powietrza, a zatem może gromadzić się

w górnej części przestrzeni ładunkowej lub innych zamkniętych przestrzeniach. Jeśli przestrzenie ładunkowe nie są wystarczająco szczelne to metan może przenikać do sąsiadujących pomieszczeń (IMO 2012).

Jeżeli załoga posiada informacje, iż dany ładunek wykazuje zdolność do emisji metanu lub na podstawie analiz składu atmosfery w ładowni, występuje obecność metanu w ilości ponad 20% dolnej granicy wybuchowości (DGW), należy podjąć następujące dodatkowe środki ostrożności:

- ładownie powinny być odpowiednio wentylowane. Zaleca się zaprzestanie procesu wentylacji na okres pomiaru stężenia metanu,
- załoga powinna usunąć wszelkie skumulowane gazy przed otwarciem pokryw lukowych w procesie rozładunku. Należy podjąć wszelkie środki ostrożności przed otwarciem pokryw ładowni, aby zapobiec tworzeniu iskier. Palenie i używanie otwartego ognia jest zakazane,
- zabrania się, by załoga wchodziła do ładowni lub pomieszczeń sąsiadujących, chyba że przestrzeń jest wentylowana. Wówczas monitorowane parametry ładunku są na dopuszczalnie niskim poziomie, a zawartość tlenu jest wystarczająca do podtrzymania życia. W sytuacji awaryjnej wejść do ładowni może tylko przeszkolony personel posiadający niezależny aparat do oddychania pod nadzorem oficera,
- wydzielone pomieszczenia pracy, takie jak magazyny, stolarnie, korytarze, czy tunele są regularnie monitorowane na obecność metanu. Takie pomieszczenia powinny być odpowiednio wentylowane, a w przypadku wentylacji mechanicznej, sprzęt powinien być bezpieczny do stosowania w atmosferze zagrożonej wybuchem (IMO 2012).

Węgiel wykazujący zdolność do samozagrzewania

Jeżeli ładunek wykazuje zdolność do samozagrzewania lub na podstawie analiz stwierdza się podwyższoną zawartość tlenu węgla(II) należy podjąć następujące środki ostrożności:

- ładownie powinny być zamykane natychmiast po zakończeniu załadunku.
- załoga nie może wejść do ładowni podczas rejsu, jeśli nie posiada specjalistycznego aparatu oddechowego i mogłaby spowodować zagrożenie zdrowia lub życia całego personelu,
- przed załadunkiem temperatura ładunku powinna być monitorowana. Ładunek uznaje się za akceptowalny do załadunku w momencie, gdy jego temperatura nie przekracza 25°C,
- gdy systematycznie wzrasta poziom tlenu węgla(II) istnieje prawdopodobieństwo zainicjowania procesu samozagrzewania. W takim przypadku należy zamknąć przestrzeń ładunkową, a kapitan powinien zasięgnąć porady eksperta. W celu schłodzenia ładunku lub ugaszenia pożaru nie wolno stosować wody. Woda może posłużyć jako czynnik pomocniczy przy schładzaniu granic przedziałów ładunkowych,
- gdy poziom tlenu węgla(II) w przestrzeni ładunkowej sięga wartości 50 ppm lub wskazuje stały wzrost w ciągu trzech kolejnych dni, świadczy to o rozpoczęciu procesu samozagrzewania (IMO 2012).

6. Wnioski i podsumowanie

Najważniejszą formą transportu na świecie jest transport morski, który odgrywa istotną rolę we współczesnej gospodarce globalnej. Transport stałych ładunków masowych należy do grupy jednostek o dużym ryzyku katastrofy. Stałe ładunki sypkie klasyfikuje się jako materiał niebezpieczny tylko luzem gdyż posiadają jedno ze znaczących zagrożeń obniżających bezpieczeństwo transportowanego ładunku. Węgiel w transporcie morskim stanowi potencjalne zagrożenie dla środowiska morskiego jak również dla jednostek ładunkowych. Wytyczne i zasady sformułowane w Kodeksie Bezpiecznego Przewozu Stałych Ładunków Masowych warunkują podjęcie decyzji o przynależności materiału do odpowiedniej grupy ładunków klasy MHB. Kryterium decydującym o zakwalifikowaniu węgla kamiennego do ładunków niebezpiecznych klasy MHB jest jego samozapalność, która poprzedzona jest procesem samozagrzewania.

Wśród głównych przyczyn odpowiedzialnych za powstawanie zagrożeń w trakcie przewozu węgla, wyróżnić można brak znajomości właściwości ładunku dostarczonego do transportu oraz zły stan techniczny infrastruktury i urządzeń przeładunkowych. Niekorzystnie na stan bezpieczeństwa

wpływa również brak odpowiedniego przygotowania teoretycznego i praktycznego do wykonywania czynności transportowych z ładunkami.

Znaczenie i ważna rola jaką pełni węgiel stanowiły podstawę do przeprowadzenia analizy jego właściwości z uwzględnieniem warunków przewozu. Cel pracy został zrealizowany dzięki wnikliwej analizie opartej na porównaniu konwencji międzynarodowych.

7. Literatura

- Bąkowska E (1997) Ładunki Okrętowe - Poradnik encyklopedyczny: Polskie Towarzystwo Towaroznawcze Oddział Morski w Sopocie Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni.
- IMO (2011) Classification of criteria for Materials Hazardous only in Bulk (MHB). BSC 16/4/13.
- IMO (2012) International Maritime Dangerous Goods.
- Kolman K (2009) Kwalitologia: Wydawnictwo Placet.
- Krasowska K, Popek M (2006) Ładunkoznawstwo: Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni.
- McGlinchey D (2008) Bulk Solids Handling: Blackwell Publishing, UK.
- Popek M (2012) Analiza jakości koncentratów rud metali modyfikowanych materiałami skrobiowymi w transporcie morskim: Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni.

6. Analiza możliwości wykorzystania wodoru w pojazdach mechanicznych

The use of hydrogen in motor vehicles

Kruszelnicka Weronika, Bałdowska-Witos Patrycja

Zakład Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Andrzej Tomporowski, prof. nadzw. UTP

Andrzej Tomporowski: Andrzej.tomporowski@utp.edu.pl

Słowa kluczowe: ogniwo paliwowe, pojazdy zasilane wodorem, paliwo wodorowe, transport ekologiczny, wodór

Streszczenie

Malejące zasoby naturalne, wpływ na środowisko naturalne i ciągle rosnące potrzeby energetyczne zmuszają do ponownej oceny struktury systemu energetycznego. Znaczna część paliw kopalnych zużywana jest na potrzeby transportu i w związku z tym jest także znaczącym źródłem emisji CO₂ i innych zanieczyszczeń powietrza. W celu zmniejszenia oddziaływania sektora transportu na środowisko naturalne poszukuje się alternatywnych sposobów zasilania pojazdów. Rozwiązaniem może być wykorzystanie wodoru do zasilania pojazdów.

Wodór jest powszechnie uważany za „najczystsze” ekologicznie i najbardziej przyjazne środowisku paliwo, gdyż w wyniku jego spalania w powietrzu lub tlenie produkowana jest wyłącznie woda. Podstawowa trudność w zastosowaniu wodoru jako napędu w samochodach, to problem zaopatrzenia pojazdów w to paliwo.

Celem pracy jest przeanalizowanie możliwości użycia wodoru w sektorze transportu. W pracy przedstawiono zagadnienia dotyczące wykorzystania wodoru w pojazdach mechanicznych, omówiono zasadę działania układu ogniwa paliwowego na przykładzie instalacji działającej w Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii na Wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy. Omówiono także właściwości wodoru jako paliwa i problemy dotyczące eksploatacji układów wodorowych. Całość rozważań zakończono podsumowaniem i wnioskami.

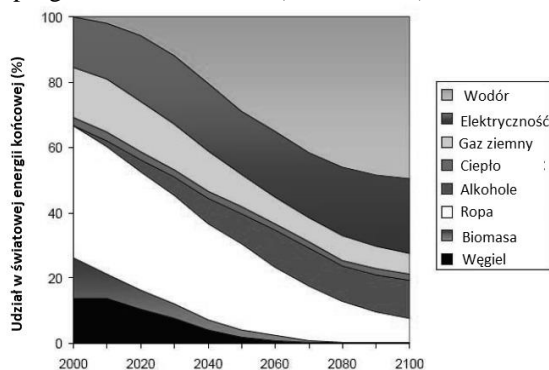
1. Wprowadzenie

Zmniejszające się rezerwy naturalnych zasobów paliw kopalnych, pogarszający się z roku na rok stan środowiska naturalnego oraz obserwowane zwiększanie się zapotrzebowania na energię składają do wprowadzenia zmian w strukturze systemu energetycznego. Zmiany dotyczą przede wszystkim zmniejszenia użycia paliw konwencjonalnych jak ropa naftowa, gaz ziemny czy węgiel na rzecz odnawialnych źródeł energii. Pakiet klimatyczny wprowadzony przez UE zakłada m.in. zwiększenie udziału źródeł alternatywnych w ogólnym zużyciu paliw transportowych (Kruszelnicka i in. 2015).

Współcześnie źródła energii wykorzystywane są w sektorze transportu, w przemyśle, do ogrzewania budynków, a także do produkcji energii elektrycznej. Szacuje się, że ponad 90% energii pierwotnej pochodzi z paliw kopalnych, z czego 30% zużywane jest na potrzeby transportu. Duże zużycie energii w gospodarce transportowej powoduje wysoką emisję szkodliwych substancji do otoczenia. W związku z tym, uważa się, że sektor ten jest jednym z największych „producentów” gazów cieplarnianych. W celu przeciwdziałania zmianom klimatu oraz zmniejszenia zużycia paliw kopalnych naukowcy nieustannie poszukują paliwa taniego i trwałego, którym można by zastąpić ropę naftową i węgiel (Badyda 2010; Dincer 2008; Kumar i in. 2007).

Wykorzystanie paliw alternatywnych do zasilania pojazdów nie przedstawia się imponująco. Najczęściej stosowane z nich: metanol, CNG czy etanol oraz biopaliwa, nie odniosły sukcesu jakiego się spodziewano, ze względu na niską opłacalność, wysokie koszty inwestycyjne oraz konieczność wprowadzenia wielu zmian w infrastrukturze i pojazdach. Wraz z rozwojem technologii oczekuje się jednak, że wspomniane wcześniej paliwa będą stanowić alternatywę dla paliw konwencjonalnych w krótkoterminowej relacji. W dłuższej perspektywie czasu paliwem spełniającym oczekiwania branży transportowej może okazać się wodór jako czyste ekologicznie i powszechnie występujące paliwo (Kumar i in.2009).

Zagrożenia środowiskowe takie jak: kwaśne deszcze, zubożenie warstwy ozonowej i zmiany klimatyczne wiążą się ściśle z produkcją, przetwarzaniem i zużyciem energii. Wprowadzane systemy energetyczne oparte na paliwie wodorowym jawią się jako efektywne rozwiązanie problemów dotyczących poprawy jakości środowiska oraz prowadzenia zrównoważonej gospodarki energetycznej. Zagadnienie wykorzystania wodoru jako paliwa w literaturze pojawia się niezbyt często. Dostępne analizy dotyczą przede wszystkim długoterminowych zmian w strukturze zużycia paliw kopalnych i znaczenia wodoru w tych zmianach. Na (Rys.1) przedstawiono scenariusz zmian wykorzystania wodoru w prognozie do 2100 roku (Dincer 2008).



Rys. 1. Wykres zmian udziału różnych nośników energii w światowej energii końcowej w latach 1990-2100 (Dincer 2008).

Jak wynika z przedstawionego wykresu przewiduje się, że udział wodoru w gospodarce energetycznej będzie wzrastał i w 2100 roku paliwo to może być źródłem nawet do 50% światowej energii końcowej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania wodoru w sektorze transportowym z wyszczególnieniem szans i zagrożeń jakie niesie za sobą wdrożenie technologii wodorowej oraz przedstawienie stanowiska do badań eksperymentalnych ogniwa wodorowego.

Wodór ze względu na swoje właściwości uważany jest za jedną z najatrakcyjniejszych alternatyw dla paliw kopalnych. Paliwo wodorowe charakteryzuje się najniższym współczynnikiem emisji zanieczyszczeń spośród paliw, które mogą być spalane bezpośrednio w silnikach spalinowych. Dodatkowo powszechność występowania wodoru wszędzie tam, gdzie dostępna jest woda lub inne źródło energii zachęcają naukowców do podejmowania tematu paliw wodorowych w prowadzonych badaniach (Deluchi i Ogden 1993).

2. Właściwości wodoru

Wodór jest bezbarwnym, bezwonny, nietoksycznym gazem palnym, który nie oddziałuje w niekorzystny sposób na otoczenie. Może być wykorzystany do bezpośredniego spalania w silniku spalinowym (ICE - internal combustion engine) lub w układzie ogniwa paliwowych w pojazdach (FCV - fuel cell vehicles). W porównaniu z innymi paliwami zawiera większą ilość energii w jednostce masy oraz charakteryzuje się niską emisją związków toksycznych w procesie spalania. W (Tab.1) przedstawiono ciepło spalania dla niektórych paliw, w tym wodoru (Kumar i in. 2009).

Do najważniejszych właściwości wodoru należą (Jain 2009):

- czystość paliwa;
- powszechność występowania;
- lekkość;
- wysoka zawartość energii w jednostce masy;
- łatwość magazynowania;
- możliwość bezpośredniej konwersji na energię cieplną, mechaniczną i elektryczną.

Tab. 1. Ciepło spalania niektórych paliw (Jain 2009).

Ciepło spalania	
Paliwo	Energia [Kcal/g]
Wodór	34
Ropa naftowa	10,3-8,4
Nafta	10,3-9,8
Grafit (węgiel)	7,8
Olej rycynowy	9,4
Drewno	4,2

Ze względu na wymienione właściwości wodór traktowany jest jako paliwo o unikalnych charakterystykach spalania i dyfuzji. W (Tab.2) przedstawiono główne parametry wodoru podczas spalania, w kontekście wykorzystania wodoru w silnikach spalinowych w zestawieniu z parametrami metanu i benzyny (Karim 2007).

Tab.2. Porównanie właściwości procesu spalania dla wybranych paliw (Karim 2007).

Właściwość	Wodór	Metan	Benzyna
Granice palności [% objętości]	4-75	5,3-15,0	1,2-6,0
Minimalna energia zapłonu [mJ]	0,02	0,28	0,25
Laminarna prędkość płomienia [m/s]	1,90	0,38	0,37-0,43
Adiabatyczna temp. płomienia [K]	2318	2190	2470
Temperatura samozapłonu [K]	858	813	500-750

Wodór ma bardzo szeroki zakres palności w mieszaninie z powietrzem. W porównaniu do metanu i benzyny potrzebna jest niewielka ilość energii do zainicjowania procesu spalania, przy czym prędkość procesu jest bardzo wysoka. Temperatura samozapłonu wodoru nie odbiega znacząco od temperatur pozostałych dwóch paliw. Właściwości procesu spalania wodoru powodują, że jest on paliwem znacznie różniącym się od stosowanych konwencjonalnie, dlatego konieczne jest dostosowanie układów zasilania do jego specjalnych właściwości (Karim 2007).

3. Wady i zalety

Wykorzystanie wodoru w transporcie niesie ze sobą wiele korzyści, jednak przysparza też pewnych problemów. W (Tab.3) przedstawiono najważniejsze wady i zalety stosowania wodoru jako paliwa.

Tab. 3. Wady i zalety wykorzystania wodoru jako paliwa (Chamousis 2009).

Zalety	Wady
– Wysoka wartość energetyczna (122 kJ/kg)	– Niska gęstość (duże powierzchnie magazynowe)
– Najpowszechniejszy pierwiastek	– Nie występuje w naturze w stanie wolnym
– Wytwarzany z wielu źródeł energii pierwotnej	– Niska energia zapłonu
– Szeroki zakres palności	– Droga technologia
– Wysoka dyfuzyjność	
– Para wodna jako główny produkt utleniania	
– Najbardziej wszechstronne paliwo	
– Niska emisja związków toksycznych	
– Ograniczenia zużycia paliw kopalnych	

4. Technologie wytwarzania wodoru

W literaturze spotkać można wiele technologii wytwarzania i produkcji wodoru. Podstawowym problemem towarzyszącym wdrożeniu danej technologii jest jej ekonomiczna opłacalność oraz koszty wytwarzania. Do najczęściej stosowanych metod produkcji wodoru należą: reforming parowy gazowego metanu, gazyfikacja, elektroliza wodoru z wody oraz pozyskiwanie wodoru z wykorzystaniem energii słonecznej. W (Tab.4) przedstawiono najważniejsze technologie wytwarzania wodoru wraz z ich charakterystyką (Chamousis 2009).

Tab. 4. Technologie pozyskiwania wodoru (Chamousis 2009).

Technologie produkcji metanu				
Metoda	Proces	Realizacja	Zalety	Wady
Reforming parowy gazowego metanu	W obecności niklu jako katalizatora w temp. 700-1100°C: $\text{CH}_{4(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{CO}_{(g)} + 3\text{H}_{2(g)}$ Następnie reakcja w niższej temperaturze: $\text{CO}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)} + \text{H}_{2(g)}$	Obecnie główne źródło wodoru	Efektywność procesu 65-75%; Najtańsza metoda Istniejąca infrastruktura;	Nieodnawialne źródło; Emisja CO ₂ w procesie produkcji;
Gazyfikacja	Przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu: węgiel+ $\text{H}_2\text{O}_{(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{gaz syntezowy}$ Gaz syntezowy= $\text{H}_2 + \text{CO} + \text{C}$ $\text{O}_2 + \text{CH}_4$	Główna metoda w masowej produkcji wodoru	Duże zasoby węgla; Niedrogie źródło;	Emisja CO ₂ ; 45% efektywność; Sekwestracja węgla podnosi koszty;
Elektroliza z wody	Ładunek elektryczny przechodzi przez wodę: $2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$	Niestosowana powszechnie ze względu na cenę energii elektrycznej	Zależna od źródła elektryczności;	Energia potrzebna do produkcji wodoru może być wyższa niż energia wyprodukowana; Emisja CO ₂ jeśli energia elektryczna produkowana jest z paliw kopalnych;
System słoneczno-wodorowy	Ładunek elektryczny przechodzi przez wodę: $2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$	Niestosowana powszechnie ze względu na cenę energii ze źródeł odnawialnych	Brak emisji toksycznych związków; 65% efektywność;	Droga technologia;

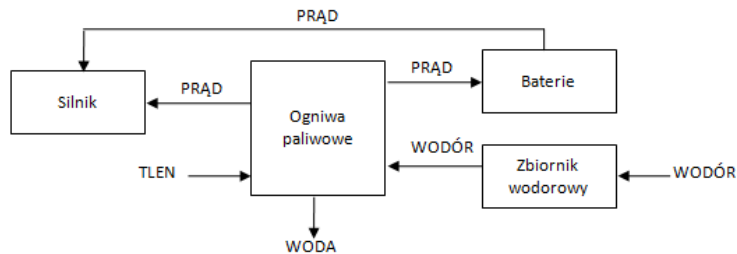
5. Wykorzystanie wodoru w pojazdach mechanicznych

Technologia wodorowa z powodzeniem została wdrożona w pokazowych pojazdach: autach, ciężarówkach oraz samolotach. Wyróżnia się dwie metody zasilania pojazdów paliwem wodorowym: technologię wykorzystującą silnik spalinowy i spalanie w nim wodoru (ICE internal combustion engine) oraz technologię pojazdów elektrycznych z ogniwami paliwowymi (Deluchi i Ogden 1993).

Instalacje silników spalinowych zasilanych wodorem powodują takie samo zagrożenie, jak te zasilane CNG, dopóki wodór magazynowany jest w zbiornikach pod ciśnieniem do 689,5 bar na pokładzie samochodu. Ewentualne zagrożenia ograniczają się zatem do uwalniania gazu w przypadku nieszczelności i jego akumulacji w zamkniętych przestrzeniach. W związku z niewielką ilością energii potrzebną do zainicjowania zapłonu, istnieje ryzyko wystąpienia samozapłonu w instalacji wodorowej, co może doprowadzić do eksplozji (Deluchi i Ogden 1993).

Z tego powodu w pojazdach zasilanych wodorem (ICE) instaluje się zawory elektromagnetyczne i czujniki, które mają wykrywać nieszczelności i zapobiegać niepożądanym przeciekom. Stosowane są także urządzenia obniżające ciśnienie wodoru, mogą one występować w formie przewodów wentylacyjnych pozwalających na wydostawanie się wodoru na zewnątrz zbiornika i dalej poza pojazd. Sygnałami, które mogą świadczyć o awarii układu i na które należy zwrócić szczególną uwagę, są syczące dźwięki, ostrzeżenia z urządzeń pomiarowych ciśnienia i przepływu wodoru oraz z alerty czujników wykrywających przecieki wodoru. W celu ograniczenia ryzyka wystąpienia sytuacji zagrażającej życiu zbiornik z wodorem powinien być umieszczony w bezpiecznej odległości od miejsc pasażerów w szczelnej, wykonanej z wytrzymałych materiałów obudowie. Ponadto powinno unikać się stosowania w pobliżu zbiornika i przewodów potencjalnych źródeł zapłonu. Zaleca się także, żeby cały pojazd był dobrze wentylowany (Dincer 2008).

Drugim typem pojazdów wykorzystujących wodór jako paliwo są pojazdy wyposażone w ogniwa paliwowe (FCEV-fuel cell electric vehicle). FCEV to pojazdy elektryczne wykorzystujące do zasilania wodór magazynowany w zbiornikach ciśnieniowych oraz ogniwa paliwowe. Na (Rys.2) przedstawiono zasadę działania samochodu wyposażonego w ogniwa paliwowe.



Rys. 2. Zasada działania samochodu wyposażonego w ogniwa paliwowe (Opracowanie własne).

FCEV zasilane są gazowym wodorem o ciśnieniu z zakresu 35-70 MPa. Zbiorniki o ciśnieniu 70 MPa wykorzystuje się powszechnie ze względu na uzyskiwanie znacznie wyższych zasięgów pojazdu przy akceptowalnych objętościach zbiorników.

Obecnie FCEV zużywają przeciętnie 1 kg wodoru na 100 km, a zasięg uzyskiwany to około 500-650 km. Są to wartości porównywalne z samochodami o napędzie konwencjonalnym, przy czym emisje CO₂ utrzymują się na znacznie niższym poziomie. Dużym wyzwaniem w kierunku upowszechnienia pojazdów o napędzie wodorowym jest wprowadzenie infrastruktury umożliwiających tankowanie wodoru (Karim 2007).

Koszt pojazdu z ogniwami paliwowymi kształtuje się na poziomie 60000 USD. Wpływa na to wysoki koszt systemu ogniw paliwowych oraz utrzymujące się wysokie ceny materiałów kompozytowych potrzebnych do budowy wysokociśnieniowych zbiorników wodoru.

Ważne jest, aby monitorować stan silnika elektrycznego w trakcie jego pracy. Urządzenia zabezpieczające stosowane w celu ochrony obejmują wyłączniki zasilania oraz przełączniki do minimalizowania skoków napięcia. Jednym z problemów związanych z pojazdami napędzanymi ogniwami paliwowymi jest to, że trudno jest wykryć błędy i ewentualne zagrożenie w wytwarzaniu i przeniesienia napędu elektrycznego. Procedury bezpieczeństwa w celu uniknięcia wypadków

obejmują unieruchomienie pojazdu poprzez wyłączenie układu napędowego jak najszybciej po zdiagnozowaniu awarii.

6. Stanowisko eksperymentalne do wytwarzania wodoru

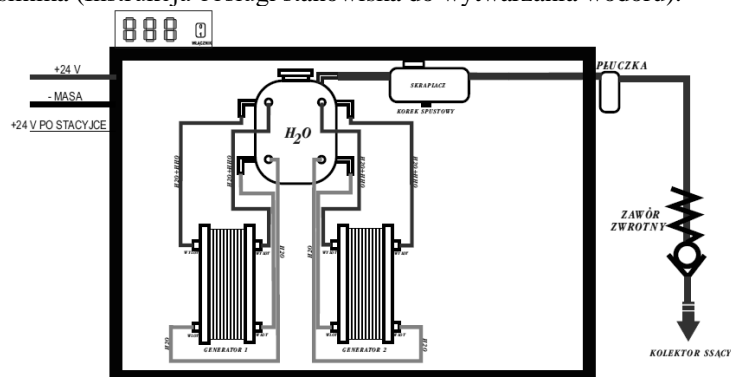
W Laboratorium Inżynierii OZE działającym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego znajduje się stanowisko pokazowo-dydaktyczne ogniwa paliwowego (Rys.3). Proste eksperymenty z wykorzystaniem modelu generatora wodoru mają zapewnić łatwe zrozumienie podstawowych zasad technologii wodorowej.



Rys. 3. Stanowisko pokazowo-dydaktyczne ogniwa paliwowego - wytwornica wodoru (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

W skład zestawu ogniwa wchodzi dwa generatory wodoru z 21 celami reakcyjnymi, 10-cio litrowy zbiornik na wodę, osuszacz gazu, dwa kontrolery CCPWM, amperomierz elektroniczny z wyłącznikiem oraz przełączniki, boczniki, bezpieczniki oraz pozostała aparatura. Na (Rys.4) przedstawiono schemat poglądowy zestawu do wytwarzania wodoru (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

Generator ten jest przystosowany do współpracy z silnikiem spalinowym diesla, benzyny lub lpg. Aby praca generatora była prawidłowa i bezpieczna gaz musi być zassany przez silnik i podany dalej do komory spalania. Ważne jest, aby mieć pewność, że produkowany przez generator gaz jest zasysany i nieprzerwanie dostarczany do komory spalania i spala się we właściwy sposób bezpieczny dla silnika (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).



Rys. 4. Schemat wytwornicy wodoru znajdującej się w Laboratorium Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii na UTP w Bydgoszczy (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

Aby prawidłowo wykonać roztwór do naczynia należy wsypać i rozrobić porcję otrzymanego wraz z generatorem katalizatora KOH – około 5gr wodorotlenku potasu na litr wody destylowanej, następnie należy wlać go do zbiornika generatora. Jeżeli dodamy zbyt dużą ilość katalizatora KOH do wody w generatorze, może to spowodować, że zbyt wysokie przewodzenie prądu przez wodę w generatorze, będzie równe zwarcia. Może ulec przepaleniu bezpiecznik

chroniący zasilanie generatora lub uszkodzone zostaną CC PWMy odpowiadające za prawidłową pracę urządzenia. Należy wtedy zrobić nowy roztwór wodny z mniejszą ilością katalizatora. Zbiornik należy wypełnić maksymalnie do około połowy objętości, nie więcej jednak, ponieważ należy zostawić miejsce w zbiorniku na oddzielenie się gazu od wody. Ze zbiornika z wodą wodór dostaje się do tzw. skraplacza, jest to zbiornik, w którym skrapla się para z resztek chemii i wody tak, aby w jak najczystszej postaci gaz został podany do spalania w komorze silnika. Na boku urządzenia znajduje się rodzaj płuczki w postaci białej buteleczki przeznaczonej do filtrowania gazu HHO oraz zabezpieczenia przed cofnięciem się iskry. Powinna ona być wypełniona do połowy czystą wodą tak, aby w razie potrzeby ugasiała nam cofający się płomień. Zwalnia ona także od potrzeby stosowania zaworku zwrotnego w układzie (w zestawie jednak ze względów bezpieczeństwa jest dołączony) i powoduje, że do silnika dostarczamy tylko czysty gaz a nie np. resztki czasami tworzącej się piany. W górnej części urządzenia zainstalowany jest amperomierz za pomocą, którego dokładnie widzimy na jakim poziomie prądu pracują dwa generatory HHO. Obok wyświetlacza znajduje się wyłącznik główny. Obok zbiornika jest zainstalowany tzw. skraplacz, pozwala on na to, aby para, która wytwarza się podczas pracy urządzenia została skroplona w zbiorniku, a czysty suchy gaz został podany dalej do komory silnika. Urządzenie ustawione jest fabrycznie na około 25A. Można za pomocą zainstalowanych CCPWM ustawić wyższy amperaż, ale nie więcej niż 30A, aby nie uszkodzić instalacji. Po bokach generatorów zamontowane są CC PWM. Służą one do precyzyjnego ustawienia amperażu i częstotliwości pracy generatorów. Jest tam także bezpiecznik główny 30A oraz przekaźniki sterujące urządzeniem (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

Podsumowując, cała instalacja, generator i sterownik działa tylko wtedy prawidłowo, gdy jest włączona w obwód zasysania powietrza i zasilania w czasie pracy silnika samochodu. Można zrezygnować ze sterownika CC PWM i regulować natężenie prądu ilością chemii w układzie sypiąc 5 gr wodorotlenku KOH na 1L wody najlepiej destylowanej. Powoduje to bardzo spokojną i stabilną pracę generatora. Jednak wytwarza się wtedy mniej gazu (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

Na wężyku wylotowym z gazem HHO zainstalowany jest zaworek zwrotny. Jest to zaworek kierunkowy i należy go tak założyć, aby gaz mógł swobodnie się wydostać z układu i trafić do silnika. Zabezpiecza nam on dodatkowo instalację przed uszkodzeniem (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

Generator HHO wzbogaca paliwo standardowe o wodór, co powoduje lepszą efektywność spalania. Poza tym generator niweluje szkodliwe działanie na silnik tzw. biokomponentów dodawanych do paliw, co przedłuża znacznie żywotność silnika (Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru).

7. Podsumowanie i wnioski

Sektor transportu jest jednym z obszarów o wysokim zużyciu paliw kopalnych, a co z tym związane emitentem znacznych ilości toksycznych związków zanieczyszczających środowisko naturalne. Poszukiwanie i wprowadzanie alternatywnych sposobów zasilania silników pojazdów mechanicznych ma przyczynić się do realizacji założeń Unii Europejskiej o ograniczeniu emisji dwutlenku węgla oraz polepszenia jakości ekosystemu. Obok coraz popularniejszych biopaliw płynnych czy biogazu za paliwo przyszłości uważa się wodór.

Wodór pod względem energetycznym jest paliwem o wysokim potencjale. Jednak niektóre jego właściwości (lotność, łatwopalność) stwarzają problemy z wdrożeniem technologii wodorowej w pojazdach mechanicznych. Instalacje zasilane wodorem wymagają zmian w układzie paliwowym, szczególnie jeżeli chodzi o szczelność instalacji, układ doprowadzania paliwa oraz magazyn wodoru o odpowiednich parametrach ciśnienia. Istotną kwestią jest przede wszystkim koszt zaimplementowania napędów wodorowych do pojazdów, nadal są to dość wysokie koszty w porównaniu z innymi technologiami.

Przed branżą motoryzacyjną stoi wiele kwestii do rozwiązania dla wprowadzenia i upowszechnienia aut z napędem wodorowym. Ważną kwestią będącą w pewnym zakresie barierą rozwoju napędów wodorowych są kosztowne metody jego wytwarzania na skalę masową.

W pojazdach mechanicznych wodór może być wykorzystywany w silnikach o bezpośrednim spalaniu wodoru lub w ogniach paliwowych. Technologie wodorowe w samochodach nie cieszą się jednak dużą popularnością z powodu pojawiających się obaw o bezpieczeństwo (zagrożenie wybuchem). W ramach dobrych praktyk wartym rozważenia jest więc uświadamianie społeczeństwa na temat zasady działania instalacji wodorowych, czego przykładem może być stanowisko do wytwarzania wodoru znajdujące się na Wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy.

8. Literatura

- Badyda AJ (2010) Zagrożenia środowiskowe ze strony transportu. Nauka nr 4: 115-125.
- Chamousis R (2009) Hydrogen: fuel of the future. [online: www.csustan.edu].
- Davis C i inni. (2003) Hydrogen Fuel Cell Vehicle Study. A Report Prepared for the Panel on Public Affairs (POPA) American Physical Society.
- Deluchi MA, Ogden JM (1993) Solar-Hydrogen Fuel-Cell Vehicles. Transportation Research-A. Vol. 27A nr 3: 255-275.
- Dincer I (2008) Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Sustainable Future. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Vol. 2., nr 1: 1-14.
- Instrukcja obsługi stanowiska do wytwarzania wodoru.
- Jain IP (2009) Hydrogen the fuel for 21st century. International Journal Of Hydrogen Energy. nr 34: 7368-7378.
- Karim GA (2007) Hydrogen as an engine fuel some pros and cons. Journal of KONES Powertrain and Transport. Vol. 14 nr 4: 153-164.
- Kruszelnicka W, Kozłowska N, Mroziński A (2015) Analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej podgrzewania wody użytkowej przez instalację zasilaną modułami fotowoltaicznymi. Mechanik. Nr 10: 70-80.
- Kumar P, Britter R, Gupta N (2009) Hydrogen Fuel: Opportunities and Barriers. Journal of Fuel Cell Science and Technology. vol. 6, nr 2: 1-7.
- Lewandowski WM (2010) Proekologiczne odnawialne źródła energii. Wydanie IV. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne.
- Marzec A (2007) Problemy wodorowego paliwa. Polityka energetyczna. Vol 10, nr 1: 89-96.
- Piasecka I, Kruszelnicka W i inni. (2015) Ocena energochłonności cyklu istnienia lądowej elektrowni wiatrowej typu Vestas V100. Ekologia i Technika. Vol. 23 nr 3: 149-152.
- Praca zbiorowa (2015) Technology Roadmap: Hydrogen and Fuel Cells, OECD/IEA, Francja.

7. Eksperymentalne wyznaczenie częstotliwości drgań własnych elastycznych przewodów mikrohydraulicznych

Experimental identification of natural frequencies of vibration of microhydraulic hoses

Marek Lubecki

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Michał Stosiak, prof. PWr

Marek Lubecki: marek.lubecki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: wibracje, hydraulika, badania

Streszczenie

Fakt występowania drgań w układach mechanicznych jest powszechny i znany. Zjawisko to jednak może mieć wiele niekorzystnych konsekwencji. Szczególnie niebezpieczny w skutkach bywa rezonans, czyli nałożenie się na siebie częstotliwości wymuszenia oraz częstotliwości drgań własnych elementu wymuszanego. W napędzie hydrostatycznym, jednym z miejsc gdzie zjawisko rezonansu może występować są przewody tak sztywne, jak i elastyczne, a wymuszenia pochodzą od pulsacji ciśnienia cieczy i wydajności w układzie, jak również od drgań innych części maszyny której układ hydrauliczny jest częścią. Jednym ze sposobów uniknięcia rezonansu przewodów elastycznych jest takie ich zaprojektowanie oraz montaż, aby ich częstotliwość drgań własnych nie pokrywała się z częstotliwościami wymuszeń podczas pracy urządzenia. O ile w hydraulice konwencjonalnej dysponujemy już zależnościami pozwalającymi modelować przewody elastyczne i wyliczać ich częstotliwości własne, o tyle w mikrohydraulicznych zagadnienie to nadal wymaga opracowania. W pracy przedstawiono eksperymentalne podejście do wyznaczania tych częstotliwości. Opisano stanowisko badawcze, sposób przeprowadzania eksperymentu oraz analizy danych pomiarowych. Z przedstawionych rezultatów wynika, że istniejące w konwencjonalnej hydraulice zależności pozwalające obliczać częstotliwości drgań własnych przewodów w skali mikro nie zawsze mogą być stosowane. Zachowana jest jednak prawidłowość przesuwania się częstotliwości własnej elementu w zależności od ciśnienia i natężenie przepływu w układzie.

1. Wstęp

Jednym z najsilniej obserwowanych trendów we współczesnej budowie maszyn jest miniaturyzacja. Zmniejszenie wymiarów oraz mas elementów prowadzi często do dużo wydajniejszej pracy konstruowanych układów, jak również pozwala na stosowanie w niewielkich maszynach technologii dotychczas zarezerwowanych tylko dla większych jednostek. Przykładem może być napęd hydrostatyczny, do tej pory utożsamiany z maszynami ciężkimi, który dzięki miniaturyzacji znajduje jeszcze szersze zastosowanie na przykład w robotyce, inżynierii medycznej, przemyśle samochodowym czy rozrywkowym (Kollek i in. 2011).

Mikrohydraulika jest działem napędu hydraulicznego, w którym natężenia przepływu w układzie nie przekraczają 2 l/min. Przystępując do procesu projektowania urządzeń z takim napędem istotna jest znajomość charakterystyk statycznych poszczególnych elementów, lecz także ich zachowania przy dynamicznie zmieniających się warunkach pracy i obciążeniach. Pozwala to uzyskać w konstruowanym układzie zadane parametry pracy i zapewnić jego bezproblemowe i bezawaryjne działanie. Jednym z takich właśnie zagadnień dynamicznych jest szacowanie częstotliwości drgań własnych elastycznych przewodów mikrohydraulicznych.

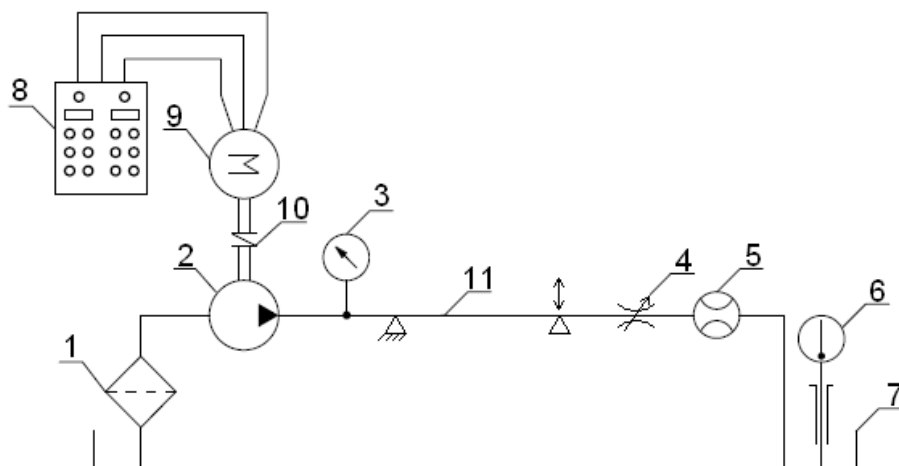
Fakt występowania zjawiska drgań w układach mechanicznych jest znany, oraz badany od wielu lat (Osiński 1980). Drgania elementów napędu hydrostatycznego wzbudzone zostać mogą na skutek działania wymuszenia zewnętrznego pochodzącego z pracy innych elementów i układów maszyny (silnik, przekładnie, układ jezdny, elementy robocze) lub poprzez pulsacyjny przepływ medium w układzie (spowodowany pulsacją wydajności pompy czy stanami przejściowymi układu)

(Kudźma 2012). Szczególnie niebezpieczne jest wystąpienie zjawiska rezonansu tj. nałożenia się częstotliwości oscylacji wymuszenia na częstotliwość drgań własnych elementu gdyż prowadzi to do gwałtownego, niekontrolowanego wzrostu amplitudy (a co za tym idzie prędkości i przyspieszeń) drgań elementu i może być przyczyną szybszego zużycia zmęczeniowego lub nawet katastroficznego zniszczenia zespołu (Osiński 1980). Do innych skutków drgań elementów hydraulicznych zaliczyć można zwiększoną emisję hałasu, trudności a uzyskaniu precyzyjnego sterowania odbiornikami (Stosiak 2015).

Istniejące dotychczas publikacje dość dokładnie opisują drgania konwencjonalnych przewodów hydraulicznych (tak elastycznych jak i sztywnych), wzbudzone wymuszeniem zewnętrznym jak również przepływem wewnątrz przewodu (Czerwiński i Łuczko 2015; Łuczko i Czerwiński 2016; Paidoussis 1998). Istnieje jednak potrzeba badania tych zagadnień w odniesieniu do przewodów w skali mikro, gdyż tak istotna zmiana parametrów elementów i układów stawia pod znakiem zapytania stosowalność dotychczasowych metod.

2. Materiał i Metody

Badaniu poddano dostępny na rynku przewód elastyczny Polyflex 2020N-012U30 firmy Parker Hannifin, którego średnica wewnętrzna wynosiła $d = 2\text{mm}$, a zewnętrzna $D = 3,2\text{mm}$. Długość przewodu dla której prowadzone były pomiary to $L = 600\text{mm}$. Badany przewód pracował w układzie hydraulicznym w którego skład wchodziły: pompa zębata WPH PZ3A1G, nastawny zawór dławiący, manometr do kontroli ciśnienia średniego, przepływomierz Parker K-SCVF-002-10-07X do kontroli średniego natężenia przepływu, termometr Elmetron PT-217, filtr oleju oraz zbiornik (Rys. 1).

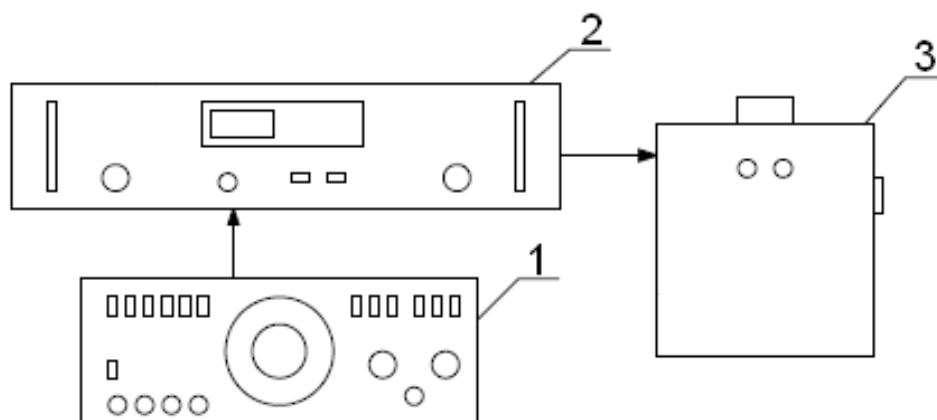


Rys. 1. Układ hydrauliczny: 1 – filtr oleju, 2 – pompa, 3 – manometr, 4 – nastawny zawór dławiący, 5 – przepływomierz, 6 – termometr, 7 – zbiornik, 8 – szafa sterownicza, 9 – silnik elektryczny, 10 – miernik momentu obrotowego, 11 – badany przewód.

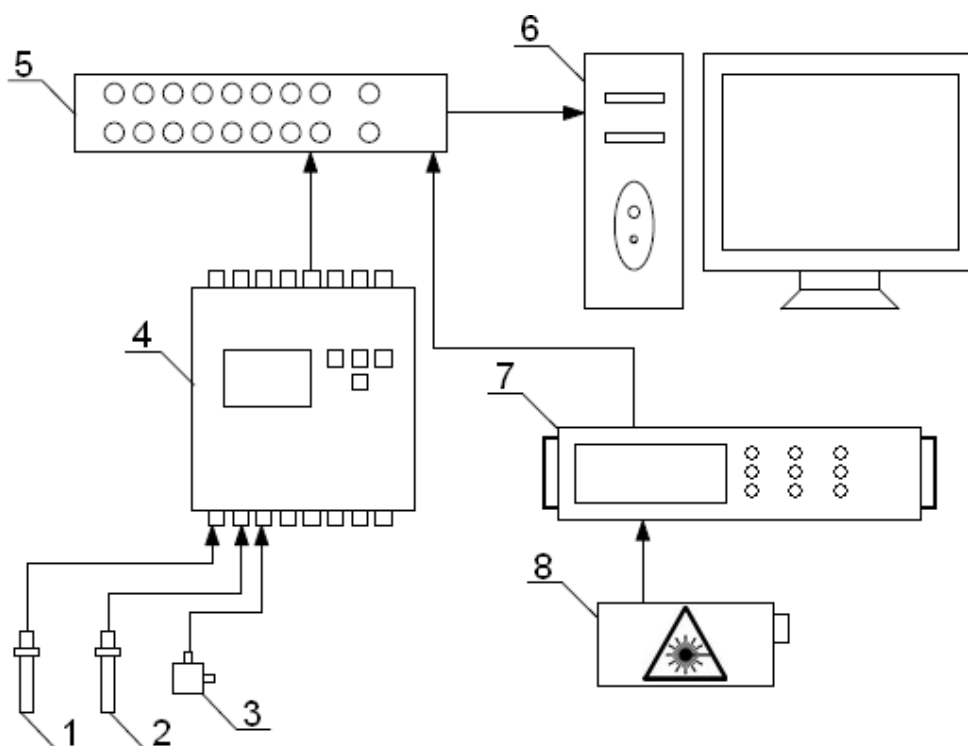
Wymuszenie zewnętrzne symulowano poprzez sztywne przymocowanie przewodu do elektromagnetycznego wzbudnika drgań Brüel&Kjær 4809 zasilanego przez wzmacniacz mocy Brüel&Kjær 2718, a przebieg wymuszenia generowany został przy wykorzystaniu cyfrowego generatora funkcji (Rys. 2.). Za pomocą piezoelektrycznych czujników ciśnienia rejestrowano wartości pulsacji ciśnienia w układzie przed oraz za przewodem, a wartości przyspieszenia drgań wzbudnika rejestrowano używając piezoelektrycznych akcelerometrów. Prędkość drgań badanego przewodu mierzono w środku jego długości przy wykorzystaniu wibrometru laserowego firmy Polytec (Rys. 3.). Metoda taka wybrana została z uwagi na niewielką masę badanego układu mechanicznego i chęć uniknięcia błędów wynikających z wprowadzenia do układu dodatkowej masy czujnika. Wymuszenie zadawano w zakresie częstotliwości od 15 Hz o 100 Hz z krokiem co 5 Hz, a wzbudnik zasilany był napięciem 1V. Częstotliwość próbkowania wynosiła 10 kHz. Obróbkę

wyników przeprowadzono w oprogramowaniu Origin Pro 9. Przebiegi czasowe prędkości drgań poddano analizie FFT dzięki czemu otrzymano charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe z których następnie odczytano wartości prędkości drgań odpowiadające konkretnym częstotliwościom wymuszeń i stworzono z nich wykresy zbiorcze dla różnych wartości ciśnień i natężeń przepływu. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 4.

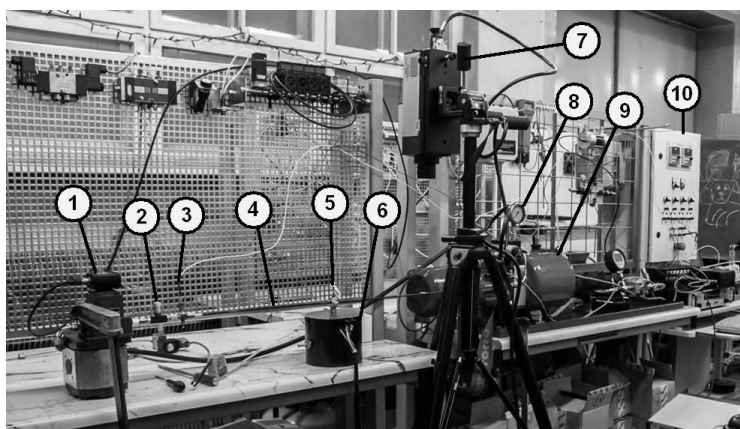
Częstotliwości drgań własnych identyfikowane były jako te, dla których przy wymuszeniu następował duży, widoczny wzrost prędkości oscylacji przewodu.



Rys. 2. Układ wymuszenia drgań: 1 – generator funkcji, 2 – wzmacniacz mocy, 3 – wzbudnik.



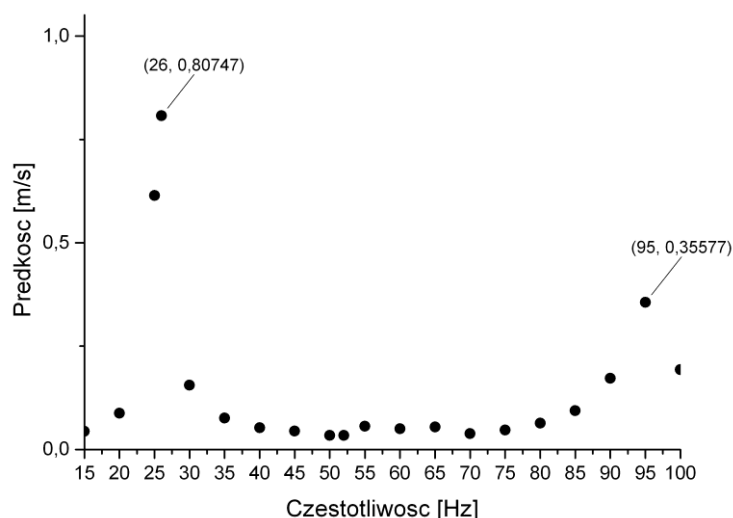
Rys. 3. Układ pomiarowy: 1, 2 – piezoelektryczne czujniki ciśnienia, 3 – akcelerometr piezoelektryczny, 4 – kondycjoner sygnału, 5 – karta pomiarowa, 6 – komputer PC, 7 – sterownik wibrometru, 8 – głowica laserowa.



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego: 1 – przepływomierz, 2 – zawór dławiący, 3 – czujnik ciśnienia, 4 – badany przewód, 5 – czujnik przyspieszeń, 6 – wzбудnik drgań, 7 – głowica wibrometru, 8 – manometr, 9 – zasilacz hydrauliczny, 10 – szafa sterownicza.

3. Wyniki

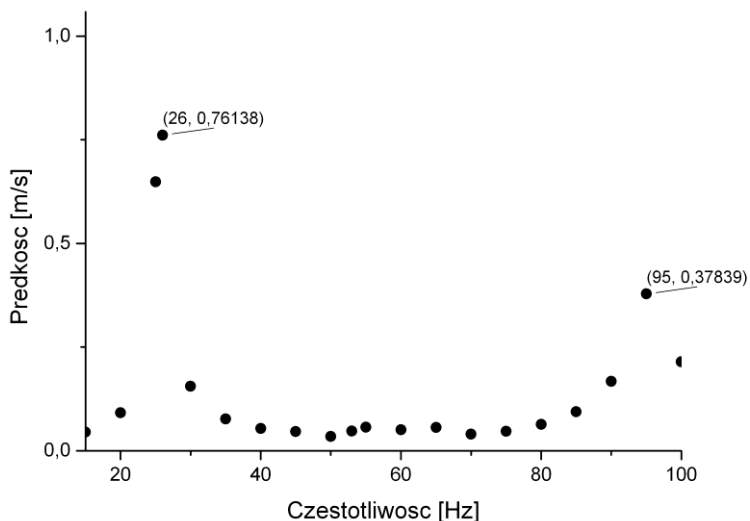
Pierwsza seria pomiarowa wykonana została przy wyłączonym układzie hydraulicznym. miało to na celu ustalenie częstotliwości drgań własnych przewodu bez uwzględniania przepływu i ciśnienia płynącej cieczy. Rysunek 5. przedstawia wykres prędkości drgań przewodu w funkcji częstotliwości wymuszenia. Pierwsza częstotliwość drgań własnych tego przewodu widoczna na wykresie to 26 Hz, a w okolicach 95 Hz widać również trzecią częstotliwość.



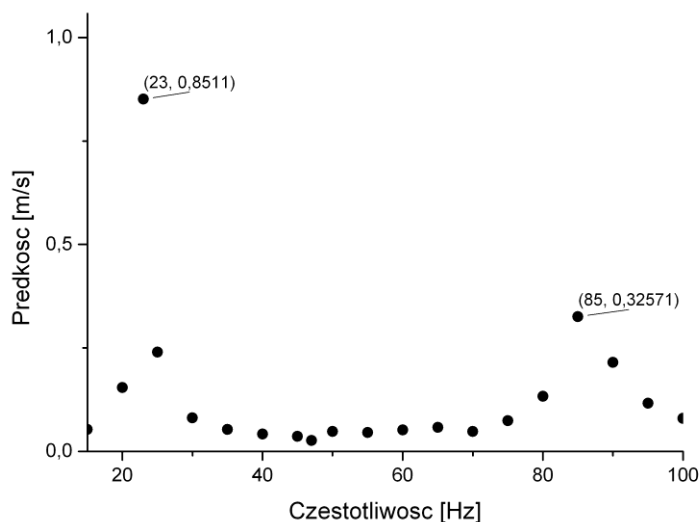
Rys. 5. Zależność prędkości drgań przewodu od częstotliwości wymuszenia przy wyłączonym układzie hydraulicznym.

Ze względu na umiejscowienie promienia wibrometru laserowego w połowie długości badanego elementu nie możemy łatwo zidentyfikować drugiej częstotliwości drgań, gdyż w miejscu pomiaru tworzył się węzeł fali. Kolejne serie pomiarów przeprowadzone zostały przy włączonym układzie hydraulicznym. Celem było zbadanie wpływu natężenia przepływu i ciśnienia płynącego w przewodzie medium na zmianę wartości częstotliwości drgań własnych. Rysunek 6. pokazuje, że niskie parametry zarówno ciśnienia w układzie jak i natężenia przepływu ($Q = 0,21/\text{min}$, $p = 5 \text{ MPa}$) nie wpływają w widoczny sposób na te częstotliwości. Zwiększenie natężenia przepływu jednak z $0,2 \text{ l/min}$ do $1,4 \text{ l/min}$ (Rys. 7.) spowodowało już widoczne zmniejszenie częstotliwości podstawowej

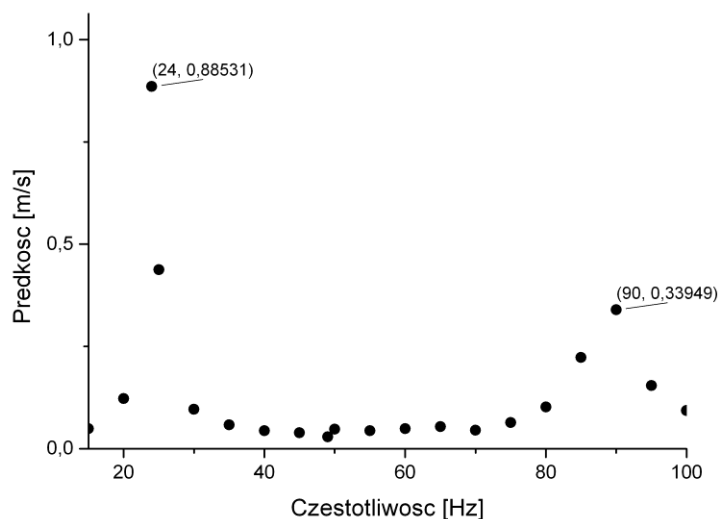
o ok. 3 Hz, natomiast trzeciej o 10 Hz. Na rysunku 8. przedstawione zostały wyniki ostatniej serii pomiarowej, w której wartość natężenia przepływu pozostała na poziomie 1,4 l/min, natomiast wartość ciśnienia średniego w układzie zwiększono z 5 MPa, do 15 MPa. Widać nieznaczny wzrost podstawowej częstotliwości drgań własnych z 23 Hz do 24 Hz oraz trzeciej z 85 Hz do 90 Hz.



Rys. 6. Zależność prędkości drgań przewodu od częstotliwości wymuszenia przy ciśnieniu $p = 5$ MPa i natężeniu przepływu $Q = 0,2$ l/min.



Rys. 7. Zależność prędkości drgań przewodu od częstotliwości wymuszenia przy ciśnieniu $p = 5$ MPa i natężeniu przepływu $Q = 1,4$ l/min.



Rys. 8. Zależność prędkości drgań przewodu od częstotliwości wymuszenia przy ciśnieniu $p = 15$ MPa i natężeniu przepływu $Q = 1,4$ l/min.

4. Dyskusja i wnioski

We wszystkich seriach pomiarowych zaobserwowano, że kolejne częstotliwości drgań przewodu nie są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej. przykładowo dla przypadku z wyłączonym układem hydraulicznym stosunek trzeciej częstotliwości drgań do pierwszej jest równy

$$\frac{f_3}{f_1} = \frac{95\text{Hz}}{26\text{Hz}} = 3,65 \quad (4.1)$$

Przyczyną takiego stanu rzeczy może być silna nieliniowość rozpatrywanego układu. Elastyczne przewody hydrauliczne są elementami kompozytowymi wykonanymi z materiałów elastomerowych wzmacnianych oplotem stalowym. Właściwości obu materiałów jak również geometria wzmocnienia ma bardzo duży wpływ na otrzymywane wyniki.

W literaturze spotkać można wzory służące do analitycznego wyznaczenia podstawowej częstotliwości drgań własnych przewodów hydraulicznych. Opracowane one zostały jednak dla elementów hydrauliki konwencjonalnej, co stawia pod znakiem zapytania zasadność ich stosowania w skali mikro. Jeden z takich wzorów zaprezentowano poniżej (Baszta, 1966):

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EIg}{G_p + G_c}} [\text{Hz}] \quad (4.1)$$

gdzie:

L – odległość między podporami [cm],

E – moduł sprężystości materiału [kG/cm^2],

I – moment bezwładności przekroju [cm^4],

g – przyspieszenie ziemskie [cm/s^2],

G_p, G_c – ciężar bieżący jednego metra przewodu i cieczy [kG/cm].

Po podstawieniu do ww. zależności danych opisujących rozpatrywany układ otrzymano podstawową częstotliwość drgań własnych $f = 1,17$ Hz. Porównując to z wynikami otrzymanymi

metodą doświadczalną widać, że rozbieżność między wynikami jest bardzo duża (ponad 22 razy) co uniemożliwia analityczne określenie częstotliwości drgań własnych przewodów mikrohydraulicznych. Niezbędne są więc dalsze prace prowadzące do zbudowania modelu matematycznego takiego mikroprzewodu oraz określenia wzorów analitycznych, bądź analityczno-doświadczalnych pozwalających w prosty sposób wyliczyć te częstotliwości.

5. Literatura

- Baszta TM (1966) *Hydraulika w budowie maszyn*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Czerwiński A, Łuczko J (2015) Parametric vibrations of flexible hoses excited by pulsating fluid flow, Part II: Experimental research. *Journal of Fluids and Structures* 55: 174-190
- Kollek W i in. (2011) *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Kudźma Z. (2012) *Tłumienie pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych w stanach przejściowych i ustalonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
- Łuczko J, Czerwiński A (2016) Experimental and numerical investigation of parametric resonance of flexible hose conveying non-harmonic fluid flow. *Journal of Sound and Vibration* 373: 236-250
- Osiński Z (1980) *Teoria drgań*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa
- Paidoussis MP (1998) *Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*, vol. 1. Academic Press, Londyn
- Stosiak M (2015) *Identyfikacja oddziaływania drgań i metody ich redukcji w wybranych zaworach hydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

8. Przemysłowy Internet Rzeczy w monitorowaniu stanu obiektów technicznych

Marek Lubecki

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Michał Stosiak, prof. PWR

Marek Lubecki: marek.lubecki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: IoT, utrzymanie ruchu, IIoT, CBM

Streszczenie

Idea Internetu Rzeczy (IoT) jako sieci wzajemnie połączonych elementów mogących komunikować się ze sobą bez udziału człowieka jest powszechnie znana w technologii informacyjnej. Przemysłowy Internet Rzeczy w odróżnieniu od swojej wersji konsumenckiej jest koncepcją, która opiera się na łączeniu ze sobą maszyn i urządzeń, co w efekcie umożliwia ich współpracę oraz wymianę informacji w ramach systemów technicznych. W niniejszej pracy przedstawiono istniejące rozwiązania z zakresu czujników dedykowanych do zastosowań w IIoT, przykłady wdrożenia tej koncepcji w przemyśle i badaniach naukowych, jak również opisano perspektywy rozwoju związane z Przemysłowym Internetem Rzeczy.

1. Wstęp

Nieustający postęp techniczny oraz dynamicznie zmieniające się warunki rynkowe wymuszają na producentach maszyn wdrażanie rozwiązań nie tylko czysto mechanicznych, ale również korzystanie z osiągnięć takich dziedzin jak elektronika, mikroelektronika, informatyka czy inżynieria systemów. Szczególnie widoczne jest to w obszarze diagnostyki oraz monitorowania stanu technicznego elementów urządzeń, gdzie od wielu już lat z powodzeniem używane są różnego rodzaju czujniki (prędkości, przyspieszeń, drgań, ciśnienia, temperatury, hałasu), elektroniczne urządzenia do rejestrowania i przetwarzania sygnałów (wzmacniacze, kondycjonery, filtry, konwertery DA) czy też oprogramowanie komputerowe pozwalające na obróbkę i interpretację wyników pomiarów.

Utrzymanie według stanu technicznego (*ang. Condition-based maintenance, CBM*) jest strategią utrzymania ruchu, w której naprawy i wymiany elementów odbywają się tylko wtedy, kiedy są rzeczywiście konieczne. Nie dopuszcza się jednak do wystąpienia awarii, która mogłaby nieść za sobą straty spowodowane nieplanowanymi przestojami bądź koniecznością przeprowadzenia szerszego zakresu napraw. Aby jednak możliwe było utrzymanie według stanu, niezbędne jest bieżące monitorowanie stanu technicznego urządzeń i systemów w taki sposób, by w porę wykryć uszkodzeniowo zorientowane symptomy i w konsekwencji skutecznie zaplanować i podjąć działania zaradcze

Zgodnie z literaturą (Jardine i in. 2006) CBM składa się z trzech głównych kroków:

- I. Pomiar wielkości fizycznych, których wartości wykazują związek ze stanem technicznym urządzenia (np. hałas, drgania, temperatura),
- II. Przetwarzanie danych pomiarowych w sposób pozwalający na ich późniejszą interpretację (wzmacnianie, filtracja, rejestracja, przeprowadzanie operacji matematycznych),
- III. Ocena stanu technicznego obiektu na podstawie wyników pomiarów i podjęcie decyzji odnośnie dalszych działań w tym zakresie.

Idealnym rozwiązaniem byłoby nieustanne i równoległe prowadzenie wszystkich tych kroków, by możliwie jak najwcześniej zarejestrować niepokojące zmiany stanu technicznego obiektu i podjąć adekwatne działania.

Internet Rzeczy (*ang. Internet of Things, IIoT*) jest to koncepcja zakładająca wyposażenie pojazdów, przedmiotów użytkowych, maszyn i innych obiektów w sensory, układy elektroniczne, oprogramowanie i łączność bezprzewodową w taki sposób, by mogły one łączyć się między sobą tworząc sieć oraz wymieniać informacje bez udziału człowieka. Każdy element takiej sieci posiada

swoją unikatową nazwę, co pozwala na jego łatwą identyfikację. Otwiera to szereg możliwości tworzenia sieci współpracujących ze sobą urządzeń, takich jak autonomiczne pojazdy, inteligentne domy czy też zaawansowane systemy produkcyjne, które mogą na bieżąco diagnozować swój stan oraz informować o zaistniałych bądź przewidywanych problemach (Serpanos i Wolf 2018).

Rozwinięciem idei IoT jest tzw. Przemysłowy Internet Rzeczy (*ang. Industrial Internet of Things, IIoT*). Wywodzi się on z opracowanej w Niemczech w latach 2011-2013 strategii Przemysłu 4.0 (niem. Industrie 4.0), której główne założenia obejmują (Hermann i in. 2016):

- łączność między elementami sieci – maszyny mają możliwość komunikacji i współpracy między sobą, wykorzystując do tego łączność przewodową i bezprzewodową, co w efekcie umożliwia osiągnięcie wspólnych celów
- decentralizację decyzji – każdy element sieci wykonuje swoje zadania możliwie niezależnie, a jedynie w razie wystąpienia sytuacji nadzwyczajnych decyzje podejmowane są na wyższych poziomach,
- transparentność informacji – informacje zbierane przez sensory i przetwarzane przez systemy pomocnicze muszą być dostępne w każdej chwili dla każdego elementu sieci,
- współpracę człowiek-maszyna – rola czynnika ludzkiego w systemie technicznym w głównej mierze obejmuje sprawowanie nadzoru nad prawidłową pracą urządzeń oraz podejmowanie decyzji w sytuacjach wyjątkowych. Konieczne jest zatem istnienie takich systemów, które będą wspomagały podejmowanie takich decyzji, między innymi za pomocą zbierania danych, przetwarzania ich i prezentowania w przystępnej formie.

Przykładem mogłyby być „inteligentne” elementy i układy hydrauliczne, które np. same diagnozowałyby występującą kawitację lub nadmierne drgania elementów sterujących zaworu lub niedopuszczalny (z punktu widzenia ustanowionej wielkości kryterialnej) poziom pulsacji ciśnienia. Pozwoliłoby to na korekcję parametrów pracy układu bez konieczności angażowania załogi.

2. Istniejące rozwiązania

Aby możliwe było ciągłe zbieranie informacji dotyczących stanu technicznego obiektów, konieczne jest wyposażenie ich w zestaw sensorów rejestrujących zmiany wielkości fizycznych, których określone wartości można zdefiniować jako sygnały zorientowane uszkodzeniowo. W obiektach mechanicznych najczęściej są to różnego rodzaju prędkości, przyspieszenia, przemieszczenia, siły, temperatura i hałas, a w układach hydraulicznych natężenie przepływu, ciśnienie oraz poziom zanieczyszczenia cieczy roboczej.

Pierwszym rozwiązaniem wpisującym się w ideę IIoT jest seria czujników, SensoNODE Gold firmy Parker Hannifin (Rys. 1.). Pozwalają one na ciągły, bezprzewodowy pomiar, a w połączeniu z dedykowaną platformą do przechowywania danych i prowadzenia obliczeń w chmurze SCOUT Cloud, a także na monitorowanie i podejmowanie decyzji niezależnie od miejsca, w którym znajduje się osoba przeprowadzająca badanie. W rodzinie SensoNODE dostępne są czujniki ciśnienia, temperatury, przemieszczenia, wilgotności i napięcia jak i również przetwornik pozwalający na przekształcenie konwencjonalnych, posiadanych już sensorów w bezprzewodowe i podłączenie ich do sieci (Parker 2017).

Kolejnym ciekawym urządzeniem jest PumpMD (Rys. 2.). Jest to rodzaj czujnika umieszczonego w porcie odprowadzającym przecieki z wielotłoczkowych, osiowych pomp hydraulicznych, którego zadaniem jest diagnostyka stanu pompy i ostrzeżenie przed możliwością wystąpienia awarii. Aktualnie w sprzedaży znajduje się wersja posiadająca łączność przewodową, która pozwala na monitorowanie temperatury, ciśnienia i natężenia przepływu przecieków jak i również podająca informacje o aktualnej sprawności elementu. Na etapie opracowania znajduje się natomiast wersja posiadająca dodatkowo funkcję łączności bezprzewodowej z zastosowaniem standardu Wi-Fi, która rozszerza dotychczasową funkcjonalność urządzenia o możliwość wysyłania powiadomień na urządzenia mobilne, dostęp do danych historycznych jak również umożliwia planowanie przeglądów i remontów (PumpMD 2017).

Jednymi z najczęściej wymienianych elementów w układach hydraulicznych są bez wątpienia przewody elastyczne. Standardowym podejściem praktykowanym w większości dużych

przedsiębiorstw produkcyjnych jest planowanie wymiany elementów co określoną liczbę godzin pracy maszyny, bazując na danych statystycznych dotyczących czasu życia przewodów. Firma Eaton zaprezentowała więc rozwiązanie pozwalające zaimplementować filozofię CBM także w powyższym przypadku. LifeSense jest systemem monitorowania stanu elastycznych przewodów hydraulicznych, dającym służbom utrzymania ruchu informacje, który z nich wymaga już wymiany, a który, pomimo przepracowania określonej liczby godzin, kwalifikujących go w standardowym systemie do wymiany, może jeszcze bezpiecznie pracować.



Rys. 1. Czujniki temperatury serii SensoNODE Gold firmy Paker Hannifin (Parker 2017).



Rys. 2. Czujnik PumpMD służący do monitorowania stanu technicznego wielotłoczkowych, osiowych pomp hydraulicznych (PumpMD 2017).

W skład systemu LifeSense wchodzi specjalnie opracowane przewody elastyczne, zakucia, czujniki oraz elektroniczne urządzenia przetwarzające sygnał i wysyłające dane do serwera, a także oprogramowanie do wizualizacji wyników. Wśród korzyści deklarowanych przez producenta wymienić można między innymi:

- wydłużenie czasu między wymianami elementów nawet o 50%,
- poprawę bezpieczeństwa załogi, maszyn oraz środowiska dzięki wczesnemu wykrywaniu nadchodzących awarii oraz optymalizację, a także
- zwiększenie czasu pracy urządzenia, poprzez możliwość planowania remontów z odpowiednim wyprzedzeniem (Eaton 2015).

3. Przykłady zastosowań

Pomimo, iż Przemysłowy Internet Rzeczy wydawać się może koncepcją dość nową, znaleźć można szereg przykładów wdrożenia tego podejścia w przemyśle do monitorowania obiektów technicznych.

Gałęzią, w której IIoT wykorzystywany jest szczególnie szeroko jest nowoczesne rolnictwo. Pierwszym zastosowaniem, które zostało znalezione jest wspieranie rolników podczas planowania prac polowych oraz obsługi maszyn. Szereg sensorów umieszczonych w miejscu prowadzenia upraw zbiera dane o stanie roślin, kondycji gleby, chwastach szkodnikach i warunkach otoczenia, po czym przesyła je bezprzewodowo do komputera zarządzającego bądź do chmury. Następnie informacje znajdujące się w tym miejscu, połączone z danymi GPS obrabiane są przez specjalnie zaprojektowane algorytmy, a rolnik otrzymuje niezwykle precyzyjne informacje o stanie upraw w czasie rzeczywistym. Pozwala to optymalnie planować prace polowe, a także dobierać dawki nawozów czy środków ochrony roślin (Jaiganesh i in. 2017; Zhuang i in. 2014).



Rys. 3. System LifeSense firmy Eaton; 1 – jednostka diagnozująca, 2 – czujnik, 3 – przewód hydrauliczny (Eaton 2015).

Kolejnym zastosowaniem IIoT w rolnictwie jest monitorowanie stanu maszyn roboczych i współpraca z operatorem podczas ich obsługi. Nowoczesne maszyny rolnicze, takie jak ciągniki, kombajny zbożowe i inne, wyposażone są w cały szereg różnego rodzaju sensorów oraz układów elektronicznych, które pozwalają gromadzić informacje o stanie urządzenia, ilości paliwa, czy pokonanej trasie, a standaryzowany system ich przesyłania za pomocą systemu ISOBUS umożliwia łatwy do nich dostęp (Steinberger i in. 2009). Dane te, razem z informacjami pobranymi z modułu GPS są analizowane, a następnie przekazywane operatorowi przez wyspecjalizowane oprogramowanie. W efekcie, pomagają one w precyzyjnym sterowaniu, zapewniając optymalne trasy

przejazdu przez pole i redukując zjawisko przejazdu na obszarze już uprawionym (np. przy wykonywaniu oprysków minimalizowane są obszary, gdzie nie został on zastosowany, jak również gdzie został zastosowany podwójnie). Pozyskane dane umożliwiają również synchronizację kilku maszyn wykonujących jednocześnie prace polowe na tym samym obszarze. Przekazuje także takie informacje jak ilość hektarów możliwych do obrobienia bez tankowania czy ilość materiału siewnego pozostałego w zasobniku przy wykonywaniu operacji siewu (Deere 2017; Oksanen i in. 2016).

Ciekawe podejście do monitorowania stanu obiektów technicznych znaleźć można w pracy (Dong i in. 2015), w której autorzy skorzystali z narzędzi Internetu Rzeczy by prowadzić diagnostykę on-line podnośnika hydraulicznego. Rejestrowano w niej wartości ciśnienia oraz natężenia przepływu w układzie, a system monitorujący zbudowano w oparciu o popularną światie IoT sieć ZigBee. Wykazano, że implementacja idei Internetu Rzeczy pozwoliła na budowę sprawnie funkcjonującego systemu, który w porównaniu z rozwiązaniami tradycyjnymi cechował się mniejszym kosztem, mniejszymi gabarytami oraz większą elastycznością pracy.

Analitycy Harvard Business Review przytaczają przykład firm Pirelli i Ford, które w swoich produktach zastosowały IoT (HBR 2014). Pirelli, monitorując na bieżąco parametry opon, takie jak ciśnienie powietrza czy temperatura przy jednoczesnym zapewnieniu ich optymalnej wartości w czasie eksploatacji, wygenerowało w czasie testów systemu oszczędności na poziomie 1500 dolarów rocznie z jednego pojazdu. Firma Ford, zbierając i analizując dane pochodzące z pojazdów stara się natomiast opracować schematy dotyczące stylu, w jakim kierowcy użytkują samochody. Badania te przyczynić mają się to do lepszego projektowania pojazdów pod kątem bezpieczeństwa i komfortu prowadzenia.

4. Perspektywy rozwoju

W ostatnich latach obserwować można coraz większe zainteresowanie Internetem Rzeczy, nie tylko ze strony ośrodków naukowych, lecz także firm produkcyjnych czy doradczych. Szacuje się, że nakłady inwestycyjne poniesione przez przedsiębiorstwa wzrosną z 215 mld. dolarów w roku 2015 do 832 mld. w roku 2020. Szczególny nacisk położony miałby zostać na rozwój platform pozwalających producentowi na zdalny monitoring urządzeń znajdujących się u klienta (PwC 2016). Przesunęłoby to ciężar planowania napraw z użytkownika na wytwórcę, jak również umożliwiłoby w miarę możliwości usuwać usterki na odległość. Wymaga to jednak od producentów nierzadko zmiany podejścia do projektowanych urządzeń oraz odejścia od układów typowo mechanicznych czy elektromechanicznych na rzecz integracji zaawansowanych rozwiązań informatycznych.

Interesującym działaniem z perspektywy biznesowej, może być wyposażenie maszyn w czujniki z łącznością IIoT po to, by nie prowadzić sprzedaży urządzeń, ale zamiast tego wypożyczać je klientom, a następnie przeprowadzać rozliczenia na podstawie precyzyjnie obliczonych roboczogodzin lub nawet zużycia maszyny (PwC 2016). Przykładowo, firma Michelin dzięki umieszczeniu czujników w pojazdach oraz w oponach ma możliwość nie tylko tworzyć rekomendacje dla użytkowników, opisujące w jaki sposób efektywnie zmniejszyć zużycie paliwa i opon, ale również pobierać opłaty nie za sztukę czy zestaw opon, lecz za liczbę przejechanych kilometrów (Accenture 2015).

5. Podsumowanie

Przemysłowy Internet Rzeczy jest koncepcją, która znajduje coraz szersze zastosowanie w wielu obszarach przemysłu, a prace nad jej rozwojem prowadzone są w ośrodkach naukowych na całym Świecie. Producenci oferują szereg elementów ułatwiających implementację IIoT w maszynach, począwszy od pojedynczych sensorów, a skończywszy na całych ekosystemach zbierających, przetwarzających, magazynujących i prezentujących dane. Głównymi gałęziami przemysłu, gdzie dotychczas poczyniono w tym obszarze największe inwestycje są rolnictwo, przemysł motoryzacyjny oraz wytwórczy. Szacuje się natomiast, że w nadchodzących latach Internet Rzeczy diametralnie zmienić może sposób konstruowania, wytwarzania oraz eksploatacji obiektów technicznych prowadząc do zwiększenia niezawodności, bezpieczeństwa i komfortu użytkownika przy jednoczesnej redukcji kosztów obsługi.

6. Literatura (wymieniona alfabetycznie)

- Accenture (2015) Driving Unconventional Growth through the Industrial Internet of Things
- Eaton (2015) LifeSense Master catalog, assembly, installation and service manual
- Harvard Business Review (2014) Internet of Things: Science Fiction or Business Fact?
- Hermann M, Pentek T, Otto B, (2016) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, 49th Hawaii International Conference on System Sciences
- Jaiganesh S, Gunaseelan K, Ellappan V (2017) IOT Agriculture to improve Food and Farming Technology, Proc. IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems, 3-4 March 2017, Mahendra Engineering College, Tamilnadu, India
- Jardine A K S, Lin D, Banjevic D (2006) A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, p. 1483-1510
- John Deere (2017) Precision Ag Technology [online] <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology> [dostęp 29.12.2017]
- Oksanen T, Linkolehto R, Seilonen I (2016) Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery: a combine harvester with IoT, IFAC-PapersOnLine Vol. 49-16, p. 127–131, Elsevier
- Parker Hannifin (2017) Condition Monitoring and Diagnostic Solutions SensoNODE Sensors and SCOUT Software
- PumpMD, (2017) About Us [online] https://www.mypumpmd.com/about_us [dostęp 21.12.2017]
- PwC (2016) The Industrial Internet of Things
- Serpanos D, Wolf M, (2018) Internet-of-Things (IoT) Systems, Architectures, Algorithms, Methodologies, Springer
- Steinberger G, Rothmund M, Auernhammer H (2009) Mobile farm equipment as a data source in an agricultural service architecture, Computers and Electronics in Agriculture, Vol 67, p. 238-246
- Zhuang W, Feng Z Y, Yuan L (2014) NGI-Oriented Measure and Control System of Agriculture IOT, Applied Mechanics and Materials Vol. 568-570, p. 1389-1393, Trans Tech Publications, Switzerland

9. Etapy procesu identyfikacji ryzyka

Steps of the risk identification process

Łój-Pilch Magdalena, Zakrzewska Anita, Zielewicz Ewa

Zakład Wodociągów i Kanalizacji, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska w Gliwicach

Opiekun naukowy: dr hab. Ewa Zielewicz, prof. nzw. w Pol.Śl.

Łój-Pilch Magdalena: magdalena.loj-pilch@polsl.pl

Słowa kluczowe: ryzyko, zarządzanie ryzykiem, identyfikacja ryzyka, komunalne oczyszczalnie ścieków

Streszczenie

Każda oczyszczalnia ścieków, ze względu na dbałość o środowisko, zdrowie i życie ludzkie oraz prawodawstwo Unii Europejskiej, powinna prowadzić analizy ryzyka i na ich podstawie zarządzać ryzykiem. Proces ten składa się z dwóch głównych etapów: oceny ryzyka i sterowania ryzykiem. Jednym z elementów oceny ryzyka jest jego identyfikacja. Tylko poznanie w pełni zagrożeń, które mogą wystąpić na oczyszczalni pozwala na sprawne i rzetelne zarządzanie ryzykiem. Zdarzenia niekorzystne, występujące na oczyszczalni i mogące powodować ryzyko, można podzielić w zależności od czynników jakie je wywołały oraz zakres oddziaływania. Podział czynników niekorzystnych przeprowadza się uwzględniając źródło zagrożenia (wewnętrzne/zewnętrzne), jego standardowość (zwykajne/nadzwyczajne) oraz potencjalność (zaistniałe/utajone). Najprostsze do identyfikacji są zjawiska zwykajne oraz zaistniałe, czyli takie, które wystąpiły już wcześniej. Natomiast najtrudniej zidentyfikować jest zagrożenia utajone. Ze względu na obszar oddziaływania wyróżnia się ryzyko ekologiczne, finansowe, eksploatacyjne oraz jakościowe. Identyfikacja ryzyka, jak każdy proces, składa się z kilku etapów. Polegają one na analizie poszczególnych dokumentów, takich jak: karty pracy oczyszczalni, karty napraw i przeglądów poszczególnych urządzeń, zeszytu technologicznego oraz instrukcji eksploatacji. Każdy z tych dokumentów pozwala na zidentyfikowanie nowych zdarzeń niekorzystnych, mogących powodować ryzyko. Celem artykułu jest przedstawienie poszczególnych etapów identyfikacji ryzyka na przykładzie komunalnej oczyszczalni ścieków.

1. Wstęp

Występowanie ryzyka jest zjawiskiem powszechnym w trakcie funkcjonowania każdego obiektu technicznego. Ryzyko definiuje się jako prawdopodobieństwo strat w skutek wystąpienia zdarzeń niepożądanych (Kaczmarek 2008). Źródłem ryzyka są losowe zdarzenia niekorzystnie wpływające na założone cele oraz zagrożenia uniemożliwiające realizację założeń (Łęgowik-Świącik 2012; Andraka i Dzieńis 2013).

Proces zarządzania ryzykiem ma na celu eliminowanie zagrożeń lub ograniczanie wielkości powstałych szkód. Na proces ten składa się ocena ryzyka, jednym z jej elementów jest identyfikacja ryzyka, i sterowanie ryzykiem. Identyfikacja i ocena ryzyka są to etapy procesu zarządzania ryzykiem, które determinują dalsze działania oraz nakłady powiązane z zabezpieczeniem przedsiębiorstwa/obektu przed stratami finansowymi, będącymi skutkami wystąpienia ryzyka (Zawarska 2012). Proces identyfikacji polega na rozpoznawaniu zjawisk, które w niesprzyjających warunkach mogą powodować ryzyko. Dokładne zapoznanie się z zagrożeniami, które mogą wystąpić w trakcie eksploatacji obiektu/działania przedsiębiorstwa, umożliwi sprawne i rzetelne zarządzanie ryzykiem (Iwanejko i Rybicki 2008; Kokot-Stępień 2015). W trakcie identyfikacji powinny zostać realizowane następujące działania: określenie przyczyn i rodzaju ryzyka, wskazanie podmiotów dotkniętych ryzykiem, scharakteryzowanie zidentyfikowanych rodzajów ryzyka, stwierdzenie potencjalnych następstw oraz zakresu ich oddziaływania (Kaczmarek 2008; Korombel 2007; Kokot-Stępień 2015). Błędne zidentyfikowanie zagrożeń lub jego niezidentyfikowanie może powodować, że zarządzanie ryzykiem nie będzie spełniało swojej roli, a nawet może doprowadzić do powstania nowych sytuacji ryzykogenicznych (Zawarska 2012).

Przedstawione w artykule etapy procesu identyfikacji określono na podstawie osobistych doświadczeń i przemyśleń autorów, popartych analizą doniesień w literaturze przedmiotu.

2. Zarządzanie ryzykiem

W zależności od specyfiki przedsiębiorstwa będą występować różne rodzaje ryzyka. Wyróżnić można między innymi:

- ryzyko operacyjne (handlowe) – związane z możliwościami i umiejętnościami sprzedaży produktów, kosztami wytworzenia oraz cenami produktu (Stańczak 2014),
- ryzyko finansowe – związane z kapitałem przedsiębiorstwa, kredytami, zyskami i stratami, stopami procentowymi i kursami walut (Stańczak 2014),
- ryzyko techniczne – związane z dostępną technologią, ograniczeniami wydajności, wymaganiami jakościowymi (Thlon 2013),
- ryzyko prawne – związane z regulatorami prawnymi rynku, odpowiedzialnością prawną spółki, licencjami, ochroną praw autorskich oraz patentami (Thlon 2013)
- ryzyko społeczne – związane z przestrzeganiem zasad kulturalnych, religijnych, ustrojowych, tradycji społeczności, w której działa przedsiębiorstwo (Thlon 2013),
- ryzyko polityczne – związane z ingerencją władz lokalnych lub państwowych, czy organizacji międzynarodowych (Thlon 2013),
- ryzyko czynnika ludzkiego – związane z przepisami bezpieczeństwa i higieny pracy (Gajdzik 2013),
- ryzyko przyrodnicze – związane z zmiennymi warunkami klimatycznymi i biologicznymi, glebowymi, chorobami roślinności i inwentarzu zwierzęcego (Wawrzynowicz i inni 2012).

W zależności od rodzaju ryzyka, różne czynniki ryzykogenne będą występować w przypadku badanych obiektów. Również podejście osoby dokonującej analizy determinować będzie rodzaj rozpoznawanych zagrożeń. Przy całościowym zarządzaniu ryzykiem powinno się wziąć pod uwagę wszystkie aspekty oddziaływania przedsiębiorstwa/obiektu na środowisko i ludzi, oraz czynniki zewnętrzne/środowiskowe oddziałujące na przedsiębiorstwo/obiekt.

Rozpoznanie potencjalnego ryzyka pozwala na określenie zjawisk, które mogą negatywnie wpływać na działanie obiektu. Następnie należy dokonać jego oceny (Zawarska 2012). W literaturze można zapoznać się różnymi sposobami pomiaru ryzyka i jego oceny. Metody oceny ryzyka podzielić można na jakościowe, ilościowe oraz mieszane (Iwanejko i Rybicki 2008). Za najbardziej obiektywną metodę uznawana jest metoda mieszana, która łączy liczbową wielkość ryzyka (np. prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenie) z jego wartością względną (opisową), wynikającą z doświadczenia i wiedzy oceniającego (Iwanejko i Rybicki 2008; Zawarska 2012).

Identyfikacja, pomiar i ocena ryzyka umożliwiają określenie ryzyka, które jest kolejnym krokiem w procesie zarządzania ryzykiem. Ryzyko można określić jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia i powstałej, w jego wyniku, straty. Efektem takiego podejścia może być powstanie tzw. mapy ryzyka, której najprostszą wersję zaprezentowano na rysunku 1 (Liwacz 2004; Zawarska 2012).

Opisanie prawdopodobieństwa oraz straty jako „niskie(a)” lub „wysokie(a)” zależy od specyfikacji badanego obiektu oraz podejścia osoby dokonującej oceny ryzyka. Dlatego ważne dla prawidłowej oceny ryzyka są: doświadczenie, kompetencje oraz wiedza oceniającego.

Kolejnym etapem procesu zarządzania ryzykiem jest wyznaczenie jego dopuszczalności. Polega on na określeniu zakresu ryzyka na podstawie wcześniej przeprowadzonej identyfikacji i oceny ryzyka. Najczęściej, w praktyce, wyróżnia się 3 podstawowe zakresy ryzyka (Iwanejko i Rybicki 2008; Zawarska 2012):

- ryzyko wysokie (niedopuszczalne) – utrata bezpieczeństwa funkcjonowania obiektu, należy podjąć natychmiastowe działania (np. zastosować dodatkowe środki bezpieczeństwa, wyłączyć obiekt z eksploatacji) oraz zmniejszyć ryzyko bez względu na poniesione koszty,

- ryzyko średnie (tolerowane) – ryzyko możliwe do warunkowanego zaakceptowania, wówczas gdy ryzyko nie jest zbyt duże, a koszty związane z jego usunięciem są zbyt wysokie,
- ryzyko niskie (akceptowalne) – ryzyko codzienne, postrzegane jako zdarzenia oddziałujące w bardzo małym stopniu na obiekt.

prawdopodobieństwo	wysokie	Ryzyko występujące często, powodujące względnie niskie straty	Ryzyko występujące często, powodujące względnie wysokie straty
	niskie	Ryzyko występujące rzadko, powodujące względnie niskie straty	Ryzyko występujące rzadko, powodujące względnie wysokie straty
		niska	wysoka
		strata	

Rys. 1 Mapa ryzyka (Zawarska 2012).

Sterowanie ryzykiem jest końcowym etapem procesu zarządzania ryzykiem. Polega on na podejmowaniu decyzji, wykonywaniu czynności zmniejszających ryzyko oraz monitorowaniu pracy przedsiębiorstwa. Podstawowymi działaniami, mającymi na celu obniżenie poziomu ryzyka są działania: eliminujące zagrożenia zanim wystąpią, np. na podstawie prowadzenia monitoringu, podnoszenia kwalifikacji pracowników oraz zmniejszające rozmiar powstałych już szkód (Iwanejko i Rybicki 2008).

W literaturze można znaleźć wiele metod i proponowanych rozwiązań dotyczących procesu zarządzania ryzykiem. Ważne jest natomiast, aby podejmowane działania były optymalnymi rozwiązaniami w zakresie zidentyfikowanych zagrożeń. Identyfikacja i pomiar ryzyka determinują wybór metody kontroli ryzyka, a co za tym idzie określone działania i nakłady finansowe. Mając na uwadze, że celem procesu zarządzania ryzykiem jest minimalizowanie skutków lub całkowita eliminacja negatywnych zdarzeń losowych, to ponoszenie dodatkowych kosztów związanych z procesem zarządzania ryzykiem jest jak najbardziej uzasadnione (Zawarska 2012).

3. Ryzyko w komunalnych oczyszczalniach ścieków

W komunalnych oczyszczalniach ścieków, nawet nowych, dobrze zaprojektowanych, wykonanych i eksploatowanych występują awarie i niesprawności, które mogą być sytuacjami ryzykownymi. Ze względu na specyfikę procesu oczyszczania ścieków, na terenie oczyszczalni są produkowane, przetwarzane i magazynowane substancje biologiczne i chemiczne, które mogą stanowić zagrożenie dla środowiska i ludzi. Każda oczyszczalnia ścieków, ze względu na dbałość o środowisko, zdrowie i życie ludzkie oraz prawodawstwo Unii Europejskiej, powinna prowadzić identyfikację i analizy ryzyka by na ich podstawie móc zarządzać/sterować ryzykiem. Identyfikacja zdarzeń, mogących powodować ryzyko, polega przede wszystkim na zapoznaniu się z archiwizowaną dokumentacją oraz rozmowie z kierownikiem oczyszczalni i jej pracownikami (Iwanejko i Rybicki 2008; Andraka i Dzienis 2013).

W zależności od rodzaju rozpatrywanego obiektu technicznego różni się wiele rodzajów ryzyka. W odniesieniu do komunalnych oczyszczalni ścieków oraz analizy dotyczącej tylko sprawności ciągu technologicznego wyróżnia się:

- ryzyko jakościowe – związane z jakością ścieków dopływających i odpływających, przekroczeniem dopuszczalnych wartości wskaźników na odpływie z oczyszczalni np. zrzut dużej ilości tłustych ścieków;
- ryzyko eksploatacyjne – powiązane z ryzykiem jakościowym, związane z wpływem na technologię oczyszczania, które w ekstremalnych sytuacjach może powodować załamanie procesu technologicznego np. awaria systemu monitorującego (nadzorującego) pracę oczyszczalni;
- ryzyko ekologiczne – powiązane z ryzykiem jakościowym i eksploatacyjnym, związane z negatywnym oddziaływaniem na środowisko naturalne np. zrzut ścieków przemysłowych;
- ryzyko finansowe – powiązane z wszystkimi wcześniej wymienionymi rodzajami ryzyka, związane z ponoszeniem kosztów, wynikających ze strat powstałych na wskutek negatywnego oddziaływania komunalnej oczyszczalni ścieków na otaczające ją środowisko itp.

Podstawą do zarządzania ryzykiem w komunalnej oczyszczalni ścieków jest stworzenie bazy zawierającej informacje o rodzaju, ilości i częstotliwości występujących zagrożeń w obiekcie, wraz z krótką charakterystyką dotyczącą rodzaju ryzyka oraz informacją o typie czynnika, który je wywołuje, podejmowanym lub proponowanym sposobie radzenia sobie z danym zjawiskiem i skutkami jego wystąpienia. Natomiast fundamentalnym etapem zarządzania ryzykiem jest jego identyfikacja.

Identyfikacja ryzyka polega na określeniu rodzajów ryzyka i wskazaniu czynników, powodujących powstanie ryzyka (Iwanejko i Rybicki 2008). Dla komunalnych oczyszczalni ścieków można wskazać następujące typy czynników ryzykogennych, z podziałem na:

- standardowość występowania:
 - zwyczajne – typowe dla danego obiektu, często powtarzalne np. uszkodzona uszczelka,
 - nadzwyczajne – nietypowe, trudne do przewidzenia np. zalanie oczyszczalni, wypłukanie osadu czynnego,
- źródło zagrożenia:
 - wewnętrzne – powstałe na wskutek oddziaływania elementów oczyszczalni lub błędy personelu np. awaria rotorów napowietrzających,
 - zewnętrzne – powstałe w wyniku czynników zewnętrznych (np. zjawisk atmosferycznych, zakładów przemysłowych występujących na terenie zlewni (Kuśnierz i Świerczek 2014)) lub na etapie projektowania, wykonawstwa oraz w czasie eksploatacji np. zanik energii elektrycznej,
- potencjalność wystąpienia:
 - zaistniałe – występujące w przeszłości, łatwe do przewidzenia, powtarzalne, typowe dla danego obiektu np. zamarznięcie powierzchni komory osadu czynnego przy bardzo niskich temperaturach,
 - utajone – potencjalnie możliwe, ale jeszcze nigdy nie wystąpiły na danym obiekcie np. pożar.

W celu uzyskania dokładnych wyników identyfikacja powinna być prowadzona w określonej kolejności i na podstawie dobrze udokumentowanych oraz zweryfikowanych informacji.

4. Etapy procesu identyfikacji ryzyka

Proces identyfikacji ryzyka komunalnych oczyszczalni ścieków składa się z kilku etapów/czynności, które trzeba wykonać w odpowiedniej kolejności. Postępowanie według poniżej przedstawionego schematu umożliwia uzyskanie miarodajnych wyników.

I. Zapoznanie się z technologią oczyszczania ścieków komunalnych

Celem tego etapu jest zaznajomienie się ze stosowaną technologią oraz sposobem eksploatacji oczyszczalni. Na tym etapie, osoba zajmująca się identyfikacją zagrożeń powinna zapoznać się z instrukcją eksploatacji oczyszczalni, a jeśli to możliwe to również z projektem, pozwoleniem wodno-prawnym oraz dokumentacją przeprowadzanych modyfikacji ciągu technologicznego. Rezultatem tego etapu powinno być dokładne poznanie technologii oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych wraz z urządzeniami znajdującymi się w ciągach technologicznych obiektu oraz parametrami ich pracy.

II. Wywiad z kierownikiem i pracownikami oczyszczalni

Rozmowa z kierownikiem oczyszczalni ma na celu wprowadzenie w bieżące problemy eksploatacyjne. Podczas rozmowy z personelem osoba dokonująca identyfikacji ma możliwość poznania wcześniejszych problemów występujących na oczyszczalni oraz sposobów ich eliminacji. Przeprowadzony wywiad daje również sposobność do weryfikacji informacji zawartych w dostarczonej dokumentacji i ich aktualizacji.

III. Zapoznanie się z książką eksploatacji oczyszczalni

W skład księgi eksploatacji, która dostępna była w badanych przez autorów obiektach, wchodziły karty pracy, karty napraw i przeglądów poszczególnych urządzeń oraz zeszyt technologiczny. Etap ten służy do zaznajomienia się z notowanymi w kartach pracy czynnościami wykonywanymi w trakcie codziennej eksploatacji, notowanymi oraz wyszukiwaniu zjawisk nietypowych (np. zamrożenie kraty) i sposobów radzenia sobie z nimi przez obsługę oczyszczalni. Z zapisów na kartach napraw i przeglądów poszczególnych urządzeń wyśledzić można ryzyko utajone, eliminowane dzięki bieżącej kontroli pracy poszczególnych elementów w ciągach technologicznych.

IV. Sprawdzenie dotrzymania warunków pozwolenia wodno-prawnego

Etap ten związany jest z zapoznaniem się z wynikami badań notowanymi w zeszycie technologicznym. Pozwali to na sprawdzenie, czy nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń w oczyszczonych ściekach, na odpływie do odbiornika. Ponadto na tym etapie wykonuje się kontrolę dotrzymania uwarunkowań prawnych dotyczących gospodarki odpadami w oczyszczalni. Ten etap identyfikacji ryzyka umożliwia wyodrębnienie zjawisk niekorzystnych będących czynnikami powstania ryzyka w komunalnej oczyszczalni ścieków.

V. Weryfikacja uzyskanych wyników

W tym etapie identyfikacji ryzyka należy: dokonać konfrontacji uzyskanych wyników podczas rozmowy z kierownikiem i personelem oczyszczalni, uzupełnić brakujące informacje oraz wyjaśnić nieścisłości. Dopiero po tych czynnościach można przejść do końcowej analizy uzyskanych wyników.

5. Wnioski

Ryzyko występuje na każdym obiekcie i w każdym procesie technologicznym. Identyfikacja zjawisk, które mogą zakłócać pracę urządzenia lub przebieg procesu jest podstawowym etapem w procesie zarządzania ryzykiem (Kasap i Kaymak 2007; Tchankova 2002). Wysoka jakość procesu jego identyfikacji gwarantuje adekwatną wartość merytoryczną oceny ryzyka i zapewnia dobór odpowiednich metod jego sterowaniem, co umożliwia zapobieganie występowaniu zagrożeń lub ich szybką eliminację (Kempa 1993). Identyfikacja ryzyka, jak i zarządzanie nim, powinno być procesem systematycznym i ciągłym (Zawarska 2012).

Zaburzenia w pracy oczyszczalni ścieków mogą stanowić zagrożenia dla środowiska naturalnego, dlatego zarządzanie ryzykiem powinno być wpisane w eksploatację tych strategicznych obiektów komunalnych. Wymagane jest zatem zapoznanie się z wszystkimi zagrożeniami, które mogą zakłócić pracę danej oczyszczalni ścieków, przeprowadzenie ich analizy i weryfikacji oraz zaproponowanie strategii unikania zagrożeń. Zaprezentowane czynności w przedstawionych etapach procesu identyfikacji ryzyka mogą się różnić dla poszczególnych oczyszczalni z uwagi na zakres prowadzonej w nich archiwizacji danych oraz wpływ czynnika ludzkiego.

6. Literatura

- Andraka D, Dzienis L (2013) Modelowanie ryzyka w eksploatacji oczyszczalni ścieków. Środkowo-pomorskie towarzystwo naukowe ochrony środowiska. tom 15 s. 1111-1125
- Gajdzik B (2013) Komponenty ryzyka po stronie czynnika ludzkiego w doskonaleniu systemu zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach Nr 1(9)/2013 s. 44-55
- Iwanejko R, Rybicki S M (2008) Zarządzanie ryzykiem dla oczyszczalni ścieków. Gaz, woda i technika sanitarna. luty 2008
- Kaczmarek T T (2008) Ryzyko i zarządzanie ryzykiem. Ujecie interdyscyplinarne. Difin, Warszawa
- Kasap D, Kaymak M (2007) Risk Identification. Step of the Project Risk Management. International Conference on Management of Engineering & Technology. Portland
- Kempa ES (1993) Analiza ryzyka w systemach oczyszczania wód. Ochrona Środowiska. Nr 3(50)
- Kokot-Stępień P (2015) Identyfikacja ryzyka jako kluczowy element zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego nr 855 Finanse. Rynki Finansowe. Ubezpieczenia nr 74. Szczecin.
- Korombel A (2007) Ryzyko w finansowaniu działalności inwestycyjnej metodą project finance. Difin. Warszawa
- Kuśnierz M, Świerczek E (2014) Infrastruktura krytyczna a niezawodność systemu odprowadzania i oczyszczania ścieków w niekorzystnych warunkach pogodowych. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich. Nr I/1/2014 s. 125-135
- Liwacz A (2004), Zarządzanie ryzykiem, „Poradnik Samorządowy” grudzień
- Łęgowik-Świącik S (2012) Zarządzanie ryzykiem jako element systemu kontroli w przedsiębiorstwie. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego nr 690 Finanse. Rynki Finansowe. Ubezpieczenia nr 51. Szczecin.
- Stańczak A (2014) Ryzyka prowadzenia działalności gospodarczej w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem sektora małych i średnich przedsiębiorstw. ZNUV 2014 Nr. 35 s. 82-98
- Tchankova L (2002) Risk identification – basic stage in risk management. Environmental Management and Health. Vol. 13 Issue: 3 pp.290-297
- Thlon M (2013) Charakterystyka i klasyfikacja ryzyka w działalności gospodarczej. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie. Ekonomia Nr. 902 s. 17–36
- Wawrzynowicz J, Wajszczuk K, Baum R (2012) Specyfika czynników ryzyka w przedsiębiorstwach rolnych – próba holistycznego podejścia. Zarządzanie i Finanse
- Zawarska (2012) Identyfikacja i pomiar ryzyka w procesie zarządzania ryzykiem podmiotów gospodarczych. Zarządzanie i Finanse

10. Ocena niezawodności sieci wodociągowej

Reliability of the water distribution system

Magdalena Łój-Pilch, Anita Zakrzewska

Zakład Wodociągów i Kanalizacji, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska
w Gliwicach

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Ewa Zielewicz

Magdalena Łój-Pilch: magdalena.loy-pilch@polsl.pl

Słowa kluczowe: niezawodność, sieć wodociągowa, średni czas odnowy, jednostkowa intensywność uszkodzeń, wskaźnik gotowości

Streszczenie

Sieć wodociągowa jest złożonym i skomplikowanym obiektem technicznym, który powinien być utrzymany w ciągłej sprawności. Podstawą do racjonalnego zarządzania takimi obiektami technicznymi są dane z eksploatacji tych obiektów, obejmujące informacje o rodzajach, przyczynach i skutkach awarii, stanowiące o niezawodności systemu. Sieć wodociągowa jest najbardziej rozległym, najdroższym oraz końcowym (bezpośrednio związanym z odbiorcą) elementem systemu zaopatrzenia ludności w wodę. Niezawodność tego obiektu jest jedna z najważniejszych właściwości eksploatacyjnych systemu dystrybucji wody. Jest również najważniejszą cechą, decydującą o przydatności użytkowej danego obiektu. Ocena niezawodności sieci wodociągowej umożliwia sprawne zarządzanie, a co za tym idzie funkcjonowanie systemu dystrybucji wody.

1. Wprowadzenie

Sieć wodociągowa jest niezbędnym elementem systemu zaopatrzenia ludności w wodę (Kwietniewski 1999). Głównym jej celem jest zapewnienie ciągłej dostawy wody, w taki sposób, żeby każdy odbiorca miał do niej dostęp o każdej porze, w zaspokajającej jego potrzeby ilości i o wymaganej jakości oraz pod odpowiednim ciśnieniem (Bergel i in. 2013). Poprawne funkcjonowanie sieci jest niezbędne do utrzymania wysokiej jakości życia jej użytkowników (Kwietniewski 1999). Ze względu na komfort konsumenta systemy wodociągowe powinny charakteryzować się wysokim poziomem niezawodności dostawy wody. Między innymi uzyskuje się to stosując sieć w układzie pierścieniowym, co daje możliwość zasilania odbiorcy wielokierunkowo. Dzięki temu pojawiające się w sieci awarie nie zawsze powodują długotrwałe przerwy w dostawie wody dla odbiorców (Zimoch 2011).

Najogólniej przyczyny uszkodzeń w sieci wodociągowej, w zależności od czynników, które je wywołały, można podzielić na (Zimoch 2011):

- oddziaływania środowiska zewnętrznego (m.in. uwarunkowania gruntowo-wodne, obciążenia statyczne i dynamiczne, oddziaływanie eksploatacji górniczej, użytkowanie sąsiadujących obiektów i urządzeń technicznych, występowanie prądów błądzących oraz skład chemiczny transportowanej wody);
- błędy projektowe (m.in. brak doświadczenia zespołu projektującego, niepełna lub błędna analiza założeń projektowych);
- błędy powstałe przy budowie sieci (m.in. nikłe doświadczenie wykonawcy, niepoprawne ułożenie rur i armatury, wady materiałowe i konstrukcyjne rurociągów oraz armatury, niedbałe wykonanie kompensacji, zabezpieczeń i izolacji sieci);
- nieprawidłowa eksploatacja (m.in. nieprawidłowa strategia remontowa i modernizacyjna, brak oceny stanu technicznego sieci wodociągowej, nieodpowiednie kwalifikacje lub przeszkolenie personelu obsługującego i towarzyszące temu błędy decyzyjne operatora systemu).

Można również dokonać podziału uszkodzeń przewodów ze względu na ich charakter: fizyczny lub chemiczny. Do fizycznych zaliczyć można (Kwietniewski i in. 1993):

- przyczyny pochodzenia geologicznego (m.in. podmycia podparć przewodów przez wody gruntowe, posuw gruntu pod przewodem, osiadanie gruntu);
- przyczyny pochodzenia konstrukcyjno–eksploatacyjnego (m.in. uderzenie hydrauliczne, nieoczekiwany zanik pracy pompy, niewłaściwe szczelimo połączeń, wady materiałowe i konstrukcyjne przewodów, niewłaściwa konserwacja armatury, obciążenie dynamiczne przewodów, przeciążenie wieloletnią eksploatacją);
- przyczyny wynikające z nieostrożnego prowadzenia robót ziemnych w pobliżu rurociągów;
- przyczyny pochodzenia żywiołowego (m.in. ruchy ziemi, gwałtowna zmiana warunków atmosferycznych).

Natomiast do przyczyn chemicznych zaliczyć należy:

- korozję pochodzenia gruntowego – korozyjne działanie wody gruntowej oraz korozja elektrochemiczna (prądy błędzące);
- korozję od transportowanej wody – korozyjne właściwości wody wodociągowej.

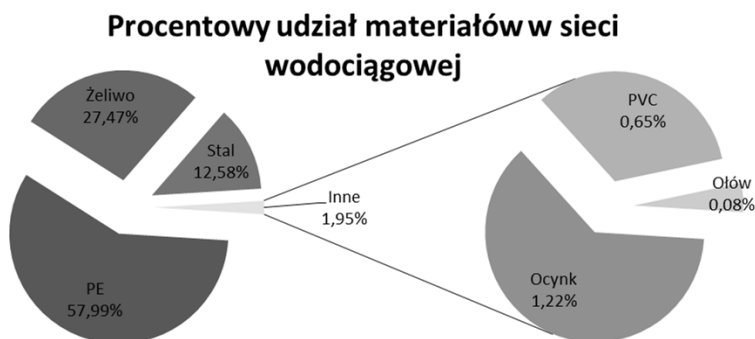
W rozległej miejskiej sieci wykrycie awarii jest trudne i czasochłonne, nawet jeżeli przedsiębiorstwo eksploatujące sieć wodociągową posiada rozbudowany system monitoringu. Natomiast w celu sprawnego usunięcia awarii konieczne jest dysponowanie odpowiednim sprzętem i wykwalifikowanymi zasobami ludzkimi. Im krótszy jest czas lokalizacji awarii oraz czas trwania prac montażowych, tym krótszy jest czas odnowy przewodu, co z kolei powoduje zwiększenie jego niezawodności.

Występowanie awarii w sieci wodociągowej, w czasie jej normalnej eksploatacji, jest zjawiskiem losowym, dlatego, z punktu widzenia analizy niezawodnościowej, ważne jest sporządzenie dokładnej charakterystyki powstałego zdarzenia. W celu dokonania pełnej oceny niezawodnościowej potrzebne są następujące dane: miejsce zdarzenia, rodzaj uszkodzeń i sposób naprawy, charakterystyka uszkodzonego elementu, zakres prac, informacje o przerwach w dostawie wody na skutek awarii, data i godzina zgłoszenia awarii, rozpoczęcia napraw oraz zakończenia prac.

Prowadzenie badań niezawodnościowych systemów wodociągowych umożliwia zwrócenie uwagi eksploatatora na najczęściej występujące uszkodzenia i może przyczynić się do bardziej efektywnego wykorzystania sieci wodociągowej.

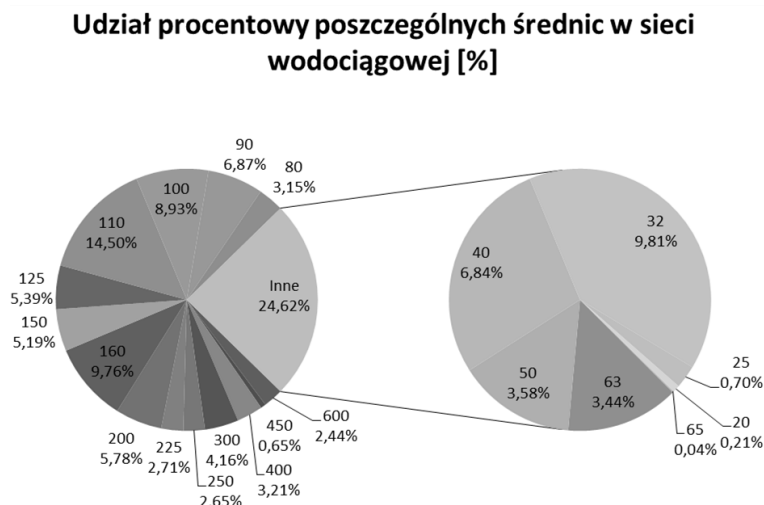
2. Charakterystyka badanej sieci

Analizę niezawodnościową przeprowadzono dla sieci wodociągowej eksploatowanej przez przedsiębiorstwo wodociągowe dostarczające wodę do ok 200 tysięcy odbiorców. Łączna długość sieci to 814 km na terenie kilku gmin. Badania niezawodnościowe przeprowadzono dla 718 kilometrów sieci wykonanej z PE, żeliwa, stali, stali ocynkowanej i PVC. Udział procentowy poszczególnych materiałów pokazano na wykresie (Rys. 1).



Rys 1. Udział procentowy długości sieci wodociągowej z poszczególnych materiałów.

Badane rurociągi spełniały funkcje przyłączy wodociągowych, przewodów rozdzielczych oraz magistralnych. Średnice przewodów występowały w zakresie od DN20 do DN 600, co przedstawiono na wykresie (Rys. 2).



Rys. 2. Udział procentowy długości sieci wodociągowej w zależności od średnicy.

3. Metodyka badań

Bazą, na podstawie której przeprowadzono analizę niezawodnościową, były archiwalne oraz bieżące dane eksploatacyjne z okresu od 1.02.2010r. do 30.04.2016r, co daje 6 lat i 3 miesiące pracy sieci wodociągowej. W tym czasie odnotowano 3667 różnych awarii. Przedsiębiorstwo wodociągowe dostarczyło wyczerpujące informacje o powstałych awariach, m. in. o lokalizacji, materiale i średnicy uszkodzonego przewodu, przyczynie awarii, dacie i godzinie zgłoszenia, rejestracji oraz usunięcia niesprawności.

Uzyskane dane surowe poddano weryfikacji, aby wyeliminować przypadkowe błędy czy powtarzające się zapisy, a następnie wszystkie zdarzenia pogrupowano ze względu na funkcję przewodu, na którym miały one miejsce, na: magistrale, przewody sieci rozdzielczej oraz przyłącza wodociągowe.

Dla każdego typu przewodu wyznaczono poszczególne czasy pracy oraz czasy odnowy, a na ich podstawie wartości średniego czasu pracy T_p i średniego czasu odnowy T_o , przy założeniu wykładniczego rozkładu obu zmiennych dla przedmiotowych rurociągów.

Korzystając z wartości średniego czasu pracy T_p i średniego czasu odnowy T_o wyznaczono wskaźnik gotowości K_g , obliczony na podstawie danych eksploatacyjnych wg wzoru:

$$K_g = \frac{T_p}{T_p + T_o} \quad (1)$$

Kolejną wyznaczoną miarą niezawodności była jednostkowa intensywność uszkodzeń λ^* , wyrażoną liczbą uszkodzeń na kilometr i rok [$\text{km}^{-1} \text{a}^{-1}$], obliczona na podstawie danych eksploatacyjnych wg wzoru:

$$\lambda^* = \frac{n}{L \cdot \Delta t} \quad (2)$$

gdzie:

λ^* - jednostkowa intensywność uszkodzeń, $\text{km}^{-1} \text{rok}^{-1}$

n - liczba powstałych uszkodzeń,

L – całkowita długość sieci, km

Δt – okres, w którym analizowano pracę sieci, wyrażony w latach.

4. Omówienie wyników

4.1 Analiza jednostkowej intensywności uszkodzeń

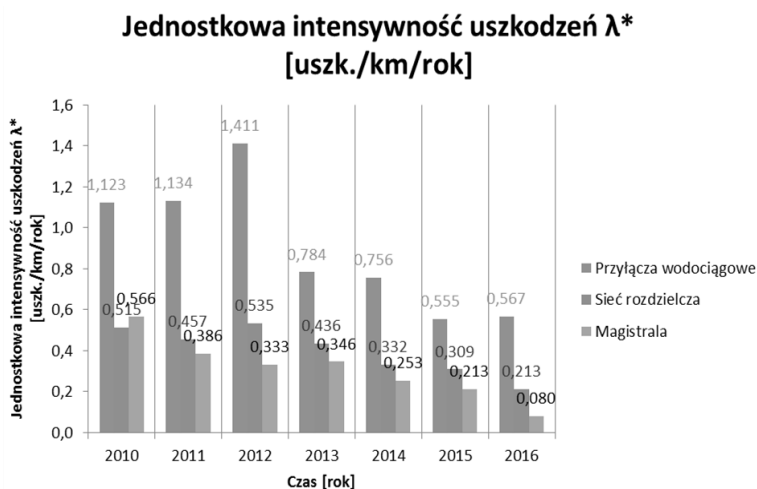
Przewody magistralne, sieci rozdzielcze i przyłącza wodociągowe pracują w zupełnie odmiennych warunkach hydraulicznych. Magistrale wodociągowe charakteryzują się bardziej ustabilizowanym ciśnieniem i przepływem, natomiast w sieci rozdzielczej i przyłączach parametry te zmieniają się w szerokim zakresie i krótkich odstępach czasowych. Dlatego zaleca się ocenianie awaryjności oddzielnie dla poszczególnych rodzajów przewodów (Kwietniewski i Rak 2010). Słuszność tych rozważań potwierdza zestawienie w tabeli (Tab. 1) wartości jednostkowej intensywności uszkodzeń w zależności od funkcji przewodu.

Tab. 1. Jednostkowa intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych w zależności od funkcji rurociągu.

Funkcja przewodu	Jednostkowa intensywność uszkodzeń λ^* [km ⁻¹ rok ⁻¹]
Magistrala	0,252
Sieć rozdzielcza	0,369
Przyłącza wodociągowe	0,942

W badanej sieci wodociągowej wyraźnie widać, że magistrale wodociągowe cechują się znacznie mniejszą wartością intensywności uszkodzeń niż przyłącza wodociągowe. Biorąc pod uwagę wytyczne europejskie z 2001 roku (PN-IEC 60300-3-4:2001) badana sieć nie przekroczyła wartości granicznych jednostkowej intensywności uszkodzeń dla poszczególnych funkcji przewodu. Nie można jednak powiedzieć, że jej stan jest dobry. Trzeba wziąć pod uwagę nowsze kryteria. Według klasyfikacji Kwietniewskiego (Kwietniewski 2011) magistrala i sieć rozdzielcza charakteryzują się średnią awaryjnością, a przyłącza wodociągowe – wysoką awaryjnością.

Analizując zmianę jednostkowej intensywności uszkodzeń w okresie prowadzonych badań, przedstawioną na wykresie (Rys. 3), można zauważyć znaczną poprawę stanu technicznego sieci.



Rys. 3. Jednostkowa intensywność uszkodzeń przewodów wodociągowych w zależności od funkcji rurociągu na przestrzeni lat 2010-2016.

Również przy dokładniejszej analizie, z uwzględnieniem struktury materiałowej, przyłączy, sieci rozdzielczej i magistrali w analizowanym okresie widać tendencję spadkową awaryjności przewodów. Może być to spowodowane wymianą przewodów z materiałów tradycyjnych (stal, żeliwo szare) na PE i żeliwo sferoidalne podczas usuwania awarii oraz wymiana przewodów wodociągowych o długim czasie eksploatacji czy wysokiej awaryjności, powiązana z wprowadzaniem monitoringu w przedsiębiorstwie.

4.2 Czas odnowy przewodu w zależności od jego funkcji

Wskaźnikiem, który jest zależny od funkcji przewodu jest średni czas odnowy T_o . Na długość czasu odnowy składa się: czas od momentu zgłoszenia awarii wodociągu do chwili rozpoczęcia prac montażowych, czas trwania prac montażowych oraz czas potrzebny na odtworzenie nawierzchni. Zależy on również od „ważności” awarii oraz trudności w jej usunięciu. Przez „ważność” rozumie się decyzje dyspozytora, który przy zgłoszeniu awarii decyduje o kolejności interwencji oraz o terminie rozpoczęcia prac. W pierwszej kolejności brygady udają się w miejsca, gdzie następuje duża strata wody w krótkim przedziale czasu, czyli do awarii na przewodzie magistralnym. Dobrze obrazują to wyniki przedstawione w tabeli (Tab. 2) na przykładzie przewodu o średnicy DN250.

Tab. 2. Średni czas odnowy T_o dla tej samej średnicy przy odmiennej funkcji przewodu, na przykładzie średnicy DN250.

Średnica	Funkcja przewodu	Średni czas odnowy [d]
DN250	sieć rozdzielcza	1,64
	magistrala	0,87

Trudność usunięcia awarii zależy m.in. od dostępności miejsca oraz warunków infrastrukturalnych i komunikacyjnych. Dużo łatwiej usunąć awarię na przyłączy np. pod trawnikiem lub w mało uczęszczanej uliczce, niż w sieci rozdzielczej zlokalizowanej np. pod ruchliwą drogą. Ponadto w sieci rozdzielczej przewody mają większe średnice oraz ich naprawa zwykle wymaga użycia specjalistycznego sprzętu. Wydłuża to czas odnowy przewodów „ważniejszych”, z punktu widzenia ilości zaopatrywanych w wodę mieszkańców. Jako przykład przedstawiono tabeli (Tab. 3) prezentującą średni czas odnowy przewodów wykonanych z tego samego materiału, ale pełniących inne funkcje w systemie dystrybucji wody.

Tab. 3. Średni czas odnowy T_o dla tego samego materiału przy odmiennej funkcji przewodu, na przykładzie PE – awaria spowodowana wyciekami oraz żeliwa - korozja.

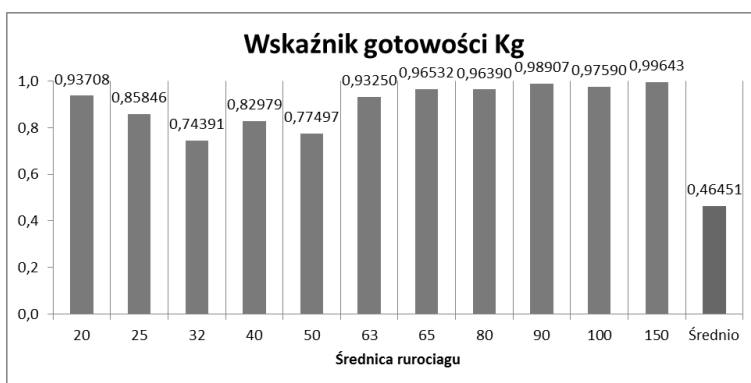
Materiał	Przyczyna awarii	Funkcja przewodu	Średni czas odnowy [d]
PE	wyciek	przyłącza wodociągowe	0,87
		sieć rozdzielcza	2,28
Żeliwo	korozja	przyłącza wodociągowe	0,62
		sieć rozdzielcza	1,34

4.3 Wskaźnik gotowości

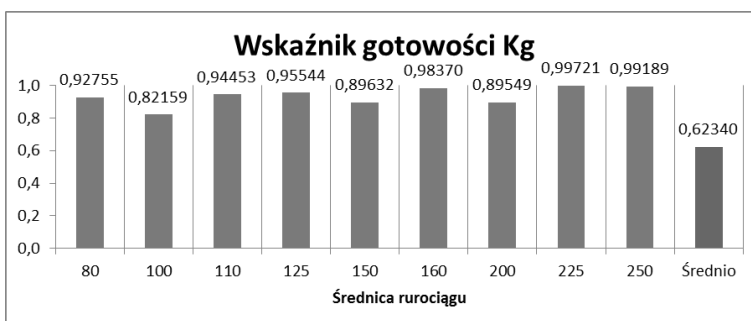
Najważniejszą miarą niezawodności jest wskaźnik gotowości K_g , którego wartość im bliższa jedności tym większa jest niezawodność przewodów sieciowych. Wskaźnik ten jednocześnie bierze pod uwagę uszkodzalność i naprawialność przewodów, gdyż wpływa na niego zarówno średni czas pracy T_p oraz średni czas odnowy T_o . Na podstawie otrzymanych wyników, przedstawionych na wykresach (Rys. 4, 5 i 6) oraz w tabeli (Tab. 4), można stwierdzić, że największą niezawodnością charakteryzują się magistrale wodociągowe, następnie sieci rozdzielcze, a najmniejszą przyłącza wodociągowe.

Wartość wskaźnika gotowości K_g magistrali jest prawie dwukrotnie wyższa niż przyłączy i około 1,4 wyższa niż przewodów rozdzielczych. Z jednej strony wynika, to z najmniejszej wartości intensywności uszkodzeń przewodów magistralnych, a drugiej - z większej sprawności usuwania

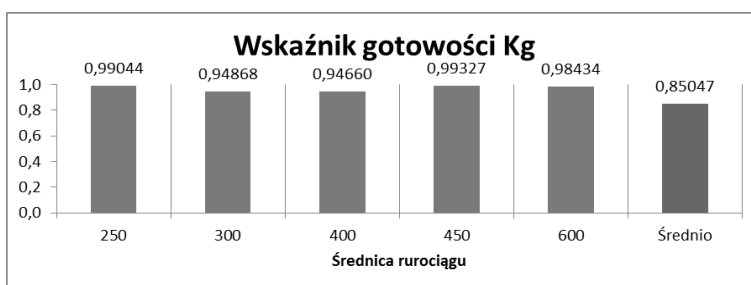
awarii i sposobu eksploatacji tego rodzaju rurociągów. Powyższa analiza dowodzi, że magistrale wodociągowe analizowanej sieci najlepiej spełniają swoją funkcję spośród wszystkich typów przewodów, co wydaje się być uzasadnione ze względu na ich znaczenie w systemie dystrybucji wody.



Rys. 4. Wskaźnik gotowości dla przyłączy wodociągowych w zależności od średnicy.



Rys. 5. Wskaźnik gotowości dla przewodów sieci rozdzielczej w zależności od średnicy.



Rys. 6. Wskaźnik gotowości dla przewodów sieci magistralnej w zależności od średnicy.

Tab. 4. Wskaźnik gotowości przewodów wodociągowych w zależności od funkcji rurociągu.

Funkcja przewodu	Wskaźnik gotowości
Magistrala	0,85047
Sieć rozdzielcza	0,62340
Przyłącza wodociągowe	0,46451

5. Wnioski

- Jediną metodą pozyskania miarodajnych wyników analizy niezawodnościowej sieci wodociągowej jest dostęp do danych eksploatacyjnych podczas normalnej eksploatacji systemu, a nie korzystanie z danych archiwalnych.
- Biorąc pod uwagę jednostkową intensywność uszkodzeń i klasyfikację Kwietniewskiego (Kwietniewski 2011) określono, że magistrale wodociągowe i sieć rozdzielcza charakteryzują się średnią awaryjnością, a przyłącza wodociągowe dużą awaryjnością.
- Dla każdego typu przewodów, w analizowanym okresie, odnotowano spadek wskaźnika jednostkowej intensywności uszkodzeń.
- Wartości wskaźnika gotowości wskazują na lepsze własności niezawodnościowe magistral wodociągowych niż przewodów rozdzielczych oraz przyłączy wodociągowych.
- Najkrótszy czas odnowy osiągnęły przewody sieci rozdzielczej. Przyłącza wodociągowe charakteryzują się dłuższą odnową, ze względu na potencjalnie mniejszą stratę wody i liczbę poszkodowanych odbiorców niż w przypadku pozostałych typów przewodów. Usuwanie awarii na magistralach wodociągowych stanowi najtrudniejsze zadanie dla brygad ze względu na swoją lokalizację (najczęściej w pasie jezdni) oraz technologie prac montażowych dla dużych średnic.

6. Literatura

- Bergel T, Kaczor G, Bugajski P (2013) Stan techniczny sieci wodociągowych w małych wodociągach województwa małopolskiego i podkarpackiego. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich. Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie Nr 3/IV/2013 s. 291–304
- Kwietniewski M (1999) Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców. Prace naukowe „Inżynieria Środowiska”. Zeszyt 28. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- Kwietniewski M (2011) Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych. XXV Konferencja naukowo-techniczna „Awarie budowlane 2011”. Międzyzdroje
- Kwietniewski M, Rak J (2010) Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Polska Akademia Nauk. Warszawa
- Kwietniewski M, Roman M, Kłoss-Trębaczkiwicz H (1993) Niezawodność wodociągów i kanalizacji, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1993
- Zimoch I (2011) Niezawodnościowa interpretacja awaryjności podsystemu dystrybucji wody. Środowisko Czasopismo techniczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 1-Ś/2011

11. Przegląd i analiza nowoczesnych systemów bezpieczeństwa w pojazdach

Review and analysis of modern vehicle safety systems

Piotr Malesa

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Niezgoda

Malesa Piotr: piotr.malesa@wat.edu.pl

Słowa kluczowe: pojazdy wojskowe, bezpieczeństwo, IED, ochrona aktywna, ochrona pasywna

Streszczenie

Konflikty zbrojne i związane z nimi zagrożenia, m.in. na Bliskim Wschodzie, wymuszają konieczność nieustannego poszukiwania coraz to nowszych rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów opancerzonych. Na całościowy system ochrony przeciwminowej mogą składać się mniejsze podsystemy ochrony zewnętrznej i wewnętrznej: modyfikacje konstrukcji pojazdu, innowacyjne materiały pochłaniające energię wybuchu, siedziska i maty absorbujące energię wybuchu, czy też wzmacniane koła. Doświadczenia z walk toczonych z wykorzystaniem pojazdów militarnych i liczne straty w postaci zabitych i rannych żołnierzy zapoczątkowały intensywne prace nad nowymi konstrukcjami, lepiej opancerzonymi, których główną cechą była lepsza odporność na zagrożenia. W niniejszej pracy zostanie zaprezentowany przegląd systemów bezpieczeństwa stosowanych we współczesnych pojazdach wojskowych biorących udział w misjach pokojowych i działaniach wojennych.

1. Wstęp

Rozwój systemów ochronnych służących zwiększeniu bezpieczeństwa uczestników konfliktów zbrojnych od początku szedł w parze z rozwojem coraz to nowocześniejszych broni. Najstarsze znane nam środki rażenia takie jak miecze czy lance wymusiły rozwój środków ochrony bezpośredniej w postaci tarcz, osłon czy zbroi Rys. 1. Z biegiem czasu do pancerzy tego typu zaczęto wykorzystywać nowocześniejsze, bardziej wytrzymałe a co za tym idzie trudniejsze do przebicia pancerze ochronne zbudowane niekiedy z wielowarstwowych struktur (Walentyłowicz 2011).



Rys. 1 Średniowieczne środki ochrony - zbroja rycerska, zbroja konna (www.google.pl).

Z biegiem lat środki transportu, których siłą napędową były zwierzęta zaczęły być wypierane przez pojazdy maszynowe zbudowane na podwoziach kołowych i gąsienicowych. Zastosowanie w pojazdach grubych pancerzy spowodowało znaczny skok w poziomie ich bezpieczeństwa jednocześnie wpływając negatywnie na wzrost ich masy sięgającej kilkunastu czy nawet kilkudziesięciu ton (Rys. 2). Zwiększona masa i ograniczenia w osiąganym poziomie mocy pojazdów wojskowych w ówczesnych czasach powodowały znaczne utrudnienia w poruszaniu się po bezdrożach, a także problemy z rozwijaniem pożądanego prędkości w czasie transportu. Aby możliwe były szybkie przerzuty wojska, konieczne było obniżenie masy pojazdów i transportowanie ich przy użyciu statków powietrznych. W efekcie analiz prowadzonych współcześnie kładzie się nacisk na ograniczenie masy maksymalnej wozów bojowych. Zapewnienie bezpieczeństwa załogom lżejszych pojazdów wymaga jednak udoskonalenia nie tylko pancerzy tych pojazdów odpornych na pociski, odłamki i falę uderzeniową po wybuchach ładunków, ale również zastosowania metod zwalczania zagrożeń w bezpiecznej odległości od pojazdu. W związku z tym udoskonaleniu podlegają zarówno pasywne, jak i aktywne metody osłony pojazdów i ich załóg.



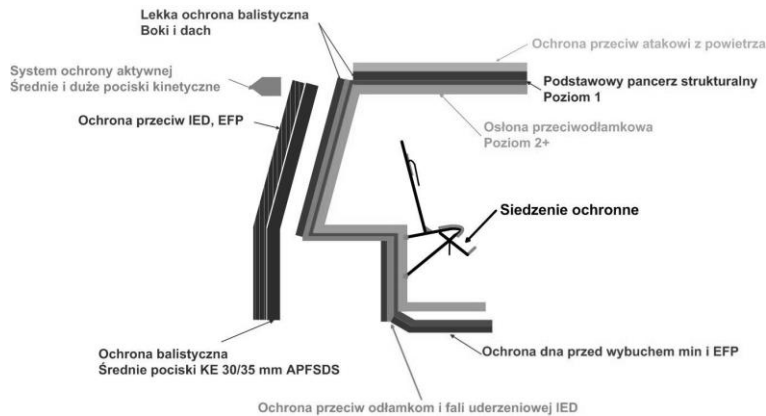
Rys. 2 Czołg Pz. VI Tiger (www.google.pl).

2. Wymagania stawiane nowoczesnym pojazdom

Zagrożenia spowodowane oddziaływaniem wybuchu na pojazdy wymusiły stworzenie odpowiednich wymagań ochrony balistycznej pojazdów będących na wyposażeniu sił zbrojnych. Dokumentem określającym te wymagania jest umowa standaryzacyjna TANAG 4569. Głównym celem nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych pojazdów wojskowych jest zapewnienie odpowiedniej ochrony przeciw różnego rodzaju zagrożeniom i środkom minowym. Pożądany poziom ochrony załogi uzyskuje się przez stosowanie modułowych osłon i pancerzy dodatkowych, dobieranych i montowanych na pojeździe w zależności od rodzaju zagrożenia. Schemat przedstawiający złożoność pasywnych systemów ochrony pojazdu przedstawiono na Rys. 3.

Istotą rozwoju metod i środków ochrony przed minami jest badanie wpływu oddziaływania fali uderzeniowej na strukturę pojazdu oraz jego załogę. Nowoczesne pojazdy wojskowe powinny posiadać następujące cechy:

- modułową budowę i integrację podzespołów z innymi pojazdami,
- wysoką mobilność,
- możliwości transportu lotniczego (gabaryty i masa),
- wysoki poziom osłonności przez:
 - szybko montowany pancerz dodatkowy,
 - zabezpieczenie przeciwminowe dna pojazdu,
 - możliwość montażu dodatkowego wyposażenia (przystosowanie do walk w mieście i terenie górzystym, systemy aktywnej samoobrony),
- wysoki poziom przeżywalności i komfortu załogi.



Rys. 3 Przekrój poprzeczny kadłuba pojazdu specjalnego wyposażonego w złożony system ochrony pojazdu (Krzyształa 2011).

3. Rodzaje i przykłady osłon stosowanych w pojazdach wojskowych

Współczesne prace rozwojowe na temat osłon chroniących pojazdy przed falą uderzeniową koncentrują się w głównej mierze na projektowaniu i badaniu struktur warstwowych wykorzystujących materiały o dużej energochłonności. Dodatkowe lekkie wielowarstwowe panczerze przystosowane do ochrony zarówno pasywnej, jak i aktywnej. Ich warstwy wykonuje się na bazie twardych materiałów ceramicznych, kompozytów polimerowych metali w formie spienionej i elastomerów. Tego rodzaju osłony są adoptowane indywidualnie do każdego typu pojazdu.

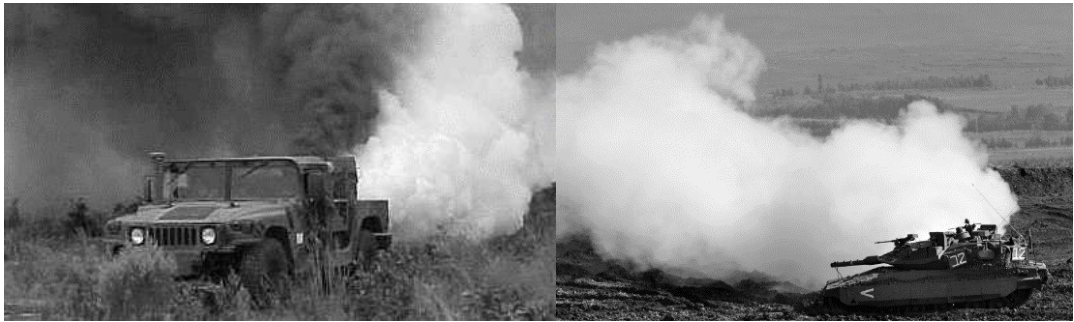
Obecnie stosowany rozwiązania w postaci osłon mocowanych do kadłuba pojazdu wojskowego można podzielić na trzy rodzaje (Walentyłowicz 2011):

- osłony pasywne, przyjmujące całą energię pocisków;
- osłony reaktywne, reagujące na uderzenie pocisku;
- osłony aktywne, niszczące lub osłabiające pocisk przed uderzeniem w pojazd.

Najstarszym rodzajem osłon są osłony pasywne złożone ze struktur pojedynczych lub wielowarstwowych. Wraz z rozwojem techniki zaczęto stosować osłony reaktywne wyposażone w materiał wybuchowy mający powstrzymać pocisk uderzający w osłonę czy też osłony kratownicowe. Ich działanie polegało na przerwaniu połączenia pomiędzy zapalnikiem piezoelektrycznym i granatem z pocisku RPG jednak pomysłowość bojowników pozwalała na bardzo proste ominięcie tych osłon.



Rys. 4 Czołg z osłoną prętową (www.google.pl).



Rys. 5 Zasłona dymna jako aktywna forma ochrony (www.google.pl).

Współczesne pancerze stanowią wielowarstwowe struktury, zbudowane z materiałów energochłonnych mających na celu pochłonięcie energii pochodzącej od wybuchu materiału wybuchowego oraz ograniczenie perforacji nadwozia i przenikanie odłamków do wnętrza pojazdu .

Oslony aktywne mają z założenia zareagować odpowiednio wcześniej, przed uderzeniem pocisku w pojazd. Zazwyczaj polega to na zakłóceniu toru lotu pocisku lub zamaskowanie pojazdu z wykorzystaniem zasłony dymnej.

W parze z istniejącymi rozwiązaniami pancerzy chroniących pojazdy przed pociskami uderzającymi z góry i z boku idą konstrukcje chroniące dno pojazdu. Przykładem może być tu osłona w postaci deflektora w kształcie litery „V” lub spłaszczonego „U” (Saska 2013) mająca na celu rozproszenie fali wybuchowej pochodzącej od ładunku umieszczonego pod pojazdem. Rozwiązanie z tego typu osłoną w pojeździe przedstawiono na Rys. 6.




Rys. 6 Pojazd z podwoziem typu „V” (www.google.pl).

4. Systemy ochrony przykładowych lekkich pojazdów wojskowych

Większość armii krajów europejskich posiada na wyposażeniu lekkie pojazdy wojskowe przeznaczone do transportu patrolu w sile 4-5 żołnierzy. Część z nich wykorzystuje amerykańskie HMMWV lub jego podwozie np. Szwajcaria (EAGLE), Turcja (OTOCAR). W dzisiejszych dniach powstają także konstrukcje nowe takie jak Aligator w Słowacji lub Dingo w Niemczech. Standardem dla najnowszych konstrukcji tych pojazdów jest zapewnienie ochrony przed pociskami przeciwpancernymi kalibru 7,62x51mm i minami przeciwczołgowymi. Do pojazdów tego typu produkowanych w kraju, tylko ze względu na stawiane zadania, a nie poziom ochrony, można zaliczyć Skorpiona 3 wykonanego na bazie HONKERA 2000 (www.witu.mil.pl)

Tab. 1. Zestawienie porównawcze systemów ochrony najpopularniejszych pojazdów bojowych.

<p>DINGO 2</p> <p>System ochrony</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7.62x54 AP (SWD) dookoła pojazdu (STANAG 4569 częściowo poziom 3 kuloodporności) - 7kg mina przeciwczołgowa 	
<p>HMMWV M1114</p> <p>System ochrony</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7,62x51 M80 dookoła pojazdu z odległości 100m, włącznie z szybami, - 6kg mina przeciwczołgowa od frontu (poziom 2a – STANAG 4569 aneks B) - 2kg mina od tył (pojazd czterodrzwiowy), - Odłamki pocisków 155mm z odległości 100m (poziom 1 – STANAG 4569 odłamkoodporność) 	
<p>EAGLE IV</p> <p>System ochrony</p> <ul style="list-style-type: none"> - Poziom 3 STANAG 4569 kuloodporność - Poziom 2a STANAG 4569 odporność na wybuch miny 	
<p>SKORPION 3</p> <p>System ochrony</p> <ul style="list-style-type: none"> - 7,62x51 NATO Ball, wybrane powierzchnie, bez szyb (częściowo poziom 1 kuloodporności wg STANAG 4569) - 7,62x39 PS, wybrane powierzchnie, bez szyb - Miny AP, wybrane powierzchnie 	

<p>KTO ROSOMAK</p> <p>Pojazd wersji podstawowej ochrona balistyczna przednich 60 stopni pojazdu i wieży na poziomie 4, reszty na poziomie 3 wg STANAG 4569, przeciw odłamkami artyleryjskimi na poziomie 3 i przeciw minom na poziomie 3a.</p> <p>Pojazd w wersji „Afgańskiej” (z dodatkowym opancerzeniem) posiada ochronę balistyczną wzmocnioną do pełnego poziomu 4 (z wszystkich kierunków), pancerz przedni który w wersji podstawowej zapewnia ochronę na poziomie 4 również został wzmocniony. „Sterfy życiowe” pojazdu mają zapewniać ochronę przeciw pociskom granatników przeciwpancernych RPG-7.</p>	
---	--

5. Rozwój środków ochrony przeciwminowej i antywybuchowych transporterów opancerzonych

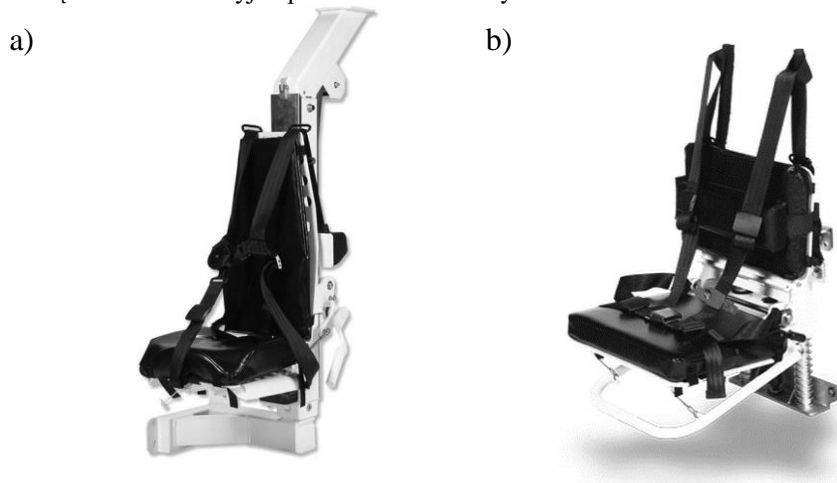
W konstrukcjach, które są obecnie projektowane szczególny nacisk kładzie się na systemy ochrony załogi redukujące przeciążenia pochodzące od wybuchu. Świadczy o tym gwałtowny wzrost ofert na rynku systemów ochrony pasażerów dla pojazdów bojowych.



Rys. 7 Środki ochrony przeciwminowej pojazdów specjalnych (Krzyształa 2012).

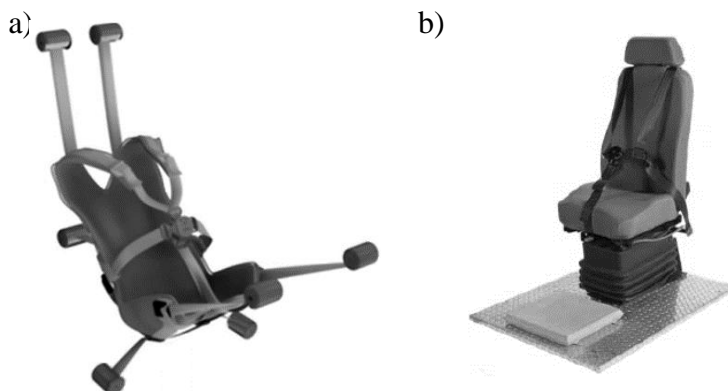
Głównym środkiem ochrony wewnętrznej pojazdów są między innymi siedziska pochłaniające energię. Podczas eksplozji ładunku wybuchowego pod pojazdem na pasażera może

działać szereg negatywnych czynników, których jednym z istotniejszych jest wspomnianie wcześniej przyspieszenie. Skuteczną ochronę żołnierzy przed wysokimi wartościami przyspieszeń powinien zapewnić względny ruch między siedziskiem i pojazdem. Zadaniem foteli jest nie tylko absorbowanie energii w momencie wybuchu, ale również w trakcie uderzenia opadającego pojazdu po wyrzuceniu go w powietrze w wyniku eksplozji. Zarówno sposób, jak i miejsce zamocowania siedziska stanowi istotny czynnik wpływający na skuteczność jego działania, dlatego w zależności od możliwości zabudowy pojazdu stosuje się mocowania do podłogi, kadłuba lub dachu pojazdu. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8 Systemy siedzeń redukujące przeciążenia firmy Allen Vanguard a) fotel mocowany do dachu pojazdu b) fotel mocowany do burty pojazdu (www.hellotrade.com).

Niekonwencjonalne rozwiązanie znajduje się w ofercie firmy Autoflug przedstawione na Rysunku 1.8a projektowane z myślą o zastosowaniu w śmigłowcach. Rozwiązanie cechuje lekka konstrukcja. Siedzisko jest mocowane do ścian kadłuba pojazdu za pomocą siedmiu elastycznych pasów otaczających siedzenie. Takie rozwiązanie eliminuje bezpośredni kontakt pasażera z kadłubem pojazdu.



Rys. 9 Systemy siedzeń redukujące przeciążenia a) system podwieszenia siedziska firmy Autoflug b) pneumatyczny fotel kierowcy z podkładką wypełnioną powietrzem firmy Allen Vanguard (www.hellotrade.com).

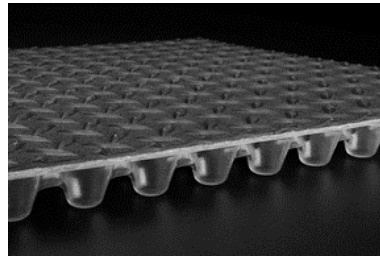
Wśród dodatkowych środków ochrony stosuje się także specjalistyczne maty przeciwwybuchowe do ochrony kończyn dolnych przed skutkami wybuchu min i IED (Rys. 10).

Stanowią one rozwiązanie uniwersalne gdyż posiadają możliwość adaptacji do każdego typu pojazdu. Ich rola jest szczególnie ważna w płaskodennych pojazdach lekko opancerzonych. Maty posiadają wkładki wykonane z materiałów energochłonnych, których geometria struktury dobrana jest w taki sposób, aby zapewniała w maksymalnym stopniu absorpcję energii w wyniku jej deformacji. W momencie wybuchu dochodzi do przemieszania się pojazdu w kierunku pionowy oraz deformacji dna pojazdu. Mata zostaje ściśnięta siłą pochodzącą z bezwładności swobodnie stykających się z nią kończyn – stóp.

a)



b)



Rys. 10 Przykładowe struktury mat energochłonnych (www.google.pl).

W celu spełnienia wymogów bezpieczeństwa stawianym pojazdom wojskowym, podejmowano się prób projektowania przedziału załogi pojazdu jako niezależnej kapsuły zamocowanej na podwoziu. Rozwiązanie to zostało zaczerpnięte z lotnictwa i polega na montowaniu tłumików i uchwytów antywibracyjnych pomiędzy kapsułą, a pancernem pojazdu Krzystała 2012. Taki zabieg ma na celu wytlumienie energii pochodzącej z siły impulsowej, przekazywanej przez bryłę pojazdu w początkowej fazie wybuchu.



Rys. 11 Przedział załogi wraz z zestawem uchwytów antywibracyjnych (Krzystała 2012).

Kolejnym, ważnym elementem ochrony przeciwinowej pojazdów militarnych są koła. Projektowane są z myślą o możliwości kontynuowania jazdy po wybuchu oraz zapewnienia możliwie jak największej absorpcji energii pochodzącej od wybuchu. Rozwój nowoczesnych technologii przyczynił się do zaprojektowania konstrukcji opony o strukturze plastra miodu. Tego typu opona pochłania o 30% mniej energii od koła z wkładką runflat co oznacza, że znaczna część energii fali wybuchowej jest rozpraszana dzięki kompozytowej strukturze. Badania wykazują ponadto znacznie mniejsze ugięcie osi koła. Takie koło umożliwia jazdę i ucieczkę z miejsca zagrożenia po jego uszkodzeniu w trakcie wybuchu.



Rys. 12 Opona skonstruowana na wzór plastra miodu (www.google.pl).

6. Wnioski

Ekspertsi wojskowych ośrodków naukowych pracują obecnie nad rozwiązaniami, które pozwolą zminimalizować skutki eksplozji ładunków wybuchowych oddziałujących na pojazdy wojskowe w trakcie działań militarnych. Ochrona załóg pojazdów wojskowych przed ww. zagrożeniami stała się sprawą priorytetową w prowadzonych pracach badawczo-rozwojowych wraz z pojawieniem się pierwszych analiz skutków działań prowadzonych w Iraku i Afganistanie. Bezpieczeństwo żołnierzy jest dziedziną nauki silnie rozwijającą się w ostatnich latach czemu dowodzi duża liczba publikacji i ofert firm produkujących tego typu produkty. Należy mieć na uwadze, że niemożliwe jest stworzenie konstrukcji, która będzie całkowicie odporna na wybuch. Istotą jest dążenie poprzez użyte materiały i zastosowane rozwiązania ograniczenie skutków eksplozji do takich wartości, które ludzki organizm jest w stanie znieść bez większego szwanku.

Praca została wykonana w ramach projektu nr DOBR-BIO4/022/13149/2013 pt. „Poprawa bezpieczeństwa i ochrona żołnierzy na misjach poprzez działanie w obszarach wojskowo-medycznym i technicznym”, realizowanego w latach 2013-2018

7. Literatura

- Barnat W, Gieleta R, Niezgoda T (2012) Experimental investigation of selected explosion parameters for numerical model validation: Journal of KONES Powertrain and Transport Vol. 19 No. 4, 9-14
- Walentynowicz J (2011) Problemy pasywnej i aktywnej ochrony wozów bojowych. Zeszyty naukowe WSOWL, Nr 2 (160) 2011, ISSN 1731-8157
- Krzystała E, Mężyk A, Kciuk S, (2011) Analiza oddziaływania wybuchu na kołowe pojazdy specjalne i ich załogi. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (28) nr 2, 2011
- Krzystała E, Kciuk S, Mężyk A, (2012) Identyfikacja zagrożeń załogi pojazdów specjalnych podczas wybuchu, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Eksploatacji –Państwowy Instytut Badawczy
- Saska P, Czmochoński J (2010) Problemy oddziaływania wybuchu na pojazdy minoodporne MRAP. Zeszyty naukowe WSOWL, Nr 4 (158) 2010 ISSN 1731-8157
- <http://www.hellotrade.com/allen-vanguard-corporation/>
- www.witu.mil.pl
- www.google.pl

12. P-jednostajna wypukłość i q-jednostajna gładkość w przestrzeniach Banacha

P-uniform convexity and q-uniform smoothness in Banach spaces

Markowicz Joanna

Katedra Zastosowań Matematyki i Informatyki, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Głęboka 28

Słowa kluczowe: analiza funkcjonalna, nierówności związane z normami

Streszczenie

Celem pracy jest przedstawienie znanych wyników dotyczących p-jednostajnej wypukłości i q-jednostajnej gładkości. Te pojęcia są związane z pewnymi geometrycznymi własnościami przestrzeni Banacha, tj. z jednostajną wypukłością i jednostajną gładkością. Wprowadzenie pojęć p-jednostajnej wypukłości i q-jednostajnej gładkości skutkuje rozpatrywaniem nierówności między elementami przestrzeni Banacha. W tej pracy wprowadza się definicję normy, przestrzeni Banacha, wraz z przykładami. Wyjaśnia się pojęcia jednostajnej wypukłości, p-jednostajnej wypukłości, jednostajnej gładkości, q-jednostajnej gładkości oraz przedstawia twierdzenia, w których uogólniono te pojęcia.

1. Wstęp

Geometria przestrzeni Banacha jest ważnym zagadnieniem analizy funkcjonalnej. Bada się w niej m.in. kształt kul i sfer jednostkowych przestrzeni unormowanych. W niniejszej pracy, przez X będziemy oznaczać przestrzeń unormowaną, tzn. rzeczywistą lub zespoloną przestrzeń wektorową nad ciałem \mathcal{F} wraz z normą $\|\cdot\|$.

Definicja 1. 1. Normą $\|\cdot\|$ nazywamy funkcję $\|\cdot\|: X \rightarrow [0, \infty)$, która spełnia następujące warunki:

- i. $\|x\| = 0$ wtedy i tylko wtedy, gdy $x = 0$;
- ii. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$ dla wszystkich $x \in X$, gdzie λ jest skalarą;
- iii. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ dla wszystkich $x, y \in X$.

Jeżeli w danej przestrzeni została wprowadzona norma, wówczas w te przestrzeni możemy zdefiniować metrykę d poprzez następujący wzór: $d(x, y) = \|x - y\|$.

Definicja 1. 2. Niech (X, d) będzie przestrzenią metryczną i niech (x_i) będzie ciągiem elementów tej przestrzeni. Ciąg (x_i) nazywamy ciągiem Cauchy'ego, jeżeli

$$\bigwedge_{\varepsilon > 0} \bigvee_{N \in \mathbb{N}} \bigwedge_{m, n > N} d(x_m, x_n) < \varepsilon.$$

Przestrzenią Banacha nazywamy przestrzeń unormowaną, która jest zupełna w odniesieniu do metryki zdefiniowanej za pomocą normy. Innymi słowy przestrzeń unormowana jest zupełna, jeśli każdy ciąg Cauchy'ego jest zbieżny w tej przestrzeni.

Przestrzenią Hilberta nazywamy przestrzeń wektorową nad ciałem \mathcal{F} z iloczynem skalarnym.

W przestrzeni unormowanej $(X, \|\cdot\|)$ domkniętą kulą jednostkową B_X nazywamy zbiór $B_X = \{x \in X: \|x\| \leq 1\}$, a sferą jednostkową S_X nazywamy zbiór $S_X = \{x \in X: \|x\| = 1\}$.

Przedstawimy kilka klasycznych przykładów przestrzeni Banacha.

- a) Niech p będzie liczbą rzeczywistą taką, że $1 \leq p < \infty$. Przestrzeń l_p definiujemy jako przestrzeń wszystkich ciągów $x = (x_1, x_2, \dots)$ skalarów, dla których suma $\sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p$ jest skończona. Standardową normą w tej przestrzeni jest

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

- b) Przestrzeń l_{∞} nazywamy przestrzeń wszystkich ograniczonych ciągów skalarów $x = (x_1, x_2, \dots)$ ze standardową normą

$$\|x\|_{\infty} = \sup\{|x_i| : i = 1, 2, \dots\}.$$

Podprzestrzenią przestrzeni l_{∞} jest przestrzeń c wszystkich ciągów ograniczonych i zbieżnych. W przestrzeni c standardowa norma jest taka sama, jak w przestrzeni l_{∞} .

Kolejną podprzestrzenią przestrzeni l_{∞} jest przestrzeń c_0 wszystkich ciągów ograniczonych i zbieżnych do 0. W przestrzeni c_0 standardową normą jest norma

$$\|x\|_{c_0} = \max\{|x_i| : i = 1, 2, \dots\}.$$

- c) Przypadek skończenie wymiarowych przestrzeni z punktów a) i b). tj, tzw. przestrzeni l_p^n wygląda następująco: Niech $1 \leq p \leq \infty$ i niech n będzie liczbą naturalną, większą od 0. Normę na wektorze \mathcal{F}^n definiujemy w następujący sposób:

$$\|x\|_p = \begin{cases} \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}, & \text{gdym } 1 \leq p < \infty; \\ \max\{|x_1|, \dots, |x_n|\}, & \text{gdym } p = \infty. \end{cases}$$

- d) Niech μ będzie rzeczywistą, nieujemną miarą na σ -algebrze Σ podzbiorów zbioru Ω . Dla każdego p takiego, że $1 \leq p \leq \infty$ definiujemy przestrzeń Lebesgue'a $L_p(\Omega, \Sigma, \mu)$ jako przestrzeń unormowaną z normą $\|\cdot\|_p$ daną następującym wzorem:

$$\|f\|_p = \begin{cases} \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}, & \text{gdym } 1 \leq p < \infty; \\ \inf\{t : t > 0, \mu(\{x : |f(x)| > t\}) = 0\}, & \text{gdym } p = \infty. \end{cases}$$

Przestrzenią sprzężoną z X nazywamy przestrzeń wszystkich funkcjonałów liniowych ciągłych nad X . Przestrzeń sprzężoną do X oznaczamy przez X^* , a jej elementy oznaczamy symbolami x^* .

2. Opis zagadnienia

Na początku wprowadzimy podstawowe definicje i fakty dotyczące jednostajnej wypukłości i jednostajnej gładkości. Następnie przejdziemy do pojęć p-jednostajnej wypukłości i q-jednostajnej gładkości. Przedstawimy szereg nierówności i twierdzeń związanych z tymi pojęciami. Kolejno podamy zależność między jednostajną gładkością przestrzeni X a jednostajną wypukłością przestrzeni X^* oraz zależność między jednostajną wypukłością przestrzeni X a jednostajną gładkością przestrzeni X^* wraz z odpowiednikami tych twierdzeń dla własności p-jednostajnej wypukłości i q-jednostajnej gładkości.

Definicja 2. 1. Niech X będzie rzeczywistą przestrzenią Banacha wymiaru $\dim X \geq 2$. Modułem wypukłości przestrzeni X nazywamy funkcję $\delta_X : [0, 2] \rightarrow [0, 2]$ określoną w następujący sposób:

$$\delta_X(\varepsilon) = \inf \left\{ 1 - \frac{\|x + y\|}{2} : \|x\| = \|y\| = 1, \|x - y\| = \varepsilon \right\}, 0 \leq \varepsilon \leq 2.$$

Definicja 2. 2. Mówimy, że przestrzeń X jest jednostajnie wypukła, jeśli $\delta_X(\varepsilon) > 0$ dla wszystkich $\varepsilon > 0$.

Definicja 2. 3. Mówimy, że przestrzeń X jest p-jednostajnie wypukła dla $2 \leq p < \infty$ jeśli istnieje stała $C > 0$ taka, że dla wszystkich $\varepsilon > 0$ spełniona jest nierówność

$$\delta_X(\varepsilon) \geq C\varepsilon^p. \quad (1)$$

Definicja 2. 4. Niech X będzie rzeczywistą przestrzenią Banacha wymiaru $\dim X \geq 2$. Modułem gładkości przestrzeni X nazywamy funkcję $\rho_X: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ określoną w następujący sposób:

$$\rho_X(t) = \sup \left\{ \frac{\|x + ty\| - \|x - ty\|}{2} - 1 : \|x\| = \|y\| = 1 \right\}, t \geq 0.$$

Definicja 2. 5. Mówimy, że przestrzeń X jest jednostajnie gładka, jeśli $\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\rho_X(t)}{t} = 0$.

Definicja 2. 6. Mówimy, że przestrzeń X jest q -jednostajnie gładka dla $1 < q \leq 2$, jeśli istnieje stała $K > 0$, taka, że dla wszystkich $t \geq 0$ spełniona jest nierówność

$$\rho_X(t) \leq Kt^q.$$

Z intuicyjnego punktu widzenia możemy powiedzieć, że przestrzeń unormowana jest gładka, jeśli jej sfera jednostkowa nie zawiera „kątów” i „ostrych zagięć”. Podobnie, możemy powiedzieć, że przestrzeń unormowana jest wypukła, jeśli jej sfera jednostkowa nie zawiera prostych odcinków.

Twierdzenie 2.1. (Suzuki Tomonari, 2014) Niech X będzie przestrzenią Banacha i niech $p \in [2, \infty)$. Wówczas następujące warunki są równoważne:

- i. X jest p -jednostajnie wypukła,
- ii. $\liminf_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} > 0$.

Dowód. Na wstępie założymy, że $\inf_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} = 0$. Wtedy dla każdego $C > 0$ istnieje $\varepsilon > 0$ takie, że $\frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} < C$. Oznacza to, że X nie jest p -jednostajnie wypukła. W drugą stronę założymy, że X nie jest p -jednostajnie wypukła. Oznacza to, że dla każdego $C > 0$ istnieje $\varepsilon \in (0, 2]$ takie, że $\delta(\varepsilon) < C\varepsilon^p$. Przyjmując za C wartość $\frac{1}{n}$, tj. gdy $C = \frac{1}{n}$, wówczas możemy zdefiniować ciąg $\{\varepsilon_n\}$ w $(0, 2]$ taki, że $\frac{\delta(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n^p} < \frac{1}{n}$. W tym przypadku $\liminf_n \varepsilon_n = 0$. Bez straty ogólności możemy założyć, że $\lim_n \varepsilon_n = 0$. Mamy, że

$$0 \leq \liminf_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\delta(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n^p} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$$

i stąd $\liminf_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} = 0$. W przeciwnym wypadku istnieje $\varepsilon_0 > 0$ takie, że $\varepsilon_0 < \varepsilon_n$ dla wszystkich $n \in \mathbb{N}$. Wówczas, z faktu, że funkcja δ jest niemalejąca mamy, że

$$0 \leq \frac{\delta(\varepsilon_0)}{2^p} \leq \frac{\delta(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n^p} < \frac{1}{n}$$

dla wszystkich $n \in \mathbb{N}$ i mamy, że $\delta(\varepsilon_0) = 0$. Stąd, $\delta(\varepsilon) = 0$ dla $\varepsilon \in [0, \varepsilon_0]$. To implikuje, że $\lim_{\varepsilon \rightarrow +0} \frac{\delta(\varepsilon)}{\varepsilon^p} = 0$. □

Twierdzenie 2.2. (Suzuki Tomonari, 2014) Niech X będzie przestrzenią Banacha i niech $q \in (1, 2]$. Wówczas następujące warunki są równoważne:

- i. X jest q -jednostajnie gładka,
- ii. $\limsup_{t \rightarrow +0} \frac{\rho(t)}{t^q} < \infty$.

Dowód. Na początku założymy, że $\limsup_{t \rightarrow +0} \frac{\rho(t)}{t^q} = \infty$. Wtedy, dla każdego $K > 0$ istnieje $t > 0$ takie, że $\frac{\rho(t)}{t^q} > K$. Stąd, X nie jest q -jednostajnie gładka. Z drugiej strony, założymy teraz, że X nie jest q -

jednostajnie gładka. Wtedy dla każdego $K > 0$ istnieje $t > 0$ takie, że $\rho(t) > Kt^q$. Przyjmując $K = n$, możemy zdefiniować ciąg $\{t_n\}$ w $(0, \infty)$ taki, że $\frac{\rho(t_n)}{t_n^q} > n$. Wtedy mamy, że

$$n < \frac{\rho(t_n)}{t_n^q} \leq \frac{t_n}{t_n^q} = \frac{1}{t_n^{q-1}}.$$

Stąd, $\lim_n t_n = 0$, ponieważ $q - 1 > 0$. Ostatecznie otrzymujemy, że

$$\limsup_{t \rightarrow +0} \frac{\rho(t)}{t^q} \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{\rho(t_n)}{t_n^q} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} n = \infty,$$

co kończy dowód. □

Przestrzenie p-jednostajnie wypukłe są jednostajnie wypukłe. Podobnie, przestrzenie q-jednostajnie gładkie są jednostajnie gładkie. Dla dowolnej przestrzeni Banacha X mamy, że

$$\delta_X(\varepsilon) \leq \delta_H(\varepsilon) = 1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{4}}$$

oraz

$$\rho_X(t) \geq \rho_H(t) = \sqrt{1 + t^2} - 1.$$

Stąd wynika, że żadna przestrzeń Banacha nie jest p-jednostajnie wypukła dla $p < 2$ i q-jednostajnie gładka dla $q > 2$. Rzeczywiście, jeśli $p < 2$, to mamy

$$\frac{\delta_X(\varepsilon)}{\varepsilon^p} \leq \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{4}}}{\varepsilon^p} = \frac{\varepsilon^{2-p}}{4 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2}{4}}\right)} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0^+} 0.$$

Jeśli $q > 2$, to otrzymujemy

$$\frac{\rho_X(t)}{t^q} \geq \frac{\sqrt{1 + t^2} - 1}{t^q} = \frac{1}{t^{q-2}(\sqrt{1 + t^2} - 1)} \xrightarrow{t \rightarrow 0} \infty.$$

Każda przestrzeń Banacha jest 1-jednostajnie gładka, ponieważ $\rho_X(t) \leq t$ dla wszystkich $t \geq 0$. Przestrzenie p-jednostajnie wypukłe są r-jednostajnie wypukłe dla $2 \leq p \leq r < \infty$. Przestrzenie q-jednostajnie gładkie są r-jednostajnie gładkie dla $1 < r \leq q \leq 2$. Dla $p > 1$ przestrzenie L^p są $\max\{2, p\}$ -jednostajnie wypukłe i $\min\{2, p\}$ -jednostajnie gładkie. Przestrzenie Hilberta są 2-jednostajnie wypukłe i 2-jednostajnie gładkie.

Twierdzenie 2.3. (K. Ball, A. Carlen, E. H. Lieb, B. Beauzamy)

- i. Niech $1 < q \leq 2$. Wtedy X jest q-jednostajnie gładka, wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje stała $K > 0$ taka, że

$$\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2} \leq \|x\|^q + \|Ky\|^q \text{ dla wszystkich } x, y \in X. \quad (2)$$

- ii. Niech $2 \leq p < \infty$. Wtedy X jest p-jednostajnie wypukła wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje stała $C > 0$ taka, że

$$\frac{\|x+y\|^p + \|x-y\|^p}{2} \geq \|x\|^p + \|Cy\|^p \text{ dla wszystkich } x, y \in X. \quad (3)$$

Uwaga 1. Formuła (2) implikuje, że $K \geq 1$. Stąd najlepszą stałą w (2) jest $K = 1$. Dla $K = 1$ mamy następującą nierówność Clarksona:

$$\left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2}\right)^{\frac{1}{q}} \leq (\|x\|^q + \|y\|^q)^{\frac{1}{q}} \text{ dla } 1 < q \leq 2. \quad (4)$$

Z formuły (3) wynika, że $0 < C \leq 1$ i nierówność z (3) z najlepszą stałą $C = 1$ jest następującą nierównością Clarksona:

$$\left(\frac{\|x+y\|^p + \|x-y\|^p}{2}\right)^{\frac{1}{p}} \geq (\|x\|^p + \|y\|^p)^{\frac{1}{p}} \text{ dla } 2 \leq p < \infty. \quad (5)$$

Nierówności Clarksona implikują, że przestrzenie L_p dla $p \in [2, \infty)$ są p -jednostajnie wypukłe, a przestrzenie L_q dla $q \in (1, 2]$ są q' -jednostajnie wypukłe, gdzie $\frac{1}{q} + \frac{1}{q'} = 1$, podczas gdy, jak wiemy, przestrzenie L_q dla $q \in (1, 2]$ są 2-jednostajnie wypukłe. Optymalna nierówność dla 2-jednostajnej wypukłości dla przestrzeni L_q dla $q \in (1, 2]$ jest następująca: (Ball-Carlen-Lieb)

$$\frac{\|f+g\|_q^2 + \|f-g\|_q^2}{2} \geq \|f\|_q^2 + (q-1)\|g\|_q^2,$$

gdzie stała $q-1$ jest optymalna. Jest to równoważne do następującej, ostrzejszej nierówności:

$$\left(\frac{\|f+g\|_q^q + \|f-g\|_q^q}{2}\right)^{\frac{1}{q}} \geq (\|f\|_q^2 + (q-1)\|g\|_q^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

gdzie stała $q-1$ jest optymalna. Dla $q \in [2, \infty)$ powyższe nierówności są przeciwne. Z nierówności (6) otrzymujemy najlepsze oszacowanie w (1) dla przestrzeni L_q dla $q \in (1, 2]$:

$$\delta_{L_q}(\varepsilon) \geq \{(q-1)/8\}\varepsilon^p \text{ dla wszystkich } \varepsilon > 0.$$

Prawdziwa są również następujące nierówności:

Twierdzenie 2.4. (J. Lindenstrauss, L. Tzafriri, 1979) Niech $1 < q \leq p < \infty$ oraz niech $\gamma = \sqrt{\frac{q-1}{p-1}}$.

Wówczas:

i. Dla wszystkich $x, y \in X$

$$\left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2}\right)^{\frac{1}{q}} \leq \left(\frac{\|x+y\|^p + \|x-y\|^p}{2}\right)^{\frac{1}{p}}.$$

ii. Dla wszystkich $x, y \in X$

$$\left(\frac{\|x+\gamma y\|^p + \|x-\gamma y\|^p}{2}\right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2}\right)^{\frac{1}{q}}.$$

Przejdziemy teraz do zależności między jednostajną wypukłością a jednostajną gładkością w przestrzeniach X i X^* .

Twierdzenie 2.5. (Lindenstrauss) Niech X będzie przestrzenią Banacha. Dla każdego $t > 0$, dla każdego $x \in X$ takiego, że $\|x\| = 1$ oraz dla każdego x^* w X^* z $\|x^*\| = 1$ zachodzą następujące równości:

$$\rho_{X^*}(t) = \sup \left\{ \frac{t\varepsilon}{2} - \delta_X(\varepsilon) : 0 < \varepsilon \leq 2 \right\}$$

oraz

$$\rho_X(t) = \sup \left\{ \frac{t\varepsilon}{2} - \delta_{X^*}(\varepsilon) : 0 < \varepsilon \leq 2 \right\}.$$

Twierdzenie 2.6. Niech X będzie przestrzenią Banacha. Wówczas następujące warunki są prawdziwe:

- i. X jest jednostajnie gładka wtedy i tylko wtedy, gdy X^* jest jednostajnie wypukła.
- ii. X jest jednostajnie wypukła wtedy i tylko wtedy, gdy X^* jest jednostajnie gładka.

Dowód. i.(\rightarrow). Jeśli X^* nie byłaby jednostajnie gładka, wtedy istniałby $\varepsilon_0 \in (0, 2]$ taki, że $\delta_{X^*}(\varepsilon_0) = 0$.

Wtedy z drugiej formuły twierdzenia wcześniejszego otrzymujemy, że dla każdego $t > 0$ zachodzą następujące nierówności

$$0 < \frac{\varepsilon_0}{2} \leq \frac{\rho_X(t)}{t},$$

co oznacza, że X nie jest jednostajnie gładka.

i.(←). Załóżmy, że X nie jest jednostajnie gładka. Wtedy

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{\rho_X(t)}{t} \neq 0,$$

Co oznacza, że istnieje $\varepsilon > 0$ takie, że dla każdego $\delta > 0$ możemy znaleźć t_δ takie, że $0 < t_\delta < \delta$ oraz spełniające nierówność $t_\delta \varepsilon \leq \rho_X(t_\delta)$. Wówczas istnieje ciąg $(t_n)_n$ taki, że $0 < t_n < 1$, $t_n \rightarrow 0$ oraz, że $\rho_X(t_n) > \frac{\varepsilon}{2} t_n$. Z drugiej formuły Twierdzenia 6. Mamy, że dla każdego n istnieje $\varepsilon_n \in (0, 2]$ takie, że

$$\frac{\varepsilon}{2} t_n \leq \frac{\varepsilon t_n}{2} - \delta_{X^*}(\varepsilon_n)$$

co implikuje, że

$$0 < \delta_{X^*}(\varepsilon_n) \leq \frac{t_n}{2}(\varepsilon_n - \varepsilon).$$

W szczególności $\varepsilon < \varepsilon_n$ i $\delta_{X^*}(\varepsilon_n) \rightarrow 0$. Ponieważ δ_{X^*} jest funkcją niemalejącą, więc mamy, że $\delta_{X^*}(\varepsilon) \leq \delta_{X^*}(\varepsilon_n) \rightarrow 0$. Dlatego też X^* nie jest jednostajnie wypukła. Zauważmy, że zamieniając miejscami X i X^* w dowodzie, otrzymujemy dowód części ii. □

Zależność między p-jednostajną wypukłością a q-jednostajną gładkością przestrzeni X i przestrzeni X^* jest podana w poniższym twierdzeniu.

Twierdzenie 2.7. Niech X będzie rzeczywistą przestrzenią Banacha. Wówczas następujące warunki są prawdziwe:

- i. X jest p-jednostajnie wypukła wtedy i tylko wtedy, gdy X^* jest q-jednostajnie gładka.
- ii. X jest q-jednostajnie gładka wtedy i tylko wtedy, gdy X^* jest q-jednostajnie wypukła, gdzie $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.

Zdefiniujemy teraz notacje typu i cotypu, które zostały wprowadzone przez Hoffmana-Jorgensena w kontekście prawa wielkich liczb dla zmiennych losowych o wartościach w przestrzeni Banacha.

Definicja 2. 7. Mówimy, że przestrzeń Banacha X jest typu q , dla $1 \leq q \leq 2$, jeśli istnieje stała $M > 0$ taka, że

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j \right\|^q \right)^{\frac{1}{q}} \leq M \left(\sum_{j=1}^n \|x_j\|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (7)$$

dla każdego skończonego ciągu elementów $x_1, x_2, \dots, x_n \in X$.

Definicja 2. 8. Mówimy, że przestrzeń Banacha X jest cotypu p , dla $2 \leq p < \infty$, jeśli istnieje stała $M > 0$ taka, że

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j \right\|^p \right)^{\frac{1}{p}} \geq \frac{1}{M} \left(\sum_{j=1}^n \|x_j\|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (8)$$

dla każdego skończonego ciągu elementów $x_1, x_2, \dots, x_n \in X$.

Te probabilistyczne własności są scharakteryzowane przez nierówności Clarksona. Wiadomo, że przestrzenie q-jednostajnie gładkie są typu q oraz przestrzenie p-jednostajnie wypukłe są cotypu p . Twierdzenie odwrotne nie jest prawdziwe.

Twierdzenie 2.8. (Kato Mikio, Takahashi Yasuji, Hashimoto Kazuo, 2002) Niech $1 < q \leq 2$ oraz $1 \leq s < \infty$. Następujące warunki są równoważne:

- i. X jest q-jednostajnie gładka.
- ii. Istnieje stała $K \geq 1$ taka, że

$$\left(\frac{\|x+y\|^s + \|x-y\|^s}{2} \right)^{\frac{1}{s}} \leq (\|x\|^q + \|Ky\|^q)^{\frac{1}{q}} \text{ dla każdych } x, y \in X. \quad (9)$$

Jeśli $q \leq s < \infty$, to wtedy dodatkowo mamy, że:

iii. Istnieje stała $K \geq 1$ taka, że

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j \right\|^s\right)^{\frac{1}{s}} \leq (\|x_1\|^q + \sum_{j=2}^n \|Kx_j\|^q)^{\frac{1}{q}} \quad (10)$$

dla każdego skończonego ciągu elementów $x_1, x_2, \dots, x_n \in X$.

Nierówność (9) jest mocniejsza od nierówności (2) jeśli $q \leq s$. Rzeczywiście, mamy, że:

$$\left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2}\right)^{\frac{1}{q}} \leq \left(\frac{\|x+y\|^s + \|x-y\|^s}{2}\right)^{\frac{1}{s}} \leq (\|x\|^q + \|Ky\|^q)^{\frac{1}{q}}.$$

Nierówność (10) jest silniejsza, niż nierówność (7). Więc (10) będziemy określać jako nierówność silnego typu q .

Twierdzenie 2.9. (Kato Mikio, Takahashi Yasuji, Hashimoto Kazuo, 2002) Niech $2 \leq p < \infty$ i

$1 < t \leq \infty$. Wówczas następujące warunki są równoważne.

- i. X jest p -jednostajnie wypukła.
- ii. Istnieje stała $0 < C \leq 1$ taka, że

$$\left(\frac{\|x+y\|^t + \|x-y\|^t}{2}\right)^{\frac{1}{t}} \geq (\|x\|^p + \|Cy\|^p)^{\frac{1}{p}} \text{ dla każdych } x, y \in X. \quad (11)$$

Jeśli $1 < t \leq p$, to dodatkowo mamy, że

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j \right\|^t\right)^{\frac{1}{t}} \geq (\|x_1\|^q + \sum_{j=2}^n \|Cx_j\|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (12)$$

dla każdego skończonego ciągu elementów $x_1, x_2, \dots, x_n \in X$.

Dla $p \geq t$ nierówność (11) jest silniejsza niż (3). Rzeczywiście, mamy, że:

$$\left(\frac{\|x+y\|^p + \|x-y\|^p}{2}\right)^{\frac{1}{p}} \geq \left(\frac{\|x+y\|^t + \|x-y\|^t}{2}\right)^{\frac{1}{t}} \geq (\|x\|^p + \|Cy\|^p)^{\frac{1}{p}}.$$

Nierówność (12) jest silniejsza niż nierówność (8) cotypu p . Więc nierówność (12) będziemy określać jako nierówność silniejszego cotypu p .

Twierdzenie 2.10. Jeśli przestrzeń X jest typu q , wtedy przestrzeń X^* jest cotypu p , gdzie $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$.

Twierdzenie w drugą stronę nie jest prawdziwe, ale kolejne twierdzenie pokazuje, że dla nierówności silnego typu i cotypu (10) i (12) twierdzenie odwrotne do powyższego zachodzi dla $q \leq s < \infty$.

Twierdzenie 2.11. (Kato Mikio, Takahashi Yasuji, Hashimoto Kazuo, 2002) Niech $1 \leq q \leq 2$,

$1 < s < \infty$ oraz niech $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{s} + \frac{1}{t} = 1$. Niech $1 \leq K < \infty$. Wtedy, jeśli nierówność

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j \right\|^s\right)^{\frac{1}{s}} \leq \left(\|x_1\|^q + \sum_{j=2}^n \|Kx_j\|^q\right)^{\frac{1}{q}}$$

zachodzi w X , wtedy nierówność

$$\left(\frac{1}{2^n} \sum_{\theta_j = \pm 1} \left\| \sum_{j=1}^n \theta_j x_j^* \right\|^t \right)^{\frac{1}{t}} \geq \left(\|x_1^*\|^p + \sum_{j=2}^n \|K^{-1}x_j^*\|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

zachodzi w X^* . Jeśli $q \leq s < \infty$, wówczas zachodzą nierówności przeciwne.

Twierdzenie 2.12. (J. Lindenstrauss, L. Tzafriri, 1979) Niech $1 < q \leq p < \infty$ oraz niech $\gamma =$

$$\sqrt{\frac{q-1}{p-1}}. \text{ Wówczas:}$$

iii. Dla wszystkich $x, y \in X$

$$\left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2} \right)^{\frac{1}{q}} \leq \left(\frac{\|x+y\|^p + \|x-y\|^p}{2} \right)^{\frac{1}{p}}.$$

iv. Dla wszystkich $x, y \in X$

$$\left(\frac{\|x+\gamma y\|^p + \|x-\gamma y\|^p}{2} \right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\frac{\|x+y\|^q + \|x-y\|^q}{2} \right)^{\frac{1}{q}}.$$

3. Przegląd literatury

Literatura wykorzystana w tej pracy została wyszczególniona w Rozdziale 5. Literatura.

4. Podsumowanie

W pracy zdefiniowano zagadnienia jednostajnej wypukłości, p-jednostajnej wypukłości, jednostajnej gładkości i q-jednostajnej gładkości w przestrzeniach Banacha. Przedstawiono szereg twierdzeń, w których powyższe własności znalazły zastosowanie.

5. Literatura

Chidume C (2009), Geometric Properties of Banach Spaces and Nonlinear Iterations, Lecture Notes in Mathematics, Springer-Verlag London Limited.

Kato Mikio, Takahashi Yasuji (2002), On optimal 2-uniform convexity inequalities.

Kato Mikio, Takahashi Yasuji, Hashimoto Kazuo (2002), On some generalizations of q-uniform convexity inequalities.

Suzuki Tomonari (2014), p-Uniform Convexity and q-Uniform Smoothness of Absolute Normalized Norms on \mathcal{C}^2 .

13. Detekcja uszkodzeń izolatorów linii elektroenergetycznej z wykorzystaniem pojazdów UAV

Detection of power line insulators damage using UAV vehicles

Osuchowski Jakub

Instytut Informatyki, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Michał Tomaszewski, prof. PO

Osuchowski Jakub: jakub.osuchowski@gmail.com

Słowa kluczowe: przetwarzanie obrazów, metody wizyjne, identyfikacja uszkodzeń.

Streszczenie

W niniejszej publikacji przedstawiono opis możliwości wykorzystania bezałogowych statków powietrznych (z ang. UAV- Unmanned Aerial Vehicle) do celów detekcji uszkodzeń izolatorów linii elektroenergetycznej. Zaprezentowany został potencjał połączenia metod przetwarzania oraz rozpoznawania obrazów oraz dronów do celów szybkiej oraz efektywnej identyfikacji zagrożeń dla linii wysokiego napięcia. W artykule przybliżono ponadto zagadnienia związane z budową oraz awaryjnością izolatorów napowietrznej linii wysokiego napięcia, przedstawiono główne zalety bezałogowych statków powietrznych w diagnostyce linii przesyłowych oraz zarysowano możliwości automatycznej detekcji uszkodzeń izolatorów.

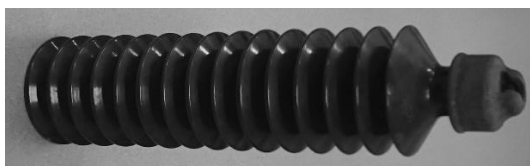
1. Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć znaczący wzrost zapotrzebowania oraz znaczenia energii elektrycznej dla gospodarki i społeczeństwa. Wzrosły również wymagania dotyczące ciągłości jej dostaw. Jak każdy obiekt techniczny linie elektroenergetyczne podlegają procesowi starzenia i ulegają awariom, które są nieodłącznym elementem procesu eksploatacji. W celu utrzymania ciągłości eksploatacji operatorzy sieci elektroenergetycznej zobowiązani są do wykonywania okresowych inspekcji prewencyjnych, których głównym celem jest ocena stanu technicznego poszczególnych elementów linii elektroenergetycznych. Ze względu na specyfikę infrastruktury przesyłowej (rozległy obszar, złożona budowa, ekspozycja na różnego typu oddziaływania, itp.) jest to skomplikowane i czasochłonne zadanie wymagające wiedzy eksperckiej oraz zastosowania odpowiednich środków technicznych.

2. Opis zagadnienia

Linia napowietrzna składa się z trzech głównych komponentów: przewodów przewodzących, słupów przesyłowych oraz izolatorów. Izolatory linii napowietrznych spełniają dwie podstawowe funkcje. Izolują przewody przewodzące od podłoża oraz struktury wieży, a także zapewniają im wsparcie mechaniczne. Izolatory te budowane są w taki sposób aby zmaksymalizować drogę upływu od jednego końca izolatora do drugiego. Dlatego formowane są one w szereg fal lub skierowanych do dołu miseczek. Miseczki te działają jak parasole zapewniając, że część powierzchni izolatora pozostaje sucha w deszczową pogodę (Holtzhausen 1994; Anjum 2014). Izolatory produkowane są obecnie z porcelany, szkła oraz materiałów kompozytowych. Izolatory porcelanowe używane są od ponad stu lat i do tej pory są cenione przez firmy dystrybuujące energię elektryczną. Są one wytwarzane z wykorzystaniem gliny, kwarcu lub skalenia, a następnie pokrywane są gładkim szkliwem aby lepiej zrzucić wodę. Jakość tych izolatorów jest w dużej mierze zależna od parametrów takich jak skład porcelany, temperatura produkcji czy jakość powierzchni (Anjum 2014; Cotton i in. 1970). W zależności od miejsca zastosowania izolatory porcelanowe występują w kilku formach. Pierwszą z nich są izolatory stojące, które są mocowane do słupów w pozycji pionowej na trzonach. Do ich szybkiego przytwierdzenia są przewody za pomocą specjalnych uchwytów lub drutów (Cotton i in. 1970; Han i in. 2009). Innym typem izolatorów porcelanowych i szklanych są izolatory kołpakowe. Izolatory te często stosowane są w napowietrznych liniach wysokiego napięcia. Przeznaczone są one

do pracy mechanicznej na rozciąganie. Składają się z modułów zbudowanych z klosza, kołpaka oraz trzonka. Zaletą tego rodzaju izolatorów jest możliwość składania izolatora w zależności od potrzeb z różnej liczby modułów. Dodatkowo, w razie uszkodzenia pojedynczego dysku, może on zostać wymieniony bez konieczności wymiany całego izolatora. Kolejnym rodzajem izolatora porcelanowego jest izolator wsporczy. Składa się on z pełnego porcelanowego cylindra oraz stalowych zaczepów na końcach. Jest on stosowany do podtrzymywania przewodów wysokiego napięcia w podstawach. Podobnie zbudowanym izolatorem porcelanowym jest izolator długopniowy. Jest on węższy, lżejszy i używany jako izolator wiszący. Przykładowe zdjęcie izolatora długopniowego przedstawiono na Rys.1.



Rys.1. Porcelanowy izolator wiszący długopniowy LP 75/14/860.

Następną grupą izolatorów są izolatory kompozytowe, które obecnie reprezentują znaczącą część rynku. Izolatory te mają wiele zalet takich jak: niższa waga, większa wytrzymałość mechaniczna oraz spora wytrzymałość na akty wandalizmu. Szacuje się, że około 60% do 70% nowo zakładanych izolatorów to właśnie izolatory kompozytowe. Przykładowe zdjęcie izolatora kompozytowego przedstawiono na Rys.2.



Rys.2. Kompozytowy izolator liniowy wiszący CS 70 E24 170/650.

Izolatory stosowane w liniach napowietrznych, szczególnie w liniach wysokiego napięcia wymagają regularnej inspekcji. Jest to konieczne ze względu na ich degradację na skutek działania czynników atmosferycznych, temperatury, jak również wysokiego napięcia i stresu mechanicznego. Bezpieczeństwo i stabilność linii wysokiego napięcia może mieć znaczący wpływ na warunki i jakość życia jej użytkowników. Aby zapobiec przerwom w dostawach energii elektrycznej i skrócić ich czas do absolutnego minimum, firmy zajmujące się dystrybucją energii elektrycznej powinny przeprowadzać regularne szczegółowe i rutynowe inspekcje linii napowietrznych (Lee i in. 2007; Oberweger i in. 2014; Wang i in. 2016). Awaria izolatora zachodzi w momencie, gdy jedna lub obydwie jego główne funkcje (izolacyjna i wsparcia mechanicznego) nie są spełnione. Ze względu na typy izolatorów podlegają one różnego rodzaju uszkodzeniom. Wiele czynników może prowadzić do uszkodzenia izolatora, należą do nich: wady produkcyjne, błędy podczas doboru izolatorów, wandalizm, trudne warunki pracy, zanieczyszczenie środowiska i warunki pogodowe. Najczęstszą przyczyną awarii izolatorów kołpakowych jest pęknięcie talerzy na skutek rozszerzania się spoiwa, które zostało użyte do połączenia kołpaka i trzonka z dyskiem. Innym rodzajem awarii jest korozja zaczepów izolatora. Zachodzi ona na fragmentach izolatora odsłoniętych na działanie wilgoci i zanieczyszczeń. Wynikiem korozji jest osłabienie izolatora oraz w najgorszym przypadku odłączenie się przewodu przewodzącego. Innym rodzajem uszkodzenia jest rozpad rdzenia. Zjawisko to występuje tylko w izolatorach kompozytowych. Izolatory te dotykają także inne rodzaje awarii. Najpoważniejsze to: erozja dysków z powodu gromadzenia się brudu i soli, rozrywanie talerzy przez silne wiatry i niszczenie dysków przez ptaki (Chojnicki 2011, Bretuj i in. 2012). Talerze izolatorów szklanych i porcelanowych pękają często z powodu aktów wandalizmu. W izolatorach porcelanowych wandalizm powoduje zwykle odłamanie kawałka dysku (Rys.3). W szklanych

izolatorach na skutek hartowania nawet drobne uszkodzenie powoduje pęknięcie całego dysku. Izolatory te mają również tendencję do spontanicznego pęknięcia, spowodowanego uwalnianiem naprężeń zgromadzonych podczas procesu hartowania.



Rys.3. Przykład porcelanowego izolatora długopniowego (typ LP 75/14/860) z ukruszonym kawałkiem dysku.

Szacuje się, że około 50% kosztów utrzymania linii napowietrznych to koszty związane z wymianą, naprawą i diagnostyką izolatorów. Awarie izolatorów są przyczyną około 70% przestołów w działaniu linii (Anjum 2014). Powyższe dane pokazują jak ważny jest proces diagnozowania i wczesnego wykrywania uszkodzeń izolatorów.

Urządzeniem, które w ostatnim czasie zdobywa coraz większą popularność w diagnostyce linii przesyłowych są pojazdy UAV, które są rodzajem statku powietrznego, sterowanego ręcznie za pomocą urządzeń radiowych lub (oraz) wbudowanego oprogramowania oraz systemu GPS. W drugim przypadku konieczne jest ręczne zaprogramowanie trasy przelotu. Pojazd UAV może być stosowany w wielu dziedzinach, takich jak fotografia lotnicza, geodezja, sport, działania wojskowe i wywiadowcze oraz do walki z efektami klęsk żywiołowych ze względu na jego zdolność do szybkiego działania w bezpiecznej odległości od celu. Znaczny postęp technologiczny i inżynierski w zakresie budowy pojazdów UAV sprawił, że maszyny te cechuje duża stabilność, prostota, niezawodność, odporność na warunki atmosferyczne i możliwość długiego przelotu. Do podstawowych podzespołów pojazdu UAV przeznaczonego do inspekcji napowietrznej linii wysokiego napięcia powinny należeć: silniki umożliwiające utrzymanie dużej mocy oraz stabilnego lotu. System komunikacji gromadzący i przekazujący informacje o stanie lotu i dane z inspekcji linii. Powiązanego systemu monitorującego w czasie rzeczywistym status lotu na ziemi, dzięki któremu operator może obserwować i analizować stan linii napowietrznej (np. transmisja wideo) i odczyty ze sprzętu pokładowego. System sterowania lotem, musi posiadać dobrą funkcję stabilizacji oraz identyfikacji pozycji GPS, która powinna być ściśle kontrolowana w pewnym zakresie. Dane o pozycji GPS powinny być także umieszczane na mapie co znacząco zwiększa wygodę inspekcji linii energetycznej (Linxin 2015).

3. Przegląd literatury

Diagnostyka izolatorów służy trzem głównym celom: identyfikacji uszkodzonych izolatorów, ocenie stopnia degradacji izolatorów oraz wykryciu nieprawidłowo dobranych lub niewłaściwie zamontowanych izolatorów. Diagnostykę izolatorów linii napowietrznych można podzielić na dwa typy: badania w warunkach laboratoryjnych oraz w trakcie pracy linii (Anjum 2014; Bretuj i in. 2012).

Użytecznym narzędziem w diagnozowaniu izolatorów linii elektroenergetycznych jest podczerwień. Może ona być użyta do wykrycia wielu problemów. Za pomocą tej metody można wykrywać uszkodzenia w izolatorach porcelanowych, takich jak: korozja, pęknięcia lub degradacja

wewnętrznej powierzchni (Han i in. 2009; Salustioano i in. 2014). Kamery podczerwone służą do zbierania obrazów związanych z różnicami temperatur, które powstają na elementach takich jak na przykład izolatory. Inteligentna analiza tych obrazów, zwanych "termogramami", może ujawnić ich ewentualne wady. Światło podczerwone jest falą elektromagnetyczną o długości od 1mm do 1 μ m. Promieniowanie podczerwone jest wytwarzane przez obiekty, których temperatura przekracza 10K. Światło widzialne jest emitowane ze źródeł o temperaturze powyżej 1900 K. Temperatura ciała ludzkiego emituje promieniowanie o długości fali 8 μ m do 9 μ m i może być obserwowana tylko za pomocą kamery lub czujnika wykrywającego podczerwień. Zazwyczaj wszystkie gorące powierzchnie emitują promieniowanie IR. Istnieje wiele różnych zastosowań i metod wykorzystania promieniowania podczerwonego. Niektóre z nich są analogiczne do tych stosowanych dla światła widzialnego. Wyładowania koronowe i powierzchniowe wyładowania niepełne mogą być objawem pewnych rodzajów uszkodzeń izolatorów linii wysokiego napięcia. Te możliwe defekty mogą być wykryte dzięki promieniowaniu ultrafioletowemu, za pomocą spec elektrycznych emitują energię w postaci światła, głównie w paśmie ultrafioletowym widma fal elektromagnetycznych 300-400nm (piki widmowe przy 340 i 360nm). Jednak niewielka część energii koronowej promieniuje poniżej 280nm. W tej części widma elektromagnetycznego, promieniowanie słoneczne nie dociera do powierzchni ze względu na warstwę ozonową wokół sfery ziemi, która działa jak filtr. W normalnych warunkach obiekty widać ze względu na odbite światło, które jest odbierane przez sensor, ale w przypadku widma elektromagnetycznego poniżej 280nm widoczne będą tylko aktywne źródła promieniowania. Możliwe jest generowanie obrazu zawierającego informacje o różnych pasmach spektralnych. Do tego celu wykorzystywane są tzw. kamery multispektralne. Obraz taki przechwytyje dane o różnych określonych pasmach częstotliwości w niemal całym spektrum elektromagnetycznym. Poszczególne długości fali mogą być rozdzielane za pomocą specjalnych filtrów lub przy użyciu instrumentów wrażliwych na poszczególne długości fali, włączając w to światło o częstotliwości przekraczających zakres światła widzialnego, na przykład podczerwień (Li 2015). Inną szeroko stosowaną metodą jest test wysokiego potencjału. Ta metoda zapewnia wysoką dokładność w wykrywaniu uszkodzonych dysków porcelanowych izolatorów kołpakowych (Anjum 2014; Lee i in. 2007). Kolejną metodą diagnostyki izolatorów jest rejestracja ultradźwięków powstających podczas emisji wyładowań niepełnych (Salustioano i in. 2014). Aby określić dokładne miejsce tworzenia wyładowania, konieczne jest użycie kamery UV. Następną metodą testowania izolatorów jest badanie pola elektrycznego wokół izolatora. Badania te przeprowadza się przy użyciu różnych narzędzi. Otrzymane w ten sposób pomiary są porównywane z danymi wzorcowymi w celu znalezienia wadliwych izolatorów (Han i in. 2009). Jedną z podstawowych metod monitorowania linii napowietrznych jest kontrola wizualna. Metoda ta pozwala na łatwe wykrycie oczywistych awarii i uszkodzeń, takich jak silna korozja, złamane płyty i duże pęknięcia. Sukces inspekcji wizyjnej zależy w dużej mierze od szczegółów jakie mogą zostać zaobserwowane z punktu obserwacyjnego. Problemami są tutaj szczegółowość obserwacji oraz słaba wizualna dostępność izolatora. Rozwiązaniem jest wykorzystanie helikoptera lub pojazdu UAV oraz kamer o wysokiej rozdzielczości. Tak pozyskane zdjęcia lub filmy mogą być analizowane online podczas przelotu lub po jego zakończeniu. Wykorzystanie powyższych narzędzi czyni inspekcję linii napowietrznych bardziej dokładną oraz precyzyjną, ale generuje niestety dużą ilość danych, na których izolator musi zostać wykryty i zdiagnozowany (Anjum 2014; Wang i in. 2016). Rozpoznanie, zlokalizowanie lub wyznaczenie obszaru zainteresowania (ROI z ang. Region Of Interest) zawierającego izolator jest kluczowym procesem wykrywania awarii izolatorów linii napowietrznej.

Technologia rozpoznawania obrazów cyfrowych jest wciąż na dość wczesnym etapie rozwoju (Moore 2014). Jedną z najbardziej oczywistych korzyści wynikających z jej zastosowania jest lepsze wykorzystanie platform obserwacyjnych (helikopterów, pojazdów UAV, teleskopów, itp.). Użycie metod rozpoznawania i przetwarzania obrazów powinno umożliwiać gromadzenie danych masowych, właściwe ich archiwizowanie i wstępne etykietowanie. Technologia ta w połączeniu z doświadczeniem w terenie może w przyszłości zaowocować stworzeniem systemu do łatwej i szybkiej identyfikacji problemów związanych z określonym typem elementów linii energetycznej (na przykład izolatorami), a ostatecznie stworzeniem bazy danych połączonej z probabilistycznym systemem diagnozowania i prognozowania awarii i uszkodzeń. System taki mógłby kompleksowo

wspomagać decyzje o zarządzaniu linią napowietrzną (Mirallès 2014). Do celów rozpoznawania obrazów mogą być używane dane zarejestrowane w zakresie światła widzialnego, podczerwieni oraz ultrafioletu. Kontrola wizyjna, niezależnie od tego czy prowadzona w sposób zautomatyzowany czy manualny, znacząco się rozwija i pozostaje sprawdzoną i wszechstronną techniką inspekcji. Obecne lornetki, teleskopy i kamery wyposażone są w wysokiej klasy optykę, która pomaga uchwycić i zapisać obraz wyposażenia linii napowietrznej, zarówno z poziomu podłoża, helikoptera czy pojazdu UAV. Obraz satelitarny jest również często stosowany jako niedrogi sposób inspekcji terenu.

Podczas inspekcji linii przesyłowych i dystrybucyjnych, pojazd UAV może przenosić wszelkiego rodzaju urządzenia pomiarowe. Platforma ta posiada wiele zalet w porównaniu do innych metod diagnostycznych. Jej praca jest niezależna od ukształtowania terenu oraz przeszkód terenowych. Praktycznie nie posiada martwych kątów. W porównaniu z tradycyjnym patrolem pojazdu UAV, niosąc urządzenie do obrazowania w podczerwieni, może łatwiej wykrywać defekty izolatorów oraz innych elementów wyposażenia. Ten sam pojazd UAV może patrolować linie przesyłowe 750 kV, 450 kV, 400 kV, 220 kV, 110 kV, bez konieczności dokonywania zmian w jego wyposażeniu. Dzięki niemu możliwe jest realizowanie szybkich patroli, których efektywność jest znacznie większa niż klasycznych pieszych patroli. Dane wizyjne mogą być pozyskiwane szybko oraz przesyłane w czasie rzeczywistym do operatora. W porównaniu z teledetekcją satelitarną, warunki meteorologiczne (np. zachmurzenie) mają znacznie mniejszy wpływ na możliwość przeprowadzania badań diagnostycznych. Koszty użytkowania i konserwacji pojazdów UAV są niskie. Technologia ich obsługi jest łatwa do opanowania. Po jednorazowej inwestycji każdy następny patrol z wykorzystaniem pojazdów UAV kosztuje niewiele. Wykorzystanie helikopterów lub innego dużego sprzętu może być bardzo kosztowne, a możliwości jego wykorzystania organiczne (śmigłowce nie mogą latać w trudnych warunkach oraz miejscach wyłączonych z ruchu lotniczego). Dzięki pojazdowi UAV możliwe jest zidentyfikowanie różnych wad linii przesyłowych. Wraz z rozwojem nauki i technologii drony będą mogły skutecznie identyfikować defekty kluczowych elementów linii wysokiego napięcia (tj. korpusy wież, przewody przewodzące czy izolator) (Linxin 2015).

4. Podsumowanie

Do celów detekcji oraz identyfikacji uszkodzeń izolatorów linii elektroenergetycznej może zostać wykorzystany system składający się z szeregu czujników (np. kamery UV, kamery termowizyjnej, a także kamery pracującej w zakresie światła widzialnego) oraz pojazdu UAV. Inspekcja izolatorów linii napowietrznej jest szczególnie istotnym działaniem w procesie utrzymania linii wysokiego napięcia. Wczesne wykrycie awarii jest kluczowe dla uniknięcia kosztownych przestoju w pracy linii elektroenergetycznej. Wykorzystanie pojazdów UAV w procesie diagnostyki izolatorów linii elektroenergetycznej może mieć uzasadnienie w tym, iż w przypadku inspekcji prowadzonej z ziemi odległość izolatorów od punktu obserwacyjnego może wynosić nawet 80m, co znacząco utrudnia namierzenie uszkodzeń. Dzięki zastosowaniu metod przetwarzania obrazu możliwe jest wyznaczenie klatek w sekwencji video zawierających izolatory oraz wstępne wyznaczenie obszarów zainteresowania co znacząco skraca czas i koszt inwentaryzacji oraz inspekcji. Zastosowanie pojazdów UAV oraz metod przetwarzania obrazu może pozwolić w przyszłości na stworzenie kompletnego i autonomicznego systemu inspekcji całych linii przesyłowych.

5. Literatura

- Anjum S (2014) A Study of the Detection of Defects in Ceramic Insulators Based on Radio Frequency Signatures. University of Waterloo: 1 -87.
- Bretuj W, Fleszy J, Wieczorek K (2012) Diagnostyka izolatorów kompozytowych eksploatowanych w liniach elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5a (5): 51-54.
- Chojnacki A. (2011) Analysis of reliability of selected devices in MV/LV substations: 399-407.
- Cotton, H, Barber H (1970) *The Transmission and Distribution of Electrical Energy* Paperback,
- Han, S, Hao R, Lee J (2009) Inspection of insulators on high-voltage power transmission lines. *IEEE Trans. Power Del.*, 24 (4): 2319-2327.
- Holtzhausen, J (1994) High voltage insulators, *Electrical Engineering*, 53(11): 1536-1542.

- Lee J, Park J, Cho B, i in. (2007) Development of Inspection Tool for Live-line Insulator Strings in 154kV Power Transmission Lines Keywords. *Power*, 7(1): 23-33.
- Li Z, Ruan Y (2015) Fault diagnosis system for the inspection robot in power transmission lines maintenance, University of Shanghai for Science and Technology.
- Linxin Li (2015) The UAV Intelligent Inspection of Transmission Lines, International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015): 1542–1545.
- Mirallès F, Pouliot N, i in. (2014) State-of-the-Art Review of Computer Vision for the Management of Power Transmission Lines. 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry: 1-6.
- Moore GA (2014) *Crossing the Chasm*, HarperCollins, 3rd Edition.
- Oberweger M, Wendel A, Bischof H (2014) Visual Recognition and Fault Detection for Power Line Insulators. *Computer Vision Winter Workshop*.
- Salustiano R, Capelini R. i in. (2014) Development of New Methodology for Insulators Inspections on Aerial Distribution Lines Based on Partial Discharge Detection Tools, ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application: 1-4.
- Wang, X, Zhang Y (2016) Insulator Identification from Aerial Images Using Support Vector Machine with Background Suppression, *ICUAS*: 892-897.

14. Diagnostyka farm fotowoltaicznych z wykorzystaniem metod wizyjnych

Photovoltaic farm diagnostics using image processing methods

Osuchowski Jakub

Instytut Informatyki, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Michał Tomaszewski, prof. PO

Osuchowski Jakub: jakub.osuchowski@gmail.com

Słowa kluczowe: Panel fotowoltaiczny, identyfikacja uszkodzeń, metody wizyjne.

Streszczenie

Artykuł porusza zagadnienia dotyczące możliwości wykorzystania metod wizyjnych w diagnostyce paneli fotowoltaicznych. Przedstawiony został w nim przegląd aktualnie wykorzystywanych metod diagnostycznych dla paneli fotowoltaicznych. Główny nacisk położono na metody, które mogą zostać wykorzystane dla dużych powierzchni, na jakich znajdują się farmy fotowoltaiczne. W artykule opisana została zasada działania konwersji fotowoltaicznej, a ponadto scharakteryzowane zostały różne rodzaje ogniw fotowoltaicznych. Ważną część artykułu stanowi także klasyfikacja awarii i uszkodzeń farm fotowoltaicznych, z uwzględnieniem przyczyn ich powstawania oraz konsekwencji dla jej wydajności.

1. Wstęp

W ostatnich latach co roku notowany jest wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Wymaga to inwestycji ze strony państwa, zarówno w nowe źródła energii konwencjonalnej, jak i pozyskanej z OZE. Tak samo ważnym elementem, co budowa nowych elementów systemu, jest prawidłowa eksploatacja i monitoring elementów już istniejących. Ponieważ farmy fotowoltaiczne znajdują się zwykle na dużych powierzchniach celowym wydaje się być wykorzystywanie metod pozwalających na przeprowadzenie monitoringu oraz diagnostyki w relatywnie krótkim czasie i niskim nakładem pracy. Taką możliwość oferuje szeroka gama metod wykorzystujących informacje w postaci materiału fotograficznego lub sekwencji wideo. Są to metody mieszczące się w kategorii badań nieniszczących, dzięki czemu nie wymagają kosztownego wyłączenia badanego obiektu. Na podstawie zebranego materiału może powstać raport oraz dokumentacja fotograficzna w postaci cyfrowej.

2. Opis zagadnienia

Konwersja fotowoltaiczna jest najprostszą, a zarazem najbardziej zaawansowaną metodą przetwarzania energii promieniowania słonecznego. W metodzie tej dokonuje się przetworzenie najbardziej pierwotnej postaci energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Proces ten odbywa się w wyjątkowo prostym pod względem mechanicznym urządzeniu. Układ taki charakteryzuje się prostotą konstrukcją i metodą działania, brakiem części ruchomych, mediów, pośrednich etapów przetwarzania oraz małą awaryjnością i prostotą obsługi. Niestety występuje tutaj także wysoki jednostkowy koszt wyprodukowanej energii (Frankowski 2009). Ogniwo słoneczne (fotowoltaiczne) jest elementem półprzewodnikowym, w którym w wyniku zjawiska fotowoltaicznego następuje bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Uformowane jest ono w materiale półprzewodnikowym, w którym znajdują się bariery potencjału (pole elektryczne), pod postacią złącza p-n (positive-negative). Padające na ogniwo promieniowanie słoneczne, o energii większej niż szerokość przerwy energetycznej, wybija elektrony z ich miejsc w strukturze półprzewodnika tworząc pary nośników o przeciwnych ładunkach. Następnie zostają one rozdzielone przez istniejące na złączu p-n pole elektryczne, co w konsekwencji prowadzi do pojawienia się różnicy potencjałów, czyli napięcia elektrycznego. Pojedyncze ogniwo produkuje zazwyczaj pomiędzy 1W do 6W, co jest niewystarczające dla większości zastosowań. Ponieważ same ogniwa fotowoltaiczne są kruche i nieodporne na warunki atmosferyczne, nie ma możliwości ich praktycznego wykorzystania bez dalszego przetworzenia. Dla uzyskania większych

napięć lub prądów oraz dla uzyskania większej trwałości ogniwa łączone są szeregowo lub równolegle tworząc moduł fotowoltaiczny. Moduły te są hermetyzowane, aby uchronić je przed korozją, wilgocią, zanieczyszczeniami i wpływami atmosfery. Istnieje bardzo szeroka gama modułów o różnej wielkości i budowie. Wytwarzane są moduły o specjalnych właściwościach odporne na korozję oraz takie, które są zintegrowane z dachami lub fasadami budynków. Panel fotowoltaiczny składa się z połączonych dla uzyskania większych mocy wielu modułów fotowoltaicznych. Ogniwa fotowoltaiczne najczęściej laminowane są folią EVA (z ang. Ethylene Vinyl Acetate). Przed ogniwami umieszcza się szybę ze szkła hartowanego, a za ogniwami folię ochronną. Cały panel zamyka się w aluminiowej obudowie (Frankowski 2009; Green 2002). W panelu wytwarzany jest prąd stały. Poziom prądu na wyjściu panelu może być zwiększony poprzez równoległe łączenie modułów, ale zależy on ściśle od nasłonecznienia. Panel fotowoltaiczny może być zaprojektowany do pracy przy praktycznie dowolnym napięciu, aż do kilkuset woltów, dzięki szeregowemu łączeniu modułów. Panele zamontowane na konstrukcjach mocujących z dołączonym okablowaniem nazywane są kolektorem fotowoltaicznym (z ang. PV array). W mniejszych systemach kolektor fotowoltaiczny może zawierać pojedynczy panel (Frankowski 2009; Green 2002).

Materiały, z których produkowane są ogniwa fotowoltaiczne muszą posiadać konkretne charakterystyki. Niektóre ogniwa są przystosowane do pracy na powierzchni ziemi, a inne są dostosowane do pracy w kosmosie. Najczęściej (85%) w produkcji ogniw fotowoltaicznych wykorzystuje się krzem. Może on występować w trzech formach. Pierwszą z nich jest krzem monokrystaliczny. Ogniwa takie wykonane są z jednego monolitycznego kryształu krzemu o uporządkowanej budowie wewnętrznej. Podstawą do ich tworzenia są cięte na płytki odpowiedniej wielkości bloki krzemu. Monokrystaliczne ogniwa fotowoltaiczne wykazują najwyższe sprawności konwersji (15-19%) oraz najwyższy poziom żywotności ze wszystkich ogniw krzemowych, ale również są najdroższe w produkcji. Innym rodzajem ogniwa jest ogniwo polikrystaliczne. Pomimo niższej wydajności (14%-16%) od paneli monokrystalicznych, są one bardziej rozpowszechnione ze względu na niższy koszt produkcji. Panele produkowane w tej technologii zbudowane są z ogniw składających się z wielu kryształów krzemu, których niejednorodna powierzchnia przypomina szron. Ogniwa poli i monokrystaliczne są stosunkowo grube i do ich produkcji zużywa się dużo drogiego materiału, mają ograniczoną wielkość i muszą być łączone w moduły. Inną odmianą ogniw nie posiadającą wyżej wymienionych wad są ogniwa amorficzne. Wykonane są one z bezpostaciowego niewykryształizowanego krzemu. Gruba na jedynie 2 mikrony warstwa krzemu osadzana jest na powierzchni innego materiału, takiego jak np. szkło. Nie można tu wyróżnić pojedynczych ogniw. Panele te charakteryzują się niską sprawnością w przedziale 6-10%, niską ceną związaną z małymi kosztami materiału, niewielkim zużyciem energii przy produkcji modułu (głównie dzięki niskiej temperaturze procesu), możliwością osadzenia na giętkich podłożach i uzyskania dużych powierzchni panelu. Ogniwa amorficzne mogą być produkowane w dowolnych kształtach i rozmiarach oraz projektowane w sposób umożliwiający integrację z fasadami i dachami budynków. (Frankowski 2009; Green 2002). Panele amorficzne produkowane są w technologii cienkowarstwowej (z ang. thin-film). Polega ona na stosowaniu jedynie bardzo cienkich warstw drogiego materiału półprzewodnikowego na tanich podłożach o dużej powierzchni. Innymi materiałami używanymi do wyrobu ogniw cienkowarstwowych jest np. tellurek kadmu (CdTe). W tej technologii zazwyczaj cały panel zbudowany jest z jednego ogniwa, a jego sprawność wynosi od 10 do 12%. (Cusano 1963; Duenow I in. 2009; Perrenoud 2009). Kolejnym rodzajem ogniw w technologii thin-film są ogniwa CIGS wykonane z mieszaniny półprzewodników takich jak miedź, ind, gal, selen. Również tutaj bardzo często cały panel zbudowany jest z jednego ogniwa, a jego sprawność wynosi 12-14%. W przypadku ogniw opartych o CIGS możliwa jest produkcja metodą przemysłowego druku, który jest bardzo tanim i wydajnym sposobem produkcji ogniw (Ho Yu 2007)

3. Przegląd literatury

Panele fotowoltaiczne zaprojektowane są do długoletniej pracy. Jednakże ze względu na swoją budowę oraz miejsca pracy są one narażone na awarie i uszkodzenia. Jednym z głównych, a zarazem najniebezpieczniejszych awarii jest powstanie miejscowych wypaleń tzw. Hot-spotów. Wypalenia te w ekstremalnych przypadkach mogą być przyczyną zniszczenia całej instalacji PV.

Punktowe wypalenie występują zarówno w panelach monokrystalicznych, polikrystalicznych jak i w panelach produkowanych w technologii cienkowarstwowej. Ogniwo PV w czasie normalnej pracy generuje prąd elektryczny. Jeżeli jedno z ogniw panelu jest zacienione przestaje generować prąd i zaczyna go pobierać od reszty nie zacienionych ogniw. Przepływ prądu przez zacienione ogniwo powoduje podniesienie temperatury. Temperatura może podnieść się średnio od 1 do 80°C, a w ekstremalnych przypadkach nawet powyżej 200°C. Uszkodzeniu może ulec krzem, folia EVA oraz tworzywo pokrywające tylną ścianę panelu. Szczyt temperatury jest osiągany w kilkadziesiąt sekund. Przyczynami powstania zacienienia mogą być: liście, ptasie odchody, brud, śnieg oraz cienie budynków. Zamontowane w panelu diody „by-pass” pozwalają w bardzo wielu przypadkach uniknąć powstania punktowych wypaleń, poprzez przekierowanie przez siebie prądu całego paska ogniw fotowoltaicznych. Zabezpieczenia te nie działają jednak kiedy bardzo mała część ogniwa jest zacieniona lub w przypadku kiedy dioda jest niesprawna. Inną przyczyną wystąpienia Hot-Spotów mogą być wady fabryczne ogniw lub całych modułów. Strata mocy modułu spowodowana punktowymi wypaleniami są zwykle niewielkie. Mimo to uszkodzone moduły powinny być wymienione szczególnie jeżeli materiał enkapsulacyjny (EVA) został rozhermetyzowany (Bożek i in. 2015; Gallon). Folia EVA chroni wrażliwe ogniwa przed czynnikami atmosferycznymi (wilgoć, promieniowanie UV). Błąd w procesie enkapsulacji lub słabej jakości materiały mogą być przyczyną delaminacji modułu PV. Uszkodzone moduły powinny zostać wymienione ze względu na możliwą korozję ogniw oraz spadek wydajności całego panelu. O delaminacji mogą świadczyć powstałe „mleczne” przebarwienia na powierzchni panelu. Innym częstym uszkodzeniem paneli PV są mikropęknięcia (z ang. microcraks), które najczęściej tworzą się podczas transportu lub instalacji. Pęknięcia te nie muszą powodować utraty sprawności panelu, jednak istnieje ryzyko postępu uszkodzenia w obrębie panelu. Mikropęknięcia mogą objawiać się jako tzw. „ślimacze ścieżki” (z ang. snail tracks). Pokazują się one zazwyczaj w pierwszych miesiącach po instalacji i są skutkiem błędnej kombinacji materiałowej i mikropęknięć ogniwa. Ślimacze ścieżki są uznawane jedynie jako defekt optyczny. Kolejnym bardzo poważnym rodzajem uszkodzenia jest pęknięcie szkła. W większości przypadków powodem pęknięć są warunki zewnętrzne, niewłaściwe pakowanie do transportu, błędy w czasie instalacji, grad lub uderzenia przedmiotów np. kamieni. Szkło pęka niezwykle rzadko na skutek defektów materiałowych lub produkcyjnych. Moduły z pękniętym szkłem muszą być zawsze wymienione (Dollara i in. 2014).

Diagnostyka paneli PV pełni bardzo ważną rolę. Wykrycie drobnych usterek oraz awarii może pozwolić na uniknięcie kosztów wymiany całej instalacji. Istnieje wiele metod diagnostycznych. Podstawową metodą będącą miarodajnym wskaźnikiem do reklamacji panelu jest badanie charakterystyk prądowych. Badanie to pozwala na ocenę mocy elektrycznej panelu fotowoltaicznego oraz jej wychyleń. Dla dokładniejszego określenia przyczyn obniżenia mocy panelu konieczne jest wykorzystanie innych metod diagnostycznych (Spataru 2015). Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod diagnostyki wizyjnej paneli fotowoltaicznych jest wykorzystanie termowizji. Kamera termowizyjna pozwala na szybką i efektywną lokalizację wad, które mogą powodować straty mocy panelu. Metodą tą możliwe jest wykrycie między innymi: oporów przejściowych w złączach i połączeniach lutowanych, zasłonięcie pojedynczych ogniw lub ich części oraz punktowych wypaleń (Cusano 1963; Gallon i in.). Kolejną często wykorzystywaną metodą diagnostyczną jest elektroluminescencja. Ta metoda wykorzystuje odwrotne zasady niż termowizja. Zamiast naświetlania i produkcji energii elektrycznej jest do panelu dostarczany prąd. Panel emituje promieniowanie, które jest rejestrowane naukową kamerą CCD. Dzięki tej metodzie możliwe jest zaobserwowanie rozłożenia prądów w panelu i jego ogniwach oraz podświetlenie niejednorodności i lokalnych usterek. Dzięki tej metodzie możliwe jest wykrycie: pęknięć i mikropęknięć w ogniwie, przerwanej metalizacji pojedynczych ogniw oraz pozostałych niejednorodności. Diagnostyka farm fotowoltaicznych, których moc przekracza kilkaset kilowatów jest niezwykle czasochłonna. Serwisant z kamerą termowizyjną musi przejść wzdłuż całej instalacji i zeskanować każdy panel z osobna. Możliwe jest wykorzystanie do tego celu bezzałogowych pojazdów latających (dronów). Dron przelatując nad całą instalacją może przeprowadzić skan wszystkich paneli w czasie nieprzekraczającym 30min. Dzięki możliwości wykorzystania modułów GPS możliwe jest zaprogramowanie lotu drona oraz stworzenia mapy terenu wraz z naniesionymi danymi

pomiarowymi. Dzięki skróceniu czasu diagnostyki możliwe jest przeprowadzanie częstszych zautomatyzowanych pomiarów, a co za tym idzie możliwa jest szybsza lokalizacja usterek i zwiększenie niezawodności całej elektrowni. Zebrane w ten sposób dane mogą pozwolić na utrzymanie maksymalnej sprawności farmy w wszystkich okresach czasu (Pstarś 2014).

Metody wizyjne są bardzo często wykorzystywane do utrzymywania oraz kontrolowania jakości produktu. Znalazły szerokie zastosowanie w diagnostyce różnego rodzaju obiektów od małych i precyzyjnych poprzez analizę ruchu pewnych elementów, zaś na obiektach rozległych jakimi są farmy fotowoltaiczne kończąc. Niewątpliwą zaletą wykorzystania metod wizyjnych w diagnostyce jest fakt, że są to badania nieniszczące nieingerujące w żaden sposób w proces produkcyjny. Każdy system wizyjny składa się z co najmniej z dwóch elementów czujnika lub kamery, który rejestruje obraz. Może to być klasyczna kamera rejestrująca obraz w paśmie RGB, kamera termowizyjna kamera UV czy kamera widmowa. Drugim elementem jest oprogramowanie, które realizuje z góry założony cel. Może to być np. identyfikacja biometryczna, wyszukiwanie określonych cech lub wzorców na obrazie. Zaletą wykorzystania technik wizyjnych jest fakt, że niezależnie od zastosowanego czujnika po stronie oprogramowania ciągle ma się do czynienia z obrazem. Oczywiście formaty danych i rozdzielczości poszczególnych czujników różnią się pomiędzy sobą jednak zawsze można doprowadzić do sytuacji kiedy pojedynczy piksel wyświetlany na ekranie reprezentuje współrzędne X, Y oraz dodatkową informację uzależnioną od zastosowanego czujnika. Niemniej jednak dla tego rodzaju danych można wykorzystywać szeroki zasób dobrze udokumentowanych i sprawdzonych metod z dziedzin segmentacji, filtracji czy też innych metod analizy obrazu. Specyficznym rodzajem czujnika jest kamera termowizyjna rejestrująca promieniowanie podczerwone. Metoda ta najczęściej wykorzystywana jest w celu wychwytu ubytków ciepła. Poszczególne wartości temperatury przedstawione są na termogramie za pomocą palety barwnej lub odcieniach szarości. Większość kamer termowizyjnych oferuje niepewność pomiaru temperatury nie mniejszą niż 2 K, pod warunkiem, że prawidłowo zostaną ustalone i wprowadzone pozostałe parametry, takie jak współczynnik emisyjności i temperatura otoczenia (Zator i in. 2016). Gdy pomiar jest wykonywany z większej odległości konieczne jest wprowadzenie temperatury otaczającego powietrza oraz współczynnika transmitancji bądź tłumienia atmosfery. Dodatkowo w przypadku analizy termowizyjnej paneli fotowoltaicznych zjawisko odbicia jest bardzo problematyczne dlatego też, aby uzyskać najbardziej wiarygodne wyniki należy wykonywać pomiar w pochmurne dni. Jak wspomniano wcześniej wykorzystanie jednostki latającej pozwala na automatyzację wykrywania miejsc, które silniej się nagrzewają, niestety nie w każdym przypadku można jasno określić jaki jest powód wyższej temperatury. Dlatego dobrym podejściem jest zróżnicowanie czujników pomiarowych. Najczęściej wykorzystywaną metodą jest inspekcja wizualna realizowana z wykorzystaniem kamer światła widzialnego. Kamery te pracują w zdecydowanie wyższych rozdzielczościach w stosunku do kamer termowizyjnych które najczęściej pracują w rozdzielczościach 320 x 240 lub 640 x 480 pikseli. Wyższa rozdzielczość pozwala na uchwycenie detali takich jak: pęknięcia czy uszkodzenia mechaniczne, które przy wykorzystaniu odpowiednich filtrów można w prosty sposób zlokalizować. Kolejnym czujnikiem, który cieszy się coraz większą popularnością są skanery laserowe. Skanery stacjonarne o dużym zasięgu i precyzji są cenione ze względu na rejestrację topologii dużych obszarów w bardzo krótkim czasie. Niestety do tej pory nie było możliwości wykorzystania ich w efektywny sposób badając farmy fotowoltaiczne ze względu na specyfikę ich budowy. Aktualnie na rynku pojawiają się lekkie skanery dedykowane do jednostek UAV np. YellowScan Surveyor, które umożliwiają pozyskanie bardzo gęstych danych o rozdzielczości około 5 cm przy prędkości z przelotem 5 m/s. Skaner generuje dane w postaci chmury punktów pomiarowych z których każdy zawiera informację o współrzędnych XYZ oraz wartości współczynnika intensywności. Na bazie tego współczynnika można określić w jakim stopniu badany obiekt odbija wiązkę światła w skali 0 -255 punktów. Każda z zaprezentowanych metod posiada swoje mocne i słabe strony ale rozwój w dziedzinie budowy urządzeń doprowadził do stanu w którym możliwość swobodnego przelotu z dodatkowym obciążeniem w granicach 10 kg nikogo nie dziwi. Brak konieczności rezygnacji z któregośkolwiek czujnika daje możliwość powstania synergii, która prowadzi do utworzenia jednego spójnego modelu cyfrowego obiektu, który

przechowywał będzie np. trójwymiarową geometrię obiektu, barwy odpowiadające rzeczywistym oraz informację o temperaturze w każdym punkcie (Swiderski i in. 2004; Czapaj-Atlas i in. 2014).

4. Podsumowanie

Diagnostyka farm fotowoltaicznych jest zagadnieniem niezwykle istotnym. Pozwala na utrzymanie krótkich czasów przestojów oraz uniknięcie długotrwałych awarii. Wykorzystanie metod wizyjnych do diagnostyki paneli fotowoltaicznych pozwala na wykrycie różnych typów uszkodzeń i awarii. Są one jednak na tyle mocno zróżnicowane, że uzyskanie jednej skutecznej metody jest na chwilę obecną nieosiągalne. Najlepszym przykładem mogą być tutaj defekty widziane w różnych zakresach światła widzialnego. Dlatego celowym jest przeprowadzanie diagnostyki opartej o szerokie spektrum narzędzi oraz metod diagnostycznych.

5. Literatura

- Bożek E, Basista G (2015) Thermographic Research of Photovoltaic System Operating in Shaded Conditions, *Measurement Automation Monitoring*, nr. 61: 253-256.
- Cusano D (1963) CdTe solar cells and photovoltaic heterojunctions in II–VI compounds, *Solid-State Electronics*, nr. 6: 217-232.
- Czapaj-Atlas R, Dudek B (2014) Drony, mini- i mikrodrony – przegląd obszarów zastosowań bezzałogowych statków powietrznych dla potrzeb monitoringu i inspekcji, w szczególności w obszarze energetyki. *Energetyka*, nr 8: 485-492.
- Dolara A, Leva S, Manzolini G, Ogliari E (2014) Investigation on performance decay on photovoltaic modules: Snail trails and cell microcracks, *IEEE Journal of Photovoltaics*, nr. 4: 1204-1211.
- Duenow J, Barnes T, Dhere R i in. (2009) Comparison of transparent back contacts for CdTe top cells in tandem thin-film photovoltaic devices, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*: 2443-2447.
- Frankowski P (2009) Perspektywy efektywnego wykorzystania energii słonecznej w gospodarstwach domowych, *Wydział Elektryczny Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie*: 26-39.
- Gallon J, Horner G, Hudson J i in. PV Module Hotspot Detection, *Tau Science Corporation*.
- Green M A (2002) Photovoltaic principles, *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, nr. 14: 11-17.
- Ho Yun J, Hwan Kim K, Tae Ahn B i in. (2007) Effect of Na-doped Mo/Mo bilayer on CIGS cells and its photovoltaic properties, *Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, nr 112: 509-511.
- Perrenoud J, Buecheler S, Tiwari A (2009) Flexible CdTe solar cells with high photovoltaic conversion efficiency, *Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*: 695-699.
- Pstraś, L (2014) Metodyka analizy rentowności inwestycji fotowoltaicznych, *Rynek Energii*.
- Spataru S, Sera D, Kerekes T i in. (2015) Diagnostic method for photovoltaic systems based on light I–V measurements. “*Solar Energy*”, nr. 119: 29-34.
- Świderski W, Szabra D (2004) Examples of processing image methods using in infrared thermograms problems” *Materiały z Międzynarodowej Konferencji OSAV’2004 /Saint Petersburg*: 121-135.
- Zator S, Michalski P, Lasar M (2016) Niepewności pomiaru strat ciepła z instalacji energetycznych i urządzeń przemysłowych, *Diagnostyka procesów inwestycyjnych i eksploatacyjnych wybranych urządzeń energetycznych*, *Politechnika Opolska*.

15. Indukcja opony samochodowej - stan wiedzy

Car tyre magnetic flux density – state of knowledge

Agnieszka Szegda

Katedra Pojazdów, Politechnika Opolska

Opiekun naukmowy: Dr hab. inż. Sebastian Brol, prof. PO

Szegda Agnieszka: agnieszka.szegda@gmail.com

Słowa kluczowe: magnetyzm koła ogumionego, podstawowe informacje.

Streszczenie

W dostępnej literaturze zajmującej się zagadnieniami związanymi ze zmianami pola magnetycznego koła ogumionego można znaleźć ogólną informację dotyczące głównie wpływu niskoczęstotliwościowego pola magnetycznego na stan zdrowia człowieka oraz głównych czynników generujących pole magnetyczne koła ogumionego (Milhami in. 1999; LeGoffi in. 2012; Stankowski i in. 2006). Znaleźć, również można informacje dotyczące, w jaki sposób można rejestrować zmiany pola magnetycznego koła ogumionego (3 patenty - Method for detecting the magnetic field of a tire. US 6404182 B1 Kawase i in.2001, Method and apparatus for detecting tyre revolution using magnetic field US 6246226 B1 Kawase i in. 2001, Sposób pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego i układ do pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego Brol i in. 2014) oraz sposoby pomiaru zmian pola magnetycznego zaprezentowane przez innych autorów, np. Milham, LeGoff i Stankowski. W poniższej pracy autorzy chcieliby w sposób uporządkowany przedstawić informacje dotyczące zmian pola magnetycznego koła ogumionego innych autorów oraz przedstawić swoje osiągnięcia w tej dziedzinie.

1. Wstęp

Aby badać magnetyzm koła ogumionego należy zastanowić się, jakie czynniki wywołują to zjawisko fizyczne. Należy najpierw przyjrzeć się samemu procesowi produkcyjnemu koła ogumionego, który jest procesem złożonym z wielu etapów i może być różny w zależności od firmy produkującej ten element pojazdu. Pierwszy etap to przygotowanie mieszanki gumowej w skład, której może wchodzić do 30 różnych związków chemicznych część z nich jest naturalna (np. żywice, kauczuk) inne są sztuczne (np. przeciwutleniacze, guma syntetyczna). Komponenty, z których wytwarzane są opony wg Michelin (Opony, powstawanie opony, stan na dzień 21.11.2017) można podzielić na następujące grupy:

1. kauczuk – główny składnik opony,
2. guma syntetyczna – składnik bieżnika,
3. sadza i krzemionka – wzmacniają opony,
4. włókna tekstylne i metalowy kord – jest to szkielet opony, który zapewnia zachowanie odpowiedniej geometrii koła ogumionego,
5. substancję chemiczne – są różne w zależności od funkcji, które ma spełniać opona np. przyczepność do jezdni, odporność na zużycie.

Przygotowaną mieszankę gumową najpierw miesza się oraz rozdrabnia. Równocześnie przygotowuje się kolejne warstwy opony np. osnowa, drutówka czy opasanie. Opona budowana jest od swojego wnętrza to znaczy, że pierwszymi elementami jakie tworzą oponę jest osnowa, następnie wbudowywane są elementy stalowe (drutówka) w warstwę kordu oraz nakładane są boki opony, dalej umieszczane są dwie warstwy opasania stalowego (warstwy te ułożone są tak aby stalowe „nitki” tworzące opasanie krzyżowały się), w zależności od zastosowania opony na tą warstwę może być umieszczona kolejna warstwa kordu tekstylnego na samym końcu umieszczany jest bieżnik. Tak przygotowany produkt poddawany jest kolejnemu etapowi – wulkanizacji. Wulkanizacja polega na nadaniu finalnego kształtu opony oraz wzoru bieżnika. Ostatnim etapem produkcji opon jest kontrola jakości. Na tym etapie sprawdzana jest opona pod kątem ewentualnych

uszkodzeń wewnętrznych i zewnętrznych, gotowe element został zamieszczony na **rys. 1** (Dębica Nasze porady 2017; Goodyear Technologia produkcji opony2017).



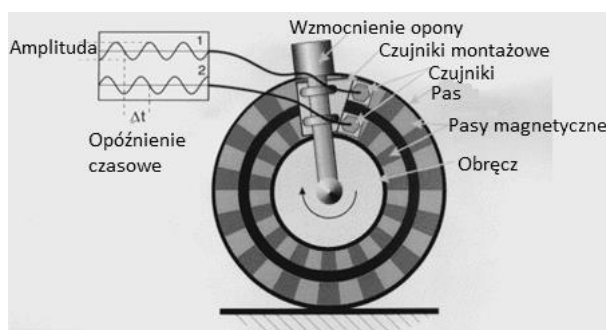
Rys. 1 Części składowe opony samochodowej z zaznaczonymi elementami ferromagnetycznymi 1 – drutówka, 2 - osnova, 3 – opasanie (Hankook tire, konstrukcja opon2017).

2. Opis zagadnienia

W rozwiązaniu patentowym nr US 6404182 B1 autorzy wyjaśniają sposób, w jaki można wykrywać pole magnetyczne opony. W prezentowanym rozwiązaniu wymagane jest dodatkowe namagnesowanie elementów stalowych opony w dwóch różnych biegunach po to, aby cztery czujniki pola magnetycznego mogły wykrywać zmiany w polu magnetycznym opony podczas ruchu pojazdu – dwa czujniki umieszczone są równoległe i dwa prostopadle do bocznej części opony. Na podstawie zmian pola magnetycznego opony autorzy są w stanie określić prędkość, z jaką porusza się pojazd oraz drogę, jaką przebył.

Patent US 6246226 B1 jest kontynuacją i rozwinięciem rozwiązania opisywanego powyżej. Również i w tym rozwiązaniu opona musi być specjalnie namagnesowana, a czujnik pomiarowy umieszczony prostopadle do powierzchni bocznej opony. Umieszczenie czujników determinuje, iż muszą to być czujniki o stosunkowo małym zakresie pomiarowym. Otrzymane informacje z czujników pomiarowych powinny zawierać najmniej dwa sąsiednie piki, które odpowiadają za pełen obrót koła.

Rozwiązaniem, które również wykorzystuje zjawisko magnetyzmu oraz dodatkowe elementy w pojeździe jest system SWT (SidewallTorison) zaproponowany przez firmę Continental (**rys. 2**). W tym systemie koło wyposażone jest w dwa pasy o przeciwnej magnetyzacji oraz dwa czujniki. Pierwszy pas montowany jest w pobliżu obręczy natomiast drugi blisko zewnętrznej linii obwodowej opony. Opisany system działa podobnie jak enkodery inkrementalne to znaczy namagnesowane pasy wytwarzają przebiegi o znanym kształcie np. sinusoidalnym. Otrzymane przebiegi mogą być badane na dowolnie wybranym poziomie za pomocą np. czujnika i dyskryminanty. Uzyskane w powyższy sposób przebiegi będą miały kształt prostokątny przesunięty względem siebie o stałą czasową. Uzyskany w opisany powyżej sposób, przebieg pozwala określić kierunek obrotu badanego obiektu (opony.com.pl/arttykul/opony-i-elektronika2017).



Rys.2 Rozwiązanie SWT zaproponowane przez firmę Continental (opony.com.pl/arttykul/opony-i-elektronika2017)

Rozwiązanie, które wymaga znajomości zagadnień związanych z transformatą Fouriera jest polski patent nr401304 (22)2012 10 22. Patent ten wykorzystuje naturalne pole magnetyczne opony oraz czujnik natężenia pola magnetycznego. W tym rozwiązaniu największą trudnością jest prawidłowa interpretacja uzyskanych wyników, ponieważ do tego celu należy najpierw wzmacniać transformaty kolejnych fragmentów sygnałów, a następnie dobrać odpowiednią funkcję okienkową oraz szerokość okna pomiarowego.

3. Przegląd literatury

Milham S. w artykule pt. *Magnetic fields from steel-belted radial tires: implications for epidemiologic studies* nawiązuje do stwierdzeń innych autorów (Vedholma i Hamneriusa) odnośnie generowania pola magnetycznego przez opasanie radialne opon. Autor bada naturę statycznego pola magnetycznego opon oraz zmiany pola magnetycznego podczas ruchu opony i możliwości eliminacji tego pola. Badania zostały przeprowadzone na trzech grupach badawczych: oponach radialnych nowych, eksploatowanych oraz nienadających się do dalszej eksploatacji. Zmiany pola magnetycznego badano za pomocą magnetometru transduktorowego (Walker FGM-301) i magnetometru (R.B. Annis Company, Magnetic Equipment). Wszystkie badane opony były magnetyczne i każda miała inny, unikalny wzór pola magnetycznego, który malał wraz z odległością od czujnika. Z przeprowadzonych badań wynika, iż geometria pojazdu w stosunku do opony samochodowej będzie głównym czynnikiem wpływającym na oddziaływanie pola magnetycznego pochodzącego od opony na ludzi znajdujących się w pojeździe (Milham i in. 1999).

Badania LeGoffi innych nad kołem ogumionym wykazały, że w kole występuje niehomogeniczna magnetyzacja, która jest obserwowana na zewnątrz opony w postaci unikalnego „podpisu” magnetycznego, podczas ruchu. Autorzy, aby zmierzyć ten podpis użyli czujnika ARM (anizotropowy rezystor magnetyczny), który umieścili nad kołem. Obracające się koło z prędkością ok 15 km/h generowało pole magnetyczne o wartości $\pm 40 \mu\text{T}$, co jest porównywalne z siłą pola magnetycznego ziemi w Europie ($40 \mu\text{T}$). Również i w tym eksperymencie zauważono że magnetyzm koła ogumionego jest umiejscowiony głównie w elementach stalowych opony. Ponadto zauważono, że każda opona ma niepowtarzalny wzór pola magnetycznego nawet, jeśli jest to komplet opon montowanych w jednym pojeździe. Autorzy zauważają, iż na magnetyzm opony może wpływać kilka czynników takich jak np. historia stali nadeutektoidalnej użytej do produkcji elementów składowych opony czy transportowanie opon w fabrykach elektromagnesami. Również sam proces transportu, składowania oraz eksploatacji wpływa na zmiany pola magnetycznego (LeGoffi in.2012).

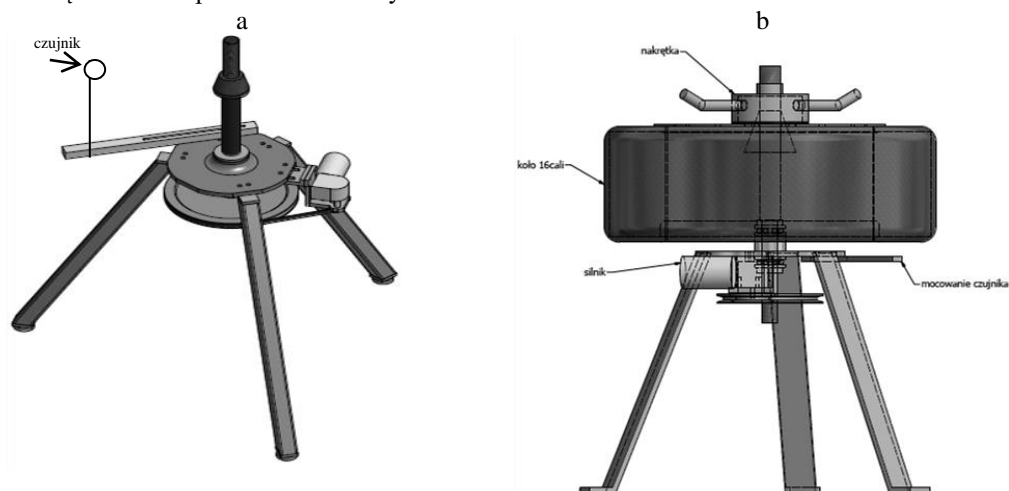
W pracy pt. *Low frequency magnetic fields induced by car tire*, S. Stankowski i inni potwierdził, że magnetyzm koła ogumionego pochodzi głównie od stalowego opasania opony. Badania przeprowadzane w opisywanej pracy były przeprowadzane na różnych samochodach, w stanie spoczynku i ruchu z różnymi prędkościami. Ponadto autorzy magnesowali i rozmagnetyzowali opony, aby otrzymać konkretne warunki pomiarowe i sprawdzić czy magnetyzm opony wróci po pewnym czasie. Niskoczęstotliwościowe pole magnetyczne było mierzone za pomocą analizatora pola magnetycznego NARDAEF200 oraz sondy połowej BN2245/90.10. Użyty przez autorów sprzęt pozwolił wykrywać pola o losowych kierunkach. Do opisu zmian pola magnetycznego w otrzymanym spektrum szybkiej transformaty Fouriera (FFT) autorzy użyli dwóch parametrów: najwyższej wartości szczytowej oraz sumy wszystkich szczytów. Dla opon samochodowych badanych na wyważarce wartości parametrów szczytowych były rozbieżne i wykazywały wartości od 0.8 do $97 \mu\text{T}$. Ciekawym wnioskiem jest również fakt, iż opony starsze/eksploatowane wykazywały większą różnorodność pola magnetycznego niż opony nowe (Stankowski i in.2006).

Aby badać zmiany pola magnetycznego koła ogumionego oraz opony autorzy monografii postanowili zbudować swoje własne stanowisko pomiarowe, które umożliwi prowadzenie badań w polu geomagnetycznym ziemi w sposób powtarzalny. Przed rozpoczęciem budowy przyrządu pomiarowego autorzy założyli pewne ograniczenia, co do stanowiska pomiarowego:

1. Urządzenie pomiarowe powinno umożliwiać prowadzenie powtarzalnych badań.
2. Przyrząd powinien mieć ograniczoną wagę (ponieważ urządzenie będzie transportowane w przyszłości, a jednocześnie musi być stabilny).

3. Urządzenie powinno być w łatwy sposób modyfikowane, tak, aby w przyszłości można było dowolnie zmieniać konstrukcję oraz wyposażenie stanowiska, w zależności od rodzaju prowadzonych badań.
4. Narzędzie pomiarowe w razie awarii powinno w sposób dostarczający problemu dla operatora powinno dać się naprawić.

Założenia, jakie zostały nadane przyrządowi pomiarowemu przez autorów oraz dostępna technologia produkcji i materiały sprawiły, że przyrząd pomiarowy jest modułowy (rys. 3). Większość elementów w przyrządzie została zaprojektowana i zbudowana specjalnie dla tego rozwiązania (np. krzyżakowe mocowanie opon czy nakrętka mocująca), pomijając elementy które są znormalizowane i dostępne w handlu jak np. profile z których zostały wykonane nogi przyrządu oraz łożyska kulkowe skośne jednorzędowe. Do wytworzenia przyrządu pomiarowego użyto między innymi tokarek CNC (obróbka wykańczająca), tokarek konwencjonalnych (obróbka zgrubna), frezarkę CNC oraz przecinak taśmowy.



Rys. 3 Przyrząd pomiarowy (a) z obiektem badawczym (b).

Wszystkie moduły są skupione wokół głównego zespołu, w skład, którego wchodzi wrzeciono oraz tarcza (Szegda i Brol 2017). W skład przyrządu wchodzi moduły, zamieszczone w tabeli 1.

Tak zbudowany przyrząd pomiarowy umożliwia prowadzenie badań na dowolnym obiekcie pomiarowym. Podawane przez innych autorów (np. Milhama, LeGoffa, Stankowskiego) tezy o unikatowości pola magnetycznego opon oraz wpływie składowania i eksploatacji na zmiany pola magnetycznego koła ogumionego mogą zostać zweryfikowane na przyrządzie pomiarowym. Ponadto przyrząd pomiarowy umożliwia prowadzenie badań w 2D – badania profili magnetycznych oraz 3D – tworzenie skanów magnetycznych opon lub kół ogumionych. Do analizy otrzymanych danych wykorzystywany jest program Matlab oraz parametry profili magnetycznych, opisanych wzorami 1-6, zamieszczonych w tab. 2.

Parametry profili magnetycznych takie jak średnia indukcja magnetyczna, skośność oraz Kurtoza rozkładu indukcji magnetycznej zostały zaadoptowane z opisu chropowatości powierzchni i użyte po raz pierwszy przez autorów (Brol i Szegda 2017) do opisu zmian profili magnetycznych opon/kół ogumionych.

Autorzy Szegda i Brol (2017) użyli przyrządu pomiarowego i parametrów profili magnetycznych opisanych wzorami 1-6 do weryfikacji wcześniejszych wiadomości odnośnie niepowtarzalności wzoru pola magnetycznego opon. Badania były prowadzone w trzech kierunkach pomiarowych (x, y, z), dalszej analizie poddano kierunek x. Autorzy zbadali jeden komplet opon, które były eksploatowane. Podczas badań stwierdzono, iż każda opona ma inny profil magnetyczny oraz inne parametry profili (tab. 3).

Tab. 1: Podzespoły uniwersalnego stanowiska pomiarowego.

Nazwa podzespołu	Elementy tworzące moduł	Funkcja
główny	tarcza i wrzeciono	jest to „rdzeń” przyrządu do którego mocowane są inne podzespoły
napędowy	wymienne koła pasowe oraz pas	dwa koła pasowe umożliwiają dobór odpowiedniej prędkości obrotowej wrzeciona w zależności od częstotliwości pomiaru
enkodera	enkoder wraz z tarczą i mocowaniem	steruje prędkością obrotową wrzeciona
silnika	silnik i dedykowanie do tego silnika łączenie silnika do zespołu głównego	realizuje napęd wrzeciona
mocowania	nakrętka, podkładka oraz stożki mocujące lub krzyżak mocujący	dwa różne mocowania, umożliwiają badanie opony lub koła o dowolnej średnicy (od 12 do 25 cali)
pomiarowy	czujnik pomiarowy magnetorezystancyjny trójosiowy HMC5883L oraz regulowane ramie pomiarowe	umożliwia prowadzenie badań na dowolnej wysokości i szerokości od badanego obiektu

Tab. 2 Parametry profili magnetycznych, dla B_i – zmierzona wartość indukcji magnetycznej w tzw. „profilu magnetycznym” opisana indeksem i , i – numer kolejnego pomiaru.

Numer	Wzór, jednostka	Nazwa parametru
1	$M_{\min} = \min(B_i)$, [T]	wartość minimalna indukcji magnetycznej dla wszystkich B_i dla $i=1$ do $i=N$
2	$M_{\max} = \max(B_i)$, [T]	wartość maksymalna indukcji magnetycznej dla całego badanego profilu
3	$M_m = M_{\max} - M_{\min}$, [T]	wartość międzyszczytowa indukcji magnetycznej
4	$M_b = \frac{\sum_{i=1}^N B_i }{N}$, [T]	średnia indukcji magnetycznej profilu
5	$M_s = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^3}{N}$, [T ³]	skośność rozkładu indukcji magnetycznej,
6	$M_k = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^4}{N}$, [T ⁴]	Kurtoza rozkładu indukcji magnetycznej

Z otrzymanych wyników można zauważyć, że najmniejszą wartość minimalną ma koło tylnie lewe TL ($M_{\min} = -1498.12 \cdot 10^{-7}$ T), natomiast największą wartość ma koło tylnie prawe TP ($1226.39 \cdot 10^{-7}$ T). Największą wartość parametru $M_m = 2549.11 \cdot 10^{-7}$ T ma również koło tylnie prawe (TP). Także największą wartość średniej indukcji magnetycznej ($606.12 \cdot 10^{-7}$ T) oraz skośności rozkładu indukcji magnetycznej ($-0.14 \cdot (10^{-7})^3$ T) ma koło tylnie prawe TP. Natomiast najwyższą wartość Kurtozy ($3.35 \cdot (10^{-7})^4$ T) odnotowano na kole tylnym lewym TL.

Następnie badany komplet został zamontowany w samochodzie osobowym, klasy średniej (segment D), tam był normalnie eksploatowany przez cały sezon zimowy (6 miesięcy). Po sezonie

zimowym powtórzono badania (tab. 4), w takich samych warunkach pomiarowych (tj. przy takim samym położeniu czujnika i takim samym zamocowaniu koła ogumionego na przyrządzie pomiarowym) i stwierdzono różnice w profilach magnetycznych oraz w parametrach profili.

Tab. 3 Wartości parametrów indukcji magnetycznej dla kół przedniego lewego (PL), przedniego prawego (PP), tylnego lewego (TL) oraz tylnego prawego (TP).

PL	PP	TL	TP
$M_{\min} = -925.95$	$M_{\min} = -1242.29$	$M_{\min} = -1498.12$	$M_{\min} = -1322.72$
$M_{\max} = 662.13$	$M_{\max} = 867.91$	$M_{\max} = 1002.49$	$M_{\max} = 1226.39$
$M_m = 1588.08$	$M_m = 2110.20$	$M_m = 2500.61$	$M_m = 2549.11$
$M_b = 326.30$	$M_b = 434.87$	$M_b = 370.08$	$M_b = 606.12$
$M_s = -0.22$	$M_s = -0.19$	$M_s = -0.40$	$M_s = -0.14$
$M_k = 2.04$	$M_k = 2.17$	$M_k = 3.53$	$M_k = 1.81$

Tab. 4 Wartości parametrów profili magnetycznych po 6 miesięcznej eksploatacji.

PL	PP	TL	TP
$M_{\min} = -672.67$	$M_{\min} = -405.00$	$M_{\min} = -996.94$	$M_{\min} = -1250.22$
$M_{\max} = 1038.27$	$M_{\max} = 349.31$	$M_{\max} = 1322.16$	$M_{\max} = 1058.26$
$M_m = 1710.95$	$M_m = 754.30$	$M_m = 2319.10$	$M_m = 2308.49$
$M_b = 349.79$	$M_b = 175.75$	$M_b = 361.60$	$M_b = 450.54$
$M_s = 0.30$	$M_s = -0.07$	$M_s = 0.32$	$M_s = 0.04$
$M_k = 2.16$	$M_k = 1.93$	$M_k = 3.05$	$M_k = 2.19$

Po eksploatacji zauważono, że najmniejszą wartość ma koło tylnie prawe TP ($-1250.22 \cdot 10^{-7}$), a największą ma koło tylnie lewe TL ($1322.16 \cdot 10^{-7}$). Również i po eksploatacji koło tylnie prawe TP miało największe wartości parametrów M_m oraz M_b , jednak uzyskane wartości w drugim pomiarze różniły się dla M_m o $241 \cdot 10^{-7} T$ i dla M_b o $155.6 \cdot 10^{-7} T$ w odniesieniu do pierwszego pomiaru. W przypadku skośności rozkładu indukcji magnetycznej największą wartość miało koło tylnie lewe TL ($0.32 \cdot (10^{-7})^3 T$), koło przednie lewe PL miało wartość zbliżoną do koła tylnego lewego TL, natomiast jako jedyne koło przednie prawe PP miało wartość ujemną ($-0.07 \cdot (10^{-7})^3 T$). Największą wartość Kurtozy rozkładu również w drugim pomiarze uzyskało koło tylnie lewe TL ($3.53 \cdot (10^{-7})^4 T$), jednak różniła się ona w stosunku do pierwszego pomiaru o $0.48 \cdot (10^{-7})^4 T$.

Wszystkie parametry profili magnetycznych uległy zmianie w trakcie eksploatacji. Przeprowadzony pomiar pierwszy potwierdził, że każde koło ogumione ma swój niepowtarzalny wzór pola magnetycznego, a badanie drugie potwierdziło przypuszczenia autorów, iż eksploatacja ma wpływ na zmiany profili magnetycznych kół. Na zmianę wartości parametrów profili indukcji magnetycznej mogła mieć wpływ droga, po której poruszał się pojazd. Jeśli na drodze znajdowało się dużo metalowych słupków oraz samochód często przejeżdżał przez stalowe mosty to te elementy mogły spowodować zmianę indukcji magnetycznej na poszczególnych kołach pojazdu.

4. Podsumowanie

Opisywane przez innych autorów rozwiązania dotyczące badania zmian pola magnetycznego koła ogumionego przyczyniły się do zbudowania własnego stanowiska pomiarowego, które umożliwia prowadzenie badań w 2D i 3D. Ponadto analiza literaturowa

wykazała, że koło ogumione w pojeździe ma swoje właściwości magnetyczne, które mogą posłużyć do diagnostyki jego stanu. Diagnostyka może być przeprowadzona na podstawie zmian wartości parametrów opisujących profile indukcji magnetycznej badanych obiektów. Przeprowadzone badania własne potwierdziły wnioski innych autorów o zmianie niskoczęstotliwościowego pola magnetycznego opon w trakcie ich użytkowania oraz o unikatowości wzoru pola magnetycznego opon.

5. Literatura

- Brol S, Prażnowski K, Augustynowicz A (2014) Sposób pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego i układ do pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego, MKP, Politechnika Opolska. Patent, Polska, nr PL 223767.
- Brol S, Szegda A (2017) Comparison of exploitative magnetic characteristics of winter tyres, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 4(113)/2017: 5-12.
- Brol S, Szegda A (2017) Direct measurement of magnetic flux density of car's wheels, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 2(111)/2017: 37-44.
- Dębica.com.pl Nasze porady (https://www.debica.com.pl/nasze_porady/porady/jak-sie-robi-opone, stan na 10 12 2017).
- Goodyear.eu Technologiaprodukcjiopon (https://www.goodyear.eu/pl_pl/consumer/learn/how-tires-are-mad.html, stan na 10 12 2017).
- Hankooktire.com Konstrukcja opon (<http://www.hankooktire.com/pl/services-tips/tire-guide/structure.html>, stan na 10 12 2017).
- Kawase M, Tazaki S (2001) Method for detecting the magnetic field of a tire. US 6404182 B1.
- Kawase M, Tazaki S, Kaneko H et al. (2001) Method and apparatus for detecting tire revolution using magnetic field US 6246226 B1.
- LeGoff A, Lacoume JL, Blanpain R et al. (2012) Automobile wheel clearance estimation using magnetism, Mechanical Systems and Signal Processing 26 (2012) 315–319.
- Michelin.pl Podstawowe informacje, powstawanie opon (<http://www.michelin.pl/opony/ucz-sie-udostepniaj/podstawowe-informacje-o-oponach/produkcja-opony>, stan na 10 12 2017).
- Milham S, Hatfield JB, Tell R (1999) Magnetic Fields From Steel-Belted Radial Tires: Implications for Epidemiologic Studies, Bioelectromagnetics 20:440-445.
- Opony.com (<http://www.opony.com.pl/artykul/opony-i-elektronika/?id=33>, stan na 10 12 2017).
- Stankowski S, Kessi A, Be'cheiraz O et al. (2006) Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization, Health Physics, March 2006, DOI: 10.1097/01.HP.0000174526.10639.ff.
- Szegda A, Brol S (2017) Measurement device of magnetic flux density of tyre, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 2(111)/2017: 121-128.

16. Magnetyzm koła a eksploatacja

Magnetism wheel and exploitation

Agnieszka Szegda

Katedra Pojazdów, Politechnika Opolska

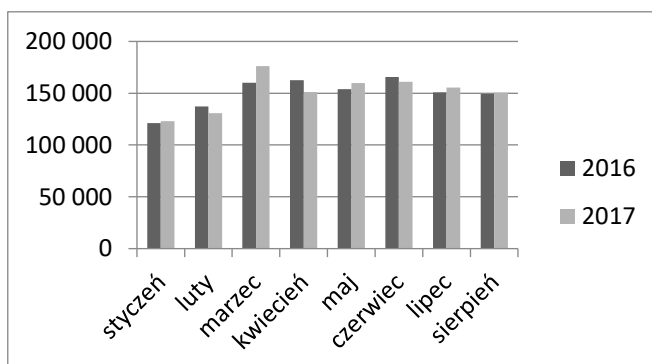
Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Sebastian Brol, prof. PO

Szegda Agnieszka: agnieszka.szegda@gmail.com

Słowa kluczowe: parametry statystyczne, badania, analiza.

Streszczenie

W ciągu ostatnich lat na polskich drogach można zauważyć wzrost liczby pojazdów, nie wszystkie nowo rejestrowane samochody są nowymi pojazdami (rys. 1). Koło samochodowe to jedyna część pojazdu, która ma bezpośredni kontakt z podłożem podczas ruchu. Statystyki rządowe niestety nie podają, w jakim stopniu zużycie opon przyczynia się do zdarzeń drogowych. Istotne jest z punktu widzenia bezpieczeństwa podczas jazdy, aby mieć jak najwięcej informacji o tym elemencie samochodu. Opona samochodowa wykazuje właściwości magnetyczne, te właściwości mogą być wykorzystane do uzyskiwania informacji o kole samochodowym. W celu pozyskania informacji o polu magnetycznym opony/ koła samochodowego autorzy zbudowali własny przyrząd pomiarowy. Służący on do badania zmian indukcji magnetycznej koła samochodowego lub opony. Ponadto autorzy zaproponowali parametry statystyczne opisujące zmianę profili magnetycznych badanych opon/ kół samochodowych. Dalej zawarto sposób prowadzenia badań oraz otrzymane wstępne wyniki.

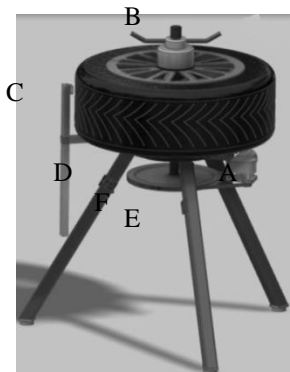


Rys. 1 Ilość zarejestrowanych pojazdów w Polsce w latach 2016 oraz 2017 wg CEPiK.

1. Wstęp

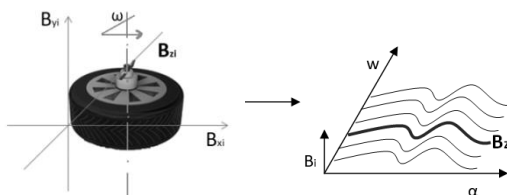
Przed rozpoczęciem badań własnych autorzy przeprowadzili przegląd literatury, z którego wynikało, że opona/ koło samochodowe ma pewne właściwości magnetyczne. Właściwości te były badane pod różnymi aspektami i różnymi metodami w zależności, co dani autorzy chcieli zbadać. Tak Milham S. (autor badał wpływ niskoczęstotliwościowego pola magnetycznego na organizm człowieka) używał do badania niskoczęstotliwościowego pola magnetycznego opon radialnych magnetometru transduktorowego (Walker FGM-301) i magnetometru (R.B. Annis Company, Magnetic Equipment), a LeGoffi A. (badał unikatowość wzoru magnetycznego „podpisu” opon oraz przyczyny powstawania magnetyzmu opon) używał czujnika ARM (anizotropowy rezystor magnetyczny), natomiast Stankowski S. prowadził badania przy użyciu analizatora pola magnetycznego NARDAEF200 i sondy polowej BN2245/90.10 w swojej pracy autor badał rozkład pola magnetycznego w pojeździe oraz czy utracony magnetyzm opony (specjalnie rozmagnesowano badane obiekty) powróci w trakcie eksploatacji (Milham i in. 1999; LeGoffi i in. 2012; Stankowski i in. 2006).

Dalej autorzy monografii przeprowadzili rozeznanie odnośnie dostępnej technologii produkcji oraz materiałów. Uwzględniają te wymienione czynniki oraz czynnik finansowy autorzy zbudowali własny przyrząd pomiarowy służący do rejestracji zmian pola magnetycznego koła ogumionego lub opony – umożliwia to wymienne mocowanie badanego elementu do stanowiska. Zbudowane stanowisko pomiarowe spełnia założenia konstrukcyjne (np. modyfikowalność konstrukcji, mobilność, możliwość obsługi przez jedną osobę) oraz (rys. 2) jest modułowe, a każdy moduł jest wymienny i pełni inną funkcję. Użyto w przyrządzie dwa mikrokontrolery *Arduino* ponieważ jeden odpowiada za sterowanie przyrządem a drugi za pomiary. Rozdzielając funkcję sterowania i prowadzenia pomiarów na dwa niezależne mikrokontrolery, można uniknąć zakłóceń podczas prowadzenia pomiarów oraz pojawiające się awarie są łatwiejsze do zdiagnozowania i naprawienia.



Rys. 2 Graficzna wizualizacja przyrządu pomiarowego z zaznaczonymi: modułem silnika (silnik oraz mocowanie silnika) – A, mocowaniem koła ogumionego do przyrządu (nakrętka, stożek mocujący i podkładki) – B, modułem pomiarowym (ramię pomiarowe i czujnik) – C, mikrokontrolery D i E oraz zespół napędowy (wymienne koło pasowe i pas) – F.

Obiektem badawczym było koło ogumione, które znajdowało się w polu ziemskim geomagnetycznym. Dane z eksperymentu były pobierane za pomocą czujnika magnetorezystancyjnego trójosiowego HMC5883L. Przykładowe tworzenie profilu indukcji magnetycznej w kierunku pomiarowym B_{zi} zostało zamieszczone na **rysunku 3**. Czujnik ten wykorzystuje do przesyłu informacji magistralę I²C. Przy pomocy trójosiowego czujnika oraz programu *Matlab* możliwe było sprawdzenie wyglądu profili magnetycznych kół ogumionych, określenie wpływu eksploatacji na profile magnetyczne oraz porównanie profili magnetycznych jednego kompletu kół względem siebie oraz względem innego zbadanego kompletu kół ogumionych.



Rys. 3 Kierunki pomiarowe oraz przykładowe profile magnetyczne dla kierunku B_{zi} (Broli i Szegda 2017).

Do analizy otrzymanych danych użyto parametrów statystycznych opisanych wzorami 1-6.

$$M_{\min} = \min(B_i), [T] \quad (1)$$

$$M_{\max} = \max(B_i), [T] \quad (2)$$

$$M_m = M_{\max} - M_{\min}, [T] \quad (3)$$

$$M_b = \frac{\sum_{i=1}^N |B_i|}{N}, [T] \quad (4)$$

$$M_s = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^3}{N}, [T^3] \quad (5)$$

$$M_k = \frac{\sum_{i=1}^N B_i^4}{N}, [T^4] \quad (6)$$

gdzie: B_i – zmierzona wartość indukcji magnetycznej w tzw. „profilu magnetycznym” opisana indeksem i , i – numer kolejnego pomiaru, M_{\min} – wartość minimalna indukcji magnetycznej dla wszystkich B_i dla $i=1$ do $i=N$, M_{\max} – wartość maksymalna indukcji magnetycznej dla całego badanego profilu, M_m – wartość międzyszczytowa indukcji magnetycznej badanego profilu magnetycznego, M_b – średnia indukcji magnetycznej profilu,

M_s – skośność rozkładu indukcji magnetycznej, M_k – Kurtoza rozkładu indukcji magnetycznej (Brol i Szegda 2017).

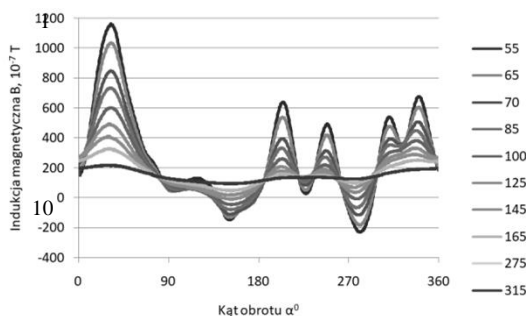
Zaproponowane wzory są uniwersalne i w sposób jednoznaczny opisują zmiany indukcji magnetycznej badanych obiektów. Najwrażliwszymi parametrami na zmiany indukcji magnetycznej okazały się parametry opisane wzorami 5-skośność rozkładu indukcji magnetycznej oraz 6- wartość Kurtozy rozkładu indukcji magnetycznej.

2. Metody prowadzenia badań oraz wyniki

Wszystkie badania były realizowane na stanowisku pomiarowym, które zostało zbudowane w celu badania zmian indukcji magnetycznej. Stanowisko to jest uniwersalne i pozwala prowadzić eksperymenty na różnych średnicach kół ogumionych oraz na samych oponach, w zależności od potrzeby badaczy i rodzaju przeprowadzanych badań.

2.1 Wpływ odległości na profil magnetyczny

Pierwszym eksperyment, jaki przeprowadzono było sprawdzenie czy odległości czujnika od badanego obiektu wpływa na wartość profilu magnetycznego. Obiektem badawczym w tym eksperymencie była opona zimowa o średnicy 14 cali. Koło umieszczono na przyrządzie pomiarowym, następnie czujnik pomiarowy oddalano od obiektu badawczego zaczynając od 55 mm pomiar, a skończywszy na 315 mm. Efekt pomiarów został przedstawiony na rysunku 4.

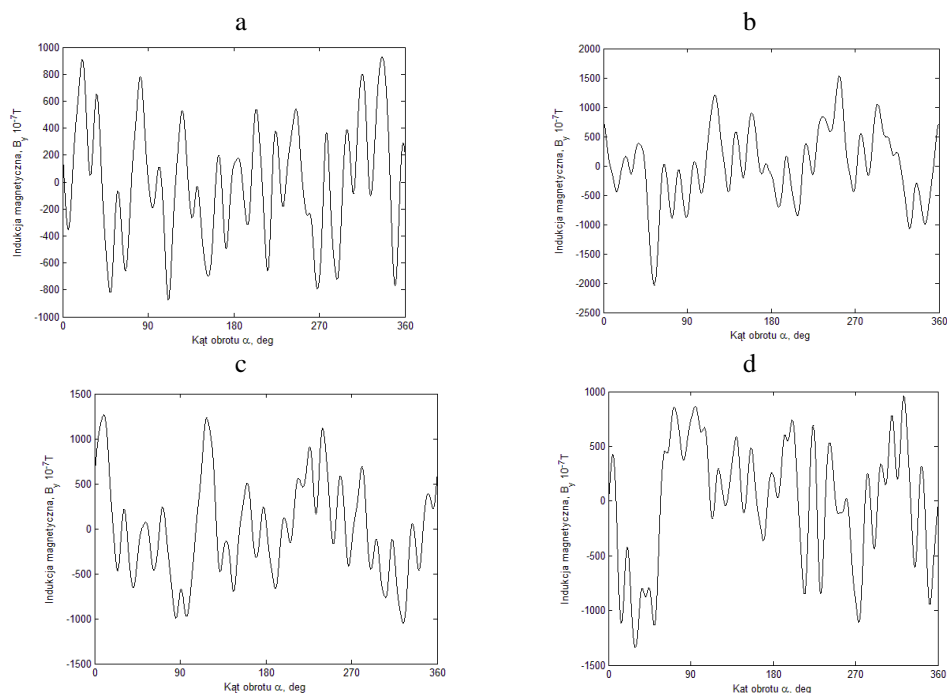


Rys. 4 Zmiany wartości indukcji magnetycznej w zakresie od 55 mm – 1 do 315 mm – 10 (Brol i Szegda 2017).

Dla odległości czujnika pomiarowego 55 mm od bieżnika wartość indukcji magnetycznej ma kształt falowy, to znaczy widać wyraźne wzniesienia oraz doliny. Wraz z powiększającą się odległością czujnika od badanego obiektu kształt indukcji magnetycznej ulega spłaszczeniu. Przy odległości 315 mm kształt indukcji magnetycznej jest prawie linią prostą bez wyraźnych wzniesień oraz dolin.

Rozkład indukcji magnetycznej w jednym komplecie opon zimowych

Dalej zbadano jeden komplet opon zimowych przed sezonem, aby ustalić czy opony w zakresie jednego pojazdu mają takie same wartości profili magnetycznych. W tym celu również zamontowano koła ogumione pojedynczo na przyrządzie pomiarowym. Po zbadaniu jednego koła ogumionego badano następne, zachowując takie samo położenie czujnika pomiarowego dla każdego pomiaru (11 mm od czoła bieżnika) oraz w izbie pomiarowej panowały takie same warunki dla każdego z pomiarów. Do opisu zmian wybrano kierunek pomiarowy wzdłużny – y, ponieważ zmiany w tym kierunku pomiarowym nie były wcześniej badane/ opisywane przez innych autorów. Zarejestrowane profile magnetyczne zostały umieszczone na rysunku 5, a wartości indukcji magnetycznej dla poszczególnych kół w tabeli 1.



Rys. 5 Wartość indukcji magnetycznej w kierunku pomiarowym y dla kół przedniego lewego PL – a, przedniego prawego PP – b, tylnego lewego TL – c i tylnego prawego TP – d.

Otrzymane wartości profili magnetycznych w funkcji kąta obrotu koła samochodu, znacznie się od siebie różnią w zakresie jednego pojazdu. Różnią się one stronami lewa od prawej oraz przód od tyłu. Graficzna interpretacja indukcji magnetycznej (**rys. 5**) w kierunku y potwierdza tezę o unikatowości wzoru pola magnetycznego dla każdego koła ogumionego.

Tab. 1 Wartości profili magnetycznych opisanych parametrami statystycznymi.

PL	PP	TL	TP
$M_{\min} = -875.19$	$M_{\min} = -2028.73$	$M_{\min} = -1046.64$	$M_{\min} = -1338.55$
$M_{\max} = 927.70$	$M_{\max} = 1532.26$	$M_{\max} = 1267.07$	$M_{\max} = 960.76$
$M_m = 1802.89$	$M_m = 3560.99$	$M_m = 2313.71$	$M_m = 2299.31$
$M_b = 354.16$	$M_b = 475.92$	$M_b = 435.62$	$M_b = 460.92$
$M_s = 0.05$	$M_s = -0.31$	$M_s = 0.35$	$M_s = -0.50$
$M_k = 2.29$	$M_k = 3.62$	$M_k = 2.58$	$M_k = 2.30$

Wartości parametrów statystycznych opisujących indukcję magnetyczną różnią się również względem siebie tak jak otrzymane charakterystyki na **rys. 5**. Analizując wartości otrzymane dla przodu pojazdu można zauważyć, że strona lewa ma większą wartość parametru wartości minimalnej indukcji magnetycznej (M_{\min}) o $1153.54 \cdot 10^{-7}$ T w porównaniu do strony prawej. Natomiast strona prawa ma większe wartości parametrów maksymalnej indukcji magnetycznej M_{\max} o $604.56 \cdot 10^{-7}$ T oraz wartości międzyszczytowej indukcji magnetycznej M_m o $1758.1 \cdot 10^{-7}$ T i wartości średniej indukcji magnetycznej profilu M_b o $121.76 \cdot 10^{-7}$ T w porównaniu do strony lewej. Strona lewa ma natomiast większą wartość skośności rozkładu indukcji magnetycznej profilu M_s w porównaniu do strony przedniej prawej o $0.36 (10^{-7} T)^3$. Strona prawa ma również większą wartość Kurtozy rozkładu indukcji magnetycznej M_k w porównaniu do strony lewej.

Rozpatrując tył pojazdu można również zauważyć różnice w odniesieniu do poszczególnych kół. Koło lewe ma większą wartość minimalnej indukcji magnetycznej M_{\min} o $291.91 \cdot 10^{-7}$ T oraz maksymalnej indukcji magnetycznej M_{\max} o $306.31 \cdot 10^{-7}$ T i wartości parametru międzyszczytowej indukcji magnetycznej M_m o $14.4 \cdot 10^{-7}$ T w odniesieniu do koła prawego. Wartość średniej indukcji magnetycznej M_b jest wyższa dla strony tylnej prawej o $25.3 \cdot 10^{-7}$ T w porównaniu do strony lewej. Wartość skośności rozkładu indukcji magnetycznej M_s jest większa dla koła lewego o $0.85 (10^{-7} T)^3$ w odniesieniu do koła prawego oraz wartość Kurtozy M_k jest również większa dla koła lewego o $0.28 (10^{-7} T)^4$.

Rozpatrując otrzymane wartości parametrów statystycznych opisujących zmiany indukcji magnetycznej można zauważyć różnicę między stroną lewą a prawą pojazdu dla poszczególnych parametrów. Najlepiej obrazuje to skośność rozkładu indukcji magnetycznej M_s , która dla strony lewej ma wartości większe od zera, a dla strony prawej mniejsze od zera.

Wartość minimalna indukcji magnetycznej M_{\min} jest największa po stronie lewej, z przodu pojazdu ($-875.19 \cdot 10^{-7}$ T) oraz najmniejsza wartość tego parametru również jest z przodu pojazdu dla prawego koła ($-2028.73 \cdot 10^{-7}$ T). Największa wartość M_{\max} znajduje się także z przodu pojazdu na prawym kole ($1532.26 \cdot 10^{-7}$ T) oraz najmniejszą wartość tego parametru zanotowano na kole przednim lewym ($927.70 \cdot 10^{-7}$ T). Analogicznie w przypadku parametru wartości międzyszczytowej M_m oraz wartości średniej indukcji magnetycznej M_b największe wartości zanotowano na kole przednim prawego a najmniejsze na kole przednim lewym. Wartość skośności rozkładu indukcji magnetycznej ma największą wartość na kole tylnim lewym, a najmniejszą na kole tylnim prawym. Kurtoza największą wartość przyjmuje na kole prawym przednim a najmniejszą na prawym lewym.

Porównanie indukcji magnetycznej przed oraz po eksploatacji

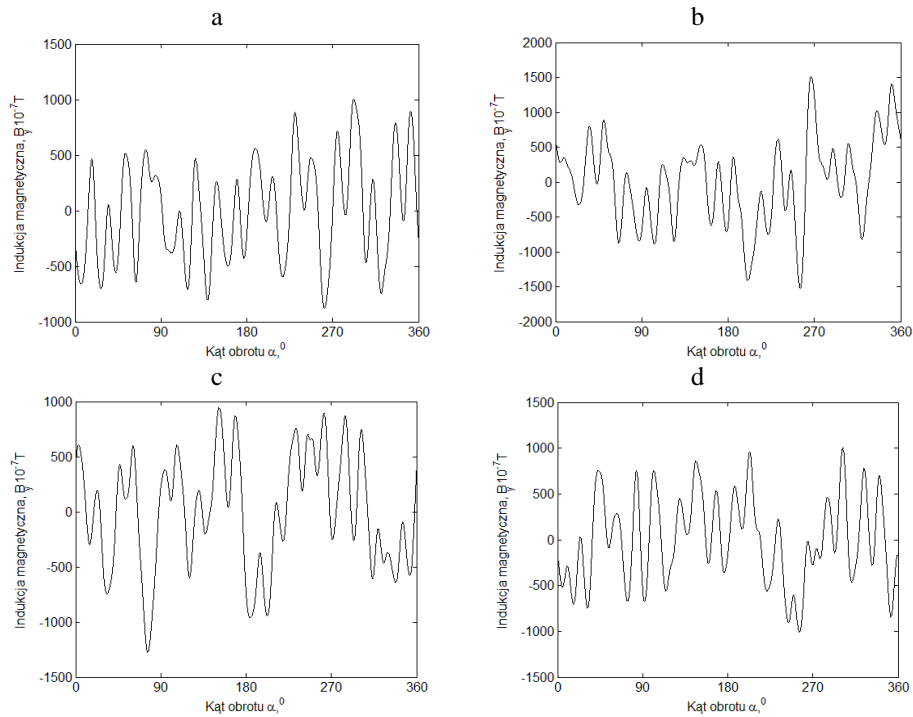
Zbadany komplet opon w eksperymencie 2.2. zamontowano do pojazdu i użytkowano go przez cały sezon zimowy (6 miesięcy), następnie po sezonie zbadano koła ogumione jeszcze raz, zachowując zbliżone warunki pomiarowe do pomiaru 2.2. (taka sama odległość czujnika od czoła bieżnika).

Otrzymane charakterystyki indukcji magnetycznej zamieszczono na rys. 6 a wartości profili magnetycznych w tab. 2.

Otrzymane wartości profili magnetycznych w funkcji kąta obrotu koła samochodu, różnią się od siebie w zakresie jednego pojazdu oraz różnią się one w porównaniu z pomiarem po eksploatacji.

Na rysunkach 7 i 8 porównano wartości parametrów opisujących zmiany indukcji profili magnetycznych dla pomiaru pierwszego (badanie 2.2. – pomiar listopadowy oraz drugiego 2.3. – pomiar majowy) dla czterech kół ogumionych.

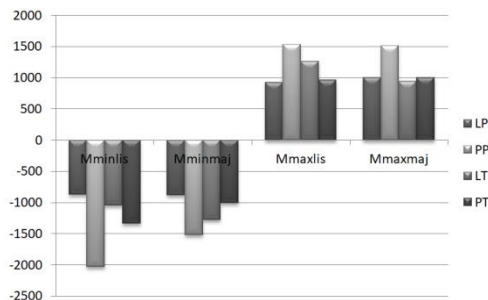
Porównując wartość parametru M_{\min} z obu pomiarów można zauważyć, iż największą zmianę miało koło przednie prawe (zmiana o $504.38 \cdot 10^{-7}$ T), a najmniejszą koło lewe przednie ($5.43 \cdot 10^{-7}$ T). Największą zmianę wartość parametru M_{\max} zauważono na kole tylnim lewym ($320.16 \cdot 10^{-7}$ T), a najmniejszą na kole przednim prawym ($15.02 \cdot 10^{-7}$ T). Największą różnicę wartości międzyszczytowej M_m w obu pomiarach miało koło tylne prawe i była ona równa $282.45 \cdot 10^{-7}$ T, natomiast najmniejszą różnicę wykazało koło przednie lewe ($80.96 \cdot 10^{-7}$ T).



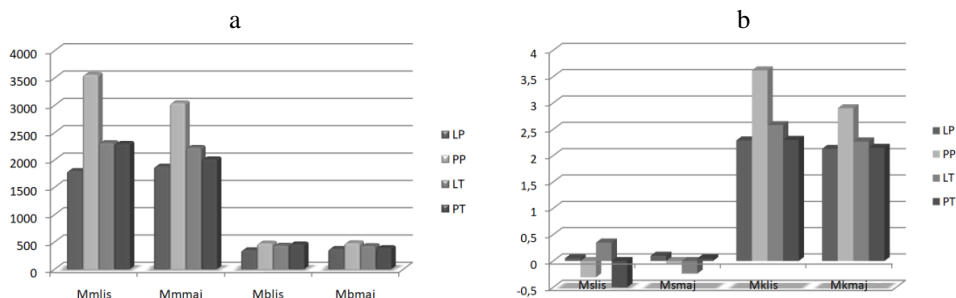
Rys. 6 Wartość indukcji magnetycznej w kierunku pomiarowym y po 6 miesięcznej eksploatacji dla kół przedniego lewego PL – a, przedniego prawego PP – b, tylnego lewego TL – c i tylnego prawego TP – d.

Tab. 2 Wartości profili magnetycznych opisanych parametrami statystycznymi po eksploatacji.

PL	PP	TL	TP
$M_{\min} = -880.62$	$M_{\min} = -1524.35$	$M_{\min} = -1279.00$	$M_{\min} = -1011.08$
$M_{\max} = 1003.23$	$M_{\max} = 1517.24$	$M_{\max} = 946.91$	$M_{\max} = 1005.78$
$M_m = 1883.85$	$M_m = 3041.59$	$M_m = 2225.91$	$M_m = 2016.86$
$M_b = 375.88$	$M_b = 480.54$	$M_b = 429.20$	$M_b = 392.66$
$M_s = 0.10$	$M_s = -0.06$	$M_s = -0.24$	$M_s = 0.05$
$M_k = 2.13$	$M_k = 2.90$	$M_k = 2.27$	$M_k = 2.15$



Rys. 7 Wartości M_{\min} i M_{\max} dla pomiaru listopadowego i majowego jednego kompletu kół ogumionych.



Rys. 8 Wartości M_m i M_b (a) oraz M_s i M_k (b) dla pomiaru listopadowego i majowego jednego kompletu kół ogumionych.

Najmniejszą różnicę w wartości średniej indukcji magnetycznej M_b miało koło prawe przednie ($4.60 \cdot 10^{-7} T$), a największą koło tylnie prawe równą $68.26 \cdot 10^{-7} T$. Z pośród porównywanych wartości profili skośności indukcji magnetycznej największe różnice wykazało koło tylnie lewe ($0.59 (10^{-7} T)^3$) a najmniejsze koło przednie lewe ($0.05 (10^{-7} T)^3$). Rozpatrując zmiany w wartości Kurtozy największe miało koło przednie prawe ($0.72 (10^{-7} T)^4$), a najmniejsze koło tylnie prawe ($0.15 (10^{-7} T)^4$).

3. Podsumowanie

Dobrane przez autorów parametry statystyczne obrazują indukcję magnetyczną, a na podstawie ich zmian można porównywać profile magnetyczne kół ogumionych/ opon.

Wartości indukcji magnetycznej w zakresie jednego pojazdu różnią zarówno porównując przód pojazdu do tyłu oraz strony lewą do prawej, co zostało przedstawione za pomocą eksperymentu drugiego. Badanie to potwierdziło stwierdzenia innych autorów np. LeGoffa o niepowtarzalności wzoru magnetycznego koła ogumionego. Indukcja magnetyczna zmienia się w trakcie eksploatacji pojazdu.

4. Literatura

- Brol S, Szegda A (2017) Comparison of exploitational magnetic characteristics of winter tyres, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 4(113)/2017: 5-12.
- Brol S, Szegda A (2017) Direct measurement of magnetic flux density of car's wheels, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 2(111)/2017: 37-44.
- LeGoff A, Lacoume JL, Blanpain R et al. (2012) Automobile wheel clearance estimation using magnetism, Mechanical Systems and Signal Processing 26 (2012): 315–319.
- Milham S, Hatfield JB, Tell R (1999) Magnetic Fields From Steel-Belted Radial Tires: Implications for Epidemiologic Studies, Bioelectromagnetics 20:440-445.
- Stankowski S, Kessi A, Be'cheiraz O et al. (2006) Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization, Health Physics, March 2006, DOI: 10.1097/01.HP.0000174526.10639.ff.
- Szegda A, Brol S (2017) Measurement device of magnetic flux density of tyre, Proceedings of the Institute of Vehicles, No. 2(111)/2017: 121-128.

17. Hydrauliczne układy napędowe w dzielarkach do bułek

Hydraulic drive systems in bread dividers

Towarnicki Krzysztof

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. Michał Stosiak, prof. nadzw. PWr

Towarnicki Krzysztof: Krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: piekarnia, dzielenie ciasta, zasilacz hydrauliczny

Streszczenie

Wyroby piekarskie i mączne są na 6 miejscu wśród wyrobów przemysłu spożywczego. W ostatnich latach nastąpiły znaczne zmiany w technologii wyrobu ciasta, wprowadzono polepszacze i spulchniacze. Zmiany zostały spowodowane zmniejszaniem kosztów produkcji, tak aby przy mniejszej wadze, wyrób piekarski miał ta sama objętość. Z tego względu nastąpiło znaczne zgęstnienie ciasta, wśród piekarzy przyjęło się powiedzenie, że mieszają „beton”. Wcześniej zaprojektowane urządzenia stosowane w piekarniach przeznaczone były do luźnego ciasta. Z powodu zmian technologii wytwarzania ciasta nastąpiły zmiany konstrukcyjne maszyn, szczególnie jeśli chodzi o ich napędy. Układy mechaniczne zastąpiono układami hydraulicznymi. Wynika to z zalet napędu hydraulicznego: przenoszenie dużych mocy, odporność na pyły i zanieczyszczenia oraz łatwość automatyzacji. Poniższy artykuł opisuje urządzenia do dzielenia i kształtowania kęsów ciasta na bułki. Przedstawiono przegląd maszyn od najstarszych stosowanych jeszcze przed wojną do obecnych z napędem hydraulicznym. Przewiduje się dalszy rozwój tych urządzeń ze względu na automatyzację piekarskiego procesu piekarniczego, maszyna zastępuje człowieka podczas produkcji.

1. Wstęp

Początki hydrauliki można odnaleźć już w starożytności, gdzie człowiek wykorzystywał ruch cieczy na własne potrzeby. W tamtym czasie nie korzystano jeszcze ze sformułowanych praw, na których opiera się współczesna technika hydrauliczna. 200 lat przed naszą erą odkryto pompę ssąco-tłoczącą, a w 1600 roku J. Kepler wynalazł pompę zębatą, która wówczas nie znalazła praktycznego zastosowania w napędach. Następnie w kolejnych latach wprowadzano w niej kolejne udoskonalenia. Obecnie należy do najczęściej używanych pomp wporowych w hydraulicznych układach napędowych. Dzisiejszy rozwój techniki hydraulicznej związany jest z rozpowszechnieniem się systemów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Zaletą hydraulicznych układów napędowych jest szeroka możliwość sterowania zarówno prędkością jak i mocą odbiorników. Wprowadzenie nowoczesnych, wielopoziomowo rozwiniętych układów elektronicznych w układach hydraulicznych przyczyniło się do płynnej regulacji oraz znacznego obniżenia emitowanego przez nie hałasu. Obecnie trwają dodatkowe prace związane z optymalizacją budowy elementów układów hydraulicznych. Odnosi się to głównie do dwóch kierunków: minimalizacji ich masy, co wiąże się ze zmniejszeniem ich gabarytów oraz redukcji emitowanego przez nie hałasu. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano rozwój mikrohydrauliki, która szeroko opisana jest w lit. (Kollek i in. 2014). Niewątpliwą zaletą układów hydraulicznych jest przenoszenie dużych mocy, które pozwoliło na zastosowanie tego napędu do maszyn przemysłu spożywczego. W zachodniej Europie już w latach 80 XX wieku zastosowano ten napęd w urządzeniach do mieszania i dzielenia ciasta. W Polsce dopiero na początku XXI wieku zaczęto wprowadzać hydrauliczne układy napędowe w urządzeniach piekarniczych. Wynika to zarówno z zalety jaką jest łatwość sterowania jak również z wysokiej odporności na pyły i zanieczyszczenia w stosunku do klasycznych mechanizmów śrubowych, mimośrodowych, krzywkowych czy zapadkowych. Dodatkowo rozwój techniki wprowadził systemy elektroniki i automatyki w budowie elementów oraz układów hydraulicznych. Wprowadzenie nowoczesnych rozbudowanych układów elektronicznych w układach hydraulicznych wpłynęło na płynną regulację oraz obniżenie emitowanego przez nie hałasu. W obecnym czasie zaobserwować

można wzrost zainteresowania wprowadzania hydraulicznych układów napędowych do urządzeń przemysłu spożywczego.

2. Opis zagadnienia

Dzielarko-zaokrąglarka do bułek jest urządzeniem przeznaczonym do pracy w piekarni. Służy do równomiernego podziału porcji urobionego ciasta oraz mechanicznego zaokrąglenia określonej liczby, w zależności od urządzenia, identycznych pod względem objętości porcji do wypieku bułek. Budowa dzielarko-formierek jest podobna niezależnie, czy jest to wersja półautomatyczna lub automatyczna.

Składa się z dwóch głównych podzespołów:

- zespół dzielarki – w niej umieszczona jest głowica nożowa z wstawionym wewnątrz wysuwającym w dół nożem wieńcowym. Opuszczanie w dół głowicy i noża odbywa się za pomocą odpowiednio dobranego mechanizmu w zależności od producenta urządzenia. Obniżenie głowicy powoduje równomierne rozprasowanie ciasta, a następnie przez wysunięcie noża uzyskuje się podział urobionego ciasta na równe kęsy pod względem objętości, która znajduje się na palecie umieszczonej na płycie górnej zaokrąglarki.

- zespół zaokrąglarki – jest to część urządzenia gdzie płyta górna wykonuje ruch kołowy po naciśnięciu dźwigni przez operatora, lub w cyklu automatycznym po otrzymaniu sygnału o podzieleniu włożonego ciasta. Ruch płyty górnej powoduje zaokrąglenie uprzednio podzielonych porcji. W większości urządzeń napęd płyty górnej odbywa się za pomocą silnika elektrycznego poprzez przekładnię pasową, stolik obrotowy oraz suwak i łącznik.

Opis pracy urządzenia: Odważoną porcję urobionego ciasta (w zależności od masy bułek) rozkłada się na środku palety. Następnie paletę z ciastem umieszcza się na płycie górnej zaokrąglarki. Paleta zabezpieczona jest przed przesuwaniem się poprzez płytki oporowe i kołki ustalające. Kolejno musi nastąpić rozprasowanie ciasta za pomocą obniżającej się głowicy. Aby uniknąć wysunięcia się ciasta spod głowicy, wprowadzony jest pierścień osłaniający. Dzięki temu uzyskuje się komorę w której znajduje się ciasto w kształcie krążka. Następnie wysuwany jest nóż z głowicy, który powoduje równomierne podzielenie ciasta na jednakowe porcje. W kolejnym etapie płyta górna zostaje wprowadzona w ruch obrotowy powodując zaokrąglenie podzielonych porcji. Następnym krokiem jest zatrzymanie płyty górnej, podniesienie głowicy do góry i wsunięcie się noża do wnętrza głowicy. Ostatnim etapem jest wyciągnięcie palety na której znajdują się zaokrąglone bułki.

3. Przegląd rozwiązań napędów w dzielarkach do bułek

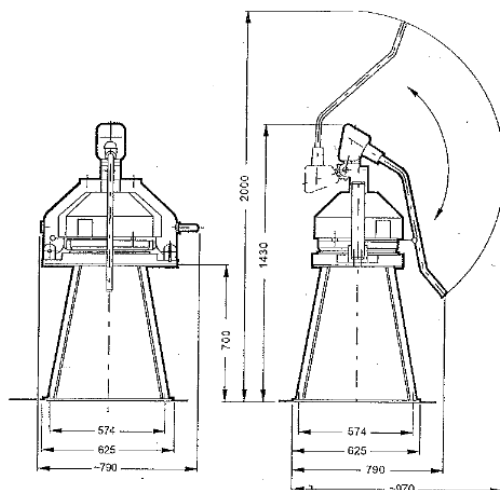
3.1 Ręczne dzielarki do bułek.

Dzielarki tego typu nie potrzebują zasilania elektrycznego, do ich napędu wystarczy jedynie siła ludzkich mięśni. Rozróżnia się dwa typy tych urządzeń:

Głowica prasująca dociskana od dołu. Przeznaczona do równomiernego podziału kęsów ciasta na porcje o wadze 25-100 gramów, które zostaną później ręcznie uformowane. Dzielarka składa się z komory w kształcie okręgu, w którym w dolnej części znajduje się głowica z umieszczonym wewnątrz nożem dzielącym. Z góry komory zamocowana jest zamykana płyta. Powyższe elementy zamontowane są w ramie złożonej z kształtowników, dzięki czemu otrzymuje się zwartą konstrukcję urządzenia. Zasada działania dzielarki polega na opuszczeniu głowicy w dół za pomocą dźwigni, otworzeniu pokrywy górnej oraz umieszczeniu w komorze odważonej porcji urobionego ciasta. Następnie należy zamknąć pokrywę górną, unieść głowicę do góry za pomocą dźwigni powodując rozprasowanie ciasta. Kolejno należy zwolnić blokadę aby wysunąć nóż z głowicy i podzielić kęs ciasta na równomierne porcje. Aby wyciągnąć podzielone porcje z komory należy opuścić głowicę maksymalnie w dół, powodując wsunięcie się noża do głowicy, następnie należy otworzyć górną pokrywę i podnieść do góry głowicę, tak aby znalazła się nad górną krawędzią komory. Wydajność około 4000 szt./h.

Głowica prasująca dociskana od góry. Przeznaczona jest do równomiernego podziału kęsów ciasta na porcje o wadze 25-100 gramów, które zostaną następnie ręcznie uformowane. Dzielarka składa się z ręcznie uruchamianej głowicy prasującej, z zainstalowanym wewnątrz wysuwającym nożem

nacinającym w kształcie gwiazdy oraz pierścienia osłaniającego. Dzielarka zamocowana jest na ramie z kształtowników. Działanie dzielarki polega na umieszczeniu palety z odważoną porcją ciasta na płycie roboczej. Następnie poprzez opuszczenie głowicy rozgniata się ciasto w przestrzeni ograniczonej pierścieniem osłaniającym. Kolejno poprzez uwolnienie noża gwiaździstego następuje nacięcie ciasta powodujące jego podział na jednakowe porcje. Po podniesieniu głowicy za pomocą dźwigni można wyciągnąć paletę z podzielonymi porcjami. Poniżej przedstawiono na (Rys. 1) dzielarkę z podanymi wymiarami gabarytowymi. Wydajność około 4000szt./h.



Rys. 1. Widok ogólny ręcznej dzielarki z wymiarami gabarytowymi.

3.2 Ręczne dzielarko- zaokrąglarki

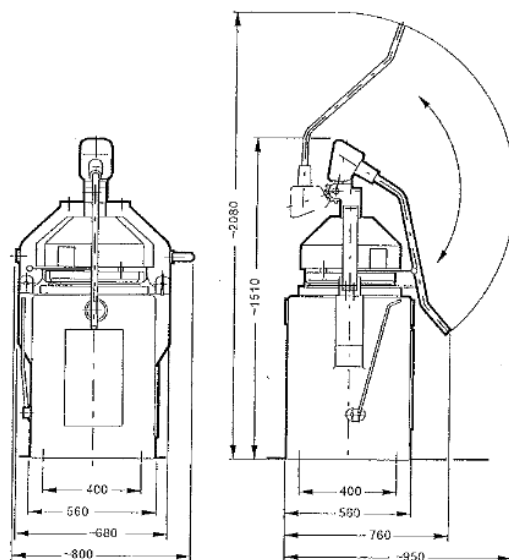
Są to urządzenia służące do otrzymywania zaokrąglonych jednakowych pod względem masy bułek. Dzielarko-zaokrąglarka składa się z dwóch zespołów:

Zespołu dzielącego : ręcznie uruchamianej dźwignią głowicy prasującej, z umieszczoną w niej wysuwającym nożem wieńcowym oraz pierścieniem osłaniającym. Przełożenie mechaniczne pozwala sprasować i przeciąć ciasto za pomocą przesuwanego segmentu zębatego umieszczonego w korpusie oraz współpracującego koła zębatego zamocowanego do obrotowej dźwigni uruchamianej ręcznie. Oś obrotu koła zębatego pokrywa się z osią obrotu dźwigni.

Zespołu zaokrąglającego: płyty obtaczającej, która wykonuje ruch oscylacyjny oraz jej układu napędowego z mimośrodowym mechanizmem uruchamiającym. W zależności od producenta można wyróżnić kilka rozwiązań mimośrodowego mechanizmu uruchamiającego. W dzielarko-formierce HABIL produkcji niemieckiej zamontowany jest na stałe mechanizm mimośrodowy, bez możliwości jego regulacji. Po odcięciu porcji zespół zaokrąglający jest uruchamiany poprzez sprzęgło. W urządzeniach produkcji polskiej i obecnie produkowanych zachodnich jest możliwość zmiany wielkości oscylacji płyty obtaczającej. Realizowane jest to za pomocą przesuwanego suwaka mechanizmu mimośrodowego, dzięki temu jest możliwość regulacji mimośrodu. W zależności od producenta istnieje kilka rozwiązań suwaka: pręta o przekroju kwadratu przesuwanego w prowadnicach, pręta o przekroju okręgu przesuwanego w tulei oraz dźwigni jednym końcem zamontowanej na obrzeżu koła mimośrodowego, gdzie za pomocą suwaka z charakterystycznym kształtem odchyła się drugi koniec dźwigni z osi koła.

Działanie dzielarko zaokrąglarki: Paletę z odważoną porcją ciasta umieszcza się na płycie obtaczającej, następnie za pomocą górnej dźwigni rozprasowuje się ciasto, w przestrzeni ograniczonej pierścieniem osłaniającym, następnie za pomocą dźwigni odblokowujemy zespół prasujący i zwalniamy noże. Dociskając dźwignią do oporu dzielimy ciasto na porcje. Zaokrąglenie porcji następuje po uruchomieniu mechanizmu zaokrąglającego za pomocą dźwigni z boku maszyny.

Wydajność około 3500 szt./h. Poniżej na (Rys. 2) przedstawiono dzielarkę tego typu produkcji polskiej.



Rys. 2. Widok ogólny ręcznej dzielarki z wymiarami gabarytowymi.

3.3 Półautomatyczne dzielarko-zaokrąglarki.

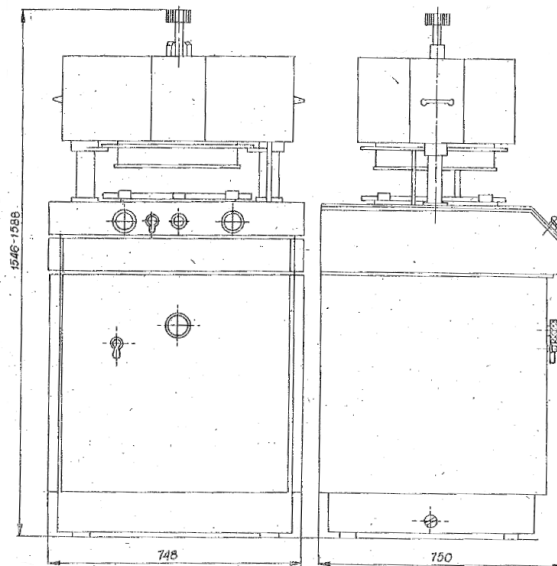
Przeznaczone są do dzielenia i formowania bułek z pierwotnego kęsa ciasta. Składają się z następujących zespołów:

- a) Głowicy roboczej,
- b) Stołu formującego,
- c) Napędu prasowania,
- d) Napędu formowania,
- e) Układu sterowania i automatyki,
- f) Korpusu z osłonami,
- g) Skrzynki elektrycznej.

Urządzenie jest wolnostojącą maszyną o ciężkim korpusie, w zależności od producenta stalowym spawanym lub odlewanym żeliwnym. Mechanizmy obudowane są blaszanymi szybkoobrotowymi osłonami, a elementy manipulacyjne i sygnalizacyjne wyprowadzone są na zewnątrz. Głowica robocza dedykowana jest do dzielenia pierwotnego kęsa ciasta, do prasowania ciasta oraz dociskania porcji ciasta podczas formowania. Głowica jako całość realizuje ruch posuwisto-zwrotny. W zależności od wytwórcy urządzenia ruch ten jest wykonywany poprzez silnik elektryczny za pomocą mechanizmu korbowego połączonego z przekładnią, mechanizmu krzywkowego lub krzywkowo-dźwigniowego. Stół formujący również jest napędzany silnikiem elektrycznym za pomocą przekładni pasowej z mimośrodowym mechanizmem identycznym jak w dzielarko-zaokrąglarkach. Poniżej przedstawiono półautomatyczną dzielarko-zaokrąglarkę produkcji polskiej.

Zasada działania polega na umieszczeniu na tacy formującej pierwotnego kęsa ciasta o określonej wadze. Następnie tacę należy umieścić na stole formującym. Elementy manipulacyjne – pokrętła należy ustawić w żądanym położeniu w zależności od rodzaju i gramatury ciasta. Kolejno należy włączyć maszynę do sieci poprzez przekręcenia włącznika głównego. Po wykonaniu prawidłowo wcześniej wspomnianych czynności należy uruchomić maszynę do pracy poprzez jednoczesne przyciśnięcie obu przycisków włączających. Po włączeniu głowica robocza przesuwa się w dół, następuje rozprasowanie ciasta i mechanizm sterujący powoduje wysunięcie się noża. Dzięki temu kęs ciasta podzielony jest na jednakowe porcje. Następnie stół formujący zostaje wprowadzony

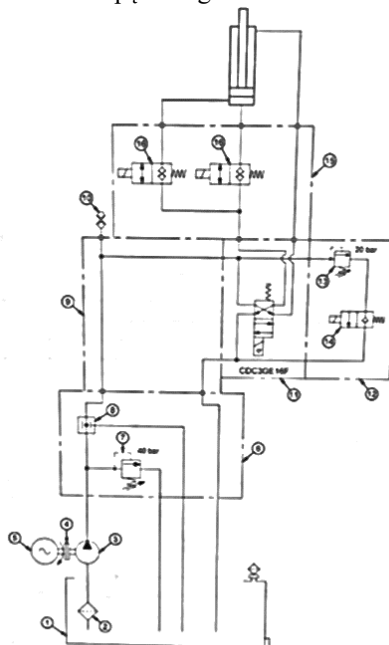
w ruch oscylacyjny powodując zaokrąglenie bułek. Po tej operacji następuje podniesienie się głowicy i można wyjąć tace z uformowanymi bułkami. Maszyna jest gotowa do włożenia kolejnej tacy z kęsem ciasta. Urządzenie posiada regulację siły prasowania, czasu po którym nastąpi podzielenie ciasta od sprasowania oraz regulacje czasu formowania bułek. Wydajność około 6000 szt./h.



Rys. 3. Widok ogólny półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki do bułek.

3.4 Dzielarki do bułek z napędem hydraulicznym.

Są to dzielarki do bułek w swojej konstrukcji zbliżone do ręcznych dzielarek z głowicą prasującą od dołu. Napęd za pomocą ludzkich mięśni został zastąpiony napędem hydraulicznym. Poniżej przedstawiono schemat układu napędowego.

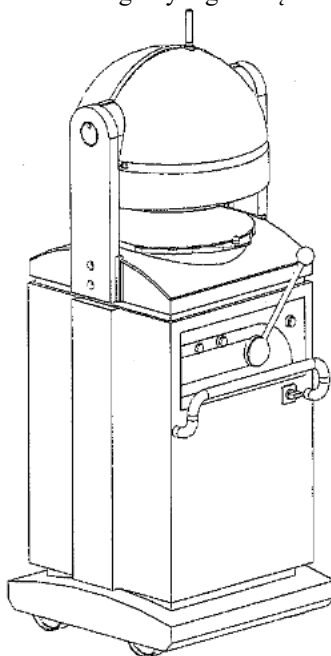


Rys. 4. Schemat układu hydraulicznego dzielarki do bułek.

Dla zachowania ruchu posuwistego głowicy z nożem zastosowano siłownik dwustronnego działania, który jest podłączony do zasilacza hydraulicznego. Zasilacz hydrauliczny składa się z silnika elektrycznego, pompy zębatej, zbiornika oleju, zaworu bezpieczeństwa oraz rozdzielacza sterującego. Dodatkowo dzielarka tego typu od dzielarki ręcznej różni się geometrią głowicy. W ręcznej dzielarce była to głowica w kształcie okręgu, a w dzielarce z napędem hydraulicznym głowice wykonano w kształcie prostokąta. Dzięki temu z kęsa ciasta otrzymuje się podzielone porcje w kształcie kwadratu, czyli po wypieczeniu otrzyma się kwadratowe bułki często spotykane na sklepowych półkach.

3.5 Dzielarko formierki z napędem hydraulicznym.

Zasadą działania przypominają półautomatyczne dzielarko-zaokrąglarki przeznaczone do dzielenia i formowania porcji ciasta uzyskanych z podzielenia pierwotnego kęsa ciasta. Są również podobnej budowy, czyli składają się z zespołów: głowicy roboczej, stołu formującego, napędu prasowania, napędu formowania, układu sterowania i automatyki, korpusu z osłonami oraz skrzynki elektrycznej. Poniżej przedstawiono widok ogólny tego urządzenia.

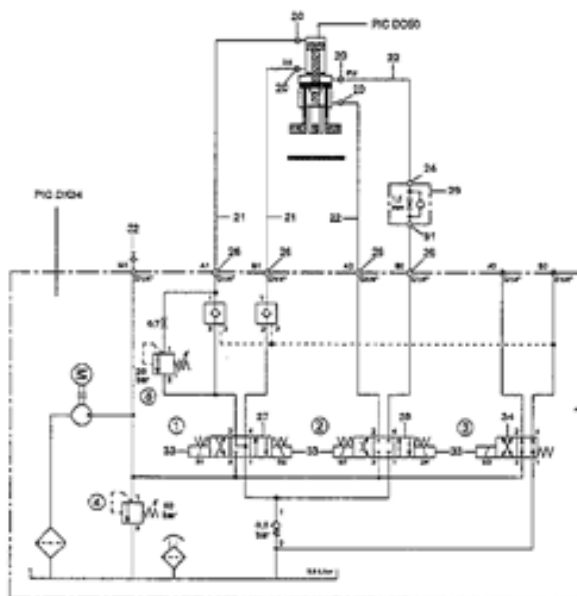


Rys. 5. Widok ogólny półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki.

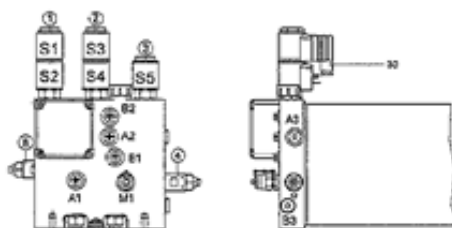
Różnica polega na zamianie mechanicznego napędu prasowania na hydrauliczny układ prasowania. Poniżej przedstawiono schemat układu hydraulicznego wykorzystywanego w tego typu dzielarkach.

Napęd hydrauliczny zbudowany jest zasilacza hydraulicznego oraz odbiornika. Którym jest dwutłokowy siłownik. Siłownik tego typu pozwala na niezależne sterowanie pracą głowicy roboczej oraz noża dzielącego. Poniżej na (Rys.7) przedstawiono widok zasilacza hydraulicznego.

Zasilacz hydrauliczny zmontowany jest z następujących elementów, pompy zębatej szerzej opisanej w lit. (Kollek 1996; Kollek i Maćkiewicz 1999; Osiński 2013) zasilanej silnikiem elektrycznym trójfazowym, zaworu bezpieczeństwa o nastawie 50 bar, rozdzielacza wielosekcyjnego, zaworu przelewowego, sterowanych zaworów zwrotnych oraz zbiornika oleju o pojemności 5,8L. Napęd talerza formującego pozostał mechaniczny, bez większych zmian.



Rys. 6. Schemat układu hydraulicznego półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki.



Rys. 7. Widok kompletnego zasilacza hydraulicznego.

4. Podsumowanie

W powyższym artykule zostały przedstawione urządzenia do dzielenia oraz formowania bułek. Te najstarsze posiadają napęd ręczny. Nowocześniejsze zostały wyposażone w napędy mechaniczne, a obecnie stosowane posiadają napęd hydrauliczny. Wprowadzenie napędu hydraulicznego w tego typu urządzeniach wynika z kilku przyczyn. Wprowadzenia kompletnych zasilaczy hydraulicznych, dzięki czemu projektant urządzeń piekarniczych nie musi się borykać z problemem doboru współpracujących elementów hydraulicznych. Kolejny powód to znaczna odporność na zabrudzenia i zapylenia w stosunku do napędów mechanicznych. W przypadku urządzeń piekarniczych jest to istotny czynnik wpływający na pracę tych urządzeń. Najważniejszą przyczyną wprowadzenia tego napędu w dzielarkach jest przenoszenie dużych mocy. W związku z wprowadzaniem do wyrobów piekarniczych spulchniaczy oraz polepszaczy pieczywa, przygotowywane ciasto stało się sztywniejsze i dotychczasowe napędy mechaniczne miały problem ze sprasowaniem takiego ciasta. Dodatkowo łatwość automatyzacji i regulacji w napędzie hydraulicznym pozwala na pracę maszyny w linii technologicznej i zastąpienie człowieka w miejscu pracy. Ze względu na ciągłe zmiany w wyglądzie i kształcie bułek przewiduje się wzrost zainteresowania napędami hydraulicznymi wśród konstruktorów dzielarko-formierek do bułek.

5. Literatura

- Kollek W, Osiński P, Stosiak M, Wilczyński A, Cichon P (2014) Problems relating to high-pressure gear micropumps, Archives of Civil and Mechanical Engineering (14) 2014, 88-95.
- Kollek W (1996) Pompy zebate, konstrukcja I eksploatacja. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1996, 10-21.
- Kollek W, Mąckewicz J (1999) Teoria I obliczanie pomp zębatych, Kadłuby I układy napięte wstępnie, Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1999,13-22.
- Osiński P (2013) Wysokociśnieniowe i niskopulsacyjne pompy zebate o zazębieniu zewnętrznym, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2013, 27-66.

18. Hydrauliczne układy napędowe w miesiarkach do ciasta

Hydraulic drive systems in dough mixers

Towarnicki Krzysztof

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. Michał Stosiak, prof. nadzw. PWr

Towarnicki Krzysztof: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: piekarnia, mieszanie ciasta, zasilacz hydrauliczny

Streszczenie

Produkcja wyrobów piekarskich i mącznych zajmuje czołowe miejsce na liście wyrobów przemysłu spożywczego w Polsce. Na przełomie ostatnich lat, znacznie zmieniono technologie wyrobu ciasta, poprzez wprowadzenie polepszaczy i spulchniaczy. Wynika to z redukcji kosztów produkcji, otrzymywany produkt ma tę samą wielkość gabarytową przy pomniejszonej wadze. Przygotowywane ciasto jest znacznie gęściejsze, piekarze posługując się językiem popularnym porównują je z betonem. Urządzenia używane od dekad nie potrafią sprostać tym wymaganiom, wzmacniane wały miesiarek ulegają zniszczeniu poprzez pękanie zmęczeniowe. W obecnych urządzeniach moc silników napędzających wzrosła praktycznie dwukrotnie. Mechaniczne układy zapinania wózków z dzieżą oraz mechanizmy podnoszenia i opuszczania głowic miesiarek, nie spełniają stawianych wymagań. Z tego względu układy mechaniczne zastąpiono układami hydraulicznymi, których niewątpliwą zaletą jest przenoszenie dużych obciążeń. Ich dodatkową zaletą jest odporność na zanieczyszczenia występujące na hali produkcyjnej w piekarni oraz łatwość automatyzacji. Poniższy artykuł opisuje działanie miesiarek do ciasta różnego typu i konstrukcji, począwszy od najstarszych użytkowanych jeszcze przed wojną do obecnie użytkowanych.

1. Wstęp

Historię powstawania dziedziny jaką jest hydraulika sięga starożytności, w której człowiek potrafił zagospodarować ruch cieczy na własne potrzeby. W owym czasie nie potrzebował zdefiniowanych praw, na których opiera się aktualnie stosowana technika hydrauliczna. Pierwsze urządzenia które opierały swe działanie na energii cieczy budowano już w starożytności, a przeszło 200 lat przed naszą erą zbudowano pompę ssąco-tłoczącą. Kolejno w około 1600 roku J. Kepler opracował pompę zębatą, w tamtym czasie nie było możliwości by ją wykorzystać do praktycznego zastosowania. W następnych latach pracowano aby ją udoskonalić. Dzisiaj należy do pomp wporowych najczęściej stosowanych w napędach hydraulicznych. Obecny rozwój technologii hydraulicznej powiązany jest z spopularyzowaniem układów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Niewątpliwą zaletą hydraulicznych układów napędowych jest bezstopniowa regulacja prędkością oraz mocą odbiorników. Ulokowanie rozbudowanych układów elektronicznych w układach hydraulicznych wpłynęło na płynną regulację oraz zmniejszenie emitowanego przez nie hałasu. Aktualnie prowadzone są badania nad optymalizacją konstrukcji elementów hydraulicznych. Prace obejmują głównie dwóch kierunków: redukcji masy oraz zmniejszenie emitowanego przez nie hałasu. Niepodważalną zaletą napędów hydraulicznych jest możliwość przenoszenia dużych obciążeń, które przychyliło się do wprowadzenia tego napędu w urządzeniach przemysłu spożywczego.

2. Opis zagadnienia

Działanie miesiarek do ciasta polega na zastosowaniu pracy dwóch ruchów obrotowych, z czego jeden to ruch obrotowy miesidła, a drugi to ruch obrotowy dzieży. Połączenie obu wspomnianych wcześniej napędów pozwala na właściwe wymieszenie ciasta w całej przestrzeni roboczej dzieży.

W odniesieniu do technologii miesienia danego ciasta w większości urządzeń istnieje możliwość miesienia z dwiema różnymi prędkościami. Zaleca się w początkowej fazie miesienia do chwili związania mąki z wodą korzystać z biegu wolnego, a dopiero później z biegu szybkiego.

Napęd mechanizmów miasiarki podzielony jest na dwa odrębne napędy:

- napęd główny,
- napęd podnoszenia miesidła oraz mechanizm zapinania dzieży (w zależności od producenta oba mechanizmy są połączone lub rozdzielone).

Napęd główny mający bezpośredni wpływ w procesie miesienia ciasta, pobiera najwięcej energii. Jego zadaniem jest powodowanie ruchu obrotowego miesidła oraz ruchu obrotowego dzieży. Dodatkowo musi posiadać dwie prędkości obrotowe: wolne i szybkie.

Napęd podnoszenia miesidła jest niezależny od napędu głównego. Jego zadaniem jest podnoszenie i opuszczanie miesidła do współpracującej dzieży. W zależności od producenta jest odpowiedzialny również za zapinanie wózka z dzieżą. Część urządzeń posiada osobny mechanizm do zapinania wózka z dzieżą.

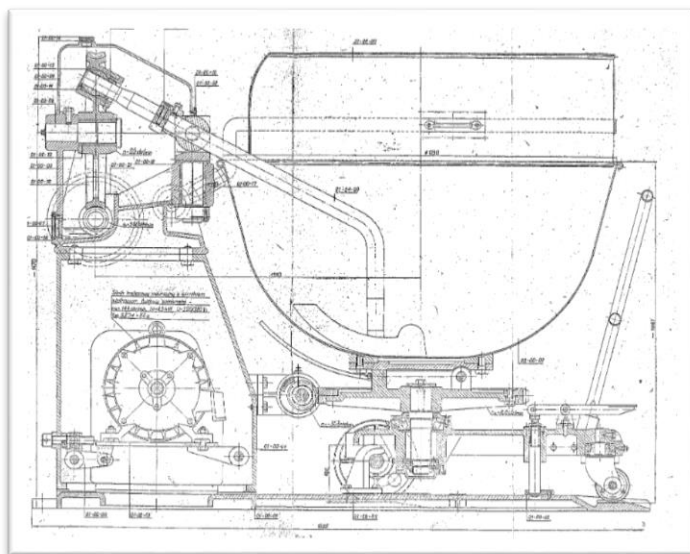
Opis pracy urządzenia: Do dzieży należy przesiać mąkę za pomocą przesiewacza do mąki oraz dodać niezbędne składniki. Kolejno należy podjechać wózkiem z dzieżą, wprowadzając go na prowadnice maszyny. Zapinamy wózek do miasiarki i opuszczamy głowicę. Ustalamy czas miesienia i uruchamiamy napęd główny maszyny. Po zakończeniu miesienia, podnosimy głowicę, odpinamy wózek i odjeżdżamy z gotowym ciastem.

3. Przegląd rozwiązań napędów w miasiarkach do ciasta.

Miasiarki łąpowe to jedne z najstarszych miasiarek do ciasta. Pierwsze modele napędzane były za pośrednictwem pasów transmisyjnych przez maszyny parowe. Istnieje wiele rozwiązań tych urządzeń w zależności od producentów, jednak ich zasada działania jest zbliżona. Miasiarka tego typu przeznaczona jest do wyrabiania ciast żytnich przy wypieku chleba oraz ciast pszennych przy wypieku strucli, bułek itp. Sposób jej pracy pozwala na zastosowanie do przerobu mas mięsnych na kiełbasy oraz w przemyśle chemicznym przy wyrobie maści, past, farb, kitu lub innych substancji. To urządzenie jest do dziś spotykane w niewielkich rodzinnych piekarniach, często można zobaczyć tego typu urządzenia jeszcze przedwojenne będące w ciągłej eksploatacji. Działanie takiego urządzenia opiera się na mocy przekazywanej z silnika elektrycznego za pomocą pasów klinowych na wał górnego ślimaka. Ślimak napędza koło ślimakowe, w którym ułożyskowany jest mimośrodowo za pomocą przegubu koniec ramienia mieszadła. Mieszadło podparte jest w widelkach czopami, a wolny koniec zakrzywiony jest ku dołowi i zakończony ostrogą. Podczas swojej pracy zakreśla koło w płaszczyźnie pionowej wykonując 25 obr/min, w dzieży miasiarki na wózku, który unieruchomiony jest za pomocą rygla w płycie fundamentowej. Z wałka ślimaka górnego przenoszony jest moment obrotowy za pomocą pasów klinowych na wałek ślimaka dolnego. Na obrotowej dzieży wózka zamocowany jest pierścień ślimakowy, który współpracując w obracającym się ślimakiem dolnym powoduje obracanie się dzieży wraz obracającym się mieszadłem. Osłony miasiarki pełnią dwie funkcje: osłaniają przed rozrzucaniem urabianego ciasta przez mieszadło oraz w przypadku uniesienia osłony następuje zatrzymanie pracy mieszadła poprzez rozłączenie sprzęgła na górnym ślimaku. Dzieżą można zjechać z miasiarki, gdy ostroga mieszadła jest w górnym położeniu. Ustawia się je pokręcając w odpowiednim kierunku kołem ręcznym. Dla dokładnego wyczyszczenia resztek ciasta, dzieża miasiarki wyposażona jest w urządzenie zawiasowe, które pozwala na przechylenie w jej dogodne położenie. Po odryglowaniu zawiasów poprzez naciśnięcie na krawędź przechyla się dzieżę. Po oczyszczeniu dzieży należy przywrócić jej normalne położenie, ryglując zawiasy dzieży do korpusu koła ślimakowego. Urządzenia są dostępne o pojemnościach dzieży 300L lub 450L. Poniżej przedstawiono miasiarkę łąpową o pojemności dzieży 450L.

Miasiarki widelcowe są to najpopularniejsze urządzenia w polskich piekarniach posiadające mieszadło w kształcie widelca. Jest to urządzenie składające się z czterech zasadniczych zespołów:

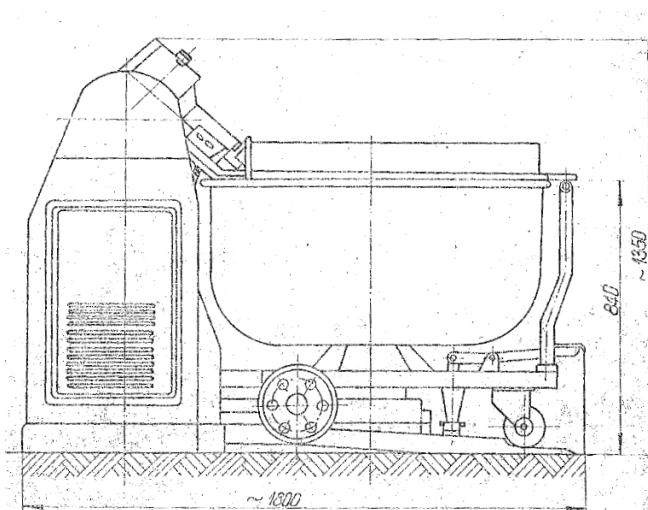
- a) Zespół korpusu,
- b) Zespół płyty fundamentowej,
- c) Zespół głowicy
- d) Zespół podnoszenia głowicy.



Rys. 1. Widok ogólny mikiarki do ciasta typ MORA-M3.

Korpus maszyny odlany jest z żeliwa i jego zadaniem jest zamocowanie zespołu głowicy, zespołu podnoszenia głowicy oraz elementów pomocniczych. Na górnej płycie głowicy przykręcane są dwa wsporniki z łożyskami ślizgowymi w których umieszcza się zespół głowicy oraz mechanizm podnoszenia głowicy. Na przedniej, wystającej części korpusu osadzone są dwa kły służące do ustalenia położenia wózka z dzieżą podczas miesienia ciasta. W bocznej części korpusu wyodrębniona jest odpowiednia przestrzeń do zamocowania skrzynki elektrycznej, a z lewej strony wykonany jest dodatkowy wypust z tablicą przycisków sterowniczych. Dla zapewnienia prawidłowego sterowania urządzenia na górnej powierzchni korpusu po prawej stronie przykręcone są dwa wyłączniki krańcowe wyłączające samoczynnie napęd podnoszenia miesiśla oraz wyłącznik krańcowy włączający napęd główny jedynie w dolnym położeniu miesiśla. Ponadto na tylnej ścianie korpusu przykręcono silnik do napędu podnoszenia miesiśla z odpowiednim mechanizmem powodującym napinanie pasów napędowych. Korpus przykręcony jest do płyty fundamentowej, również odlanej z żeliwa za pomocą czterech śrub. Płyta ukształtowana jest do postaci odpowiedniej płaskiej skrzynki. W jej tylnej części na odchylanej ramie zamontowany jest dwubiegowy silnik główny, a w przedniej części przykręcona jest przekładnia ślimakowa, która powoduje obracanie dzieży zapiętego wózka. Napęd z silnika głównego przekazywany jest poprzez paski klinowe na wał ślimaka zespołu głowicy. W głowicy umieszczona jest przekładnia ślimakowa, ślimak napędza ślimacznice osadzoną na wale, a po drugiej stronie wału osadzone jest miesiśło. Na wale ślimaka głowicy umieszczono dodatkowe koło pasowe umożliwiające przekazywanie napędu poprzez paski klinowe na przekładnię pośredniczącą, która przez łańcuch drabinkowy napędza wał ślimaka przekładni dolnej. Za pośrednictwem obracającej się ślimacznicy poprzez sprzęgło kłowe, następuje obracanie się dzieży osadzonej na wózku. W ten sposób uzyskuje się równoczesny obrót miesiśla oraz dzieży. Dodatkowo w przedniej części płyty jest przykręcony segment pozwalający za zapinanie wózka. Zespół podnoszenia miesiśla składa się z zablokowanej śruby oraz obrotowej nakrętki. W wyniku obrotu nakrętki śruba przesuwa się w dół lub w górę w zależności od kierunku obrotu nakrętki. Nakrętka napędzana jest za pomocą przekładni zębatej stożkowej oraz przekładni pasowej połączonej z silnikiem elektrycznym. Maszyna posiada dodatkowo osłony zabezpieczające. Wózek z dzieżą posiada trzy koła, z czego przednie pojedyncze jest skrętne, pozwalające do kierowania wózkiem podczas jazdy trzymając za kierownicę. Dodatkowo w środkowej części wózka w odpowiednim gnieździe osadzony jest przesuwany sworzeń, który służy do zablokowania wózka w płycie maszyny. Sworzeń przesuwany jest za pomocą połączenia przegubowego z pedałem,

uruchamianym przez operatora maszyny. Pojemność dzieży to 300L lub 500L. Poniżej przedstawiono widok urządzenia.

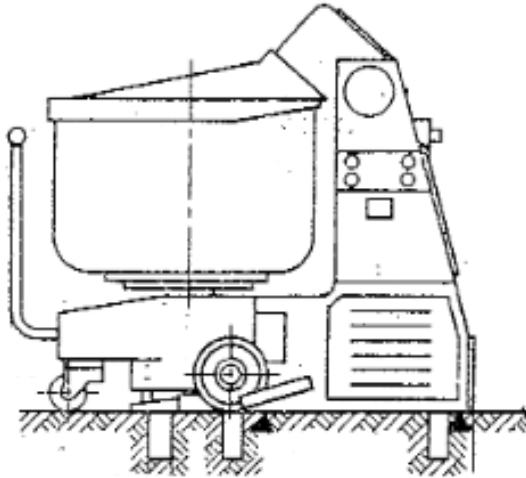


Rys. 2. Widok ogólny miesiarki widelcowej XUN-2.

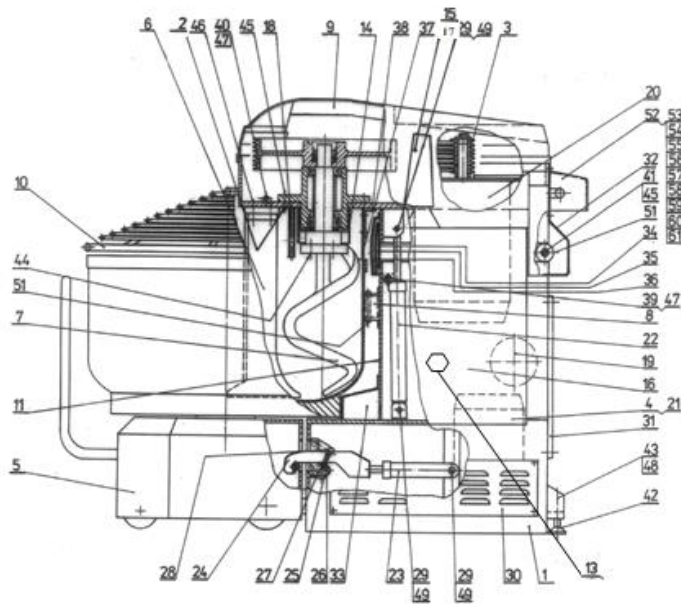
Miesiarka kątowa to druga pod względem najpopularniejszych urządzeń w polskich piekarniach. Przeznaczona do różnych rodzajów ciasta. Maszyna mocowana na stałe na płycie fundamentowej, a dzieża jest dostawna. Głowica miesiarki wraz z miesidłem i pokrywą jest wychylna. Opuszczenie głowicy jest możliwe, gdy nastąpi trwałe połączenie miesiarki z dzieżą za pomocą dźwigni ryglowania dzieży. Uruchomienie napędu głównego miesidła możliwe jest dopiero po opuszczeniu głowicy z miesidłem i pokrywą. Zasada działania polega na wprawieniu w ruch obrotowy miesidła za pomocą przekładni ślimakowej w głowicy, która napędzana jest przez silnik główny poprzez paski klinowe. Dodatkowo na silniku głównym zamocowano dodatkowe koło pasowe, dzięki któremu za pomocą paska klinowego napędzany jest dolny ślimak. Na wale obrotowej dzieży zamontowano koło zębate, które we współpracy z dolnym ślimakiem powoduje obrót dzieży. Podnoszenie i opuszczanie głowicy realizowane jest za pomocą silnika małej mocy z reduktorem. Następnie z reduktora za pomocą łańcucha napędzany jest ślimak zamontowany w korpusie miesiarki. Do bocznej części głowicy zamontowano segment ślimacznicy który we współpracy ze ślimakiem powoduje obrót głowicy. Rozróżnia się kilka wersji urządzenia o pojemności 180L, 270 L i 500L. Poniżej przedstawiono widok ogólny tego urządzenia.

Miesiarki spiralne są to urządzenia obecnie produkowane i użytkowane szczególnie do ciast piekarniczych o średniej konsystencji, zawierających przynajmniej 40% wody. Istnieje kilku producentów tych urządzeń zarówno krajowych jak i zagranicznych. Niezależnie od konstrukcji zasada działania tych urządzeń jest podobna. Mieszalka składa się z korpusu stalowego, w którym umieszczone są mechanizmy pozwalające na przeniesienie napędu na spiralę roboczą, napędu obracającego dzieżę oraz układu hydraulicznego którego zadaniem jest przyciągnięcie dzieży do miesiarki oraz podniesienie i opuszczenie głowicy ze spiralą. Napęd miesidła złożony jest z silnika głównego oraz przekładni pasowej, znajdujących się w głowicy miesiarki. Napęd dzieży składa się z silnika oraz w zależności od producenta przekładni pasowej lub reduktora, który napędza podatne koło cierne. Na obracającej się dzieży, zamontowanej na wózku, znajduje się stalowe koło cierne, które podczas współpracy w podatnym kołem ciernym wprowadza dzieżę w ruch obrotowy. Układ hydrauliczny służący do przyciągania wózka składa się z zasilacza hydraulicznego, rozdzielacza hydraulicznego oraz w zależności od producenta jednego lub dwóch siłowników z hakami na końcu służącymi do trzymania wózka. Układ podnoszenia głowicy również w zależności od producenta składa się z jednego lub dwóch siłowników unoszących głowicę oraz rozdzielacza hydraulicznego. Do zasilania zarówno układu podnoszenia jak i przyciągania wózka wykorzystywany jest ten sam zasilacz hydrauliczny. Opuszczanie głowicy jest możliwe dopiero po zapięciu wózka, a jego odpięcie

realizowane jest dopiero po uniesieniu głowicy. Poniżej przedstawiono miasarkę spiralną z siłownikami należącymi do układu hydraulicznego. W (Tab. 1) podano opis elementów zaznaczonych na (Rys. 4).



Rys. 3. Widok ogólny miasarki kątovej typ GMN-20.06.



Rys. 4. Widok ogólny miasarki spiralnej typ SM 250R.

Tab. 1. Oznaczenie elementów miesiarki SM 250R.

L.p.	Opis
1.	Korpus
2.	Ośłona górna
3.	Napęd spirali
4.	Napęd rolki
5	Wózek
6	Zgarniacz
7	Spirala
8	Rolka oporowa
9	Pokrywa górna
10	Ośłona dzieży (siatka)
11	Ośłona przednia
12	Czujnik temperatury
13	Moduł sterowniczy
14	Ośłona spirali
15	Moduł pulpitu sterującego
16	Skrzynka elektryczna
17	Pulpit sterowniczy
18	Instalacja wodna
19	Agregat hydrauliczny
20	Silnik napędu spirali
21	Silnik napędu kotła
22	Siłownik podnoszenia
23	Siłownik dociągania wózka
24	Ramię hakowe
25	Wspornik ramienia hakowego
26	Sprężyna
27	Rolka dolna
28	Rolka górna
29	Sworzeń
30	Ośłona boczna
31	Ośłona tylna
32	Ośłona zawiasów
33	Ośłona rolki napędowej
34	Ośłona wewnętrzna

35	Oślona środkowa
36	Oślona zewnętrzna
37	Oślona dzieży pionowa
38	Wspornik osłony
39	Mimośród osłony środkowej
40	Mimośród osłony dzieży
41	Tulejka osłon
42	Stopka
43	Śruba poziomująca
44	Śruba M16 lub M18
45	Śruba M12
46	Śruba zgarniacza
47	Śruba M8
48	Nakrętka M20
49	Pierścień osadczy
50	Podkładka
51	Smarownicza

Instalacja wodna – opcja wykonania

52	Oślona wodomierza
53	Rura
54	Wodomierz
55	Elektrozawór
56	Mufa redukcyjna
57	Przedłużka redukcyjna
58	Kolanko
59	Nypel
60	Opaska
61	Łącznik wodomierza

Zasilacze hydrauliczne w tych urządzeniach posiadają pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym o których szerzej można dowiedzieć się w lit (Kollek 1996; Kollek i Maćkiewicz 1999; Osiński 2013) oraz zbiorniki oleju o pojemności od 5 do 6,5L. Ciśnienie maksymalne w układzie to 140 bar, a ciśnienie robocze to 120 bar.

4. Podsumowanie

W powyższym artykule zostały przedstawione urządzenia do mieszenia ciasta. Począwszy od tych najstarszych, które swój początek wzięły od maszyn napędzanych przez maszyny parowe. Kolejne to produkowane w latach 80 XX wieku, aż do około 2005 roku. Obecnie coraz więcej wprowadza się mieszalnik spiralnych, ze względu na lepsze napowietrzanie ciasta oraz szybkość

mieszania. W pierwszych urządzeniach prędkość mieszania wynosiła ok 25 obr/min, a tych obecnie produkowanych osiąga się prędkość nawet 200 obr/min, czyli ośmiokrotnie większą prędkość mieszania. Dodatkowo zmiana technologii wytwarzania pieczywa poprzez wprowadzenie spulchniaczy i polepszaczy wymusiło zwiększenie prędkości miesienia ciasta. Ponadto zmiana technologii spowodowała usztywnienie ciasta i starsze maszyny nie mogą sprostać tym wymaganiom. W mieszalnikach widelcowych prędkość mieszania jest wystarczająca, ale za to główne wał napędowy ulega urwaniu w wyniku zbyt małej wytrzymałości zmęczeniowej oraz mocowanie wózka jest zbyt luźne. W mieszalnikach kątowych mocowanie wózka jest sztywne i pozostałe elementy są wytrzymałe, ale prędkość miesienia jest zbyt mała. Budowa miesiarek spiralnych opiera się na budowie miesiarek kątowych. Wprowadzenie kompletnych zasilaczy hydraulicznych pozwoliło na zastosowanie układów hydraulicznych do zapinania wózka oraz podnoszenia głowicy w miesiarkach. Dzięki temu uzyskano sztywne zamocowanie wózka oraz sztywne dociśnięcie głowicy do korpusu maszyny. Dodatkowo niewątpliwą zaletą układów hydraulicznych jest odporność na zanieczyszczenia w stosunku do mechanizmów śrubowych, mimośrodowych, ślimakowych lub zapadkowych stosowanych w starszych urządzeniach. Następnie wprowadzono większy silnika do napędu miesidła aby uzyskać większą prędkość miesienia. Pierwsze urządzenia posiadają główny silnik napędowy o mocy 4,5 kW, a tych obecnych moc wzrosła do 14 kW przy tej samej pojemności dzieży. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano rozwój mikrohydrauliki, która szeroko opisana jest w lit. (Kollek i in. 2014). W wyniku ciągłych ulepszeń wprowadzanych do układów hydraulicznych przewiduje się wzrost zainteresowania do wprowadzania ich do układów napędowych urządzeń przemysłu spożywczego.

5. Literatura

- Kollek W, Osiński P, Stosiak M, Wilczyński A, Cichon P (2014) Problems relating to high-pressure gear micropumps, Archives of Civil and Mechanical Engineering (14) 2014, 88-95.
- Kollek W (1996) Pompy zebate, konstrukcja I eksploatacja. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1996, 10-21.
- Kollek W, Maćkewicz J (1999) Teoria I obliczanie pomp zębatych, Kadłuby I układy napięte wstępnie, Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1999,13-22.
- Osiński P (2013) Wysokociśnieniowej niskopulsacyjne pompy zebate o zazezieniu zewnętrznym, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2013, 27-66.

Recenzenci rozdziałów w monografiach z kolekcji ISBN 978-83-65677-93-8:

dr hab. Damian Absalon, dr Jan Andrzejewski, prof. dr hab. Krzysztof Anusz, dr hab. inż. Piotr Arlet, dr hab. Katarzyna Bagan-Kurluta, dr hab. Maciej Barczewski, dr inż. Jacek Bartman, dr hab. inż. Marian Bartoszek, dr inż. Justyna Batkowska, dr inż. Piotr Bąska, dr hab. Teresa Bednarczyk, dr Jerzy Bednarski, dr Katarzyna Bergier, dr inż. Agnieszka Bielaszka, prof. dr hab. inż. January Bień, dr Barbara Bilewicz-Kuźnia, dr inż. Mariola Błaszczyk, dr Tomasz Błądek, prof. dr hab. Jacek Błęszyński, dr hab. Adam Bobryk, dr Michał Borodo, dr inż. Marta Borowska, dr inż. Tomasz Brynk, prof. dr hab. Jarosław Całka, dr Beata Całyniuk, dr hab. Witold Chabuz, dr hab. Piotr Chępiński, dr Dorota Chrobak-Chmiel, dr Agnieszka Chruścikowska, dr hab. Andrzej Ciążela, prof. dr hab. Jan Cielichowski, dr hab. inż. Adam Cwudziński, prof. dr hab. inż. Anna Cysewska-Sobusiak, dr Paweł Czarniecki, dr hab. Ewa Katarzyna Czech, dr inż. Małgorzata Czichy, dr inż. Klara Czyńska, dr Krzysztof Damaziak, dr hab. Paweł Daniel, dr hab. Anna Doliwa-Klepcka, dr Wioleta Drobik-Czwaro, prof. dr hab. Leszek Drodz, dr Renata Dudziak, prof. dr hab. inż. Włodzimierz Dudziński, dr inż. Krzysztof Durka, dr hab. Marzena Dyjakowska, dr Gabriela Dyrda, dr Magdalena Dziedzic, dr hab. Małgorzata Dzierżęcka-Gappa, dr inż. Małgorzata Dzieciół, prof. dr hab. inż. Marek Dziubiński, dr Marcin Dziwisz, prof. dr hab. Leonard Etel, dr hab. Beata Feledyn-Szewczyk, dr Wiesław Fidecki, dr hab. Marek Figura, dr hab. Paweł Filipiak, dr Piotr Filipiak, dr Jarosław Frączak, dr hab. Magdalena Gajęcka, dr inż. Mariusz Gamracki, prof. dr hab. Ryszard Gerlach, dr Artur Giełdoń, dr Wojciech Glac, prof. dr hab. Tomasz Głowiński, prof. dr hab. Agnieszka Gmitrowicz, dr hab. Sławomir Gonkowski, prof. dr hab. Józef Górniewicz, ks. prof. dr hab. Krzysztof Gózdź, dr Marcin Grąz, dr hab. Joanna Hawlena, dr Iga Hołyńska-Iwan, dr Magdalena Jaciow, dr Magdalena Jankowska-Wajda, dr inż. Tomasz Jankowski, dr inż. Paweł Jelec, dr hab. Andrzej Junkuszew, dr Agata Kabała-Dzik, dr Alena Kacmarova, dr Marta Kaczmarek-Ryś, dr hab. Hanna Karakuła-Juchnowicz, dr inż. Robert Kasner, prof. dr hab. inż. Nina Kazhar, dr inż. Krzysztof Kaziński, dr inż. Agata Kiciak, dr Dominika Kidaj, prof. dr hab. Marek Klimek, dr Joanna Klonowska, dr hab. Zbigniew Kobus, dr hab. Beata Kolny, dr Przemysław Kołodziej, dr inż. Bogusław Kołodziejewski, dr hab. Jerzy Kopiński, dr Agnieszka Korchut, dr Grzegorz Korcyl, dr Monika Kornacka, dr hab. inż. Marta Kosior-Kazberuk, dr inż. Łukasz Kotwica, dr hab. Małgorzata H. Kowalczyk, dr Kamil Kowalski, prof. dr hab. Wojciech Kowalski, dr hab. Katarzyna Kozłowicz, dr hab. Piotr Krakowiak, dr Marlena Krawczyk-Suszek, dr hab. Marta Krenz-Niedbała, ks. dr hab. Piotr Kroczek, dr inż. Karol Król, dr Celina Kruszynska-Rajs, dr inż. Krzysztof Krzysztofowicz, dr Waldemar Kuczma, dr inż. Edyta Kudlek, dr Joanna Kula-Gradziak, dr hab. inż. Andrzej Kulig, dr inż. Tomasz Kulpa, dr Marcin Kunecki, dr hab. inż. Robert Kunkel, dr hab. Małgorzata Kwiecień, dr Marzanna Lament, prof. dr hab. Katarzyna Laskowska, dr inż. Magdalena Lech, dr inż. Justyna Libera, prof. dr hab. Tadeusz Linkner, prof. dr hab. Anna Lityńska, dr hab. Wiesław Lizak, dr inż. Aneta Lorek, dr hab. inż. Magdalena Janus, dr Tariq Mahmood, dr inż. Ewa Malczyk, dr hab. inż. Justyna Martyniuk-Pęczek, dr Sławomir Maślanka, dr hab. Jacek Matulewski, dr Artur Mazurek, dr Anna Michalska-Bańkowska, dr inż. Paweł Michalski, prof. dr hab. Jan Miciński, dr hab. ks. Bogusław Migut, dr hab. Krzysztof Mikołajczuk, dr Barbara Milewicz-Bednarska, prof. dr hab. inż. Piotr Miller, dr hab. Maria Mocarz-Kleindienst, dr Sylwia Mojsym-Korybska, dr Marta Mozgawa-Saj, dr inż. Adam Mroziński, dr hab. Dorota Narożna, dr hab. Oktawian Nawrot, prof. dr hab. Stanisław Sławomir Nicieja, dr Joanna Nieć, prof. dr hab. Mateusz Nieć, dr Jacek Niedźwiecki, dr hab. Jerzy Nita, dr Katarzyna Nowak, dr hab. Zbigniew Nowak, prof. dr hab. inż. Lucyna Nyka, dr hab. Ireneusz Ochmian, dr inż. Paweł Ogrodnik, dr hab. Dorota Olszewska-Słonina, dr hab. Krzysztof Oplustil, prof. dr hab. inż. Leszek Opyrchal, prof. dr hab. Lucjan Pająk, prof. dr hab. inż. Zbigniew Paszkowski, dr inż. Agnieszka Pawłowska, dr inż. Marek Piątek, dr inż. Paweł Pietrusiewicz, dr Karol Pilorz, dr hab. Monika Pitucha, dr hab. Magdalena Polak-Berecka, dr hab. Renata Polaniak, dr inż. Kornelia Polek-Dvraj, dr Piotr Pomorski, dr inż. Arkadiusz Popławski, dr Agnieszka Potyrańska, dr hab. Krzysztof Pudelko, dr Rafał Raczyński, dr hab. Zenon Rajfur, prof. dr hab. Konrad Rejda, dr hab. Piotr Romańczyk, dr inż. Andrzej Roszkowski, dr hab. Lucyna Rotter, dr Monika Różańska-Boczula, dr inż. Jarosław Rubacha, dr inż. Maciej Rumiński, dr inż. Bogdan Ruszczak, dr hab. Justyna Rybak, dr hab. Stanisław Rybicki, dr Liliana Rytel, dr inż. Martyna Rzelewska, dr inż. Beata Sadowska, prof. dr hab. Zygmunt Sadowski, dr Artur Sajnog, dr Rafał Sawicki, dr hab. inż. Gabriela Siawrys, dr hab. inż. Jarosław Sidun, dr Grzegorz Siebielec, dr hab. inż. Waldemar Skomudek, dr hab. Agnieszka Skowrońska, prof. dr hab. Wojciech Skóra, prof. dr hab. Elżbieta Skrzypek, dr inż. Grzegorz Sławiński, dr hab. Beata Smolik, dr Marta Sobańska, prof. dr hab. Wojciech Sońta, dr hab. inż. Michał Stosiak, dr hab. Maria Straś-Romanowska, dr hab. Alicja Sułek, dr hab. Lech Szczegół, dr inż. Mirosława Szewczyk, dr Sebastian Szklener, dr Agnieszka Szuklarek, dr Łukasz Szleszkowski, dr hab. Magdalena Zulc-Brzozowska, dr hab. Józef Szymański, dr Lidia Szymczak-Mazur, prof. dr hab. inż. Adam Maria Szymski, dr inż. Małgorzata Śmist, dr hab. Janusz Świniarski, dr hab. Bożena Targońska-Stępnik, prof. dr hab. inż. Elżbieta Trocka-Leszczynska, prof. dr hab. Paweł Turzyński, dr inż. Lechosław Tuz, dr hab. Witold Tyborowski, dr inż. Ewa Ura-Bińczyk, dr inż. Krystyna Urbańska, dr inż. Urszula Warzyńska, dr hab. Adam Waśko, dr inż. Dariusz Wawrentowicz, dr hab. Adrian Wiater, dr hab. Jacek Wilczyński, dr Lidia Anna Wiśniewska, dr hab. Piotr Wiśniewski, dr inż. Agnieszka Witecka, dr Wojciech Witkowski, dr inż. Alicja Wodnicka, dr Krzysztof Kamil Wojtanowski, dr hab. Filip Wolański, dr Łukasz Wolko, dr hab. Karolina Wójcik, prof. dr hab. Maria Wróbel, dr inż. Joanna Wyczarska-Kokot, dr Adrian Zając, dr hab. Przemysław Zalewski, dr hab. Jerzy Zalewski, dr hab. Bożena Zawadzka, prof. dr hab. Anna Zdziennicka, prof. Piotr Ziółkowski, prof. dr hab. Dariusz Zlotkowski, dr inż. Maciej Zwierzchowski

W kolekcji „Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce” (ISBN 978-83-65677-93-8) ukazały się:

1. Nauki przyrodnicze - Część I – Żywnienie i żywność
(online: ISBN 978-83-65917-96-6; druk: ISBN 978-83-65917-97-3)
2. Nauki przyrodnicze - Część II (online: ISBN 978-83-65917-99-7; druk: ISBN 978-83-65917-98-0)
3. Nauki przyrodnicze - Część III (online: ISBN 978-83-66139-00-8; druk: ISBN 978-83-66139-01-5)
4. Nauki przyrodnicze - Część IV (online: ISBN 978-83-66139-03-9; druk: ISBN 978-83-66139-02-2)
5. Nauki przyrodnicze - Część V (online: ISBN 978-83-66139-04-6; druk: ISBN 978-83-66139-05-3)
6. Nauki przyrodnicze - Część VI – Ochrona Środowiska
(online: ISBN 978-83-66139-07-7; druk: ISBN 978-83-66139-06-0)
7. Nauki medyczne i nauki o zdrowiu - Część I (online: ISBN 978-83-65917-92-8; druk: ISBN 978-83-65917-93-5)
8. Nauki medyczne i nauki o zdrowiu - Część II (online: ISBN 978-83-65917-95-9; druk: ISBN 978-83-65917-94-2)
9. Nauki techniczne i inżynierskie - Część I – Budownictwo i architektura
(online: ISBN 978-83-66139-08-4; druk: ISBN 978-83-66139-09-1)
10. Nauki techniczne i inżynierskie - Część II (online: ISBN 978-83-66139-11-4; druk: ISBN 978-83-66139-10-7)
11. Nauki techniczne i inżynierskie - Część III (online: ISBN 978-83-66139-12-1; druk: ISBN 978-83-66139-13-8)
12. Nauki techniczne i inżynierskie - Część IV (online: ISBN 978-83-66139-15-2; druk: ISBN 978-83-66139-14-5)
13. Nauki techniczne i inżynierskie - Część V (online: ISBN 978-83-66139-16-9; druk: ISBN 978-83-66139-17-6)
14. Nauki humanistyczne i społeczne - Część I (online: ISBN 978-83-65917-83-6; druk: ISBN 978-83-65917-82-9)
15. Nauki humanistyczne i społeczne - Część II – Ekonomia, działalność gospodarcza i bankowość
(online: ISBN 978-83-65917-84-3; druk: ISBN 978-83-65917-85-0)
16. Nauki humanistyczne i społeczne - Część III (online: ISBN 978-83-65917-86-7; druk: ISBN 978-83-65917-87-4)
17. Nauki humanistyczne i społeczne - Część IV – Pedagogika, edukacja, rodzina
(online: ISBN 978-83-65917-89-8; druk: ISBN 978-83-65917-88-1)
18. Nauki humanistyczne i społeczne - Część V – Prawo i administracja
(online: ISBN 978-83-65917-90-4; druk: ISBN 978-83-65917-91-1)