

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Nauki techniczne i inżynieryjne

Część III



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2018

Redakcja naukowa

dr inż. Jędrzej Nyćkowiak, 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 978-83-66139-12-1)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66139-13-8)

Ilość znaków w książce: 519 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 13.0

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. Zastosowanie metod zarządzania jakością w technologii montażu	7
<i>Borkowski Wojciech, Piórkowski Paweł</i>	
2. Ocena dokładności pozycjonowania pionowego centrum CNC Haas Mini Mill	14
<i>Borkowski Wojciech, Piórkowski Paweł, Jankowski Tomasz, Stembalski Marek</i>	
3. Analiza wpływu warunków środowiskowych na pracę modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego o mocy znamionowej 180 W	20
<i>Dutka Małgorzata</i>	
4. Analiza zjawiska zacienienia ogniw modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego o mocy 245 W w warunkach rzeczywistych	29
<i>Dutka Małgorzata</i>	
5. Badanie wpływu promieniowania jonizującego na skład frakcyjny biodiesla	38
<i>Jarosiński Przemysław, Grabowski Paweł</i>	
6. Katalizatory heterogeniczne używane w transestryfikacji olejów roślinnych	46
<i>Jarosiński Przemysław, Kajkowski Dawid</i>	
7. Kompensacja temperaturowa w systemach elektrooptycznych jako metoda redukcji błędów przy pomiarach dużych prądów i wyładowań atmosferycznych	53
<i>Kossowski Tomasz</i>	
8. Przetwarzanie sygnału w czasie nierzeczywistym jako metoda niwelowania zakłóceń indukowanych w linii transmisyjnej przy pomiarach dużych prądów	60
<i>Kossowski Tomasz</i>	
9. Wykrywanie oraz eliminacja błędów grubych w pomiarach piezometrycznych zapory Dobczyce w wieloleciu 2012-2016	67
<i>Stanisław Lach</i>	
10. Interpretacja wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych na zaporze Klimkówka w roku 2015	76
<i>Stanisław Lach, Katarzyna Angielska</i>	
11. Basen to nie tylko niecka z wodą - cz. 1. Wymagania stawiane wodzie basenowej.	85
<i>Lempart Anna, Kudlek Edyta, Dudziak Mariusz</i>	
12. Basen to nie tylko niecka z wodą - cz. 2. Instalacje oczyszczania wody basenowej.	91
<i>Lempart Anna, Kudlek Edyta, Dudziak Mariusz</i>	
13. Metodyka oznaczania zawartości węglowodorów w wodach powierzchniowych	98
<i>Oliwia Liberek, Dawid Kajkowski, Tomasz Czyżewski, Renata Fabianowicz, Iza Strzelczak, Zachariasz Chabowski, Patrycja Kalbarczyk, Mateusz Bębenista, Karol Adamski, Ada Stanuszkiewicz, Paweł Grabowski</i>	
14. Badanie zawartości węglowodorów w jeziorach wokół miasta Płocka	104
<i>Oliwia Liberek, Dawid Kajkowski, Tomasz Czyżewski, Renata Fabianowicz, Iza Strzelczak, Zachariasz Chabowski, Patrycja Kalbarczyk, Mateusz Bębenista, Karol Adamski, Ada Stanuszkiewicz, Paweł Grabowski</i>	
15. Biosurfaktanty lipopeptydowe: produkcja, właściwości i zastosowanie	111
<i>Łomińska Marta, Legawiec Krzysztof Jan, Bastrzyk Anna</i>	
16. Strategie utrzymania ruchu w zakładach produkcyjnych	119
<i>Grzegorz Piecuch</i>	
17. Uniwersalne narzędzie diagnostyczne do detekcji niewyważenia wrzeciona CNC	126
<i>Grzegorz Piecuch</i>	

18. Kierunki rozwoju metod zarządzania jakością w technologii montażu	133
<i>Piórkowski Paweł, Borkowski Wojciech</i>	
19. Możliwości efektywnego wykorzystania pracowników w technologii montażu ręcznego	139
<i>Piórkowski Paweł, Borkowski Wojciech</i>	
20. Zadania optymalizacyjne w elektroenergetyce	146
<i>Karol Sidor</i>	
21. UAV jako multiplatforma do pomiarów środowiskowych	154
<i>Sławomir Szymocha</i>	
22. Metody dezodoryzacji w wybranych zakładach przetwarzania odpadów	161
<i>Wiśniewska Marta</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 najmłodsi 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. Zastosowanie metod zarządzania jakością w technologii montażu

Applying quality management in assembly technology

Borkowski Wojciech, Piórkowski Paweł

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wacław Skoczylski, prof. nadzw. PWR

Wojciech Borkowski: wojciech.borkowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: Six Sigma, TQM, Lean, 5S

Streszczenie

Artykuł opisuje metody zarządzania jakością, które aktualnie stanowią podstawowe narzędzia pomocnicze w firmach zajmujących się szeroko pojętą technologią montażu. Narzędzia te są niezbędne w uzyskaniu przewagi konkurencyjnej nad firmami organizującymi pracę nad montażem w tradycyjny sposób. W pracy zostaną opisane podstawowe metody oraz filozofie, które ułatwiają organizację procesów montażowych, rozdzielanie zadań, poprawiają skuteczność procesów montażu, zwiększają niezawodność, pozwalają oszczędzić czas, a przede wszystkim środki finansowe. Mimo tego, że wymagają poniesienia pewnych wkładów finansowych oraz wysiłków ze strony, nie tylko kadry zarządzającej, ale również każdego pojedynczego pracownika w przedsiębiorstwie, starania podjęte na rzecz poprawy jakości skutkują w dłuższej perspektywie pozytywnymi rezultatami.

W pracy opisane zostaną między innymi: filozofie: Six Sigma, Lean oraz TQM, a także wspomagające je metody, takie jak 5S, Diagram Ishikawy i Poka-Yoke,. Zostaną one przedstawione nie tylko pod kątem zarządzania jakością i ich teoretycznych założeń, ale także omówione pod względem możliwych zastosowań w przedsiębiorstwach montażowych. Stosowanie tych metod jest bowiem niemal codziennością w największych firmach zajmujących się montażem.

1. Wstęp

Produkcja i montaż wyrobów dla firm staje się coraz większym wyzwaniem organizacyjnym. Z jednej strony pojawiają się nowe technologie i możliwości wytwarzania nowych dóbr, z drugiej rosną wymagania klienta, co skutkuje zmniejszaniem się wielkości serii wyrobów, a w konsekwencji problemami organizacyjnymi. Przedsiębiorstwa mają coraz większe problemy z poprawnym zaplanowaniem prac montażowych, gdyż zajmują się coraz mniejszymi partiami wyrobów, mają powiązania z coraz większą liczbą dostawców, wymagają od pracowników coraz większej wszechstronności i są uzależnione od coraz większej liczby czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Przyczyny te sprawiają, że w przedsiębiorstwach montażowych konieczne stało się wprowadzanie narzędzi organizacyjnych, wspierających ich działania w zakresie procesów montażowych.

Jedną z dróg, na którą się zdecydowano było postawienie na metody zarządzania jakością. Dobre praktyki zaobserwowane w Japonii, która jako pierwsza zaczęła kłaść nacisk na jakość, dzięki czemu dość szybko uzyskała przewagę konkurencyjną nad swoimi rywalami z USA oraz Europy Zachodniej sprawiły, że wprowadzenie metod zarządzania jakością stało się koniecznością, gdyż pozostanie przy starych praktykach zarządzania skazywało często firmy na porażkę na wolnym rynku. Jednocześnie na wprowadzeniu metod zarządzania jakością korzystali klienci, gdyż rywalizacja w dziedzinie jakości pomiędzy firmami montażowymi skutkowało lepszym montażem wyrobów.

Aktualnie najważniejszymi zadaniami, przed jakimi stoją firmy montażowe, a jednocześnie najważniejszymi powodami, dla których stosuje się metody zarządzania jakością, są: konieczność zmniejszenia awaryjności linii, gniazd i stanowisk montażowych, tak aby ograniczyć do minimum konieczne przestoje, zwiększenie elastyczności gniazd, linii i stanowisk montażowych, tak aby na każdym z nich można było montować jak największą grupę wyrobów oraz zmniejszenie liczby pomyłek, błędów i usterek skutkujących wyjściem z linii montażowej wadliwych produktów.

2. Przegląd literatury

2.1 Six Sigma

Metoda ta odpowiada przede wszystkim za ograniczenie liczby błędów. Powstała w latach 80-tych w firmie Motorola, ale największą popularność zdobyła kilkanaście lat później. W montażu stosuje się ją między innymi w celu obniżenia wysokości kosztów montażu, poprzez ograniczenie bądź zminimalizowanie kosztów wynikających konkretnie z: (Popławski, 2009)

- kosztów godzin nadliczbowych
- kosztów powtórnych prób,
- kosztów spowodowane przez opóźnienie dostaw,
- kosztów montażu w toku,
- kar za niedotrzymanie terminów

W systemie Six Sigma należy na bieżąco i w sposób ciągły analizować proces montażu oraz wprowadzać do niego zmiany, których celem będzie zmniejszenie liczby braków w procesie montażu. W swojej nazwie, metoda ma już wpisany cel obniżania liczby braków. Sześć odchyień standardowych, czyli 34 braki na milion wyprodukowanych sztuk wyrobów. Tak mała liczba wynika z liczby czynności, które wykonuje się na liniach montażowych. Przy mniejszej niezawodności szansa na wyprodukowanie w pełni poprawnego wyrobu byłaby niewielka. Przy 1500 połączeniach montażowych i niezawodności montażu wynoszącej 99%, szanse na wyprodukowanie poprawnego wyrobu są bliskie zeru. Przy niezawodności montażu wynoszącej 34 błędy na milion, to prawdopodobieństwo rośnie z poziomu zera aż do 99,5%. A im bardziej skomplikowane procesy montażowe i im więcej części wchodzi w skład danego urządzenia, tym te wartości będą niższe. Niezawodność montażu jest zatem kluczowa, jeżeli chce się uzyskać powtarzalne wyroby o odpowiedniej jakości.

System Six Sigma nakazuje, by każda pojedyncza czynność montażowa była traktowana, jako osobny proces i w ten właśnie sposób analizowana pod kątem możliwego popełnienia błędu oraz sposobów, jak tych błędów uniknąć. Uszkodzenie śruby podczas wkręcania, zastosowanie nieodpowiedniej ilości kleju, pominięcie jednej z operacji montażowych w procesie montażu. Na każdym etapie procesu można się spotkać z różnymi błędami, które będą rzutowały na jakość końcowego wyrobu (Wrona i Wrona 2009). Aby system Six Sigma zadziałał, nie wystarczy zatem wyłącznie zmienić organizację pracy, nie wystarczy, by to kadra inżynierska oraz zarządzająca wprowadziła zmiany. Konieczne jest zapoznanie z systemem Six Sigma pracownika i przekonanie go do tego, by na bieżąco analizował procesy montażowe, które wykonuje. Z tego powodu wdrożenie systemu Six Sigma jest dość czasochłonne oraz drogie, w związku z czym zaleca się, aby stosowały go firmy stabilne oraz bogate, gdyż nim Six Sigma zacznie przynosić zyski, trzeba będzie ponieść pewne nakłady, które nie zwrócą się w krótkim czasie. Jeżeli firmy będą cierpliwie i konsekwentnie ufać filozofii Six Sigma, to w efekcie powinny spodziewać się zwiększenia niezawodności montażu, obniżenia jego kosztów oraz wzrostu zadowolenia klienta z jakości produkowanych wyrobów.

2.2 Total Quality Management

TQM jest filozofią, która zakłada zorientowanie całego przedsiębiorstwa na jakość. Filozofia ta ma swoje początki już w latach 20-tych XX wieku, ale przez wiele lat nie była stosowana jako całość. Dopiero bardzo dobre rezultaty zorientowania na jakość, które pokazała firma Toyota sprawiły, że na Zachodzie powrócono do tej filozofii. TQM nie jest metodą, ani zbiorem metod, ale zupełnie innym spojrzeniem na pojęcie jakości i cele działania firmy. Tradycyjne podejście do jakości sugerowało, że istnieje pewien punkt optymalny pomiędzy kosztami poniesionymi na jakość, a zyskami przedsiębiorstwa związanymi z poprawą jakości. Podejście TQM mówi natomiast, że postawienie na jakość zawsze w perspektywie długoterminowej obniża koszty montażu i zawsze warto jest walczyć o poprawę jakości procesów w przedsiębiorstwie.

W TQM zakłada się, że wszyscy pracownicy zaangażują się w działania na rzecz poprawy jakości w firmie. Dotyczy to nie tylko pracowników pracujących bezpośrednio przy procesach montażowych, ale także całego ich otoczenia łącznie z działami w firmie, które są bardzo luźno związane z montażem. Efektem takiego zaangażowania będzie obniżenie kosztów działania

przedsiębiorstwa. Aby móc korzystać w pełni z filozofii TQM firmy powinny połączyć zachodni i wschodni model zarządzania i stworzyć pewnego rodzaju hybrydę. Na ten moment wciąż jeszcze mamy do czynienia z faktem dominacji jednego z tych modeli w różnych firmach, co nieco ogranicza możliwość korzystania z filozofii TQM. Idealnym rozwiązaniem byłoby połączenie zachodniego przywództwa i orientacji na klienta z wschodnim systemowym podejściem do zarządzania i ciągłym doskonaleniem się.

Połączenie zachodniego i wschodniego modelu zarządzania daje osiem podstawowych zasad TQM, na których opiera się ta filozofia (Hamrol i Mantura 2002):

- orientacja na klienta
- przywództwo
- zaangażowanie pracowników
- podejście procesowe
- systemowe podejście do zarządzania
- ciągłe doskonalenie
- podjęcie decyzji w oparciu o fakty
- obustronne korzystne relacje z dostawcami

2.3 Lean Management

Lean Management to najmłodsza z opisanych w artykule filozofii zarządzania jakością, która powstała około 20 lat temu, kiedy została przedstawiona koncepcja szczupłego zarządzania, która sprawia, że przy malejących kosztach montażu można pozwolić sobie na produkowanie coraz większej liczby wyrobów (Womack i in. 1991). Od tego czasu jej popularność rośnie, a największe firmy starają się wprowadzić u siebie model zarządzania Lean. Głównym celem tej filozofii jest wyeliminowanie z procesu montażu wszystkich czynności, które nie dodają wartości wyrobowi, tak aby każda z czynności, którą wykonuje się w przedsiębiorstwie dodawała wartość do produkowanego przedmiotu.

Efektem wprowadzenia filozofii Lean w przedsiębiorstwie jest znaczące obniżenie kosztów montażu, wynikających z eliminacji kosztów związanych z czynnościami, które w procesie montażu były zbędne. Dzięki temu znacząco rośnie konkurencyjność przedsiębiorstwa, które może montaż danego wyrobu wykonywać taniej niż inne firmy. W efekcie rosną również zyski przedsiębiorstwa i jego pozycja na rynku. Aby uzyskać wyżej wymienione efekty należy wdrożyć w firmie następujące metody zarządzania jakością (Stadnicka 2011):

- 5S
- SMED
- TPM
- Kanban
- Poka-Yoke
- JIT

Powyższe metody, z których część została opisana w dalszej części artykułu, znane były już wcześniej, ale w koncepcji szczupłego zarządzania powinny zostać wdrożone jednocześnie, w tym samym czasie, tak aby uzyskać najlepsze efekty ich wzajemnego współdziałania. Powyższa koncepcja jest powodem tego, że bardzo wiele firm rezygnuje z wprowadzania Lean Management przeważnie z powodu poważnych wad na początkowym etapie. Wprowadzenie kilku metod zarządzania jakością jednocześnie powoduje prawdziwą rewolucję w działaniu przedsiębiorstwa, co może sprawiać sporo problemów, zwłaszcza pracownikom niższego szczebla, których liczba obowiązków gwałtownie rośnie. Istnieje duży opór ze strony monterów, którzy zamiast zajmować się procesem montażu, angażują się w realizację i wprowadzanie kilku metod zarządzania jakością jednocześnie. System Lean musi być na bieżąco audytowany, co przyczynia się do jeszcze większego zakresu obowiązków pracowników i dodatkowego obciążenia ich stresem. Zyski w postaci niższych kosztów funkcjonowania przedsiębiorstwa pojawiają się dopiero po jakimś czasie i nie każda firma ma na tyle cierpliwości, by doczekać do momentu, w którym Lean przynosi zyski. Niemniej nawet wprowadzenie każdej z metod funkcjonujących w szczupłym zarządzaniu jakością osobno, poprawi w dłuższej perspektywie wyniki finansowe przedsiębiorstwa (Piasecka-Głuszak 2013).

2.4 5S

Jedną z podstawowych metod Lean Manufacturing jest metoda 5S (Budzynowska i in. 2012). Jej nazwa pochodzi od pięciu japońskich słów: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke, które po przetłumaczeniu na język polski brzmią następująco: Selekcja, Systematyka, Sprzątanie, Schludność, Samodyscyplina. Ze względu na swoją uniwersalność może być stosowana także w wielu innych firmach, nie tylko produkcyjnych i montażowych, ale nawet w domu (Górny 2015).

Celem selekcji jest określenie, które przedmioty i narzędzia są niezbędne na stanowisku montażowym, a które możemy wyeliminować. Systematyka nakazuje przydzielenie niezbędnym przedmiotom ściśle określonego miejsca. Sprzątanie sprawia, że pracownicy muszą dbać o czystość swojego miejsca pracy oraz pilnować, by narzędzia na koniec zmiany znalazły się w przeznaczonych dla siebie miejscach. Schludność, zwana również standaryzacją pozwala określić odpowiedzialność poszczególnych pracowników za stosowanie metody 5S, a także stworzenie odpowiednich procedur, które będą pomagały czuwać nad prawidłowym działaniem tej metody. W ostatnim, najtrudniejszym kroku – samodyscyplinie, należy dbać o to, by w pracownikach pojawiły się odpowiednie nawyki, które pozwolą na realizację wcześniejszych 4 kroków w sposób powtarzalny i długoterminowy.

Wprowadzenie metody 5S jest pierwszym krokiem do zorientowania firmy montażowej na jakość. Przedstawione w niej zasady są proste i wymagają niewielkich kosztów, dzięki czemu nawet małe przedsiębiorstwa mogą sobie na nią pozwolić. Aktualnie większość firm zajmujących się montażem ma wprowadzony u siebie ten system. Dzięki temu mogą cieszyć się jego zaletami, do których należą głównie (Piórkowski 2011):

- redukcja kosztów
- ułatwienie pracy
- poprawa jakości montowanych wyrobów
- zmniejszenie awaryjności maszyn
- wyższy poziom bezpieczeństwa pracy
- poprawa samopoczucia pracowników

2.5 Diagram Ishikawy

Diagram Ishikawy jest to tzw. diagram przyczyn i skutków. Został wymyślony w latach 60-tych w Japonii i dość szybko zyskał uznanie w oczach firm produkcyjnych i montażowych, jako doskonałe narzędzie do odkrywania błędów w przedsiębiorstwach. Diagram Ishikawy może być używany nie tylko do analizowania procesów montażowych, jako całości, ale także do ustalania przyczyn konkretnych pojedynczych procesów oraz analizowania przyczyn wad konkretnych wyrobów (Szczęśniak, Zasadzień i Wapienik 2012). Diagram Ishikawy jest zbudowany w następujący sposób (rys.1):



Rys.1. Schemat diagramu Ishikawy (Kowalska i Paździor 2015).

W przypadku przedsiębiorstw montażowych, do grona przyczyn można zakwalifikować między innymi: zastosowaną metodę, wykorzystywany w procesie materiał, używane maszyny, osobę montującą, środowisko pracy, sposób pomiarów, czy kierownictwo. Dla każdej z tych przyczyn

powinno się ustalić podprzyczynę. Dalsze analizowanie procesu zwykle nie jest już konieczne, chyba że mamy do czynienia z analizą skomplikowanego procesu montażowego. Efektem pracy nad diagramem Ishikawy powinien być wybór czynników krytycznych, które w głównej mierze odpowiadają za problemy na linii montażowej. Do ich wyboru może posłużyć np. analiza Pareto (Łunarski 2008).

Diagram Ishikawy jest kolejną z metod zarządzania jakością, która nie wymaga wysokich kosztów, a pozwala, zwłaszcza na linii montażowej, gdzie w proces zaangażowana jest niewielka grupa pracowników i odnalezienie przyczyn błędu nie powinno powodować większych trudności, na szybkie i sprawne zidentyfikowanie przyczyn błędów oraz w miarę możliwości, ich wyeliminowanie. Do głównych problemów należy często ustalenie, które z wyszczególnionych przyczyn i podprzyczyn mogą mieć największy wpływ na pojawianie się błędów w procesie montażu.

2.6 Poka-Yoke

Poka-Yoke jest japońską techniką wymyśloną w latach 60-tych XX wieku, która ma na celu zapobieganie błędom, czyli takie projektowanie procesów, aby możliwości pomyłki były ograniczone do minimum, a czasami wręcz niemożliwe. Metoda ta przyjęła się powszechnie w przedsiębiorstwach produkcyjnych i montażowych z uwagi na fakt, że pełni ważną rolę nie tylko w szczupłym zarządzaniu Lean, ale jest także jednym z podstawowych narzędzi filozofii Six Sigma (Wodecka-Hyjek i Walczak 2006).

Metoda Poka-Yoke powinna w szczególności skupić się na zapobieganiu błędom, które mają miejsce najbliżej danego procesu montażowego. Dopuszczenie do tego, by błędnie wykonany proces montażowy został wykryty po pewnej liczbie innych operacji montażowych generuje duże koszty, w związku z tym usprawnień należy dokonywać tam, gdzie błąd może wystąpić. Należy skupić się na tym, by zapobieganie błędom nie było kosztowne. Im tańsze rozwiązanie pozwalające unikać błędów, tym na więcej tego typu rozwiązań stać będzie przedsiębiorstwo i tym częściej będzie można z tych rozwiązań korzystać. Ważną kwestią jest też ocena skutków popełnienia pomyłki. Metodę Poka-Yoke powinno zastosować się w pierwszej kolejności tam, gdzie potencjalna pomyłka może spowodować największe straty dla firmy.

Podstawowymi błędami na liniach montażowych są najczęściej: pomijanie niektórych operacji montażowych, niezamontowanie odpowiedniej liczby sztuk danej części w przedmiocie montowanym, czy też błędne zamocowanie elementu. Metoda Poka-Yoke ma na celu utrudnienie popełnienia tych błędów. Dobrym przykładem do pokazania zalet tej metody jest analiza montażu dwóch elementów za pomocą 8 śrub. W pewnej liczbie procesów montażowych pracownicy zapominają o włożeniu wszystkich 8 śrub, gdyż pobierają je z pojemnika. Zamienienie pojemnika na tackę, w której w każdym rzędzie będzie 8 miejsc na śruby spowoduje, że pracownik będzie wiedział, iż kiedy zakończy pobieranie śrub z danego rzędu, oznacza to, że zamontował już wszystkie śruby. Taka zmiana nie wymaga poniesienia dużych nakładów finansowych, a jednocześnie pozwala na uzyskanie sporych oszczędności wynikających z mniejszej liczby pomyłek w procesie montażu.

Mimo tego, że metoda Poka-Yoke jest tania i pozwala uzyskać dobre efekty niewielkim kosztem, również w jej przypadku pojawiają się problemy w praktycznym zastosowaniu. Głównym kłopotem jest współpraca z pracownikiem, który popełnia błędy. Pracownicy często mają poczucie, że jeżeli popełniają błędy, to będą za to karani, w związku z czym nie przyznają się do ich popełnienia, ani nie dzielą się z kierownictwem przyczynami popełniania tych błędów. W efekcie pojawia się utrudniony dostęp do informacji, którą można wykorzystać w procesie wdrażania metody Poka-Yoke w przedsiębiorstwie. Zatem, aby metoda ta mogła działać poprawnie, należy wyjaśnić ją wszystkim pracownikom firmy i przekonać ich do jej stosowania.

3. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule filozofie i metody pokazują, w jaki sposób całościowo bądź fragmentarycznie można wpływać na procesy montażowe, używając do tego zarządzania jakością. Zorientowanie firmy na jakość będzie skutkowało poprawą procesów wykonywanych w firmie, a w dłuższej perspektywie ograniczeniem kosztów funkcjonowania firmy, co będzie oznaczać wzrost konkurencyjności.

Aby w pełni móc korzystać z zalet metod zarządzania jakością należy być przygotowanym na początkowe niepowodzenia i straty. Zwłaszcza w przypadku filozofii Lean, Six Sigma, czy Total Quality Management w początkowej fazie działania poszczególnych metod na linii montażowej można spodziewać się opóźnień wynikających z większego zakresu obowiązków pracowników oraz wolniejszego wykonywania operacji montażowych. Firma musi być przygotowana na pokrycie początkowych kosztów i skalkulować, czy jest już gotowa na to, by móc zainwestować w poprawę jakości.

Jeżeli firma nie ma jeszcze mocnej pozycji na rynku i nie stać jej na sfinansowanie wdrożenia kosztownych filozofii zarządzania jakością, może skupić się na stopniowym wprowadzaniu mniejszych metod, zwłaszcza tych, które charakteryzują się niewielkim kosztem. Opisane w artykule metody zarządzania jakością spełniają ten warunek i pozwalają w łatwy sposób zapoznać firmę z założeniami dbania o jakość i oswoić pracowników z zarządzaniem, w którym metody jakości pełnią ważną rolę.

Należy także mieć świadomość, że wprowadzenie jakiejś metody nie oznacza jeszcze osiągnięcia sukcesu w dziedzinie zarządzania jakością. Aby uzyskiwać najlepsze efekty należy traktować doskonalenie firmy, jako niekończący się proces. W rzeczywistości zawsze istnieją pewne obszary przedsiębiorstwa, które można usprawnić, zawsze w procesie montażu będą pojawiały się czynności, które nie będą dodawały jakości do gotowego wyroby, zawsze będą pojawiały się braki i błędy, których można było uniknąć. Przystawienie się firmy na myślenie jakościowe jest o wiele trudniejsze niż wprowadzanie każdej z wymienionych w artykule metod osobno. Jeżeli pracownicy nie uwierzą, że zarządzanie jakością działa, jeżeli kierownictwo nie będzie wspierało pracowników w rozumieniu zarządzania jakością, jeżeli w pewnym momencie celem firmy przestanie być poprawa, a zacznie być nim stabilizacja, wtedy mimo wprowadzenia odpowiednich procedur, standardów i norm, jakość będzie spadać.

Opisane w artykule metody zarządzania jakością nie wyczerpują w pełni zagadnień związanych z jakością w montażu. Metody, które zostały przedstawione obejmują całe filozofie jakościowe oraz metody początkowe, które względnie szybko, tanio i skutecznie pozwolą firmie osiągnąć zamierzony efekt. W technologii montażu można także stosować i stosuje się wiele innych metod, jak na przykład: mapowanie strumienia wartości, analiza FMEA, Total Productive Maintenance, SMED, Benchmarking i wiele, wiele innych. Są to metody wymagające nieco większych kosztów, ale również pozwalają na osiągnięcie postawionych przez firmę celów jakościowych. Jeżeli jednak firma przestawi się na myślenie jakościowe, to użycie konkretnych technik i metod wspomagających stanie się kwestią drugorzędną.

4. Literatura

- Budzynowska M (red.) i inni (2012) Metoda 5S. Zastosowanie, wdrażanie i narzędzia wspomagające.
- Górny A (2015) Zastosowanie 5S w doskonaleniu środowiska wykonywania pracy. Jakość i innowacyjność w funkcjonowaniu organizacji oraz nowe rozwiązania w procesie wytwarzania: praca zbiorowa 23-39
- Hamrol A, Mantura W (2002) Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka.
- Kowalska M, Paździor M (2015), Zastosowanie diagramu Ishikawy jako narzędzia doskonalenia jakości produktów spożywczych, Postępy techniki przetwórstwa spożywczego 1/2015
- Łunarski J (2008) Zarządzanie jakością standardy i zasady.
- Piasecka-Głuszak A (2013) Korzyści z wdrożenia Lean Management. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu Issue315 Vol.2 99-111
- Piórkowski P (2011) Problemy jakości montażu w aspekcie konkurencyjności wyrobu. Praca inżynierska
- Popławski W (2009) Filozofia Six Sigma jako sposób na poprawę efektywności przedsiębiorstwa
- Stadnicka D (2011) Symulacyjna linia montażowa w Lean Learning Academy. Technologia i Automatyzacja Montażu 3/2011 58-64

- Szczęśniak B, Zasadzień M, Wapienik Ł (2012) Zastosowanie analizy Pareto oraz diagramu Ishikawy do analizy przyczyn odrzutów w procesie produkcji silników elektrycznych. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska z. 63a 125-147
- Wodecka-Hyjek A, Walczak M (2006) Wykorzystanie technik Poka-Yoke przy wdrażaniu metody Six Sigma. Problemy jakości R.38 nr 1 13-17
- Womack J P, Jones D T, Roos D (1991) The Machine that changed the world.
- Wrona A, Wrona M (2009) Zastosowanie wybranych narzędzi six sigma w procesach technologicznych. Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie 532-540

2. Ocena dokładności pozycjonowania pionowego centrum CNC Haas Mini Mill

Evaluation of the accuracy of positioning vertical center Haas Mini Mill

Borkowski Wojciech, Piórkowski Paweł, Jankowski Tomasz, Stembalski Marek

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Waław Skoczyński, prof. nadzw. PWr

Wojciech Borkowski: wojciech.borkowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: pionowe centrum CNC, badania dokładności geometrycznej, QC10 Ballbar, błąd okrągłości.

Streszczenie

Zaprezentowano wyniki oceny dokładności pozycjonowania pionowego centrum CNC Haas Mini Mill, przy pomocy systemu QC10 Ballbar. Określono wartości podstawowych błędów i odchyłek frezarki, oceniając ich wpływ na dokładność pozycjonowania. Stwierdzono, czy wartości błędów pozwalają na poprawne wykonywanie na frezarce zadań obróbkowych. Oceniono przydatność przedstawionych wyników do określenia aktualnego stanu technicznego obrabiarki.

1. Wstęp

Wymagania związane z dokładnością wymiarowo – kształtową przedmiotów obrabianych, wymuszają na producentach obrabiarek projektowanie i wykonywanie takich maszyn, które będą w stanie zapewnić odpowiednią dokładność wykonywanych na nich przedmiotów (Majda 2012). Zależność pomiędzy dokładnością obrabiarki, a dokładnością przedmiotu obrabianego sprawia, że wykonanie przedmiotu może odbywać się tylko na maszynach o określonej dokładności wykonania (Cedlik i in. 2006). W trakcie eksploatacji obrabiarki, dokładność jej geometrii maleje. Wymagane jest zatem, aby stan obrabiarki na bieżąco kontrolować, aby wiedzieć, czy dana obrabiarka wymaga kompensacji błędów, czy też nadal może być używana do obrabiania kolejnych przedmiotów.

Współczesne obrabiarki sterowane numerycznie są zwykle bardzo zaawansowanymi systemami mechatronicznymi. W związku z powyższym stawiane im są szczególnie wysokie wymagania, dotyczące niezawodności funkcjonowania, efektywności procesu skrawania, wydajności obróbki, czy też dokładności pozycjonowania. Spełnienie powyższych wymagań, które powinny uwzględniać również zagadnienia związane z energochłonnością, kosztami obróbki, czy jakością wytwarzanych elementów, sprawia, że konieczne są różne systemy pomiarowe, które mają na celu potwierdzenie, czy obrabiarka spełnia stawiane jej wymagania. Jednym z takich systemów pomiarowych są systemy do pomiarów błędu okrągłości (Skoczyński i in. 2016).

Pomiary błędów geometrycznych na obrabiarkach konwencjonalnych przez wiele lat wykonywane były ręcznie. Istniały skomplikowane zalecenia, które określały, w jaki sposób taki błąd można zmierzyć. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, istnieje o wiele więcej możliwości wykonania pomiarów błędów. Dzięki temu, że obrabiarki sterowane numerycznie potrafią realizować programy obróbkowe, operator obrabiarki może zaprogramować, w jaki sposób będą poruszały się elementy układu kinematycznego maszyny. Ponadto ruch tych elementów, dzięki istnieniu programu może odbywać się w sposób powtarzalny. Podczas pracy na obrabiarkach konwencjonalnych, taka powtarzalność byłaby niemożliwa. Programy obróbkowe mogą być wgrywane do maszyny za pomocą odpowiedniego oprogramowania lub pisane bezpośrednio na jej sterowaniu. Możliwość korzystania z zewnętrznych systemów, a także pobierania danych o maszynie bezpośrednio z oprogramowania obrabiarki, zdecydowanie ułatwia różnego rodzaju działania diagnostyczne.

Badania diagnostyczne obrabiarek sterowanych numerycznie opisane są w normie PN-ISO 230. Istnieje wiele metod i narzędzi, które pozwalają na ocenę stanu obrabiarki (Ratajczyk 2006; Turek i in. 2010). Norma ta zawiera zalecenia dotyczące określenia dokładności geometrycznej obrabiarki pracującej bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej. Znajdują się w niej

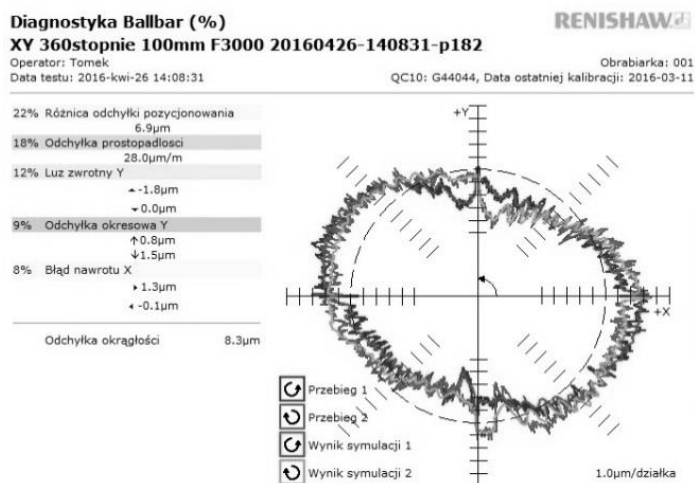
zalecenia związane z próbą pracy podczas badań odbiorczych obrabiarki, wytyczne dotyczące przedmiotu próbnego, jego geometrii i materiału, narzędzi skrawających oraz parametrów skrawania. Rezultatem pomiaru jest wskaźnik, który określa, czy obrabiarka spełnia postawione jej wymagania. Kolejne części normy dotyczą wyznaczania dokładności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie, wyznaczania emisji hałasu oraz badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie. Opisane są w niej zalecenia dotyczące pomiaru błędu okrągłości w obrabiarce. Do wykonania takiego badania można skorzystać z kilku różnych narzędzi. Jednym z nich jest system QC10 Ballbar, który umożliwia szybką i prostą analizę dokładności pozycjonowania obrabiarki (Miko i Maj 2013), a także umożliwia określenie wartości podstawowych błędów obrabiarki (Jóźwik 2010; Miko i Maj 2012). Badania przy użyciu tego systemu zostały przeprowadzone na pionowym centrum CNC Haas Mini Mill.

2. Materiały i metody

QC10 Ballbar jest to system z teleskopowym prętem kinematycznym wyprodukowany przez firmę Renishaw. Głównym zadaniem systemu QC10 Ballbar jest szybka i dokładna ocena parametrów pozycjonowania obrabiarek sterowanych numerycznie. Za pomocą prostego testu można określić podstawowe błędy i niedokładności geometryczne.

Błędy te można podzielić na 3 podstawowe grupy: błędy geometrii, luzy oraz błędy dynamiczne (Honczarenko i Kwaśniewicz 2008). System QC10 Ballbar pozwala na wyznaczenie podstawowych błędów obrabiarki, takich jak np. błąd okrągłości, czy też luz zwrotny. Może także zidentyfikować mniej powszechne usterki, związane np. ze zmianą offsetu lub błędem nadążania (Weikert 2004).

Zasada pomiaru systemem QC10 Ballbar polega na wykonaniu przez obrabiarkę ruchu po okręgu, wokół określonego punktu. Przetwornik przemieszczeń umieszczony w sondzie diagnostycznej określa z odpowiednią częstotliwością próbkowania odległość pomiędzy środkiem okręgu, a punktem, w którym znajduje się końcówka czujnika (czyli promień okręgu). Pomiar należy wykonać zgodnie oraz przeciwnie do ruchu wskazówek zegara (Polska Norma PN-ISO 230-4). Efektem działania sondy jest wykres, na którym znajduje się przebieg ruchu zgodny i przeciwny do ruchu wskazówek zegara (Rys.1). Oprócz wykresu przedstawiającego wynik symulacji, oprogramowanie sondy pozwala na wskazanie procentowego udziału poszczególnych błędów obrabiarki, w całkowitym błędzie okrągłości. W przypadku przedstawionego pomiaru, największy wpływ na błąd okrągłości mają: różnica odchyłki pozycjonowania, odchyłka prostopadłości, luz zwrotny Y, odchyłka okresowa Y oraz błąd nawrotu X. Zmierzona próbna odchyłka okrągłości wyniosła 8,3 μm . W przypadku badanego pionowego centrum frezarskiego Haas Mini Mill, dopuszczalna odchyłka okrągłości wynosi 12 μm .



Rys. 1. Graficzne przedstawienie pomiaru przy użyciu systemu QC10 Ballbar.

Ponadto system QC10 Ballbar oferuje narzędzia do analizy błędów, nie tylko określając wartości każdego z nich, ale także generuje listę usterek z uwzględnieniem ich procentowego wpływu na błędy obrabiarki. Dodatkowo można wygenerować plik ze spisem wszystkich położań czujnika i poddać je własnej analizie.

System QC10 Ballbar nie jest jedynym, który umożliwia diagnozowanie stanu technicznego obrabiarki. Istnieją rozwiązania innych firm, jak również kolejna generacja systemu QC10, czyli system QC20-W (Rys.2). System ten ma tę przewagę nad systemem QC10, że istnieje możliwość dokonania pomiaru w sposób bezprzewodowy, dzięki czemu możliwa jest łatwiejsza akwizycja danych. W przypadku poprzedniego systemu, konieczność połączenia teleskopowego pręta z laptopem, za pomocą kabla, podczas pracy obrabiarki była dosyć kłopotliwa. System QC20-W pozwala na zmiernia oprócz odchyłki okrągłości aż 18 innych błędów, wśród których można wymienić między innymi odchyłki prostopadłości, czy też luz zwrotny. Dzięki temu, wynik testu pozwala nie tylko określić błąd okrągłości, ale również na podstawie pomiaru istnieje możliwość szerszej diagnozy stanu obrabiarki sterowanej numerycznie.



Rys. 2. System QC20-W Ballbar do diagnostyki stanu technicznego obrabiarek.
(<http://www.renishaw.pl/pl/system-ballbar-qc20-w--11075>)

3. Przebieg oraz wyniki badań

Przed rozpoczęciem badań zostały ustalone zasady wykonania pomiaru. Ze względu na niewielką przestrzeń roboczą obrabiarki (606x304) ustalono, że pomiar odbędzie się w jednym punkcie z użyciem trzpieni pomiarowych o długości 100 oraz 150 mm. Punkt pomiarowy został ustalony w środku przestrzeni roboczej obrabiarki ($X=203$, $Y=152$). Napisano program, który opisuje ruch czujnika. Zdecydowano, że na początku pomiaru nastąpi dobieg czujnika podczas ruchu po okręgu, następnie zostanie wykonany pełny okrąg (pomiar właściwy), a na końcu nastąpi wybieg. Łącznie czujnik zakreśli dwa okręgi (pół okręgu na dobieg, okrąg na pomiar, pół okręgu na wybieg), zatrzyma się i powtórzy procedurę w przeciwnym kierunku. Wartości prędkości posuwu ustalono na: 5000, 3000, 1500, 1000 oraz 500 mm/min, a jako płaszczyznę pomiarową wybrano płaszczyznę XY. W dalszej kolejności podłączono sprzęt pomiarowy do obrabiarki (Rys.3) oraz laptopa i uruchomiono oprogramowanie diagnostyczne.

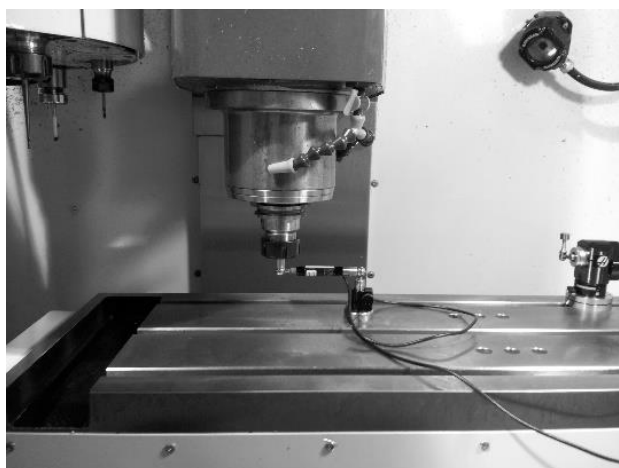
QC10 Ballbar posiada dwie kuliste końcówki po obu stronach teleskopowego pręta kinematycznego. W celu dokonania pomiaru, jedną z końcówek przymocowano do podstawki, która została umieszczona na stole frezarki. Druga z końcówek została połączona z wrzecionem (Rys.4). Po wprowadzeniu współczynnika kalibracji, rozpoczęto pomiar, uruchamiając program realizujący ruch czujnika.

W wyniku przeprowadzonych badań zostały określone wartości następujących wielkości: luz zwrotny, błąd nawrotu, luz poprzeczny, odchyłka okresowa, błąd nadążania, odchyłka

prostopadłości, odchyłka prostoliniowości X, odchyłka prostoliniowości Y, różnica odchyłki pozycjonowania oraz odchyłka okrągłości (Tab.1), której określenie było głównym celem badań.



Rys. 3. Stanowisko badawcze do pomiaru błędów obrabiarki przy użyciu systemu QC10 Ballbar.



Rys. 4. System QC10 Ballbar zamontowany na pionowym centrum CNC Haas Mini Mill (Jankowski i in. 2016).

Tab. 1. Wyniki odchyłki okrągłości(μm) dla różnych długości trzpienia pomiarowego oraz prędkości posuwu.

Długość trzpienia pomiarowego (mm)	Prędkość posuwu (mm/min)				
	500	1000	1500	3000	5000
100	7,9	8,0	5,9	8,7	17,1
150	9,7	9,1	7,9	10,0	12,5

W zakresie prędkości posuwu 500-3000 mm/min odchyłka okrągłości nie przekraczała wartości dopuszczalnej wynoszącej 12 μm . Wykonanie pomiaru przy użyciu dłuższego trzpienia pomiarowego powodowało nieznaczny wzrost wartości odchyłki okrągłości. Największy wpływ na wartość błędu okrągłości miała różnica odchyłki pozycjonowania. Mniejszy, ale wciąż znaczący wpływ na wartość błędu okrągłości miały błędy nawrotu, zarówno w osi X, jak i w osi Y oraz

odchyłka prostopadłości. Odchyłka okrągłości, dla prędkości posuwu wykorzystywanych na tej obrabiarce nie przekroczyła wartości 10 μm , co pozwala stwierdzić wystarczającą dokładność pozycjonowania frezarki CNC Haas Mini Mill do wykonania zadań obróbkowych.

4. Dyskusja i wnioski

Wykonanie testu przy pomocy systemu QC10 Ballbar pozwala w szybki sposób określić dominujące błędy w obrabiarce, a także ocenić ich wpływ na dokładność obróbki. Oprogramowanie jest intuicyjne w obsłudze. Zamontowanie sprzętu pomiarowego nie sprawia większych trudności, a wyniki można odczytać na komputerze wyposażonym w port rs232 oraz oprogramowanie firmy Renishaw. Posiadając odpowiedni program kierujący ruchem czujnika można dokonać pomiaru w czasie nieprzekraczającym godziny i uzyskać dokładne wyniki. Powtarzanie wyników w różnych płaszczyznach, przy użyciu różnych trzpieni pomiarowych, w różnych punktach przestrzeni roboczej obrabiarki pozwala nie tylko na określenie przydatności obrabiarki do obróbki, ale również pomaga w diagnozowaniu konkretnej przyczyny niedokładności i określeniu podzespołów maszyny, wymagających korekcji lub wymiany.

Przeprowadzone badania wskazują, że błędy występujące w pionowym centrum CNC Haas Mini Mill nie przekraczają wartości, które wpływałyby w istotny sposób na jego dokładność. Oznacza to, że odpowiednia dokładność wymiarowo - kształtowa przedmiotów obrabianych na tej obrabiarce powinna być osiągana w sposób powtarzalny. Wyniki te są zgodne z przewidywaniami, gdyż badana obrabiarka jest obciążona niewielką liczbą zadań obróbkowych, została wyprodukowana w 2015 roku i nie miała za sobą żadnych poważniejszych awarii.

Aby utrzymać odpowiednią dokładność obrabiarki sterowanej numerycznie, należy okresowo diagnozować obrabiarkę, zwracając szczególną uwagę na tempo jej zużycia oraz zmiany wartości błędów pozycjonowania (Miko i Skrzyniarz 2014). W przypadku pojawienia się kolejnych błędów, należy przeprowadzić działania korygujące lub dokonać remontu maszyny (Kaczmarek i in. 2015). Regularna kontrola i analiza wyników z systemu QC10 Ballbar pozwala na szybkie określenie przydatności obrabiarki do zadań obróbkowych oraz zapewnia możliwość obserwacji zmian wartości błędów, podczas kolejnych pomiarów. Analiza szybkości tych zmian pozwala z dużym prawdopodobieństwem przewidzieć, kiedy wartości błędów będą na tyle duże, że niezbędna będzie ich korekcja. Pozwala to zaplanować przestój danej obrabiarki i uwzględnić ten fakt w planie zadań obróbkowych, co znacząco zmniejsza awaryjność parku maszynowego.

Wyniki badań przeprowadzonych przy użyciu systemu QC10 Ballbar mogą jednak różnić się w zależności od przyjętych parametrów do wykonania badania. Różnice podczas takiego badania mogą sięgać nawet kilkudziesięciu procent (Jankowski i in. 2016) i są zależne od tego, w którym punkcie w przestrzeni roboczej obrabiarki przeprowadzono pomiar odchyłki okrągłości. Wynika z tego, że prędkości posuwu i długość pręta teleskopowego nie są jedynymi zmiennymi, od których zależy wynik pomiaru. Przy diagnostyce obrabiarki powinno się zatem wykonać pomiary w kilku różnych punktach pomiarowych, za pomocą różnych prętów oraz z użyciem różnych posuwów.

W przyszłości pomiary błędów występujących w obrabiarkach sterowanych numerycznie będą kierować się w stronę rozwoju systemów monitorowania i nadzoru, które powinny skutkować (Teti i in. 2010):

- łączeniem autonomicznych czujników oraz sond w inteligentne systemy monitorowania, których zadaniem będzie także kontrola narzędzi, procesów obróbkowych oraz przede wszystkim stanu maszyny,
- kontynuacją rozwoju nowoczesnych metod przetwarzania sygnałów w celu utworzenia monitoringu wytwarzania, co będzie można osiągnąć po zastosowaniu specjalnych systemów czujnikowych,
- kontynuacją rozwijania inteligentnych czujników wchodzących w skład nowoczesnych systemów monitorowania, posiadających specjalne zdolności, takie jak możliwość samokalibracji (w przypadku systemu QC10 Ballbar, kalibrację przeprowadza operator), samodiagnostyki (w przypadku systemu QC10 Ballbar, użytkownik nie jest w stanie przeprowadzić diagnostyki systemu) oraz podejmowania decyzji (system QC10Ballbar nie

posiada możliwości samodzielnego podejmowania decyzji, jest tylko narzędziem, którym posługuje się operator w celu przeprowadzenia analizy stanu technicznego obrabiarki).

5. Literatura

- Cedlik M, Sokivic J, Jurkovic J (2006) Calibration and Checking the Geometrical Accuracy of a CNC Machine-Tool. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol.52, No.11 (2006), 752-762.
- Honczarenko J, Kwaśniewicz J (2008) Nowe systemy pomiarowe do sprawdzenia dokładności obrabiarek CNC. *Mechanik R*.81, nr 12, 1012-1016.
- Jankowski T, Piórkowski P, Skoczyński W (2016) Pomiar odchyłki okrągłości pionowego centrum CNC Haas Mini Mill. *Mechanik R*.89, nr10, 1310-1311.
- Józwik J (2010) Ocena odchyłki prostokątności osi obrabiarki sterowanej numerycznie z wykorzystaniem systemu QC10 Ballbar. *Postępy Nauki i Techniki*. nr 4/2010 91-102.
- Kaczmarek J, Lange S, Święcik R i in. (2015) Identyfikacja błędów pionowego centrum frezarskiego za pomocą systemu Ballbar oraz ich korekcja poprzez poziomowanie obrabiarki. *Mechanik R*.88, nr 8-9, 479-487
- Majda P (2012) The influence of geometric compensation of a CNC machine tool on the accuracy of movement with circular interpolation. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. Vol.36, No.2, 59-67.
- Miko E, Maj P (2013) Badanie dokładności pozycjonowania i diagnostyka tokarki CNC. *Pomiary Automatyka Kontrola R*.59 nr 6, 558-561.
- Miko E, Maj P (2012) Ocena dokładności pozycjonowania tokarki CNC. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Nauki Techniczne*. z.17/2012, 100-108.
- Miko E, Skrzyniarz M (2014) Ocena dokładności pozycjonowania centrum frezarskiego Hermle B-300. *Mechanik R*.87, nr 8-9, 363-370.
- Polska Norma PN-ISO 230-4 (1999). Przepisy badań obrabiarek. *Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie*.
- Ratajczyk E (2005) Współrzędnościowa technika pomiarowa.
- Skoczyński W, Stembalski M, Roszkowski A i in. (2016) Sensory we współczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie. *Mechanik R*.89, Nr 11, 1740-1747.
- Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G i in. (2010) Advanced Monitoring of Machining Operations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 59/2010 717-739.
- Turek P, Jędrzejewski J, Modrzycki W (2010) Methods of machine tool error compensation. *Journal of Machine Engineering*. Vol.10, No.4, 5-25.
- Turek P, Kwaśny W, Jędrzejewski J (2010) Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn R*.15, z.1/2, 7-37.
- Turek P, Modrzycki W, Jędrzejewski J (2010) Analiza metod kompensacji błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn R*.15, z1/2, 130-149.
- Weikert A (2004) R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol.53, No.1, 429-432.

3. Analiza wpływu warunków środowiskowych na pracę modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego o mocy znamionowej 180 W

Analysis of the impact of environmental conditions on operation of the monocrystalline silicon photovoltaic module about the nominal power of 180 W

Dutka Małgorzata

Instytut Inżynierii Elektrycznej, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Koło Naukowe
Stowarzyszenia Elektryków Polskich
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Sławomir Cieślik

Dutka Małgorzata: gosia_dutka@onet.eu

Słowa Kluczowe: odnawialne źródła energii, ogniwa fotowoltaiczne, moduł monokrystaliczny, sprawność

Streszczenie

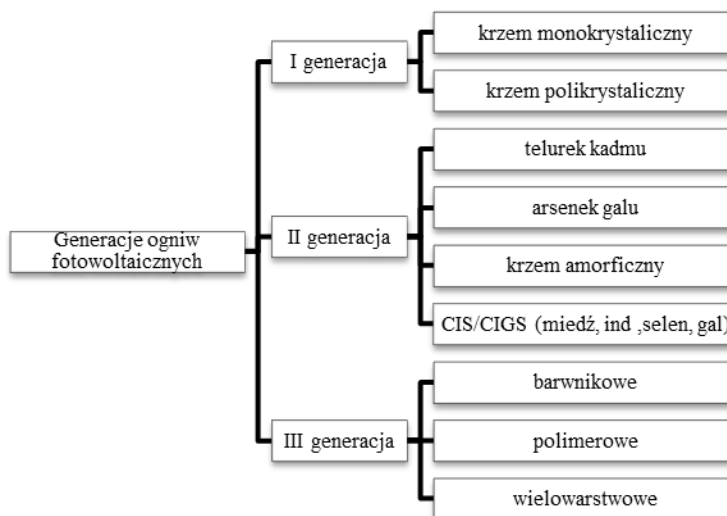
Energia ze źródeł odnawialnych znajduje coraz szersze zastosowanie nie tylko w generacji rozproszonej, ale również w rozwiązaniach przydomowych, które w polskim ustawodawstwie zostały nazwane mikroinstalacjami prosumenckimi i są wspierane przez system opustów. Najbardziej popularną technologią odnawialnych źródeł energii w warunkach gospodarstwa domowego na świecie jest fotowoltaika, która wykorzystuje przemianę energii słonecznej w energię elektryczną. Technologia ta jest tania, ale jednocześnie charakteryzuje się dużą zależnością od warunków środowiskowych. W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu kąta pochylenia modułu i natężenia promieniowania słonecznego docierającej do modułu na sprawność oraz uzysk energetyczny w warunkach rzeczywistych dla modułu z krzemu monokrystalicznego o mocy znamionowej 180 W. Zaobserwowano, iż w warunkach rzeczywistych nie można rozdzielić wpływu natężenia promieniowania oraz temperatury modułu na sprawność procesu konwersji energii, jedynie któryś z tych czynników może przeważać w danych warunkach środowiskowych. Ponadto parametry znamionowe modułu fotowoltaicznego określane są w warunkach standardowych (przy natężeniu promieniowania 1000 W/m^2 , temperaturze 25°C oraz współczynniku masy powietrza AM 1.5) nie mogą być stosowane do szacowania chwilowych uzysków energetycznych ze względu na szersze spektrum temperatur i natężeń promieniowania, w jakich pracują moduły, a sprawności uzyskiwane przez dane materiały ogniw fotowoltaicznych w warunkach rzeczywistych są znacznie niższe niż w warunkach laboratoryjnych.

1. Wstęp

Moduły PV wykorzystują bezpośrednio konwersję energii słonecznej w energię elektryczną w ogniwach przy pomocy zjawiska fotowoltaicznego wewnętrznego w ogniwie półprzewodnikowym, polegającego na wybiciu elektronu z cząsteczki przez padający na nią foton i powstaniu w półprzewodniku pary „elektron-dziura”. Zjawisko to zachodzi, gdy padający na ogniwo kwant promieniowania posiada energię większą lub równą od przerwy energetycznej złącza p-n, której wartość jest charakterystyczna dla danego materiału. W konsekwencji prowadzi to do wzrostu koncentracji nośników mniejszościowych, które poruszają się w kierunku złącza i powodują wzrost prądu wstecznego. W przypadku rozwarcia złącza jest to przyczyną powstania różnicy potencjałów na styku warstw domieszkowanych.

Ze względu na rodzaj materiału wykorzystanego do produkcji ogniw oraz jego budowy i produkcji wyróżnić można trzy podstawowe generacje ogniw fotowoltaicznych (Rys.1). Ogniwa pierwszej generacji są ogniwami bazującymi na płytkach krzemowych, w wykonaniu monokrystalicznym lub polikrystalicznym. Ich sprawność sięga 22% i stanowią obecnie ponad 80% światowej produkcji ze względu na szerokie występowanie krzemu oraz jego nietoksyczność. Ogniwa drugiej generacji charakteryzują się znaczną redukcją grubości złącza p-n, stąd nazywane są

cienkowarstwowymi. Zaliczyć tutaj można związki pierwiastków rzadkich, będących drogimi materiałami, takie jak arsenek galu, tellurek kadmu czy ogniwa CIS/CIGS oraz krzem amorficzny. Trzecia generacja ogniw PV to technologie ciągle znajdujące się w fazie rozwoju. Wśród nich można wyróżnić ogniwa barwnikowe, które w swojej pracy wykorzystują mechanizm analogiczny do fotosyntezy, a ogniwa polimerowe wykorzystują cząsteczki organiczne oraz syntetyczne polimery. Największe sprawności procesu konwersji energii osiągają ogniwa wielowarstwowe, które składają się z dwóch lub większej ilości materiałów o różnych przerwach energetycznych. Każdy z materiałów absorbuje określoną część promieniowania, którą jest w stanie najsukuteczniej przekształcić na energię elektryczną.



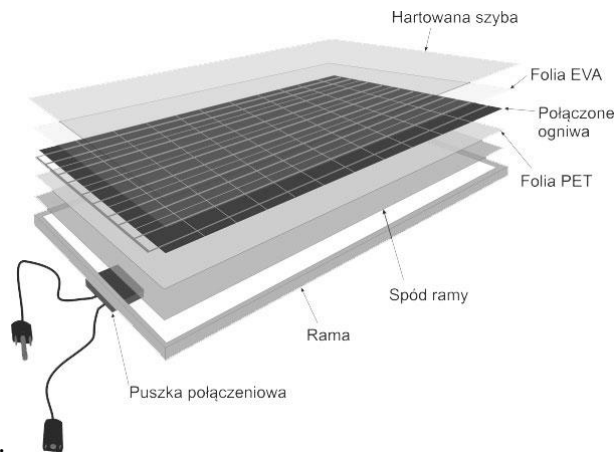
Rys. 1. Klasyfikacja generacji ogniw fotowoltaicznych (Fizikowski i in 2016).

W pracy podjęto badania modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego. Krzem monokrystaliczny nie występuje w naturze, do jego produkcji służy metoda opracowana przez prof. Jana Czochralskiego. Zarodź monokrystaliczna wyciągana jest z ciekłego krzemu z dodatkiem bromu, a następnie na jego powierzchni wytwarza się warstwę typu n poprzez dyfuzję fosforu (Fizikowski i in. 2016). Ogniwa wykonane z krzemu monokrystalicznego posiadają sprawność od 18 do 22% i charakteryzują się ceną wyższą niż ich polikrystaliczne odpowiedniki.

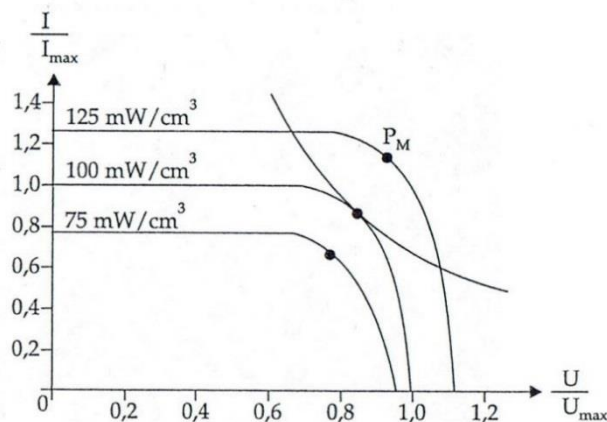
W budowie modułu monokrystalicznego, służącego bezpośrednio do montażu w instalacji, warstwa ogniw fotowoltaicznych jest zabezpieczona folią EVA (Rys. 2), która chroni je przed wilgocią oraz promieniowaniem UV. Wierzchnią warstw modułu stanowi hartowane szkło, które z jednej strony chroni ogniwa przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi, a z drugiej strony gwarantuje dużą przepuszczalność promieni słonecznych. Spodnią warstwę modułu stanowi folia PET, która gwarantuje izolację. Dodatkowo, w celu zmniejszenia odbicia promieniowania, powierzchnia ogniw jest teksturowana, dzięki czemu odbite światło może być ponownie zaabsorbowane (Tytko 2013).

Fotowoltaika, w porównaniu z innymi zastosowaniami odnawialnych źródeł energii, to technologia tania i prosta do zastosowania w różnych warunkach konstrukcyjnych, jednak charakteryzuje się dużą zależnością od warunków środowiskowych i pogodowych. W literaturze (Jastrzębska 2013, Klugmann-Radziemska 2005, Waclawek i in. 2011) podano wpływ czynników zewnętrznych takich temperatura i nasłonecznienie na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej modułów fotowoltaicznych w warunkach laboratoryjnych. Zauważono, że wraz ze spadkiem natężenia promieniowania napięcie dla punktów mocy maksymalnej MPP maleje nieznacznie, a moc maksymalna generowana przez ogniwo maleje w przybliżeniu proporcjonalnie do spadku natężenia promieniowania. Zatem im gorsze i mniej stabilne warunki pogodowe tym mniejszy uzysk energetyczny otrzymuje się z modułów (Rys. 3). Natężenie promieniowania na powierzchni modułu

jest zależne od kąta padania promieni słonecznych, zatem od ustawienia modułu. Im bardziej płaszczyzna modułu odbiega od ustawienia prostopadłego względem promieni słonecznych tym mniej energii promieniowania jest konwertowane na energię elektryczną ze względu na jej rozpraszanie i odbijanie od powierzchni modułu.



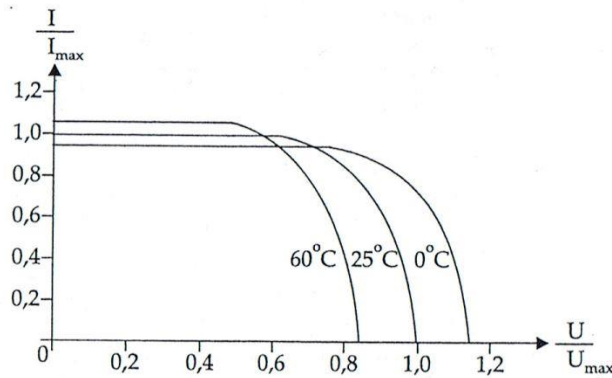
Rys. 2. Budowa modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego (gosolar.pl).



Rys. 3. Wpływ natężenia promieniowania na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej oraz położenie PMM (Klugmann-Radziemska 2005).

Drugim czynnikiem wpływającym na kształt charakterystyk prądowo-napięciowych oraz krzywych mocy jest temperatura. Wraz z jej wzrostem rośnie rozpraszanie nośników ładunku elektrycznego na fotonach sieci krystalicznej, co skutkuje zmniejszeniem ich ruchliwości. Dochodzi tym samym do zmniejszenia szerokości przerwy energetycznej i generację mniejszego napięcia na zaciskach złącza p-n (Tytko 2013). Wzrost temperatury modułu powoduje zmniejszenie napięcia obwodu otwartego oraz mocy maksymalnej, a także zwiększaniem prądu zwarcia (Rys. 4).

Dodatkowo można zauważyć, że przy wzroście temperatury o około 20°C dochodzi do spadku mocy o ok. 10% przy przyjęciu standardowego współczynnika temperaturowego dla modułów 0,5%/K, tym samym ulega zmniejszeniu sprawność. W warunkach rzeczywistych temperatura modułu jest zależna od jakości i konfiguracji hermetycznej modułu, właściwości półprzewodnika oraz od otaczającego moduł środowiska i warunków pogodowych.



Rys. 4. Wpływ temperatury modułu fotowoltaicznego na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej (Klugmann-Radziemska 2005).

2. Materiał i Metody

Do analizy otrzymanych wyników posłużono się parametrami obliczeniowymi podanymi w literaturze (Klugmann- Radziemska 2006), jakimi są sprawność, rezystancja optymalna oraz współczynnik wypełnienia modułu. Sprawność służy do bezwzględnego porównania modułów i jej maksymalna wartość jest zależna od rodzaju materiału złącza p-n w ogniwie. Obecnie największą sprawnością cechują się ogniwa wielowarstwowe. Sprawność jest to stosunek maksymalnej mocy modułu do iloczynu natężenia promieniowania słonecznego oraz powierzchni czynnej ogniw (1):

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

η – sprawność, %;

P_{max} - moc maksymalna, W;

E – natężenie promieniowania słonecznego padające prostopadłe na moduł, Wm^{-2} ;

S – powierzchnia czynna modułu, m^2 .

Rezystancja optymalna czyli rezystancja odpowiadająca punktowi maksymalnej mocy jest ilorazem napięcia i prądu w punkcie mocy maksymalnej. Jest to obciążenie jakie zapewnia wystąpienie maksymalnej sprawności w danych warunkach nasłonecznienia (2):

$$R_{opt} = \frac{U_{max}}{I_{max}} \quad (2)$$

gdzie:

R_{opt} - rezystancja optymalna, Ω ;

I_{max} - natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej, A;

U_{max} - napięcie w punkcie mocy maksymalnej, V.

Algorytmy śledzące punkt maksymalnej mocy śledzą tym samym wartość rezystancji optymalnej modułu czyli jego odpowiedniego obciążenia. Algorytmy takie stosowane są w urządzeniach energoelektronicznych do współpracy z fotowoltaiką, jakimi są falowniki i regulatory ładowania. Należy zauważyć, że zbyt małe obciążenie modułu również niekorzystnie wpływa na uzysk energetyczny.

Współczynnik wypełnienia modułu (ang. *fill factor*) jest ilorazem mocy maksymalnej modułu do iloczynu prądu zwarcia i napięcia w stanie jałowym (3):

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3)$$

gdzie:

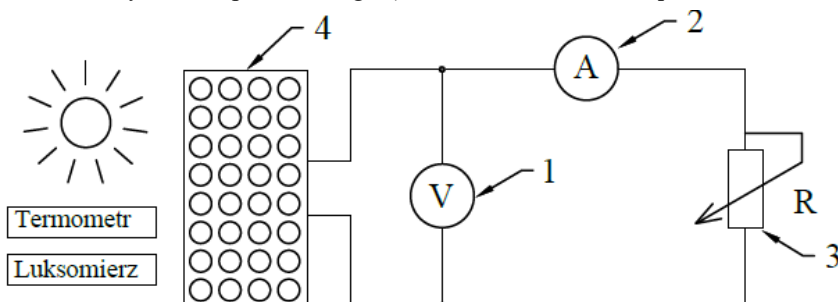
I_{sc} - prąd zwarcia, A;

U_{oc} - napięcie w stanie jałowym, V.

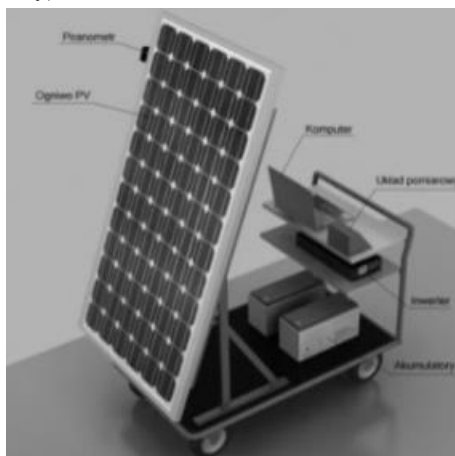
Dla idealnego modułu jest równy 100%. Im większa jest jego wartość tym charakterystyka prądowo-napięciowa jest bardziej zbliżona do prostokąta, zatem ogniwo utrzymuje stały prąd przy większym zakresie napięć. Wartość współczynnika wypełnienia nie informuje jednak o sprawności konwersji energii w module, jedynie o wartościach rezystancji bocznikowej i szeregowej w modelu ogniwa, na których wydzielają się straty mocy czynnej.

Stanowisko badawcze do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych modułów fotowoltaicznych znajduje się w Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym im. J.J. Śniadeckich w Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii Wydziału Mechanicznego. Stanowisko jest elementem mobilnym (Rys. 6). Składa się z modułu fotowoltaicznego monokrystalicznego o mocy 180 W, inwertera o mocy ciągłej 1,5 kW z wbudowaną ładowarką sieciową, akumulatorów żelowych 12V/100Ah, układu pomiarowego, obciążenia aktywnego do badania modułu oraz komputera PC z aplikacją PV2EWX, współpracującą z arkuszem kalkulacyjnym Excel. Podczas przeprowadzania badań odłączono akumulatory, by uzyskać pomiary jedynie dla chwilowej generacji energii z modułu. Badania zostały przeprowadzone 30.08.2017 w godzinach 12:30-13:00. Charakterystykę prądowo-napięciową zdejmowano dla 3 pochyleń modułu względem płaszczyzny horyzontalnej, uznając $\beta = 0^\circ$ przy ustawieniu modułu równolegle względem podłoża, zmieniając obciążenie modułu. Jednocześnie mierzono temperaturę modułu oraz wartość natężenia promieniowania padającego na moduł prostopadle do jego powierzchni (Rys. 5). Badanymi modułem był STP180S-24/Ac z krzemu monokrystalicznego.

Rys. 5. Schemat ideowy układu pomiarowego (1 – woltomierz, 2 – amperomierz, 3 – obciążenie,



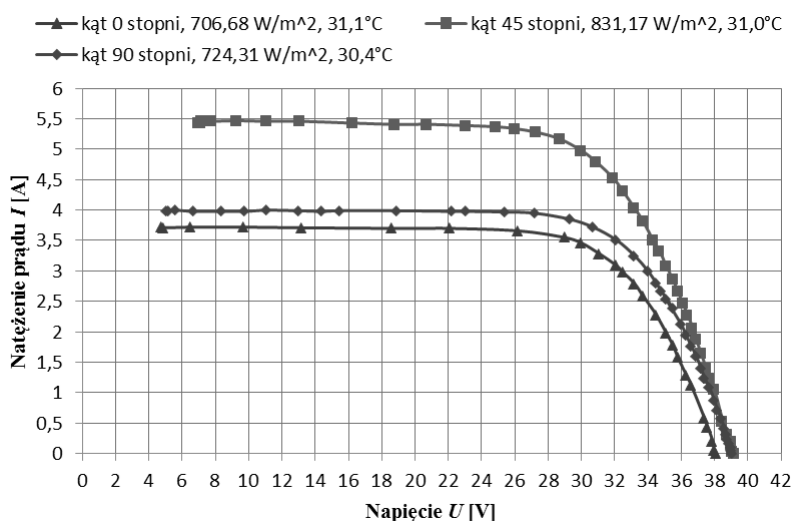
4 – badany moduł fotowoltaiczny).



Rys. 6. Mobilne stanowisko do badania wybranych parametrów modułów fotowoltaicznych (Skibowski 2012).

3. Wyniki i dyskusja

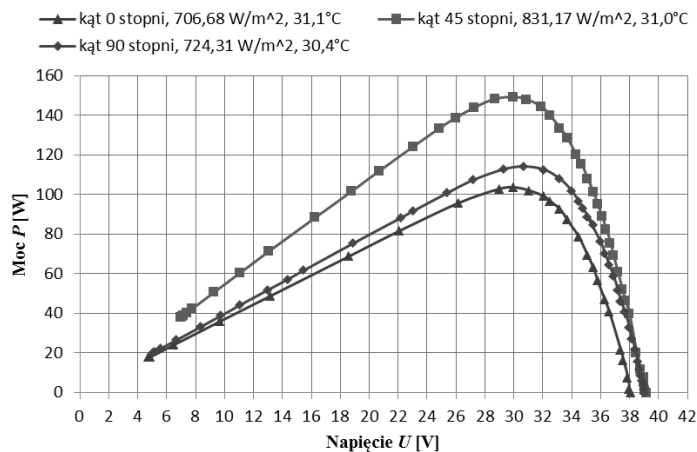
Podczas przeprowadzania badań zostały wykonane trzy pomiary, wśród których można wyróżnić ustawienia modułu względem płaszczyzny horyzontalnej pod kątem: 0° , 45° , 90° . Pomiary w każdym z ustawień zostały wykonane dla średniej temperatury powierzchni modułu około 31°C . Na rysunkach 7, 8 zaprezentowane są uzyskane charakterystyki prądowo-napięciowe oraz krzywe mocy, a w tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń, natomiast na rysunkach 9 i 10 wykreślono zmiany temperatury powierzchni modułu oraz natężenia promieniowania padającego prostopadłe na jego powierzchnię podczas prowadzenia każdego z pomiarów.



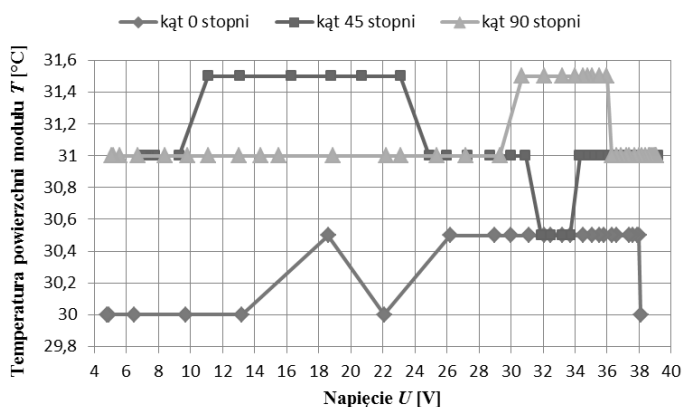
Rys. 7. Charakterystyka prądowo-napięciowa dla trzech ustawień modułu i średniej temperatury modułu około 31°C [badanie własne].

Ze względu na okres około 30 minut prowadzenia pomiarów zostały zachowane zbliżone warunki temperatury i natężenia oświetlenia, do obliczeń przyjęto wartości średnie natężenia promieniowania padającego prostopadłe na powierzchnię modułu (Tab. 1). Różnica zaledwie $0,6^\circ\text{C}$ między średnimi pomiarami temperatury sprawia, że wpływ zmiany temperatury modułu jest tutaj pomijalny. Natężenie promieniowania padającego prostopadłe do powierzchni modułu podczas pomiarów dla danego ustawienia modułu można szacunkowo przyjąć jako stałe. Zauważono zwiększenie jego wartości przy dużych wartościach obciążenia dla nachylenia modułu pod kątem 0° . Zauważono, że odchylając moduł od pozycji prostopadłego padania promieni słonecznych natężenie promieniowania padającego na moduł jest mniejsze w stosunku do ustawienia 45° o 12,9% dla ustawienia pod kątem 90° oraz 15,0% dla ustawienia pod kątem 0° . Przy temperaturze powierzchni modułu około 31°C dla kąta 90° odnotowano 23,5% spadek mocy generowanej przez moduł w stosunku do kąta 45° , natomiast dla kąta 0° spadek równy 30,5%. Rezystancja optymalna modułu waha się od 6,02 do $8,67 \Omega$. W przypadku kąta pochylenia równego 45° przy natężeniu promieniowania mniejszym o około 170 Wm^{-2} niż w warunkach standardowych STC, ale przy temperaturze o 6°C większej moduł osiągnął prąd zwarcia większy o 0,14 A od prądu zwarcia podawanego w katalogu modułu. Zaobserwować można tu zjawisko wpływu temperatury na pracę modułu fotowoltaicznego, gdyż przy jej wzroście maleje napięcie obwodu otwartego, a rośnie prąd zwarcia modułu. Szeregując pomiary od najmniejszego do największego natężenia promieniowania czyli odpowiednio dla 0° , 90° oraz 45° zauważono, że rośnie zarówno prąd zwarcia jak i natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej, a także napięcie obwodu otwartego. Współczynnik wypełnienia charakterystyki prądowo-napięciowej osiąga najmniejszą wartość przy największej sprawności modułu, czyli przy ustawieniu modułu pod kątem 45° , zatem nie informuje on bezpośrednio

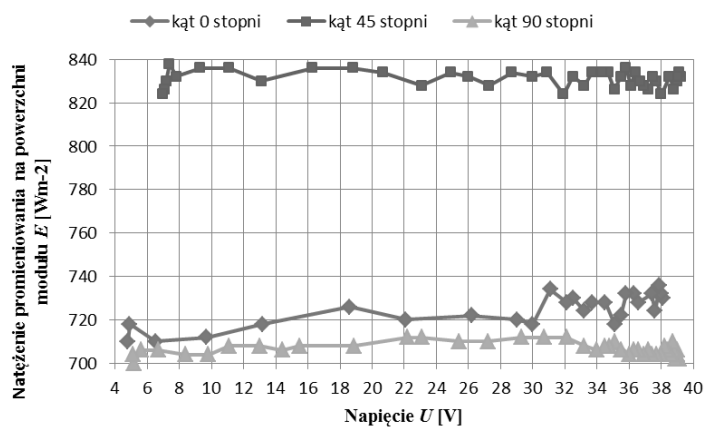
o sprawności konwersji energii, jedynie o kształcie charakterystyki prądowo-napięciowej. Zauważono, że wraz ze spadkiem sprawności modułu rośnie rezystancja optymalna modułu.



Rys. 8. Krzywe mocy dla trzech ustawień modułów i średniej temperatury modułu około 31°C [badanie własne].



Rys. 9. Zmiany temperatury powierzchni modułu fotowoltaicznego podczas badań [badanie własne].



Rys. 10. Zmiany natężenia promieniowania padającego prostopadle do powierzchni modułu podczas badań [badanie własne].

Tab 1. Wyniki pomiarów [opracowanie własne]

Parametr modułu PV	Dane producenta (STC)	Kąt pochylenia		
		0°	45°	90°
Napięcie obwodu otwartego U_{oc} [V]	44,8	38,1	39,2	39,1
Prąd zwarcia I_{sc} [A]	5,29	3,73	5,43	3,99
Napięcie w punkcie mocy max U_{mpp} [V]	36	30,0	30,0	30,8
Prąd w punkcie mocy max I_{mpp} [A]	5	3,46	4,98	3,72
Moc maksymalna P_{mpp} [W]	180	103,7	149,4	114,2
Rezystancja optymalna R_{opt} [Ω]	7,2	8,67	6,02	8,28
Współczynnik wypełnienia FF	0,76	0,73	0,702	0,732
Sprawność η [%]	Dla mono-Si 15-18	11,21	14,08	12,66
Temperatura powierzchni modułu T [°C]	25	31,1	31,0	30,4
Natężenie promieniowania padającego prostopadle na powierzchnię modułu E [W·m ⁻²]	1000	706,68	831,17	724,31

4. Wnioski

W warunkach rzeczywistych nie można rozdzielić wpływu temperatury oraz natężenia promieniowania na pracę modułów fotowoltaicznych, gdyż ich nagrzewanie jest naturalne przy większym natężeniu oświetlenia, dodatkowo spowodowane ciągłą ekspozycją na działanie promieni słonecznych. Zmiana kąta ustawienia modułu zmienia również ilość energii, jaka dociera do powierzchni modułu fotowoltaicznego. Największy uzysk energetyczny odnotowuje się, gdy promienie słoneczne padają pod kątem prostym do powierzchni modułu, stąd w celu optymalizacji pozyskiwania energii z modułów fotowoltaicznych kluczowe jest zastosowanie urządzeń energoelektronicznych z wbudowanymi algorytmami MPPT (ang. *Maximum Power Point Tracking*). Moduły fotowoltaiczne są źródłem energii, które ściśle zależy od warunków pogodowych, zatem w celu zapewnienia ciągłości zasilania w takich instalacjach stosowane są magazyny energii. Dodatkowo można zauważyć, iż parametry znamionowe modułów fotowoltaicznych nie są możliwe do osiągnięcia w warunkach rzeczywistych pomiaru (STC – 1000 Wm⁻², 25°C, AM 1.5), ze względu na ich pracę w znacznie szerszym spektrum temperatur oraz natężeń promieniowania niż w warunkach laboratoryjnych. Zauważono również, że w warunkach rzeczywistych na szerokości geograficznej 53°07'24" w sierpniu przy ustawieniu modułu pod kątem 90° uzysk energetyczny jest większy niż dla kąta 0°, z tego względu iż słońce góruje na wysokości mniejszej niż 45°, co sprawia, że promienie padają prostopadle na moduł, gdy jest ustawiony pod kątem 45° i większym.

5. Literatura

Fizikowski J, Mroziński A (2016) Inżynieria instalacji fotowoltaicznych, wydawnictwo współfinansowane ze środków krajowych i funduszy norweskich

- Jastrzębska G (2013) Ogniwa słoneczne: Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności
- Klugmann-Radziemska E (2006) Odnawialne źródła energii – przykłady obliczeniowe, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
- Klugmann-Radziemska E, Klugmann E (2005) Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii, Ekonomia i Środowisko
- Matuszczyk P, Popławski T, Flaszka J (2015) Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych, Przegląd Elektrotechniczny , (12)2015: 159-162
- Skibowski M (2012) Stanowisko dydaktyczne do badań instalacji fotowoltaicznej. Praca magisterska. Wydział Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy
- Szczerbowski R (2012) Instalacje fotowoltaiczne – aspekty techniczno –ekonomiczne, Przegląd Elektrotechniczny, (10)2014: 31-36
- Tytko R (2013) Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej Wydawnictwo i Drukarnia Stowarzyszenia Słowaków w Polsce
- Wacławek M, Rodziejewicz T (2011) Ogniwa słoneczne: wpływ środowiska naturalnego na ich pracę, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne

4. Analiza zjawiska zacienienia ogniw modułu fotowoltaicznego z krzemu monokrystalicznego o mocy 245 W w warunkach rzeczywistych

Analysis of the cells' shading phenomenon of monocrystalline silicon photovoltaic module about the power of 245 W in real environmental conditions

Dutka Małgorzata

Instytut Inżynierii Elektrycznej, Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J Śniadeckich w Bydgoszczy, Koło Naukowe
Stowarzyszenia Elektryków Polskich
Opiekun naukowy: dr hab. inż. Sławomir Cieślik

Dutka Małgorzata: gosia_dutka@onet.eu

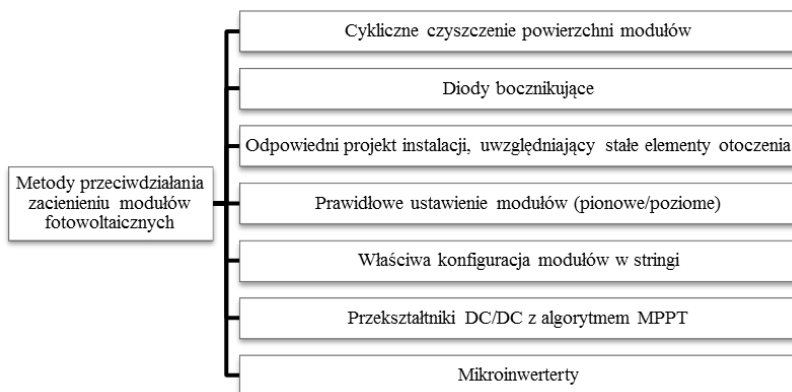
Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, ogniwa fotowoltaiczne, sprawność, moduł krzemowy monokrystaliczny, diody bocznikujące

Streszczenie

Podczas eksploatacji modułów fotowoltaicznych, które umożliwiają pozyskiwanie energii elektrycznej bezpośrednio z energii promieniowania słonecznego, zaobserwowano niekorzystny wpływ zjawiska zacienienia części modułu na jego sprawność. W zależności od stopnia zacienienia czyli procentowej powierzchni zacienionego ogniw obserwuje się różny jego wpływ na charakterystykę prądowo-napięciową i krzywą mocy. W referacie zaprezentowano badania modułu SGM-245D, o mocy znamionowej 245 W, który posiada trzy wbudowane diody bocznikujące zarówno w przypadku pracy normalnej jak i różnych wariantach zacienienia. Dokonano przeglądu metod minimalizacji wpływu zacienienia. Na podstawie badań zaobserwowano w jakich przypadkach ochrona z wykorzystaniem diod by-pass spełnia swoją funkcję, a jakich jest ona bezużyteczna.

1. Wstęp

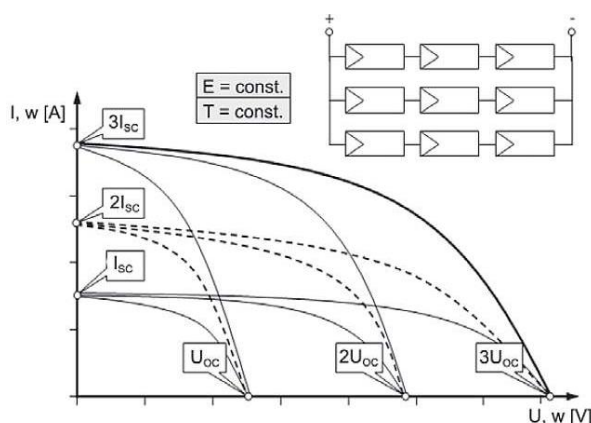
Coraz szersze zastosowanie modułów fotowoltaicznych w warunkach gospodarstwa domowego sprawia, że duży nacisk kładziony jest na efektywność konwersji energii, a także maksymalizację uzysków energetycznych. Technologia fotowoltaiczna jest tania, lecz chwilowa moc generowana z modułów fotowoltaicznych jest zależna od warunków pogodowych, z którymi związana jest temperatura powierzchni modułu oraz ilość natężenia promieniowania, docierająca do powierzchni modułu. Zjawisko zacienienia ogniw wpływa niekorzystnie na wypadkową moc modułu, gdyż produkcja energii jest odwrotnie proporcjonalna do obszaru zacienienia. Metodami eliminacji tego zjawiska lub ograniczenia jego skutków jest między innymi cykliczne czyszczenie modułów, odpowiednie zaprojektowanie instalacji z dala od stałych elementów otoczenia, właściwa konfiguracja modułów w stringi, a także prawidłowe ustawienie modułów w poziomie lub pionie.



Rys. 1. Metody ograniczenia wpływu zjawiska zacienienia na sprawność instalacji fotowoltaicznej.

Wymienione metody ograniczają się do eksploatacji instalacji fotowoltaicznej, natomiast zastosowanie diod by-pass oraz przekształtników energoelektronicznych (zarówno przekształtników z punktem śledzenia mocy maksymalnej, jak i mikroinwerterów) to rozwiązania konstrukcyjne (Rys. 1).

Zjawisko zacienienia ogniwa sprawia, że napięcie na nim zmienia kierunek i staje się obciążeniem dla pozostałej części modułu. Wówczas złącze zacienionego ogniwa może ulec przebicciu przy napięciu rzędu kilku voltów. Występuje ono na małej powierzchni ogniwa, przyjmując one biały kolor i nazywane są „gorącymi punktami”. Wydziela się z nich duża ilość ciepła, która prowadzi do lokalnego wzrostu temperatury. „Gorące punkty” są uszkodzeniami o charakterze trwałym (Fizikowski i in 2016). Efekt zacienienia zależy od połączenia wewnętrznego ogniów w module. Zacienione ogniwo traktowane jest jako przerwa w obwodzie zatem przy konfiguracji połączenia ogniów w jeden string w module wyjściowa moc spada praktycznie do zera. Stąd w celu ograniczenia zjawiska zacienienia wprowadzono równoległe połączenia stringów (Rys. 2). Przy połączeniu szeregowym dwóch ogniów napięcie jałowe połączenia wzrasta dwukrotnie, natomiast przy połączeniu równoległym prąd zwarcia wzrasta dwukrotnie.

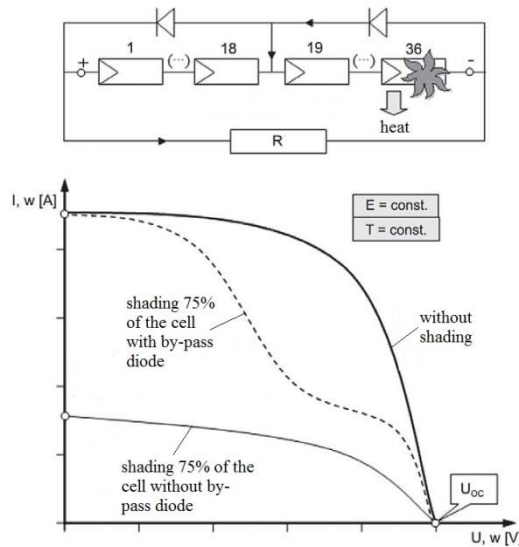


Rys. 2. Charakterystyki prądowo-napięciowe modułów PV połączonych w kombinacji szeregowo-równoległej (Wiatr 2016).

Ograniczenie skutków zacienienia jest możliwe poprzez poprawne usytuowanie modułu w poziomie lub pionie. Jeśli moduł jest ustawiony w pozycji, w której w dolnym rzędzie ogniów znajdują się ogniwa ze wszystkich stringów połączonych równoległe, wówczas całkowita produkcja z danego modułu przy zalegającym śniegu u jego podstawy jest równa 0. Przy obrocie modułu o 90 stopni uzyskuje się zacienienie ogniów tylko jednego stringu. Stosowanie diod bocznikujących, które są konstrukcyjnym rozwiązaniem przeciwdziałającym zjawisku zacienienia, przy połączeniu szeregowym ogniów umożliwia ominięcie miejsca zacienienia przez prąd wytwarzany przez pozostałe ogniwa, należące do innych części stringu i zabezpieczanych przez osobne diody bocznikujące. W trakcie normalnej pracy diody są spolaryzowane w kierunku zaporowym i nie generują strat mocy, natomiast w przypadku zacienienia ogniwa są spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Typowy moduł zawiera od 2 do 4 diod by-pass niezależnym od warunków montażu modułu. Na Rys. 3 przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową modułu zawierającego szeregowe połączenie ogniów z dwiema diodami bocznikującymi. Można zaobserwować, że w przypadku ich zastosowania oraz zacienienia 75% powierzchni ogniwa uzyskujemy znacznie lepszą sprawność konwersji energii.

Najbardziej zaawansowanym technologicznie rozwiązaniem jest zastosowanie energoelektronicznych przekształtników z wbudowanym algorytmem śledzenia punktu mocy maksymalnej lub mikroinwerterów (Głów A i in. 2014). Przekształtniki energoelektroniczne zwane optymalizatorami DC przy zacienieniu jednego modułu w instalacji zwiększa wartość prądu płynącego przez pozostałe moduły i obniżają wartość napięcia niezacienionych modułów. Jest to rozwiązanie sterujące całą instalacją PV. Do jednostkowego ograniczania wpływu zacienienia na

pojedynczym module w instalacji służą mikroinwertery. Są one montowane przy każdym module lub sekcji modułów w celu częściowego sterowania instalacją. W badaniach wykorzystano moduł monokrystaliczny z wbudowanymi diodami by-pass, gdyż bez tego zabezpieczenia może dojść do trwałego uszkodzenia sprzętu.



Rys. 3. Wpływ zacielenia częściowego modułu na kształt charakterystyki bez lub z użyciem diod bocznikujących (Wiatr 2016).

2. Materiał i Metody

W badaniach posłużono się kilkoma miarami oceny (Klugmann-Radziemska 2006), aby porównać wyniki pomiarów. Pierwszym z niej jest współczynnik wypełnienia modułu (ang. *fill factor*), będący ilorazem mocy maksymalnej modułu oraz iloczynu prądu zwarcia i napięcia w stanie jałowym (1):

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

gdzie:

P_{max} - moc maksymalna, W;

I_{sc} - prąd zwarcia, A;

U_{oc} - napięcie w stanie jałowym, V.

Dla idealnego modułu PV jest równy 100%. Im większa jest jego wartość tym charakterystyka prądowo-napięciowa jest bardziej zbliżona do prostokąta, zatem ogniwo utrzymuje stały prąd przy większym zakresie napięć, co oznacza mniejsze straty na rezystancjach bocznikowych i szeregowych modelu ogniwa fotowoltaicznego. Wartość współczynnika wypełnienia nie informuje jednak o sprawności konwersji energii w module.

Rezystancja optymalna czyli rezystancja odpowiadająca punktowi maksymalnej mocy jest ilorazem napięcia i prądu w PMM (2). Jest to obciążenie jakie zapewnia wystąpienie maksymalnej sprawności w danych warunkach nasłonecznienia.

$$R_{opt} = \frac{U_{max}}{I_{max}} \quad (2)$$

gdzie:

R_{opt} - rezystancja optymalna, Ω ;

I_{max} - natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej, A;

U_{max} - napięcie w punkcie mocy maksymalnej, V.

Algorytmy śledzące punkt maksymalnej mocy śledzą tym samym wartość rezystancji optymalnej modułu czyli jego odpowiedniego obciążenia. Są one implementowane w urządzeniach energoelektronicznych przekształcających napięcie stałe instalacji PV na napięcie przemienne sieci (falowniki).

Do bezwzględnego porównania uzysku energetycznego modułu służy wyznaczona na drodze obliczeń sprawność. Jest to stosunek maksymalnej mocy modułu do iloczynu natężenia promieniowania słonecznego oraz powierzchni czynnej ogniw (3):

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

η – sprawność, %;

E – natężenie promieniowania słonecznego padające prostopadłe na moduł, Wm^{-2} ;

S – powierzchnia czynna modułu, m^2 .

Ważnym parametrem ogniw jest również gęstość prądu zwarcia, bowiem determinuje ona wytrzymałość mechaniczną materiału (4):

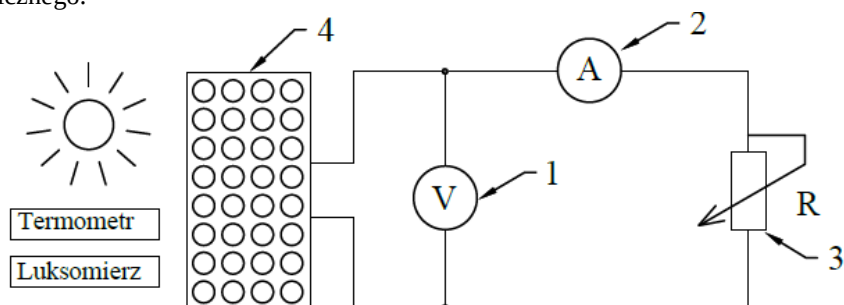
$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{S} \quad (4)$$

gdzie:

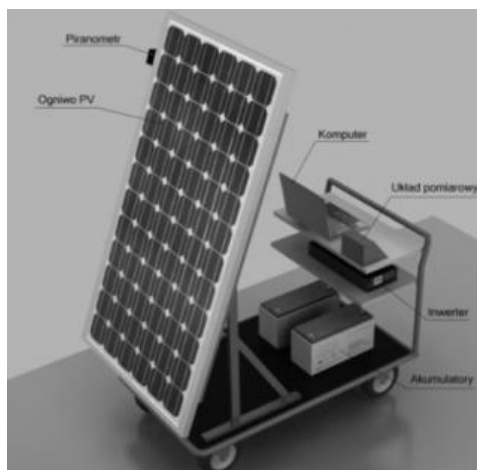
J_{sc} – gęstość prądu zwarcia, Am^{-2} .

Stanowisko badawcze do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych modułów fotowoltaicznych znajduje się w Laboratorium Odnawialnych Źródeł Energii Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczym im. J.J. Śniadeckich. Stanowisko jest elementem mobilnym (Rys. 5). Składa się z modułu fotowoltaicznego monokrystalicznego o mocy 245 W (sam moduł można wymieniać), inwertera o mocy ciągłej 1,5 kW z wbudowaną ładowarką sieciową, akumulatorów żelowych 12V/100Ah, układu pomiarowego, obciążenia aktywnego do badania modułu oraz komputera PC z aplikacją PV2EWX, współpracującą z arkuszem kalkulacyjnym Excel.

Badania zostały przeprowadzone 30.08.2017 w godzinach 12:30-13:00. Charakterystykę prądowo-napięciową zdejmowano dla 6 konfiguracji zacienienia modułu przy jego ustawieniu w pozycji horyzontalnej, zmieniając obciążenie modułu. Jednocześnie mierzono temperaturę modułu oraz wartość natężenia promieniowania padającego prostopadłe na moduł (Rys. 4). Badanym modułem był SGM-245-D o mocy znamionowej 245 W. Podczas przeprowadzania badań odłączono akumulatory, by uzyskać pomiary jedynie dla chwilowej generacji energii z modułu fotowoltaicznego.



Rys. 4. Schemat ideowy układu pomiarowego (1 – woltomierz, 2 – amperomierz, 3 – obciążenie, 4 – badany moduł fotowoltaiczny).



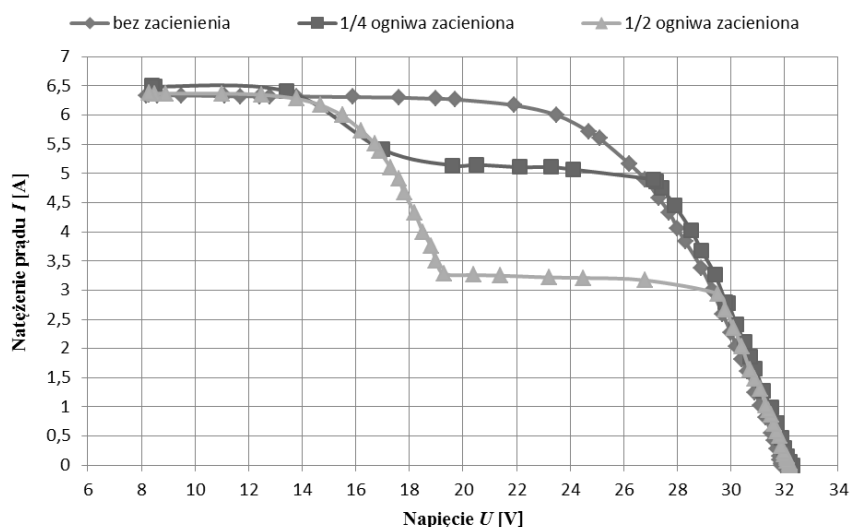
Rys. 5. Mobilne stanowisko do badania wybranych parametrów modułów fotowoltaicznych (Skibowski 2012).

3. Wyniki i dyskusja

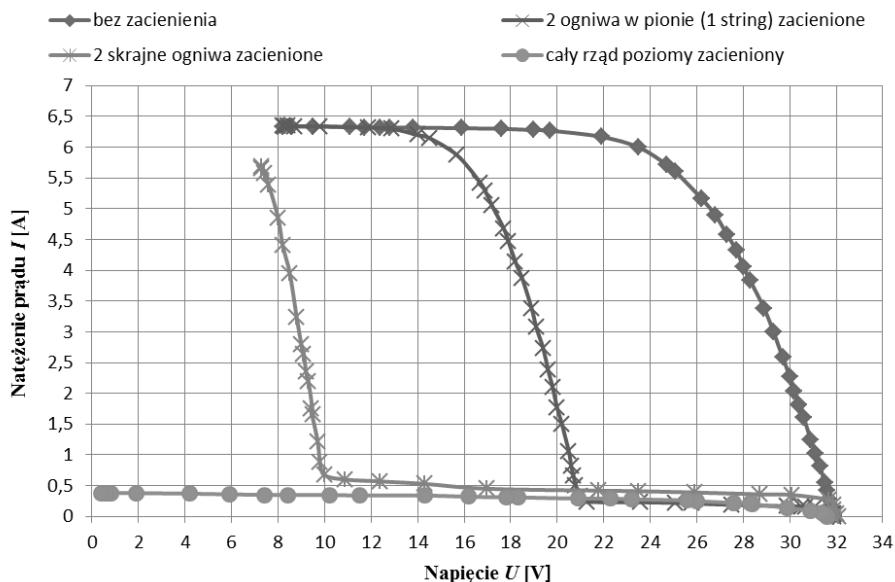
W badaniach zostało przeprowadzonych sześć pomiarów, wśród których można wyróżnić próbę kontrolną bez zacinienia, zacinienie częściowe $\frac{1}{4}$ oraz $\frac{1}{2}$ ogniwa, a także zacinienie całkowite przeprowadzone dla dwóch sąsiadujących ogniw, które znajdują się w jednym stringu, a także 2 skrajnych ogniw (leżących na przeciwległych wierzchołkach modułu). Dodatkowo wykonano również próbę zacinienia całego poziomego rzędu ogniw czyli ogniw, które należą do wszystkich zabezpieczonych stringów. Na rysunkach 6, 7, 8 i 9 zaprezentowane są uzyskane charakterystyki prądowo-napięciowe oraz krzywe mocy, natomiast w tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń. Należy zauważyć, że badania były wykonywane w stałych warunkach środowiskowych czyli dla natężenia promieniowania od 780 do 782 Wm^{-2} , a także zbliżonej temperatury powierzchni modułu, która wahała się od 30,18 do 31,26°C.

Na podstawie pomiarów zauważono, że w przypadku zacinienia częściowego czyli zasłonięcia $\frac{1}{4}$ oraz $\frac{1}{2}$ ogniwa maleje jedynie natężenie prądu przepływające przez dany string, co również przekłada się proporcjonalnie na zmniejszenie mocy wyjściowej modułu. Można oszacować, że moc zaciennionego stringu maleje proporcjonalnie do kwadratu powierzchni zaciennionego ogniwa. W przypadku zaciennienia całkowitego zauważono dużą zależność od konfiguracji zaciennionych elementów. W przypadku zaciennienia dwóch ogniw w jednym stringu działa jedna dioda bocznikująca, natomiast w przypadku zaciennienia dwóch ogniw, leżących na przeciwległych wierzchołkach modułu działają dwie diody ze względu na zaciennienie ogniw w dwóch różnych stringach. Zaciennienie całego poziomego pasa ogniw skutkuje zadziałaniem wszystkich diod i wówczas sumaryczna moc jest zbliżona do zera, dokładnie na podstawie pomiarów maksymalna moc wynosi zaledwie 6,6 W, czyli sprawność modułu równa jest 0,52%. Zaciennienie całkowite modułu z diodami by-pass powoduje znaczną redukcję napięcia modułu przy niezmiennym prądzie przepływającym przez string ogniw. Przykładowo różnica w natężeniu prądu bez zaciennienia, a z zaciennieniem 2 ogniw jest pomijalnie mała, natomiast napięcie spada z poziomu 32 V do 21 V (o 11V), co jest wynikiem zadziałania 1 diody bocznikującej. Przy zaciennieniu dwóch skrajnych ogniw obserwuje się ten sam efekt przy zadziałaniu 2 diod bocznikujących ze spadkiem napięcia o kolejne 11 V (do poziomu 10 V). Każdy rodzaj zaciennienia modułu powoduje spadek sprawności konwersji energii, a także spadek współczynnika wypełnienia charakterystyki prądowo-napięciowej. Dodatkowo zauważono, że zaciennienie powoduje wahania rezystancji optymalnej, zatem niezbędne jest we wszystkich układach stosowanie przekształtników energoelektronicznych z algorytmem śledzenia punktu mocy maksymalnej. Zaciennienie częściowe jest związane z małym oddziaływaniem na napięcie modułu, jednak spadek natężenia prądu jest proporcjonalny do spadku natężenia promieniowania. Zaciennienie całkowite powoduje przesunięcie punktu maksymalnej mocy

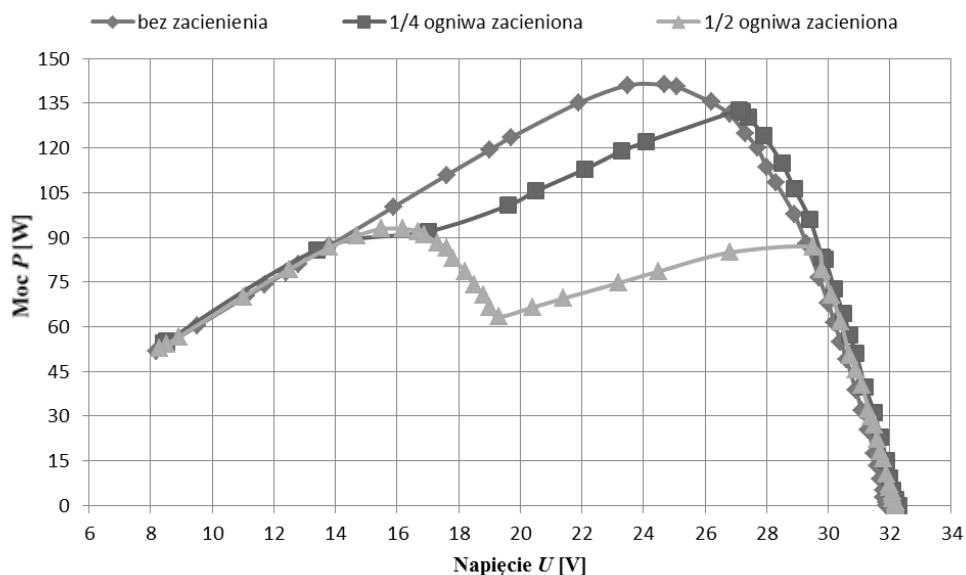
w kierunku malejących wartości napięcia przy zadziałaniu diod bocznikujących, natomiast zacinienie częściowe charakteryzuje się dwoma lokalnymi maksymalnymi wartościami mocy (Rys. 8, Rys. 9). Badając moduły fotowoltaiczne w warunkach rzeczywistych, czyli konkretne rozwiązanie techniczne jakim jest moduł SGM-245D, należy zauważyć, że nie jest możliwe uzyskanie pomiarów wpływu zacinienia na charakterystyki bez efektu ochrony przez diody bocznikujące. Jedynie podczas całkowitego zacinienia modułu czyli zadziałania wszystkich diod bocznikujących gęstość prądu zwarcia maleje. W pozostałych przypadkach jest w przybliżeniu równa gęstości prądu modułu bez zacinienia. Wraz ze wzrostem powierzchni zacinienia modułu maleje jego sprawność i jest ona odwrotnie proporcjonalna do kwadratu zacinionej powierzchni.



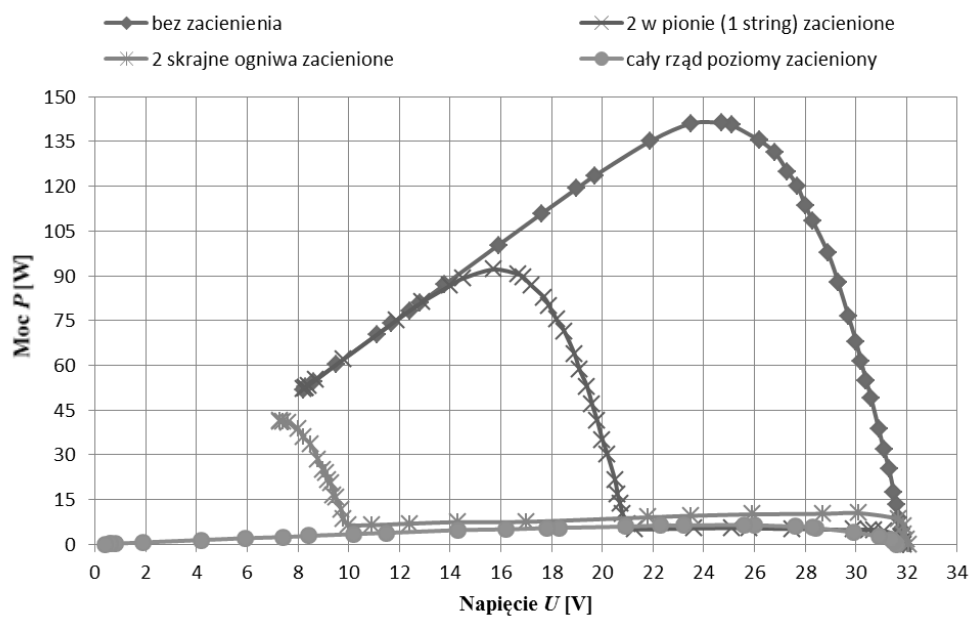
Rys. 6. Charakterystyki prądowo-napięciowe modułu SGM-245D dla zacinienia częściowego ogniwa [badanie własne].



Rys. 7. Charakterystyki prądowo-napięciowe modułu SGM-245D dla zacinienia całkowitego ogniwa [badanie własne].



Rys. 8. Krzywe mocy modułu SGM-245D dla zaciemnienia częściowego ogniwa [badanie własne].



Rys. 9. Krzywe mocy modułu SGM-245D dla zaciemnienia całkowitego ogniwa [badanie własne].

Tab 1. Wyniki pomiarów [badanie własne] .

Parametr modułu PV	Dane producenta (STC)	Zacienienie					
		bez	1/4 ogniwa	1/2 ogniwa	2 ogniwa w stringu	2 ogniwa skrajne	cały rząd poziomy
Napięcie obwodu otwartego U_{oc} [V]	37,8	31,9	32,3	32,2	31,9	32,1	31,6
Prąd zwarcia I_{sc} [A]	8,68	6,34	6,49	6,38	6,35	-	0,31
Gęstość prądu zwarcia J_{sc} [$A\cdot m^{-2}$]	5,31	3,88	3,97	3,91	3,89	-	0,19
Napięcie w punkcie mocy max U_{mpp} [V]	30,5	24,7	27,1	15,5	15,7	7,3	25,6
Prąd w punkcie mocy max I_{mpp} [A]	8,03	5,72	4,90	6,00	5,87	5,68	0,26
Moc maksymalna P_{mpp} [W]	245	141,2	132,7	93	92,1	41,4	6,6
Rezystancja optymalna R_{opt} [Ω]	3,80	4,32	5,53	2,58	2,67	1,29	98,46
Współczynnik wypełnienia FF	0,75	0,70	0,63	0,45	0,45	-	0,67
Sprawność η [%]	15,00	11,08	10,39	7,29	7,23	3,25	0,52
Temperatura powierzchni modułu T [$^{\circ}C$]	25,00	31,26	30,18	30,38	30,93	30,71	30,91
Natężenie promieniowania padającego prostopadle na powierzchnię modułu E [$W\cdot m^{-2}$]	1000	780	782	781	780	781	780

4. Wnioski

Zacienienie modułów fotowoltaicznych powoduje zmniejszenie ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ogniw, a przede wszystkim wzrost oporu elektrycznego układu ogniw, co wpływa bezpośrednio na spadek natężenia prądu, produkowanego przez dane ogniwo, a to przekłada się na spadek sprawności konwersji energii w całej instalacji solarnej. Zjawisko zacienienia pojawia się bardzo często przy normalnej eksploatacji modułów fotowoltaicznych jako skutek zabrudzenia powierzchni modułów, a także zalegającego śniegu lub liści.

Badania przeprowadzone na module SGM-245D, który zawiera w swojej strukturze 3 diody bocznikujące, pokazują, że elementy te pełnią prawidłowo swoją funkcję jedynie, gdy zacieniona jest niewielka część modułu – pojedyncze ogniwo lub jego część. Jeżeli większa ilość ogniw jest zacieniona wówczas wyjściowa moc modułu zależy od konfiguracji jego połączeń wewnętrznych. Jeżeli wszystkie zacienione ogniwa znajdują się w jednym stringu wówczas zadziała jedna dioda bocznikująca i pozostała część modułu będzie pracować. Natomiast jeżeli zostaną zacienione pojedyncze ogniwa we wszystkich stringach, tak jak miało to miejsce w przypadku zacienienia całego poziomego rzędu ogniw modułu SGM-245D, wówczas moc wyjściowa modułu jest zbliżona do zera. Większa ilość diod bocznikujących, jakie są montowane w strukturze modułu fotowoltaicznego, pozwala na precyzyjniejsze eliminowanie wpływu zacienienia, bowiem zwierana jest jego mniejsza powierzchnia czynna, jednak ze względu na większe koszty produkcyjne nie stosuje się takiego rozwiązania na szeroką skalę.

Przeciwdziałanie zjawisku zacielenia jest możliwe nie tylko poprzez instalację diod by-pass, ale również poprzez prawidłowe projektowanie instalacji fotowoltaicznej i przewidywanie przeszkód, które mogą powodować zacielenie tj. roślinność oraz obce elementy konstrukcyjne. Również częste przeglądy oraz utrzymanie czystości powierzchni modułów wpływa korzystnie, gdyż bez zanieczyszczeń większa ilość promieniowania słonecznego dociera do powierzchni modułów, a dodatkowo czas życia instalacji jest dłuższy. Do najprecyzyjniejszych metod optymalizacji uzysku mocy z zacielenionej instalacji fotowoltaicznej zaliczane jest zastosowanie urządzeń energoelektronicznych, zawierających algorytm śledzenia punktu maksymalnej mocy.

5. Literatura

- Dobrobantu L, Popescu MO, Popescu CI i in. (2011) Depositions Effects and Losses Caused by Shading on Photovoltaic Panels, Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), 1-5
- Fizikowski J, Mroziński A (2016) Inżynieria instalacji fotowoltaicznych, wydawnictwo współfinansowane ze środków krajowych i funduszy norweskich
- Jastrzębska G (2013) Ogniwa słoneczne: Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności
- Głów A, Kurz D (2014) Sposoby ochrony instalacji fotowoltaicznych przed następstwami zacielen, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej: Elektrotechnika, (79)2014: 113-120
- Klugmann-Radziemska E (2010) Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC
- Klugman-Radziemska E (2006) Odnawialne źródła energii – przykłady obliczeniowe, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
- Skibowski M (2012) Stanowisko dydaktyczne do badań instalacji fotowoltaicznej. Praca magisterska. Wydział Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy
- Wacławek M, Rodziewicz T (2011) Ogniwa słoneczne: wpływ środowiska naturalnego na ich pracę, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne
- Wiatr J. (2016) <http://www.elektro.info.pl/arttykul/id6490,instalacje-fotowoltaiczne-dobor-falownika-przewodow-oraz-ich-zabezpieczen?p=2> (dostęp:10.11.2017)

5. Badanie wpływu promieniowania jonizującego na skład frakcyjny biodiesla

Study of impact of ionizing radiation on biodiesel distillation characteristics

Jarosński Przemysław, Grabowski Paweł

Instytut Chemii, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, Polska

Jarosński Przemysław: przemyslaw.jarosinski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: FAME, modyfikacja biopaliw, właściwości fizykochemiczne

Streszczenie

Estry metylowe kwasów tłuszczowych (ang. fatty acid methyl esters, FAME) zwane popularnie biodieslem posiadają wiele zalet sprawiających, że w czasach rosnącego zainteresowania ochroną środowiska naturalnego warto rozważać ich stosowanie w silnikach o zapłonie samoczynnym. Niestety wady biodiesla wymuszają poszukiwanie możliwości polepszenia właściwości FAME. Jedną z takich możliwości może być zastosowanie promieniowania jonizującego.

Aby móc ocenić możliwość używania technik radiacyjnych do poprawy jakości biodiesla, należy zbadać oddziaływanie promieniowania jonizującego na parametry jakościowe FAME. W niniejszej pracy opisano wpływ takiego promieniowania na skład frakcyjny biodiesla produkowanego z rzepaku (ang. rapeseed methyl esters, RME). Z racji higroskopijności estrów metylowych kwasów tłuszczowych oraz wynikającej z niej możliwości wpływu wody na jakość biodiesla i procesy w nim zachodzące, zdecydowano się również zbadać RME nasycone wodą.

Badania wykazały, że skład frakcyjny RME ulega niewielkim zmianom pod wpływem promieniowania jonizującego. Analizując krzywe destylacji można zaobserwować pewną tendencję spadkową wraz ze wzrostem dawki promieniowania. W przypadku próbek nienawodnionych zmiana jest stopniowa, natomiast dla próbek nasyconych wodą ma charakter bardziej skokowy. Taki charakter zmian świadczy o możliwej degradacji najwyższej wrzących estrów pod wpływem promieniowania lub, w przypadku estrów nienasyconych, o ich polimeryzacji inicjowanej radiacyjnie.

1. Wstęp

Z uwagi na skończoność zasobów paliw kopalnych oraz w trosce o środowisko naturalne, od kilkudziesięciu lat prowadzone są badania nad alternatywnymi paliwami do silników samochodowych. Istotną grupę tych paliw stanowią biopaliwa, które można podzielić na trzy rodzaje (Lee and Lavoie 2013):

- biopaliwa pierwszej generacji – produkowane z surowców stosowanych do produkcji żywności,
- biopaliwa drugiej generacji – otrzymywane z biomasy niewykorzystywanej do produkcji żywności,
- biopaliwa trzeciej generacji – uzyskiwane z biomasy alg morskich.

W Europie wymiernym czynnikiem mobilizującym producentów paliw do rozwijania technologii otrzymywania biokomponentów są wymagania Unii Europejskiej. Do 2020 r. kraje członkowskie UE są zobligowane osiągnąć 10% udział biopaliw w ogólnym zużyciu benzyny i oleju napędowego wykorzystywanego w transporcie (Dyrektywa 2009/28/WE). Wprawdzie realizacja tego celu ma przebiegać w oparciu o powszechną dostępność biopaliw drugiej generacji, jednak trudno sobie wyobrazić, żeby biopaliwa pierwszej generacji nagle straciły znaczenie.

Wśród biopaliw pierwszej generacji stosowanych do silników z zapłonem samoczynnym najważniejszy jest biodiesel otrzymywany z olejów roślinnych w wyniku transestryfikacji, tzn. katalizowanej (najczęściej mocną zasadą) reakcji trójglicerydów z małowcząsteczkowym alkoholem, której produktami są monoestry kwasów tłuszczowych oraz gliceryna (Demirbas 2008). Pod pojęciem

biodiesla rozumie się olej napędowy zawierający powyżej 7% obj. estrów metylowych (bądź etylowych) kwasów tłuszczowych. Biodiesel oznacza się symbolem B oraz liczbą odpowiadającą procentowej zawartości estrów, np. B20 to paliwo składające się z 20% estrów oraz 80% oleju napędowego, a B100 to czyste estry. Przedmiotem badań opisanych w niniejszym artykule jest biodiesel (B100) otrzymany z oleju rzepakowego i metanolu (ang. *rapeseed methyl esters*, RME).

Estry metylowe kwasów tłuszczowych posiadają wiele zalet sprawiających, że warto rozważać ich stosowanie w silnikach o zapłonie samoczynnym, zarówno jako samoistne paliwo (B100), jak i w mieszaniu z olejem napędowym. Z racji wysokiej biodegradowalności (Blin et al. 2007) oraz niższych emisji większości szkodliwych składników spalin (Guarieiro et al. 2008; Sulewski i in. 2014; Urzędowska i Stępień 2014; Wasilewski i Krzaczek 2014), negatywny wpływ FAME na środowisko jest istotnie mniejszy niż wpływ paliw węglowodorowych. Wysoka temperatura zapłonu (Demirbas 2008) świadczy o bardzo dobrym bezpieczeństwie przeciwpożarowym, a doskonale właściwości smarnościowe estrów pozwalają znacznie polepszyć smarność oleju napędowego po dodaniu FAME już w ilości rzędu kilku procent (Baczewski i Kałdoński 2008). Niestety wady biodiesla, takie jak słaba stabilność oksydacyjna implikująca negatywne oddziaływanie na tworzywa sztuczne (Pullen and Saeed 2012) czy też wyższa w porównaniu do ON emisja tlenków azotu (Wasilewski i Krzaczek 2014) wymuszają poszukiwanie możliwości polepszenia właściwości FAME. Jedną z takich możliwości może być zastosowanie promieniowania jonizującego.

Do rzetelnej oceny możliwości używania technik radiacyjnych w celu poprawy jakości biodiesla niezbędne jest zbadanie oddziaływania promieniowania jonizującego na parametry jakościowe FAME. W ramach niniejszej pracy wykonano badanie wpływu promieniowania jonizującego na skład frakcyjny.

Skład frakcyjny wieloskładnikowego paliwa węglowodorowego to zależność między objętością oddestylowanego produktu a temperaturą. Jest on określany za pomocą destylacji normalnej, podczas której paliwo jest rozdzielane na wiele frakcji, różniących się od siebie temperaturą wrzenia (Baczewski i Kałdoński 2008).

Oznaczanie składu frakcyjnego wykonuje się najczęściej zgodnie z normą PN-EN ISO 3405. Destylacja jest prowadzona w specjalnych urządzeniach, w których paliwo jest stopniowo ogrzewane, a powstające pary schładza się aby przeszły w stan cieczy.

Za początek destylacji przyjmuje się temperaturę, w której do odbieralnika spada pierwsza kropla destylatu – jest to temperatura początku destylacji. Następnie odnotowuje się temperatury, w których do odbieralnika przedestyluje określony procent objętości destylowanej substancji. Wynikiem jest zależność $V = f(T)$, która może być przedstawiona w sposób tabelaryczny lub graficzny, jako tzw. krzywa destylacji (Baczewski i Kałdoński 2008).

Dla olejów napędowych, będących podstawowymi paliwami do silników o zapłonie samoczynnym, normalizuje się następujące parametry składu frakcyjnego (PN-EN 590):

- objętość paliwa destylującego do temperatury 250°C (poniżej 65% obj.),
- objętość paliwa destylującego do temperatury 350°C (min. 85% obj.),
- temperaturę w której oddestylowuje 95% obj. paliwa (maks. 360°C).

FAME są mieszaniną małej liczby składników, więc ich zakres temperatury wrzenia jest dużo węższy w porównaniu z ON. Średnio jest to przedział 325-350°C (Baczewski i Kałdoński 2008). Skład frakcyjny biodiesla nie jest normalizowany. Jednakże oznaczenie go pozwala wnioskować o obecności metanolu lub gliceryny, a w przypadku biodiesla poddanego działaniu promieniowania jonizującego także o obecności trwałych produktów radiolizy o wyższej lotności niż estry metylowe kwasów tłuszczowych.

2. Materiał i metody

2.1 Wybór i przygotowanie próbek pomiarowych

Badaniom poddano estry metylowe oleju rzepakowego (RME). W szklanych butelkach przygotowano osiem próbek czystego biopaliwa (B100) o objętości około 500 ml każda. Dodatkowo,

z racji higroskopijności estrów i wynikającej z niej możliwości wpływania wody na jakość biodiesla i procesy w nim zachodzące, zdecydowano się również zbadać RME nasycone wodą.

W celu nasycenia biodiesla wodą, 3750 ml RME wlewo do zlewki ustawionej na mieszadle magnetycznym i stopniowo (po włączeniu mieszadła) dodano 45 ml wody. Następnie, po wyłączeniu mieszadła, pozostawiono mieszaninę przez dwadzieścia cztery godziny w celu rozdziału faz. Po tym czasie z fazy estrów przygotowano osiem próbek w sposób analogiczny jak dla biodiesla nienasyconego wodą.

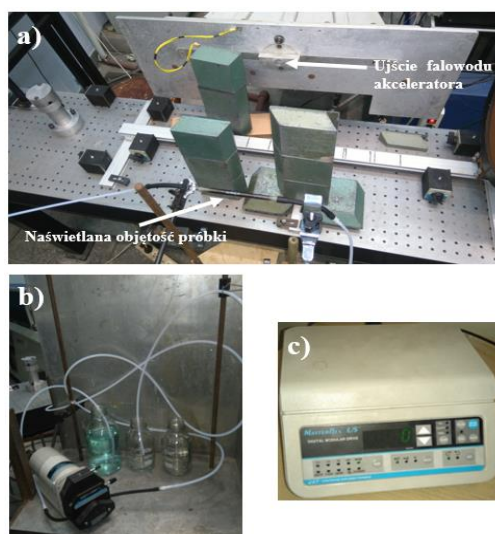
2.2 Naświetlenie strumieniem przyspieszonych elektronów

Po siedem próbek z każdej serii napromieniowano w Międzyresortowym Instytucie Techniki Radiacyjnej Politechniki Łódzkiej za pomocą liniowego akceleratora elektronów Elektronika ELU-6e zaprezentowanego na rys. 1.



Rys. 1. Liniowy akcelerator elektronów Elektronika ELU-6e.

Z racji dużych objętości próbek, naświetlenia wykonano w układzie przepływowym pokazanym na rys. 2. Układ składał się ze źródła elektronów – akceleratora, pompy perystaltycznej umieszczonej za aluminiową osłoną, szklanej rurki, dwóch butelek (na próbkę nienapromienioną oraz na próbkę napromienioną) oraz rurek łączących elementy układu, wykonanych z poli(tetrafluoroetylenu) (PTFE) – tworzywa odpornego na działanie promieniowania oraz biodiesla.



Rys. 2. Przepływowa instalacja zastosowana do naświetleń: a) układ do napromieniania RME, b) pompa perystaltyczna za osłoną aluminiową, c) sterownik pompy perystaltycznej.

Druga część pompy perystaltycznej – sterownik – znajdował się w pomieszczeniu bezpośrednio sąsiadującym z halą akceleratora. Takie umiejscowienie sterownika wynikało

z konieczności uruchamiania pompy w momencie uruchomienia akceleratora, a ze względów bezpieczeństwa w trakcie pracy akceleratora nikt nie może znajdować się w jego bezpośrednim otoczeniu.

Dawki promieniowania pochłonięte przez próbki wyznaczono z użyciem dozymetru żelazowo-żelazowego (Sugier 1992). Zostały one przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Dawki promieniowania pochłonięte przez próbki.

Nr próbki w serii	Dawka [kGy]
1	1,335
2	2,002
3	3,993
4	5,997
5	8,043
6	9,932
7	20,052

2.3 Oznaczenie składu frakcyjnego

Skład frakcyjny oznaczono metodą destylacji normalnej zgodnie z normą PN-EN ISO 3405. Do badań użyto destylarki automatycznej HDA 620 marki Herzog, zaprezentowanej na rys. 3.

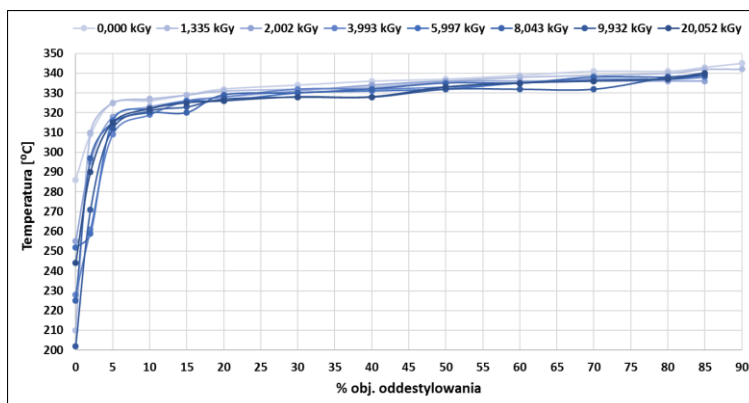


Rys. 3. Automatyczny aparat do destylacji normalnej HDA 620 marki Herzog.

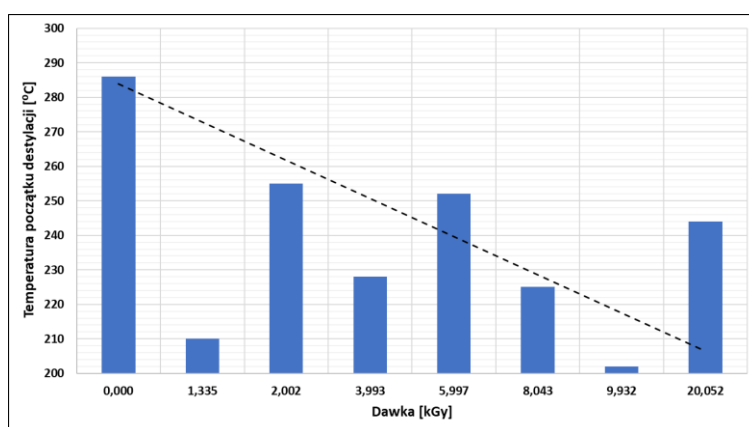
3. Wyniki i dyskusja

W pierwszej kolejności oznaczono składy frakcyjne próbek biodiesla nienasyconego wodą. Ich ogrzewanie przebiegało gwałtownie, z charakterystycznymi efektami wizualnymi (para) oraz dźwiękowymi. Spowodowane to było obecnością niewielkiej ilości wody pochłoniętej przez RME z powietrza oraz prawdopodobnie także obecnością produktów radiolizy biopaliwa bardziej lotnych niż estry. Dwie pierwsze próbki (nienapromienioną oraz o dawce pochłoniętej 1,335 kGy) destylowano do osiągnięcia 90% obj. destylatu, pozostałe już tylko do 85% obj. Krzywe destylacji przedstawiono na rys. 4.

Początek destylacji był trudny do uchwycenia ze względu na wspomnianą obecność wody oraz niżej wrzących produktów radiolizy RME. Pierwsze krople destylatów pojawiały się dość wcześnie i w nieregularnych odstępach czasu, toteż jednoznaczne określenie temperatury początku destylacji było utrudnione. Porównanie temperatur początku destylacji poszczególnych próbek pokazano na rys. 5.



Rys. 4. Składy frakcyjne próbek RME nienasyconych wodą.

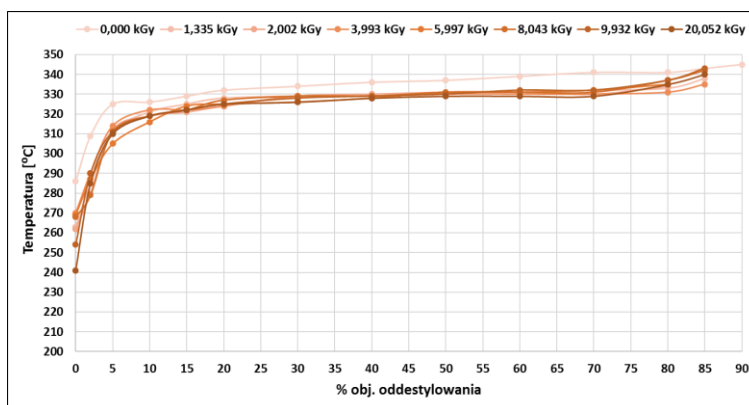


Rys. 5. Temperatury początku destylacji próbek RME nienasyconych wodą.

W przypadku próbek RME nienasyconych wodą obserwuje się obniżenie temperatury początku destylacji próbek poddanych działaniu promieniowania względem próbki nienapromienionej, jednak nie występuje żadna korelacja z pochłoniętą dawką. Najniższe początki wrzenia mają próbka o najmniejszej (1,335 kGy) oraz prawie największej (9,932 kGy) dawce pochłoniętej. Są to odpowiednio 210°C oraz 202°C. Radioliza jako proces rodnikowy charakteryzuje się pewnym stopniem losowości, dlatego niewykluczone, że podczas napromieniania biodiesla część estrów ulega fragmentacji, której produktem są bardziej lotne (tzn. wrzące w niższej temperaturze) związki chemiczne. Jednakże z racji wspomnianego statystycznego charakteru radiolizy temperatury wrzenia powstających lotnych substancji oraz ich ilość w próbkach jest niemożliwa do przewidzenia i, jak można wnioskować z rys. 5., niezależna od dawki promieniowania.

Poddając analizie całe krzywe destylacji próbek nienawodnionych można zaobserwować pewną tendencję spadkową ze wzrostem dawki promieniowania. Może to oznaczać degradację najwyżej wrzących estrów bądź, w przypadku estrów nienasyconych, ich polimeryzację. Powstające polimery mogą ulegać rozkładowi termicznemu, co objawia się wcześniejszym koksowaniem wymuszającym zakończenie destylacji przy mniejszym procencie oddestylowania próbki.

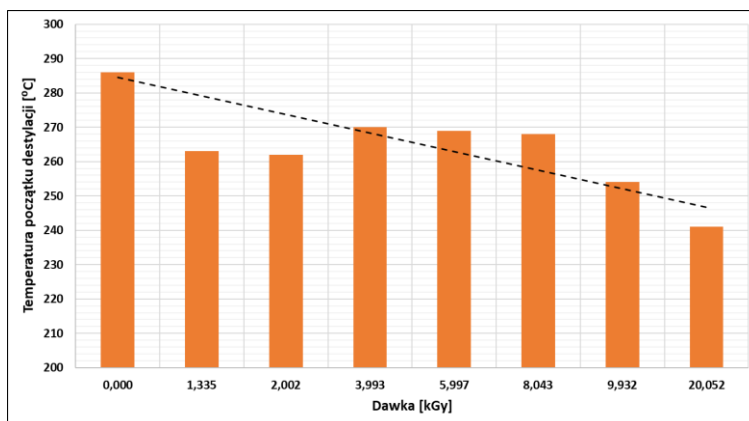
Składy frakcyjne próbek nasyconych wodą oznaczono po ich wcześniejszym osuszeniu za pomocą chlorku wapnia. Mimo tego ogrzewanie próbek przebiegało podobnie gwałtownie, jak ogrzewanie próbek nienawodnionych. Było to spowodowane prawdopodobnie zbyt krótkim czasem odwadniania, a także obecnością bardziej lotnych produktów radiolizy RME. Składy frakcyjne próbek nasyconych wodą przedstawiono na rys. 6. Jako odniesienie (0,000 kGy) wykorzystano krzywą próbki nienapromienionej nienasyconej wodą.



Rys. 6. Składy frakcyjne próbek RME nasączonych wodą.

W próbkach nasączonych wodą występował analogiczny, jak w próbkach bez wody, problem z oznaczeniem temperatury początku destylacji. Porównanie temperatur początku wrzenia zaprezentowano na rys. 7.

Temperatury początku destylacji próbek RME nasączonych wodą nie charakteryzują się aż tak losowym rozrzutem jaki można zaobserwować w próbkach nienawodnionych. Dostrzegalna jest pewna tendencja spadkowa ze wzrostem dawki pochłoniętej. Najszybciej zaczęła destylować próbka o największej dawce pochłoniętej, czyli 20,052 kGy. Miało to miejsce w temperaturze 241°C, a więc wyższej niż w przypadku czterech z siedmiu próbek nienasączonych wodą. Oznacza to, że w obecności wody powstaje mniej trwałych niskowrzących produktów radiolizy biodiesla. Należy więc wnioskować, że nasycenie próbek wodą przed naświetlaniem skutkuje osłabieniem destrukcyjnego działania promieniowania jonizującego.



Rys. 7. Temperatury początku destylacji próbek RME nasączonych wodą.

Analizując krzywe destylacji próbek RME nasączonych wodą można zaobserwować brak ich stopniowego obniżania się. Temperatury wrzenia poszczególnych frakcji estrów są niższe od temperatur wrzenia frakcji w próbce nienapromienionej, jednakże wszystkie krzywe są na podobnym poziomie. Odróżnia to próbki nawodnione od nienawodnionych. Warto także odnotować, że w większości zakresu oddestylowania (z wyjątkiem końca) temperatura wrzenia próbek nasączonych wodą oscyluje wokół 330°C, podczas gdy w próbkach bez wody często przekracza tę wartość, zbliżając się do 340°C.

Interesującym zjawiskiem zaobserwowanym wyłącznie dla próbek nasączonych wodą (wszystkich z wyjątkiem próbki o najmniejszej dawce pochłoniętej) było pojawianie się ciał stałych w kolbie w trakcie destylacji. Podejrzewa się, że były to agregaty związków wielkocząsteczkowych powstałych na skutek polimeryzacji estrów nienasączonych zainicjowanej przez rodniki pochodzące

z radiolizy wody. Agregację mogły zapoczątkować śladowe ilości chlorku wapnia, które pozostały w biodieslu po jego odwodnieniu.

Agregaty ulegały rozkładowi termicznemu w końcowej fazie destylacji, powodując szybsze koksowanie zawartości kolby. Skutkowało to zakończeniem destylacji jeszcze wcześniej niż w przypadku próbek nienasyconych wodą (w przypadku próbki 2,002 kGy nie osiągnięto nawet 85% obj. destylatu).

4. Wnioski

Skład frakcyjny RME ulega niewielkim zmianom pod wpływem promieniowania jonizującego. Analizując krzywe destylacji można zaobserwować pewną tendencję spadkową wraz ze wzrostem dawki. Na podstawie porównania temperatury początku destylacji można stwierdzić, że napromieniowanie próbek nienawodnionych powoduje poważniejsze, a zarazem bardziej losowe, obniżenie tego parametru niż ma to miejsce dla próbek nasyconych wodą.

Napromieniana woda ulega radiolizie z wytworzeniem atomów wodoru ($\cdot\text{H}$) oraz reaktywnych form tlenu, np. rodników hydroksylowych ($\cdot\text{OH}$) czy ponadtlenkowych ($\cdot\text{O}_2\text{H}$). Drobiny te, jako bardzo reaktywne, mogą się przyłączać do wiązań podwójnych oraz inicjować reakcje polimeryzacji (Kroh 1986; Sugier 1992). W przypadku próbek nawodnionych promieniowanie jonizujące oddziałuje z wodą, co skutkuje powstawaniem wyżej wymienionych indywiduów chemicznych.

Podjezwia się, że produkty radiolizy wody atakują wiązania podwójne w estrach nienasyconych, utleniając je lub inicjując polimeryzację. Z racji dużej zawartości wody w próbkach nią nasyconych, jest to mechanizm dominujący (fragmentacja estrów zachodzi w dużo mniejszym stopniu). Estrы ulegają różnym przemianom, jednak produkty tych reakcji zazwyczaj nie są bardziej lotne od substratów. Odzwierciedlają to krzywe destylacji – początek wrzenia nie spada drastycznie (mniejsza rola fragmentacji), za to koniec destylacji ma miejsce relatywnie wcześnie (rozkład termiczny powstałych polimerów).

W napromienianych próbkach nienasyconych wodą powstaje na tyle mało reaktywnych form tlenu oraz rodników wodorowych, że przeważającym skutkiem działania promieniowania jest destrukcja estrów z wytworzeniem związków o krótszych łańcuchach, a więc wyższej lotności. Zachodzące zmiany można zaobserwować na krzywych składu frakcyjnego. Produktów polimeryzacji jest mniej, więc koniec destylacji nie następuje tak szybko jak w próbkach nasyconych wodą. Występuje więcej substancji lotnych, zatem destylacja zaczyna się w niższej temperaturze.

Podsumowując, należy stwierdzić, że we wszystkich próbkach widoczny jest spadek zawartości najwyżej wrzących estrów (obniżenie krzywych składu frakcyjnego). Jednakże dominujący mechanizm przemian zależy od obecności (bądź nieobecności) wody w RME. W próbkach nienasyconych wodą następuje głównie fragmentacja estrów, zaś w próbkach nawodnionych ich polimeryzacja zainicjowana przez rodniki pochodzące z radiolizy wody.

W kontekście potencjalnego stosowania promieniowania do modyfikacji biodiesla obniżenie początku jego destylacji o kilkadziesiąt stopni Celsjusza jest zjawiskiem pozytywnym, bowiem obecność produktów niżej wrzących dobrze wpływa na proces rozruchu silnika. Niestety nieprzewidywalność procesu radiolizy nie pozwala wykluczyć możliwości powstawania związków na tyle lotnych, że biodiesel przestanie spełniać wymagania dotyczące temperatury zapłonu, która powinna wynosić min. 101°C (PN-EN 14214). Badania temperatury zapłonu i innych właściwości fizykochemicznych napromienionego biodiesla są przedmiotem odrębnych publikacji autorów.

5. Literatura

- Baczewski K, Kałdoński T (2008) Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Blin J, Volle G, Girard P et al. (2007) Biodegradability of biomass pyrolysis oils: Comparison to conventional petroleum fuels and alternatives fuels in current use. *Fuel* 86: 2679–2686.
- Demirbas A (2008) Biodiesel. A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. Springer, London.

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- Guariero LLN, Pereira PAdP, Torres EA et al. (2008) Carbonyl compounds emitted by a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel-diesel blends: Sampling optimization and emissions profile. *Atmospheric Environment* 42: 8211–8218.
- Kroh J (1986) Wybrane zagadnienia chemii radiacyjnej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa
- Lee RA, Lavoie J (2013) From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers* 3: 6–11.
- PN-EN 14214+A1:2014-04 Ciekłe przetwory naftowe – Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) do użytku w silnikach samochodowych o zapłonie samoczynnym (Diesla) i zastosowań grzewczych – Wymagania i metody badań
- PN-EN 590:2013-12 Paliwa do pojazdów samochodowych – Oleje napędowe – Wymagania i metody badań
- PN-EN ISO 3405:2012 Przetwory naftowe – Oznaczanie składu frakcyjnego metodą destylacji pod ciśnieniem atmosferycznym.
- Pullen J, Saeed K (2012) An overview of biodiesel oxidation stability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 5924–5950.
- Sugier H (1992) Laboratorium chemii fizycznej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź
- Sulewski M, Traczykowski A, Urbaniak W i in. (2014) Technologiczne aspekty produkcji biodiesla metodą okresową. *Przemysł Chemiczny* 93(4): 547–549.
- Urzędowska W, Stępień Z (2014) Wpływ starzenia biopaliw na zagrożenia stwarzane dla silników o zapłonie samoczynnym w eksploatacji. *Przemysł Chemiczny* 93(8): 1357–1361.
- Wasilewski J, Krzaczek P (2014) Emisja toksycznych związków ze spalania biodiesla. Raport z badań. *Przemysł Chemiczny* 93(4): 343–346.

6. Katalizatory heterogeniczne używane w transestryfikacji olejów roślinnych

Heterogeneous catalysts used in transesterification of vegetable oils

Jarosіński Przemysław, Kajkowski Dawid

Instytut Chemii, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska,
ul. Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, Polska

Jarosіński Przemysław: przemyslaw.jarosinski@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: FAME, biopaliwa, kataliza

Streszczenie

Zwiększenie wrażliwości na kwestie ochrony środowiska naturalnego oraz świadomość skończoności zasobów paliw kopalnych spowodowały wzrost zainteresowania alternatywnymi paliwami do silników samochodowych. W Europie szczególnie dotyczy to paliw do silników z zapłonem samoczynnym. Najpopularniejsze alternatywne paliwo do tych silników stanowią estry metylowe kwasów tłuszczowych, nazywane biodieslem. W niniejszym artykule podjęto tematykę nowoczesnych technologii otrzymywania tego biopaliwa, a konkretnie stosowanych w nich katalizatorów stałych. Przedstawiono istotę zjawiska katalizy oraz rolę katalizatora w procesie transestryfikacji. Scharakteryzowano wybrane katalizatory heterogeniczne zasadowe (tlenki metali ziem alkalicznych) oraz kwasowe (zeolity i heteropolikwasy).

1. Wstęp

Paliwa alternatywne mają szansę w przyszłości zastąpić paliwa konwencjonalne pochodzące z przeróbki ropy naftowej. W przypadku niektórych z nich, niewątpliwą zaletą jest możliwość produkcji z własnych źródeł (np. produktów rolnych). Ponadto ich negatywny wpływ na środowisko uważa się za mniejszy niż paliw konwencjonalnych. Według wytycznych Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych za paliwa alternatywne uznaje się:

- metanol, etanol i inne alkohole;
- mieszaniny 85% (lub więcej) alkoholu z benzyną;
- gaz ziemny (i produkowane z niego paliwa ciekłe);
- propan;
- ciekłe paliwa pochodzące z upłynnienia węgla;
- biodiesel;
- wodór;
- paliwa P-Series (mieszaniny ciekłych węglowodorów oddzielonych od gazu ziemnego (C₅₊), etanolu oraz metyloctetrahydrofuranu);
- wszelkie, inne niż alkohole, paliwa otrzymywane z biomasy (AFDC).

Jednym z wyżej wymienionych paliw, możliwym do zastosowania w silnikach o zapłonie samoczynnym, jest biodiesel, czyli estry metylowe kwasów tłuszczowych (ang. Fatty Acid Methyl Esters, FAME). Należy on do niezwykle istotnej i bardzo dużej grupy paliw alternatywnych zwanych biopaliwami. Są to paliwa gazowe lub ciekłe będące produktami konwersji biomasy, która jest podstawowym odnawialnym źródłem energii. Kraje członkowskie Unii Europejskiej zobligowane są stosować biokomponenty do paliw pochodzących z ropy naftowej (Dyrektywa 2009/28/WE).

Powszechne użytkowanie estrów metylowych kwasów tłuszczowych jako paliwa do silników o zapłonie samoczynnym (Diesla) posłużyłoby zmniejszeniu zapotrzebowania na ropę naftową. Warto również dodać, że FAME są paliwem znacznie bardziej przyjaznym środowisku niż olej napędowy. Z powyższych powodów trwają nieustanne prace nad modyfikacją i unowocześnianiem technologii produkcji biodiesla. Jednym z kierunków jest prowadzenie tego procesu wobec katalizatorów heterogenicznych.

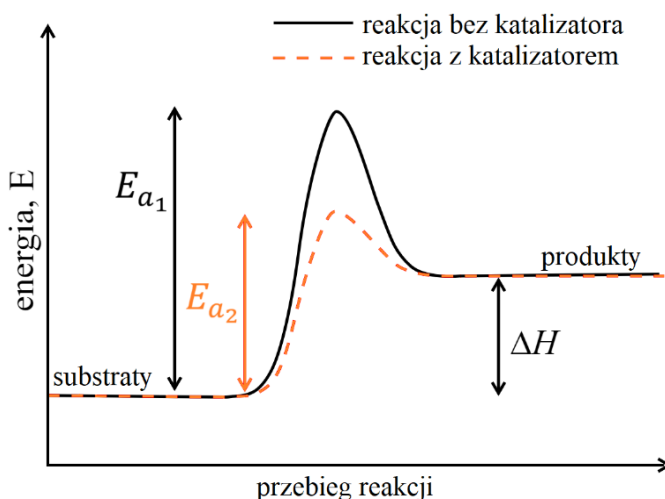
2. Opis zagadnienia

Katalizator jest to substancja, która zwiększa szybkość reakcji chemicznej i/lub kieruje reakcją na jedną z kilku możliwych termodynamicznie dróg prowadzących do różnych produktów. Katalizatory nie występują w równaniu reakcji, ponieważ tworzą nietrwałe połączenia z substratami, same nie zużywając się w procesie. Nie zmieniają położenia równowagi chemicznej, wpływają jedynie na szybkość dochodzenia do tego stanu poprzez obniżenie energii aktywacji (E_a , Rys. 1). Przyspieszanie reakcji jest szczególnie ważne podczas reakcji prostych struktur, np. związków nieorganicznych. Ukierunkowanie w stronę konkretnego produktu, zwane selektywnością, wykorzystuje się głównie podczas syntez organicznych. Katalizatorami mogą być pierwiastki lub związki chemiczne w postaci gazów, cieczy, ciał stałych amorficznych albo krystalicznych, a także układów koloidalnych. Funkcję katalizatorów w procesach biochemicznych zachodzących w organizmach żywych pełnią enzymy (Grzybowska-Świerkosz 1993).

W zależności od fazy w jakiej występują katalizator oraz reagenty, wyróżnia się katalizę homogeniczną i heterogeniczną. Kataliza homogeniczna ma miejsce, kiedy reagenty i katalizator występują w tej samej fazie. Przykładem procesu katalizy homogenicznej może być utlenianie dwutlenku siarki (SO_2) do jej trójtlenku (SO_3). Kataliza heterogeniczna ma natomiast miejsce, gdy katalizator i reagenty znajdują się w różnych fazach, a reakcja zachodzi na granicy faz reagent-katalizator. Najczęściej katalizator jest w postaci ciała stałego – krystalicznego lub amorficznego, zaś substraty i produkty znajdują się w postaci ciekłej lub gazowej.

Reakcja na powierzchni katalizatora heterogenicznego, w przemyśle potocznie zwanego kontaktem, składa się z kilku etapów:

- transport reagentów z mieszaniny reakcyjnej na powierzchnię kontaktu,
- adsorpcja jednego lub kilku reagentów na powierzchni,
- reakcja chemiczna na powierzchni,
- desorpcja produktów z powierzchni kontaktu,
- transport produktów z powierzchni katalizatora do mieszaniny reakcyjnej.

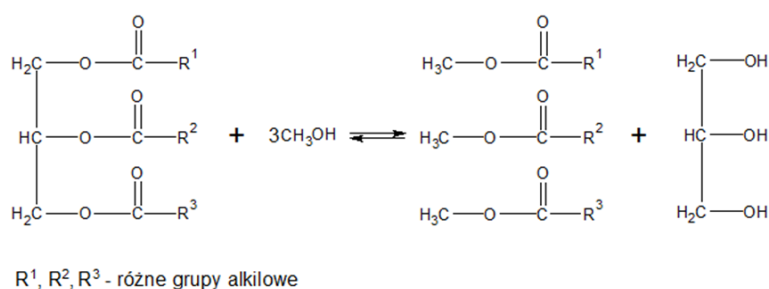


Rys. 1. Przebieg reakcji katalizowanej i niekatalizowanej (ΔH – entalpia reakcji).

W stanie stacjonarnym wszystkie etapy przebiegają z jednakową szybkością wyznaczoną przez etap najwolniejszy. W zależności od tego, czy jest to etap transportu, czy przemiany chemicznej, reakcja katalityczna przebiega w obszarze dyfuzyjnym albo kinetycznym. Z reguły nie cała powierzchnia katalizatora uczestniczy w reakcji. Zgrupowania atomów na powierzchni katalizatora, zdolne do adsorbowania i aktywowania cząsteczki reagentów biorących udział

w katalizie nazywane są centrami aktywnymi. Jeżeli wszystkie centra aktywne są jednakowo istotne z punktu widzenia reakcji katalitycznej, to powierzchnia katalizatora jest jednorodna. W innej sytuacji mówi się o powierzchni niejednorodnej (Czaja 2016).

Transestryfikacja olejów roślinnych polega na rozpadzie cząsteczki triglicerydu i zastąpieniu gliceryny małowcząsteczkowymi alkoholami (Rys. 2). Jest podstawową metodą otrzymywania estrów metylowych kwasów tłuszczowych, popularnie zwanych biodieslem. W Polsce głównym substratem do produkcji FAME jest olej rzepakowy, dlatego biodiesel otrzymywany w krajowych biorafineriach nazywany jest RME (ang. *Rapeseed Oil Methyl Esters*). Transestryfikacja na skalę przemysłową prowadzona jest najczęściej z zastosowaniem katalizatorów homogenicznych w postaci alkoholowych roztworów wodorotlenku potasu lub sodu. Stosowanie ich jest korzystne ze względu na wysoką aktywność, niski koszt, łagodne warunki procesu oraz korzystną kinetykę reakcji. Niestety nie spełniają swojej funkcji gdy surowiec tłuszczowy jest zawodniony lub gdy zawiera dużą ilość wolnych kwasów tłuszczowych (ang. *Free Fatty Acid*, FFA). W takich warunkach homogeniczne katalizatory zasadowe powodują zmydlanie tłuszczów oraz tworzenie emulsji. Niezbędne wtedy jest zastosowanie kwasowych katalizatorów, takich jak kwas siarkowy(VI) (H_2SO_4) czy kwas ortofosforowy(V) (H_3PO_4). Używanie katalizatorów homogenicznych może również skutkować powstawaniem znacznych ilości ścieków, gdyż katalizatory wymywane są z gotowego FAME. Ze względu na wady katalizy homogenicznej trwają badania nad stosowaniem katalizatorów heterogenicznych w procesie transestryfikacji (Skrzyńska i Kądziołka 2011; Żmudzińska-Żurek i Grzywacz-Wątroba 2012).



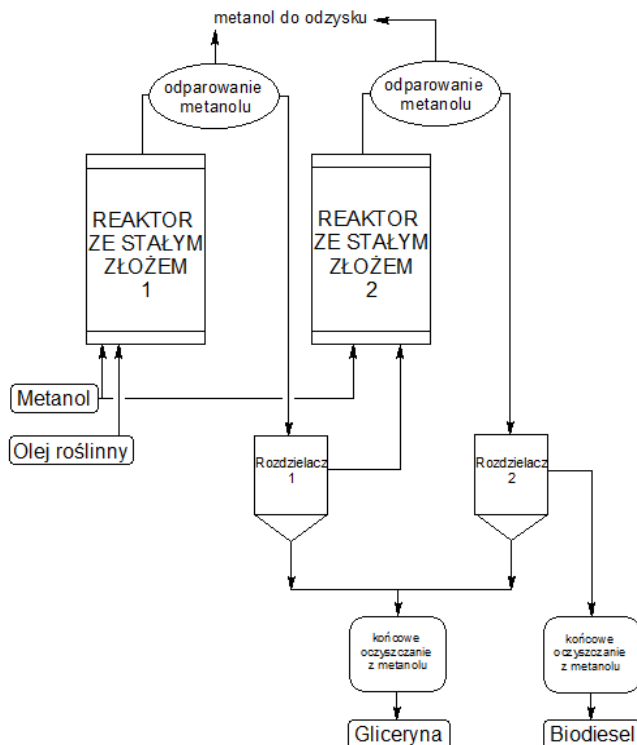
Rys. 2. Reakcja transestryfikacji trójglicerydu (na podstawie: Hillion et al. 2003).

3. Przegląd literatury

Chęć zmniejszenia kosztów produkcji biodiesla zapoczątkowała prowadzone w szerokim zakresie badania nad katalizatorami heterogenicznymi. Cechują się one mniejszą konwersją oleju w porównaniu do katalizatorów homogenicznych, jednakże zastosowanie prostych katalizatorów heterogenicznych pozwala zredukować ilość wody użytą do mycia produktu, natomiast użycie bardziej zaawansowanych pozwala całkowicie wyeliminować mycie mieszaniny poreakcyjnej. Są dużo łatwiejsze do rozdzielania od powstałych estrów oraz nie powodują strat surowca w procesie zmydlania. Dodatkowo niektóre rodzaje katalizatorów mogą katalizować zarówno proces transestryfikacji, jak i estryfikacji wolnych kwasów tłuszczowych, co pozwala przerabiać surowiec o niższej jakości (tzn. zawierający dużą ilość FFA). Niewątpliwą zaletą katalizatorów heterogenicznych jest możliwość ich regeneracji i dzięki temu wielokrotnego zastosowania w procesie (Van Gerpen and He 2014; Skrzyńska i Kądziołka 2011). Przykładowy układ do produkcji biodiesla z zastosowaniem katalizatora heterogenicznego przedstawiono na rys. 3.

Olej roślinny i metanol wprowadzane są do pierwszego reaktora ze złożem stałym, gdzie zachodzi reakcja transestryfikacji. Strumień z mieszaniną poreakcyjną po odpędzeniu metanolu kierowany jest do rozdzielacza nr 1. Estry oraz nieprzereagowany olej, znajdujące się w fazie górnej, trafiają następnie do drugiego reaktora ze złożem stałym. Tam zadaje się je kolejną porcją metanolu w celu zwiększenia stopnia przereagowania. Po drugim reaktorze mieszanina poreakcyjna przesyłana

jest do rozdzielacza nr 2. Z fazy górnej (estrów) odparowuje się nieprzereagowany metanol, otrzymując gotowy biodiesel. Gliceryna (faza dolna) z tego rozdzielacza łączona jest z fazą dolną z rozdzielacza nr 1. Połączone strumienie gliceryny również oczyszcza się z nieprzereagowanego metanolu, dzięki czemu możliwe jest późniejsze zagospodarowanie tego produktu ubocznego, np. do celów kosmetycznych.



Rys. 3. Schemat blokowy instalacji do produkcji biodiesla na katalizatorze heterogenicznym (na podstawie: Hillion et al. 2003).

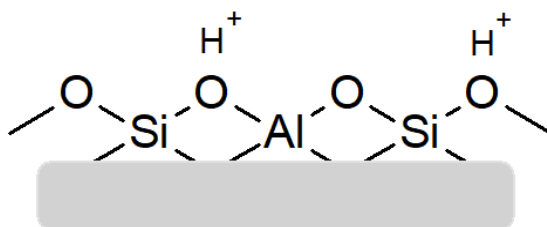
Wśród katalizatorów heterogenicznych najczęściej stosowane są tlenki metali, takich jak wapń, magnez czy glin. Mogą one być stosowane jako samodzielne katalizatory, ale również tworzyć mieszaniny z innymi tlenkami bądź stanowić nośnik dla substancji używanych jako katalizatory homogeniczne. Zastosowanie kwasu siarkowego na nośniku z tlenku glinu pozwala ograniczyć korozyjne działanie katalizatora na aparaturę. Niestety powoduje także spadek wydajności, przez co katalizator w tej konfiguracji nie jest powszechnie stosowany. Zasadowe katalizatory otrzymuje się metodą mokrej impregnacji. W tym celu fazę aktywną (KOH, NaOH, K_2CO_3 lub Na_2CO_3) rozpuszcza się w niewielkiej ilości wody destylowanej, dodaje nośnik i odparowuje wodę. Następnie otrzymany półprodukt należy wysuszyć, rozdrobnić i przeprowadzić kalcynowanie (Żmudzińska-Żurek i Grzywacz-Wątroba 2012).

Najczęściej stosowane tlenki wapnia i magnezu mogą być wytwarzane poprzez obróbkę termiczną minerałów, np. dolomitu. Aby dolomit spełniał swoje zadanie jako katalizator musi przejść proces kalcynacji. Prażenie minerału w temperaturze $700^{\circ}C$ nie powoduje aktywacji zdolności katalitycznych. Podniesienie temperatury powoduje rozpad węglanów, z których zbudowany jest dolomit do tlenków, będących silnymi zasadami. Jednakże podniesienie temperatury prażenia powyżej temperatury rozpadu węglanu wapnia, wynoszącej $825^{\circ}C$, powoduje spadek wydajności procesu transestryfikacji. Najwyższy stopień konwersji oleju rzepakowego do FAME uzyskano po wyprażeniu dolomitu w temperaturze $800^{\circ}C$. Przy tak spreparowanym katalizatorze, optymalne warunki prowadzenia procesu transestryfikacji to: temperatura $67,5^{\circ}C$; 3% mas. katalizatora

w stosunku do oleju; czas reakcji wynoszący 3 h; molowy stosunek metanolu do oleju wynoszący 6:1. (Ilgen 2011).

Do procesu transestryfikacji wykorzystuje się również tlenki metali ziem rzadkich. Proces ich przygotowania polega na przekształceniu azotanu, octanu lub chlorku metalu w postać nierozpuszczalnego wodorotlenku. Następnie powstałe osady suszy się i kalcynuje. Tak otrzymane tlenki mogą same stanowić katalizator bądź zostać użyte jako nośnik dla jonów metali alkalicznych. Wydajność procesu z użyciem samych tlenków jest niska i utrzymuje się poniżej 20%. Uzyskanie konwersji na poziomie 18% wymagało zastosowania 48-krotnego nadmiaru alkoholu w stosunku do oleju, 4% katalizatora w stosunku do oleju oraz prowadzenia procesu w 90°C. Naniesienie nawet niewielkiej ilości jonów potasu (10 mmol K^+ / 1 g nośnika) pozwoliło zwiększyć wydajność do poziomu powyżej 90% (Skrzyńska i Kądziołka 2011).

Kolejną grupą związków używanych jako katalizatory heterogeniczne są kwaśne zeolity. Są to naturalne, krystaliczne glinokrzemiany połączone ze sobą atomami tlenu (Rys. 4). Ich trójwymiarowa, mikroporowata budowa pozwala absorbować cząsteczki o określonych rozmiarach. Działając jak sita molekularne, wspomagają wymiany jonów i wytwarzają jony ujemne, które poprawiają aktywność katalizatora. Ze względu na małe rozmiary nanoporów względem triglicerydów, wydajność procesu jest niezadowalająca. Wytworzenie jonów alkoksylowych może spowodować dimeryzację i powstanie eteru dimetylowego. W celu podniesienia wydajności konieczne jest modyfikowanie struktury katalizatora poprzez powiększenie porów.



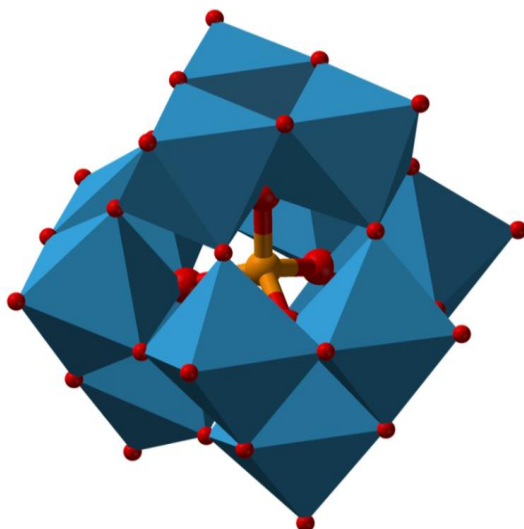
Rys. 4. Przykładowa budowa zeolitu (na podstawie: Mansir et al. 2017).

Badacze zwracają uwagę na działanie katalityczne, selektywność rozmiarów i stabilność materiałów zeolitowych. Okresowe mezoporowate związki organiczne, mezoporowate krzemionki, mezoporowate tlenki metali i gallofosfaty mają tendencję do powiększania porów. Mezoporowate krzemionki mogą mieć średnicę porów kilkakrotnie większą od naturalnych zeolitów. Głównym wyzwaniem podczas produkcji tego typu katalizatora jest utrzymanie odpowiednio kwasowego charakteru oraz odporności termicznej. Wydajność transestryfikacji prowadzonej z udziałem tego typu katalizatorów zależy przede wszystkim od dyspersji i składu centrów kwasowych włączonych do szkieletu katalizatora. Wbudowanie do szkieletu atomów złota pozwala zminimalizować dezaktywujące katalizator osadzanie węgla (Mansir et al. 2017).

Niekonwencjonalnymi katalizatorami do procesu transestryfikacji olejów roślinnych są heteropolikwasy, np. kwas 12-wolframofosforowy (ang. *12-Tungstophosphoric acid*, TPA) o wzorze $12WO_3 \cdot H_3PO_4$. Model cząsteczki tego związku pokazano na rys. 5.

Właściwości katalityczne TPA na stałym nośniku zostały ocenione przez Kulkarniego i współpracowników. Do badań wykorzystano uwodniony tlenek cyrkonu (ZrO_2), krzemionkę (SiO_2), tlenek glinu (Al_2O_3) oraz węgiel aktywny. Jako surowca użyto oleju rzepakowego o wysokiej (do 20% mas.) zawartości wolnych kwasów tłuszczowych. Stwierdzono, że spośród testowanych katalizatorów do otrzymywania biodiesla najlepszy jest TPA na tlenku cyrkonu – wydajność estrów wyniosła ok. 77%. Szczegółowe badania (m. in. z użyciem dyfrakcji rentgenowskiej) wykazały, że za wysoką aktywność odpowiadają centra kwasowe Lewisa powstałe wskutek silnych oddziaływań między TPA a grupami wodorotlenowymi na powierzchni ZrO_2 . Optymalizacja procesu pozwoliła

osiągnąć wydajność równą 90% mas. w następujących warunkach: temperatura 200°C, zawartość katalizatora 3% mas., stosunek alkoholu do oleju równy 9:1 (Kulkarni et al. 2006).



Rys. 5. Częsteczka kwasu 12-wolframofosforowego (domena publiczna).

4. Podsumowanie

Powszechnie stosowanym procesem produkcji biodiesla jest transestryfikacja olejów roślinnych prowadzona wobec homogenicznych katalizatorów zasadowych. Jej wydajność jest zadowalająca, a prostota technologii pozwala na produkcję FAME zarówno na skalę przemysłową, jak i przez rolników w małych instalacjach przy gospodarstwach rolnych. Niestety technologie oparte na katalizatorach zasadowych wymagają wysokiej jakości surowca – powinien on być maksymalnie odwodniony i nie zawierać wolnych kwasów tłuszczowych. Takie surowce uzyskuje się przede wszystkim z jadalnych olejów roślinnych, a wykorzystywanie roślin jadalnych do produkcji paliw budzi kontrowersje.

Wobec powyższego pożądane byłoby przerabianie surowców odpadowych, np. olejów posmażalniczych. Tego rodzaju oleje zawierają jednak dużo wody i wolnych kwasów tłuszczowych, przez co wymagają specjalistycznych katalizatorów kwasowych, takich jak kwaśne zeolity lub heteropolikwasy. Związki te oprócz transestryfikacji glicerydów katalizują także estryfikację wolnych kwasów, a w przypadku stałego nośnika niewątpliwą zaletą jest łatwość oddzielenia katalizatora od produktów reakcji. Niestety, z racji wysokich kosztów zakupu, powszechne stosowanie heterogenicznych katalizatorów kwasowych jest ekonomicznie nieuzasadnione.

5. Literatura

- Alternative Fuels Data Center. U.S. Department of Energy. <https://www.afdc.energy.gov>, dostęp: 19.12.2017.
- Czaja S (2016) Możliwość wykorzystania chemiczno-fizycznej koncepcji katalizatorów i inhibitorów we współczesnej teorii ekonomii – prolegomena problemu. Optimum. Studia ekonomiczne nr 3 (81): 20-34.
- DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.

- Grzybowska-Świerkosz B (1993) Elementy katalizy heterogenicznej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Hillion G, Delfort B, le Pennec D et al. (2003) Biodiesel production by a continuous process using a heterogeneous catalyst. Division of Fuel Chemistry 48(2): 636-638.
- Ilgen O (2011) Dolomite as a heterogenous catalyst for transestrification of canola oil. Fuel Processing Technology 92(3): 452-455.
- Kulkarni MG, Gopinath R, Meher LC et al. (2006) Solid acid catalyzed biodiesel production by simultaneous esterification and transesterification. Green Chemistry 8: 1056-1062.
- Mansir N, Taufiq-Yap YH, Rashid U et al. (2017) Investigation of heterogeneous solid acid catalyst performance on low grade feedstocks for biodiesel production: A review. Energy Conversion and Management 141: 171-182.
- Skrzyńska E, Kądziołka A (2011) Zasadowość katalizatorów a ich aktywność w reakcji metanolizy oleju sojowego. Czasopismo Techniczne 108(10): 221-234.
- Van Gerpen JH, He BB (2014) Biodiesel and renewable diesel production methods. Advances in Biorefineries: 441-475.
- Żmudzińska-Żurek B, Grzywacz-Wątroba J (2012) Badanie reakcji transestryfikacji oleju rzepakowego metanolem na katalizatorach heterogenicznych. NAFTA-GAZ 68(5): 306-312.

7. Kompensacja temperaturowa w systemach elektrooptycznych jako metoda redukcji błędów przy pomiarach dużych prądów i wyładowań atmosferycznych

Temperature compensation in the electro-optical system as a measurement method for high current measurements and lightning strikes.

Kossowski Tomasz

Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

Kossowski Tomasz: t.kossowski@gmail.com

Słowa kluczowe: optyczny, analogowy, awionika, światłowodowy

Streszczenie

W artykule zaproponowano budowę prototypowego urządzenia do pomiaru dużych prądów. Detekcja tego typu może być związana np.: z wyładowaniami atmosferycznymi. Układ bazuje na pomiarze napięcia (na wyjściu bocznika, które jest proporcjonalne do płynącego prądu) oraz transmisji optycznej do urządzenia rejestrującego (np.: komputer, oscyloskop). Wykorzystano do tego celu komunikację analogową w celu zredukowania ilości elementów składowych systemu pomiarowego. Do realizacji takiego zadania, konieczna okazała się kompensacja temperaturowa, zapewniająca stałe warunki pracy nadajników oraz detektorów optycznych (zmiana charakterystyki pracy w funkcji temperatury). W artykule zaproponowano prototyp wykorzystujący kompensację wraz z przedstawieniem stabilności wyników w zależności od zmian temperatury otoczenia. Zaproponowane rozwiązanie stanowi alternatywę w odniesieniu do systemów pomiarowych wykorzystujących optyczną transmisję cyfrową.

1. Wstęp

Podstawowym założeniem było zaproponowanie rozwiązania jakim jest system pomiarowy odporny na zakłócenia elektromagnetyczne, powstające podczas pomiarów dużych prądów o jednocześnie jak najmniejszej złożoności. Pomiary tego typu są obciążone różnorodnymi formami ryzyka, np.: uszkodzenie toru pomiarowego w przypadku przepięcia, zagrożenie życia. Taka sytuacja może wystąpić w szczególności podczas badania wyładowań atmosferycznych, gdyż nie zawsze jest możliwe określenie maksymalnych rejestrowanych wartości. Innym aspektem są zakłócenia elektromagnetyczne indukujące się w przewodach łączących punkt pomiarowy z układem rejestrującym (Assis i in. 2015). Nawet krótki przewód miedziany może być rozpatrywany jako złożony układ typu RLC (poza rezystancją występują również składniki pojemności oraz indukcyjności) (Bogucki i in. 2007, Horowitz i in. 2003). Oznacza to, że właściwy sygnał zostaje zniekształcony, bądź całkowicie przekłamany. Zależy to od wielu czynników, m.in. długości toru transmisyjnego oraz wielkości zakłócenia. Rozwiązaniem jest przykładowo rozdzielanie układu pomiarowego na dwie części. Pierwsza znajduje się bezpośrednio w miejscu prowadzenia pomiarów. Przetwarza ona odebrany sygnał analogowy na postać cyfrową, a następnie przesyła go do urządzenia rejestrującego (Buczek i in. 2012). Do tego typu komunikacji wykorzystuje się cyfrową postać sygnału, ponieważ zapewnia niezawodność przesyłanych danych. Transmitowane są bowiem kolejne bity wartości cyfrowych. Taka forma wymaga jednak konwersji analogowo-cyfrowej. Realizuje się ją w urządzeniu rejestrującym lub w sondzie pomiarowej (komunikacja pomiędzy sondą a rejestratorem odbywa się cyfrowo). W dalszym ciągu mamy jednak do czynienia z torem „miedzianym”. W tej sytuacji zakłócenie sygnału w kablu połączeniowym w dalszym ciągu jest możliwe. By rozwiązać ten problem, stosuje się połączenia optyczne, które są niewrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne.

W przypadku połączeń światłowodowych pomiędzy sondą pomiarową a urządzeniem rejestrującym stosuje się transmisję cyfrową (Buczek i in. 2012). Pozostaje jednak konieczność zasilania sondy pomiarowej. Pierwszym rozwiązaniem są akumulatory, zapewniające odporność na zakłócenia zewnętrzne (sonda wyposażona w ekranowaną obudowę). Zasilanie takie jest dopuszczalne w przypadku pojedynczych pomiarów ponieważ zapewnia krótki czas pracy układu. Konieczność stałej pracy wymusza zasilanie przy pomocy kabli miedzianych, co stanowi narażenie całego układu pomiarowego (oraz zasilającego) na udar wywołany wyładowaniem atmosferycznym. W ostatnich latach znaleziono rozwiązanie tego problemu w postaci układów zasilanych całkowicie poprzez tor optyczny (PoF – Power over Fiber – zasilanie po światłowodzie) (Helmers i in. 2016). W tym rozwiązaniu sonda pomiarowa pracuje nieprzerwanie, a jedynym medium łączącym ją wraz z urządzeniem rejestrującym jest światłowód (całkowicie odporny na wyładowania). W torze optycznym dane pomiarowe transmitowane są na innej długości fali, niż wiązka światła zasilająca układ. W rozwiązaniu tym stosuje się specjalnie zaprojektowane detektory, bądź wielowarstwowe złącza półprzewodnikowe umożliwiające pracę jednocześnie jako: nadajnik, odbiornik oraz fotoogniwo (Helmers i in. 2016).

Niniejszy artykuł poświęcony jest budowie prototypowego układu pomiarowego w oparciu o transmisję światłowodową. W założeniu, system zasilany będzie z akumulatorów (wykonywanie pojedynczych pomiarów), jednakże w przyszłości także przy pomocy opisanej technologii PoF. Umożliwiłoby to pracę ciągłą i pomiary w bardzo niesprzyjających warunkach (pod kątem zakłóceń elektromagnetycznych). W tej części artykułu opisywano przykłady transmisji optycznej z wykorzystaniem sygnałów cyfrowych. Wspomniano, że wiąże się to z większą złożonością układu pomiarowego oraz większą konsumpcją energii. W ramach niniejszych badań zaproponowano komunikację w formie analogowej, która umożliwia uproszczenie sondy pomiarowej i obniżenie kosztu jej budowy. Możliwe jest zatem stosowanie takich układów pomiarowych wszędzie tam, gdzie istnieje realne ryzyko ich uszkodzenia, przy minimalizacji strat finansowych.

2. Materiał i Metody

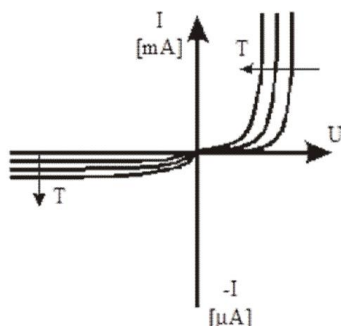
Układy analogowe w odróżnieniu od cyfrowych charakteryzują się znaczną zmiennością charakterystyki pracy w funkcji zmian temperatury otoczenia oraz temperatury całego układu (nagrzewanie się poszczególnych podzespołów w trakcie pracy może wpływać na inne elementy) (Horowitz i in. 2003; Rusek i in. 1997). Jest to jeden z wielu powodów, szybszego rozwoju techniki cyfrowej. W niniejszych badaniach zrezygnowano z budowy układów cyfrowych oraz cyfrowej transmisji optycznej na rzecz układu analogowo-cyfrowego przesyłającego dane w sposób analogowy przez światłowód. Część cyfrowa została ograniczona jedynie do układów programowalnych, których zadaniem jest utrzymanie stałej temperatury pracy analogowego toru optycznego.

Zarówno dioda jak i fotodioda są zbudowane jako złącze dwóch półprzewodników o różnych typach przewodnictwa (przewodniki niesamoistne typu N oraz P). Fotodioda pracuje dzięki powstawaniu w nim zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego. Oznacza to, że energia niesiona przez foton jest w całości pochłaniana przez elektron. Nie występuje uwolnienie elektronu, jednakże zmienia się własność materiału (powstaje fotoprzewodnictwo w strukturze dziura-elektron) (Horowitz i in. 2003; Rusek i in. 1997). Fotodioda może pracować w jednym z dwóch trybów pracy: jako fotoogniwo oraz fotodetektor. W pierwszym przypadku napięcie na oświetlonym złączu rośnie nieliniowo w funkcji natężenia światła. Druga konfiguracja wymaga spolaryzowania złącza w kierunku zaporowym. Płynący w układzie prąd jest liniowo zależny od ilości padającego światła. Charakterystykę prądowo-napięciową zaprezentowano na rysunku 1.

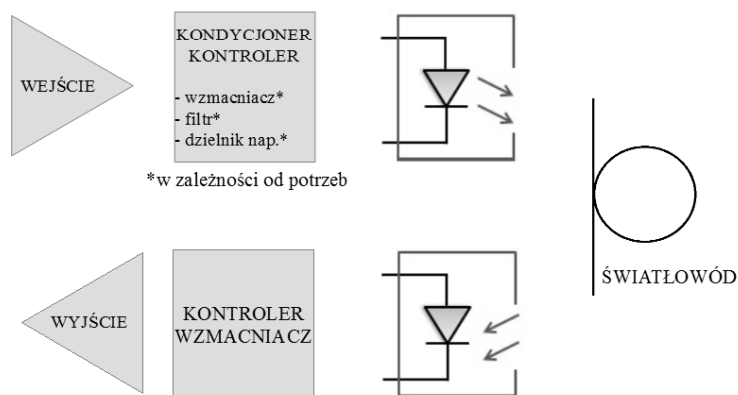
Szum termiczny ma zasadnicze znaczenie dla detektorów optycznych. Jego wartość rośnie wraz ze wzrostem temperatury otoczenia (Nyquist 1928). Konieczne jest zatem zachowanie stałej temperatury pracy, w celu zapewnienia stałej wartości szumu termicznego podczas pomiarów. Niezachowanie tego warunku sprawi, że pomiar tej samej wartości w różnych temperaturach otoczenia będzie dawał całkowicie odmienne wyniki.

Nadajnikiem jest z kolei dioda elektroluminescencyjna (LED – ang. light-emitting diode), która również jest złączem półprzewodnikowym. Jej charakterystyka prądowo-napięciowa jest zatem

tak samo zależna od zmian temperatury (Rusek i in. 1997; Nyquist 1928). Oznacza to, że należy kompensować temperaturę pracy obu elementów w celu zachowania stałości parametrów.



Rys.1. Wpływ wzrostu temperatury na charakterystykę złącza p-n w zakresie przewodzenia i w zakresie zaporowym (Politechnika Wrocławska 2017).



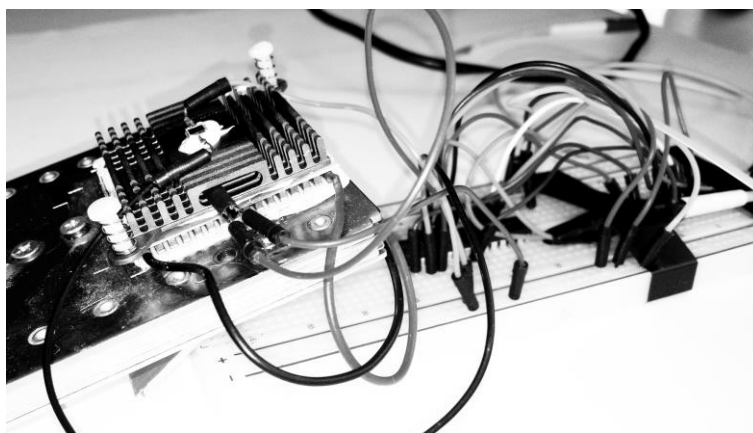
Rys.2. Schemat blokowy proponowanego toru pomiarowego.

Układem sterującym jest mikrokontroler z rodziny ATMEL, ATMega 8. Posiada on wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 10 bitów, zapewniając dokonanie dokładnego pomiaru temperatury przy pomocy termistora. Jest to jeden z wariantów, ponieważ pomiar temperatury można również wykonać przy pomocy cyfrowych modułów komunikujących się przy pomocy standardu 1-wire. Schemat blokowy układu pomiarowego zaprezentowano na rysunku 2.

Zaproponowany układ pomiarowy pozwala na pomiar napięć w zakresie 0 – 1 V. Zakres pomiarowy może zostać zwiększony przy pomocy dodatkowego dzielnika napięcia na wejściu układu. Jest to niezbędne podczas pomiarów dużych napięć. Maksymalna szybkość reakcji jest ograniczona przez czas narastania diody LED oraz czułości fotodetektora i wynosi 15 ps. Sam czas reakcji układu analogowego nie jest w tym przypadku krytyczny, ponieważ wszystkie jego elementy charakteryzują się dużym pasmem, a docelowa prędkość przetwarzania nie musi być większa niż 60 MHz. Ograniczeniem jest tutaj urządzenie docelowe, które będzie dokonywać pomiaru z opisywanego toru transmisyjnego i przetwarzać go na postać cyfrową (oscyloskop, cyfrowa karta pomiarowa, itp.).

Prototyp układu pomiarowego zawierającego nadajnik oraz odbiornik wraz z systemem chłodzenia i utrzymywania stałej temperatury zaprezentowano na rysunku 3. Pokazano fotodiode (przed montażem końcówki światłowodowej) umieszczoną na module Peltiera wraz z radiatorem. Do

odprowadzenia nadmiaru ciepła wykorzystano wentylatory o wymiarach 40x40mm. Pomiar temperatury elementów optycznych był dokonywany przy pomocy termistorów umieszczonych bezpośrednio przy nich. Wykorzystanie programowalnych mikroprocesorów do pomiaru temperatury oraz sterowania ogniwami Peltiera dało dodatkową korzyść. Podłączono moduły bezpośrednio do komputera i odczytywano wartości mierzonej temperatury oraz chwilowych nastaw sterujących. Rozwiązanie takie pozwoliło na lepszą analizę zmian w czasie oraz opracowanie trafniejszego algorytmu sterującego stabilizacją temperatury toru optycznego. Sterowanie ogniwem Peltiera odbywa się przy pomocy regulacji szerokości impulsów (PWM) realizowanej przez mikroprocesor. Zaproponowany układ zapewnia sterowanie z rozdzielczością 16 bitów co zapewnia płynną regulację. Pomiar temperatury odbywa się przy pomocy wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego o rozdzielczości 10 bitów, co oznacza, że pomiar wykonywany jest z dokładnością $0,07^{\circ}\text{C}$ (dla napięcia referencyjnego 2,56 V). Szybkość zmian temperatury otoczenia jest niewielka, dlatego układ po ustaleniu się temperatury pracy nie musi jej dynamicznie kompensować. Dobra izolacja termiczna od otoczenia zapewnia większą stabilność termiczną, ograniczenie zakłóceń od światła zewnętrznego oraz dodatkowo redukcję energii potrzebnej do utrzymania temperatury. Istotą jest zapewnienie stałej temperatury podczas całego czasu prowadzenia pomiarów zarówno dla nadajnika jak i dla odbiornika. Oba elementy układu muszą pracować w tej samej temperaturze przy braku zmienności w czasie. Dzięki temu zapewniona jest automatyczna kalibracja układu przed pierwszym pomiarem, a następnie prowadzenie pomiarów z zachowaniem kalibracji dzięki kompensacji zmian temperatury w czasie.

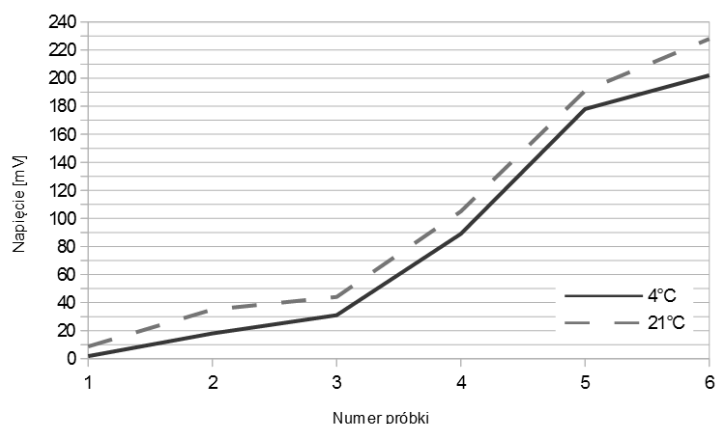


Rys. 3. Fotografia prototypowego układu pomiarowego.

3. Wyniki i Dyskusja

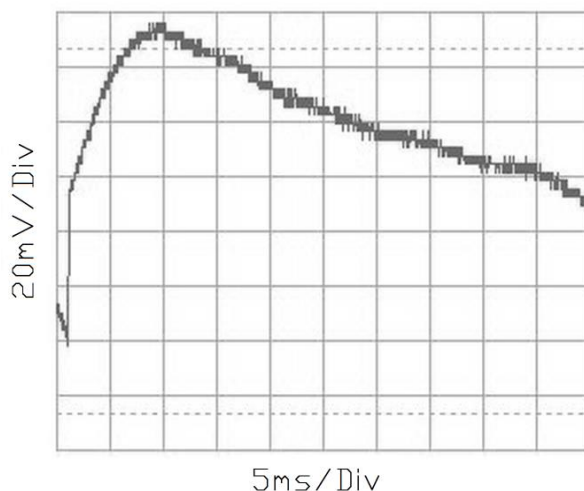
Podczas prac badawczych nad prototypowym torem pomiarowym wykonano wiele różnorodnych testów. Pozwoliło to na osiągnięcie zadowalających wyników i zaprezentowanie działającego układu. Nie jest to rozwiązanie końcowe, gdyż można je jeszcze znacząco usprawnić. Pokazuje jednak, że zaproponowana kompensacja temperaturowa całego toru optycznego pozwala na jego pracę w różnych warunkach (zmiennej temperaturze otoczenia) przy zachowaniu stałości przesyłanego sygnału. Oznacza to, że nie jest konieczna częsta kalibracja układu (wykonywana automatycznie). Wymagałoby to dodania w części cyfrowej odpowiedniego algorytmu ustalającego zadaną wartość sygnału i sprawdzanie poprawności jej odczytu przez tor pomiarowy. Konieczna byłaby do tego celu również komunikacja pomiędzy elementami układu (np.: radiowa). Na rysunku 4 zaprezentowano wyniki pomiaru napięcia na detektorze w funkcji wzrostu wielkości sygnału świetlnego dla dwóch wariantów: z aktywnym systemem chłodzenia (4°C) oraz bez kompensacji (21°C). Wyraźnie widać zmianę wartości rejestrowanego sygnału dla całego przedziału. Różnica pomiędzy wartościami jest względnie stała i wynosi około 14 mV. Oznacza to, że w przypadku braku kompensacji termicznej, przy założeniu zmiany temperatury jednego z elementów (nadajnik lub

odbiornik) o 15°C, wartość mierzonego sygnału byłaby przekłamana o 14 mV. Należy pamiętać, że mierzone wielkości sygnałów mieszczą się w przedziale do 250 mV. Tak duża zmiana ma znaczący wpływ na wynik, w szczególności dla pomiaru mniejszych wartości. Dlatego tak ważna jest kompensacja temperaturowa przy transmisji analogowej z wykorzystaniem optycznego toru pomiarowego.



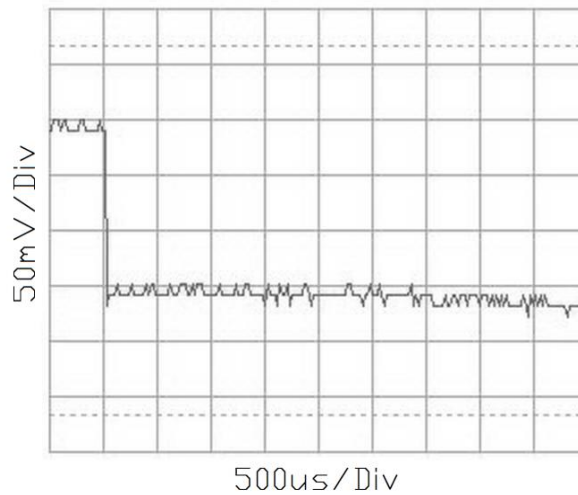
Rys. 4. Wykres zmian napięcia na detektorze w funkcji rosnącego natężenia światła dla pomiarów z aktywnym układem chłodzenia oraz bez kompensacji termicznej.

Na rysunkach 5 i 6 zaprezentowano przykładowe sygnały zaobserwowane przy pomocy opracowanego toru pomiarowego. Urządzeniem akwizycji danych była cyfrowa karta pomiarowa w komputerze, a rysunki przedstawiają zrzut ekranu z programu będącego cyfrowym oscyloskopem. Zaprezentowano dwa różne przebiegi dla dwóch różnych przedziałów czasowych. Należy zauważyć, że jakość przesyłanego sygnału jest zadowalająca i właściwie odzwierciedla badany sygnał.

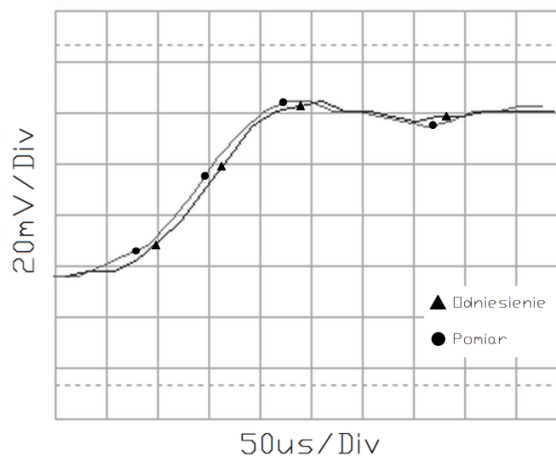


Rys. 5. Przebieg przykładowego sygnału zmierzonego przy pomocy opracowanego toru optycznego – sygnał wolno-zmienny .

Na rysunku 7 przedstawiono dwa pomiary tego samego sygnału badanego. Pierwszym z nich jest pomiar referencyjny bezpośrednio ze źródła, a drugi po przejściu przez zaproponowany w ramach badań tor pomiarowy. Oba przebiegi są do siebie zbliżone, a niewielka różnica amplitudy wynika z innej kalibracji, w celu dokładniejszego zobrazowania obu sygnałów.



Rys. 6. Przebieg przykładowego sygnału zmierzonego przy pomocy opracowanego toru optycznego – sygnał szybko-zmienny.



Rys. 7. Zrzut ekranu oscyloskopu dla dwóch pomiarów identycznego sygnału.

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników eksperymentów pokazano jak duże znaczenie dla analogowego toru optycznego ma kompensacja temperaturowa. Nawet niewielkie zmiany temperatury wpływają znacząco na wyniki mierzonych sygnałów, co bez aktywnego układu chłodzenia wiązałoby się z koniecznością kompensacji i kalibracji układu przed każdym pomiarem właściwym. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy pomiary wykonywane są latem w upale na otwartej przestrzeni (przy gromadzeniu wyników w klimatyzowanym pomieszczeniu). W takim przypadku powstaje znacząca różnica temperatur otoczenia obu części optycznego toru pomiarowego. Dla transmisji cyfrowej nie byłoby to znaczące, jednakże dla systemu analogowego konieczne jest rozwiązanie tego problemu w postaci zaproponowanej kompensacji temperaturowej. Zaprezentowany w niniejszym artykule optyczny tor pomiarowy z analogową transmisją oraz

kompensacją termiczną pozwala na prowadzenie pomiarów z zachowaniem izolacji od punktu pomiarowego oraz zapewnienie bezpiecznej odległości operatora od miejsca wyładowania. Analogowa transmisja zapewnia uproszczenie układu elektronicznego zarówno po stronie nadajnika jak i odbiornika. Konsekwencją oprócz niższych kosztów jest znacząca redukcja konsumpcji energii. Daje to możliwość wykorzystania zasilania przy pomocy światła w technologii PoF (Power over Fiber), dzięki czemu można całkowicie wyeliminować kable zasilające (w których mogą indukować się zakłócenia oraz przepięcia) oraz akumulatory (umożliwiające pracę w ograniczonym zakresie czasu).

Informacje uzupełniające

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową polegającą na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich w roku 2017 w ramach zadania pn. „DS/M.ET.17.003”.

5. Literatura

- Assis AK, Chaib JP (2015) Amperes Elektrodynamics, Aperion, Montreal, 221-226
- Bogucki J, Chudziński A, Połujan J (2007) Emisja elektromagnetyczna urządzeń w praktyce, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne 1-2/2007, 85-95
- Buczek Ł, Wyderka S, Jaworski M (2012) Światłowodowy system szerokopasmowej rejestracji sygnałów elektrycznych w środowisku wysokich napięć i silnych zaburzeń elektromagnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny 9a/2012, 171-175
- Helmers H, Lackner D, Siefer G et al. (2016) Integrated power and data transceiver devices for power-by-light systems – a concept study, 32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, June 2016, Munich, Germany
- Horowitz P, Hill W (2003) Sztuka elektroniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa
- Nyquist H (1928) Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors, Phys. Rev. 32, 110
- Politechnika Wrocławska (2017) Laboratorium Przyrządów Półprzewodnikowych, Wrocław, 1-15
- Rusek M, Pasierbiński J (1997) Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa

8. Przetwarzanie sygnału w czasie nierzeczywistym jako metoda niwelowania zakłóceń indukowanych w linii transmisyjnej przy pomiarach dużych prądów

Non-real-time signal processing as a method for compensate disturbances induced in the transmission line during measurement of high currents.

Kossowski Tomasz

Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz

Kossowski Tomasz: t.kossowski@gmail.com

Słowa kluczowe: wyładowania, napięcia, radiowe, awionika

Streszczenie

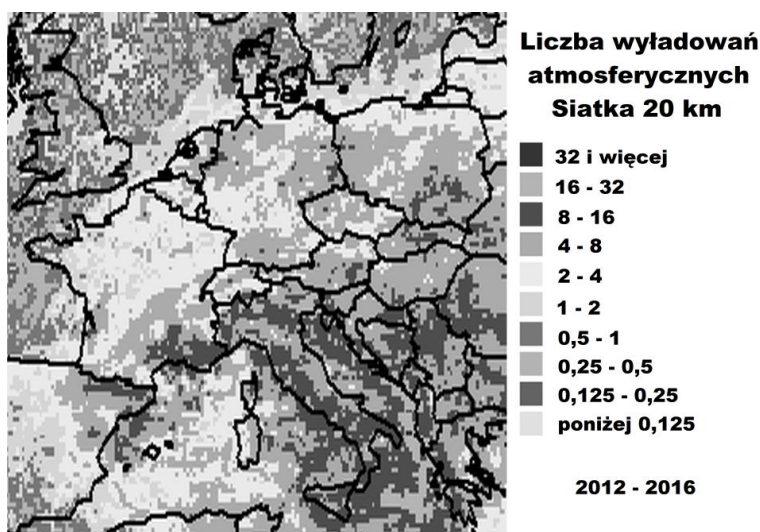
W artykule zaproponowano budowę urządzenia do pomiaru wysokich napięć oraz prądów, w szczególności do badania wyładowań atmosferycznych. Podczas wykonywania pomiarów udarów prądowych o dużej wartości, indukowane są silne zakłócenia magnetyczne (Helmers i in. 2017). Mają one duży wpływ na jakość rejestrowanego sygnału pomiarowego. Bezpośrednie połączenie miejsca, w którym dokonuje się rejestracji impulsu ze stanowiskiem pomiarowym jest niebezpieczne. Przyczyn może być kilka, m.in. możliwość przebicia bądź wyindukowania niebezpiecznego dla człowieka lub sprzętu napięcia. Dla zagwarantowania bezpieczeństwa konieczne jest zapewnienie izolacji pomiędzy miejscem prowadzenia pomiaru a stanowiskiem rejestrującym (Buczek i in. 2012). Rozwiązaniem jest wyeliminowanie kabli miedzianych i zastosowanie światłowodów, które są całkowicie niewrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne, bądź użycie komunikacji radiowej. Wykorzystanie transmisji optycznej zapewnia prowadzenie pomiarów w czasie niemal rzeczywistym (opóźnienie konwersji analogowo-cyfrowej oraz transmisji danych)(Buczek i in. 2012; Helmers i in. 2017). Układy radiowe z kolei są narażone na zakłócenia transmisji podczas trwania impulsów prądowych. Konieczne jest zatem wykonanie pomiarów, zgromadzenie danych w sondzie pomiarowej, odczekanie aż ustaną udary, a następnie przesłanie danych do urządzenia rejestrującego dane. Oznacza to, że urządzenie pracuje z pewnym opóźnieniem, ponieważ wynik otrzymujemy po 3 – 5 sekundach. Znaczącą zaletą jest jednak możliwość szybkiej rekonfiguracji układu pomiarowego i przemieszczania sond pomiarowych pomiędzy kolejnymi jego punktami.

1. Wstęp

Celem badań było zaproponowanie alternatywnego rozwiązania dla pomiarów wysokich prądów towarzyszących wyładowaniom atmosferycznym. Zarówno takie badania, jak i inne prowadzone z wykorzystaniem generatorów symulujących prądy piorunowe, są niebezpieczne dla ludzi i sprzętu pomiarowego. Wiąże się to ze stosowaniem specjalnych urządzeń separacyjnych oraz optycznych torów pomiarowych, zapewniających izolację od miejsca wyładowania oraz zredukowanie zakłóceń mierzonego sygnału (Buczek i in. 2012; Helmers i in. 2017). Zastosowanie tradycyjnych kabli miedzianych powoduje powstanie dużych szumów oraz sygnałów pochodzących od zakłóceń elektromagnetycznych (Bogucki i in. 2007). Wynika z tego, że układy pomiarowe wykorzystujące światłowody zapewniają wyższą jakość pomiarów i stanowią skuteczne zabezpieczenie (Buczek i in. 2012). Mają jednak istotną wadę, światłowody są bardzo delikatne i należy na nie szczególnie uważać podczas zmian lokalizacji sond pomiarowych oraz rozkładania torów optycznych. Konieczność częstych zmian miejsc prowadzenia pomiarów wymusza rozciąganie i przemieszczanie światłowodów łączących sondy pomiarowe z odbiornikami. Aby rozwiązać tę niedogodność zaproponowano zastąpienie optycznych torów pomiarowych transmisją radiową. Brak fizycznych połączeń nadajnika i odbiornika jest niewątpliwą zaletą przy częstych zmianach i wielu miejscach prowadzenia pomiarów. Rozwiązanie to zapewnia również izolację od miejsca wyładowań.

Wykorzystanie transmisji radiowej nie umożliwia jednak bezpośredniego transmitowania rejestrowanego przebiegu z sondy do rejestratora, ponieważ silne zakłócenia elektromagnetyczne mogą zakłócić kanał radiowy (Bogucki i in. 2007). Konieczne jest zatem wykonywanie pomiarów w tzw. czasie nierzeczywistym, czyli najpierw wykonany jest pomiar, a następnie jest on przekazywany do odbiornika. Zarówno opóźnienie jak i prędkość transmisji nie są w tym przypadku istotne, gdyż wynoszą one do 10 sekund. Dla zastosowań badawczych jest to rozwiązanie w pełni akceptowalne.

Sama analiza wyładowań atmosferycznych i badanie ich wpływu na różnego rodzaju obiekty (domy, samochody, samoloty, linie energetyczne) ma duże znaczenie w codziennym życiu. Na rysunku 1 zaprezentowano mapę średniej ilości wyładowań w latach 2012 – 2016 dla Europy (Vaisala 2017). W tym rejonie intensywność jest niższa niż w innych częściach świata, nie mniej jednak zagrożenia ochrony ogromowej są istotne dla całego globu. W szczególności narażone są np. samoloty, które niejednokrotnie są zmuszone do przelotu przez pas burzowy. Badania związane z oddziaływaniem silnych prądów piorunowych są zatem ważne i należy im poświęcić szczególną uwagę. Proponowane są różne rozwiązania, m.in. sensory optyczne umieszczone na pokładzie samolotu (Nguyen i in. 2012).



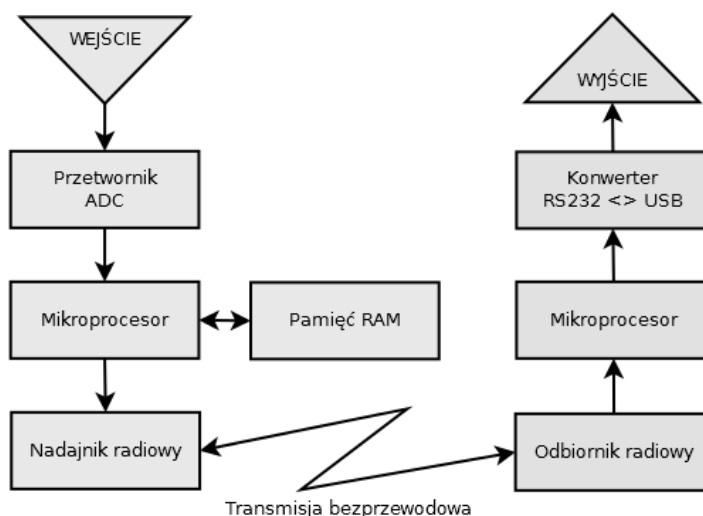
Rys.1. Mapa wyładowań atmosferycznych w Europie – średnia dla lat 2012 – 2016 (Vaisala 2017).

2. Materiał i Metody

Badanie wyładowań atmosferycznych wiąże się z pomiarami dużych prądów oraz napięć. Prąd płynący w przewodniku powoduje powstanie pola magnetycznego (Assis i in. 2015). Silne udary prądowe generują znaczne zakłócenia, które mogą indukować w przewodach pomiarowych napięcia o znacznych wartościach. Takie zewnętrzne impulsy powodują zniekształcenie mierzonej wartości, ponieważ nawet krótki przewód można rozpatrywać jak złożony układ RLC (dla dużych częstotliwości) (Bogucki i in. 2007; Horowitz i in. 2003). Zarówno ze względu na to, jak i na aspekty bezpieczeństwa opisane we wstępie, korzystne jest maksymalne zredukowanie kabli miedzianych. Dlatego zdecydowano się na opracowanie rozwiązania zapewniającego izolację od miejsca prowadzenia pomiarów oraz redukcję zakłóceń sygnału wynikających z impulsów elektromagnetycznych. W tym celu zaproponowano układ pomiarowy wykorzystujący radiowy tor transmisyjny z gromadzeniem danych w sondzie pomiarowej przez czas występowania zakłóceń.

Układ pomiarowy podzielony został na dwie części: sondę pomiarową oraz rejestrator. Oba elementy komunikują się ze sobą przy pomocy dwukierunkowej transmisji radiowej w nielicencjonowanym paśmie ISM (ang. Industrial, Scientific, Medical – "przemysłowe, naukowe, medyczne"). Wadą rozwiązania radiokomunikacyjnego jest podatność na zakłócenia

elektromagnetyczne. Rozwiązaniem opisanego problemu jest zmiana sposobu prowadzenia pomiaru i transmitowania jego cyfrowej reprezentacji. Precyzując, polega to na wysyłaniu danych pomiarowych z opóźnieniem, a nie w trakcie gromadzenia próbek pomiarowych. Dzięki temu możliwe jest uniknięcie błędów wynikających z zakłóceń elektromagnetycznych. Proponowana idea wiąże się jednak z koniecznością gromadzenia próbek pomiarowych w sondzie na cały czas trwania pomiarów. Właśnie z tego względu rozwiązanie opisywane w niniejszym artykule określane jest jako pracujące w czasie rzeczywistym. W pierwszej kolejności gromadzi ono dane zebrane podczas pomiaru a dopiero po pewnym czasie wysyła wyniki do urządzenia rejestrującego. Taka idea systemu pomiarowego wymusiła podział na dwa układy: nadajnik (pomiar oraz gromadzenie danych) oraz odbiornik (odczyt danych z nadajników oraz przekazanie ich do komputera). Schemat blokowy toru pomiarowego pokazano na rysunku 2.

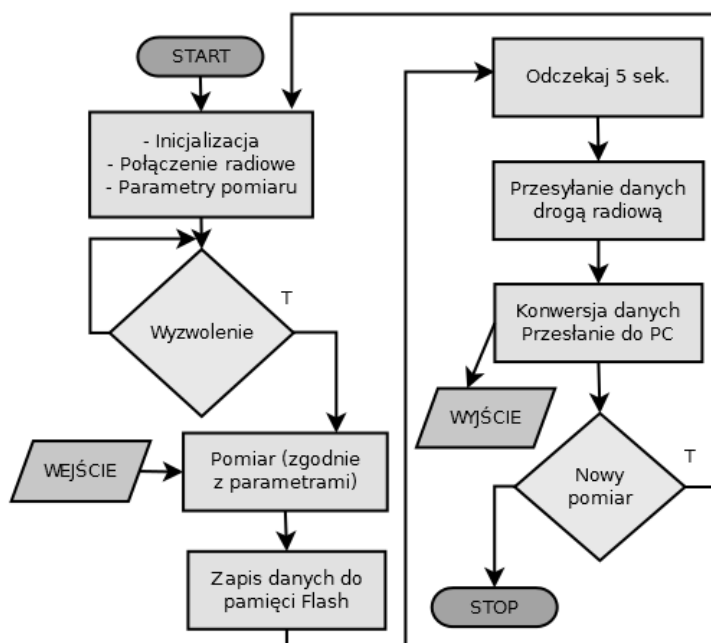


Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego.

Wszelkie formy wyładowań badanych w laboratoriach bądź poligonach badawczych mają charakter krótkotrwały. Oznacza to, że odstęp czasowy pomiędzy trwaniem pomiaru a rozpoczęciem przesyłania danych (zanik impulsów zakłócających) jest bardzo krótki. Czas rzędu 3 – 5 sekund jest wystarczający do zapewnienia transmisji radiowej, a jednocześnie na tyle krótki, że nie wpływa na czas oczekiwania na wyniki. Prędkość transmisji radiowej jest uzależniona od zastosowanego rozwiązania i standardu komunikacji. Możliwe jest zastosowanie dowolnego standardu komunikacji bezprzewodowej, w zależności od potrzeb (np.: Bluetooth, WiFi). Najkorzystniej ze względu na szybkość transmisji byłoby wykorzystać format 802.11n zapewniający przepustowość do 600 Mb/s (przy zasięgu w wolnej przestrzeni do 100 m) (Guido i in. 2010). W przypadku pomiarów na większe odległości konieczne byłoby wykorzystanie innego standardu. Do opracowania prototypowego toru pomiarowego wykorzystano moduły radiowe pracujące w nielicencjonowanym paśmie ISM na częstotliwości 868 MHz (Rozporządzenie 2014). Zapewniają one zasięg transmisji do 1000 km i prędkość do 115 kb/s. Wybór ten wynikał z konieczności transmitowania sygnału na większe odległości. Mniejsza prędkość transmisji nie jest kluczowa dla zaproponowanego rozwiązania, ponieważ wynik nie musi być dostępny natychmiast (w czasie rzeczywistym).

Mikroprocesorem wybranym do realizacji zadania został układ z rodziny Atmel. Zapewnia on dostateczną prędkość przetwarzania danych przy małej konsumpcji energii. Na wejściu układu pomiarowego znajduje się przetwornik analogowo-cyfrowy. Docelowo ma to być układ 16 bitowy o prędkości przetwarzania 32 MSPS. Do budowy prototypu wykorzystano mniejszą prędkość próbkowania wynoszącą 15 kSPS. Dane pomiarowe przetworzone w bloku konwersji analogowo-cyfrowej są zapisywane w pamięci RAM. Jest to szybka pamięć ulotna, która umożliwia gromadzenie

danych na czas trwania pomiaru. Pamięć ta może być wewnątrz mikroprocesora lub zrealizowana jako dodatkowy układ elektroniczny rozszerzający pojemność według potrzeb. Zgromadzone dane przesyłane są do odbiornika, którego zadaniem jest koordynowanie pracy nadajników, zbieranie sygnałów pomiarowych oraz przekazywanie ich do komputera przy pomocy interfejsu USB.



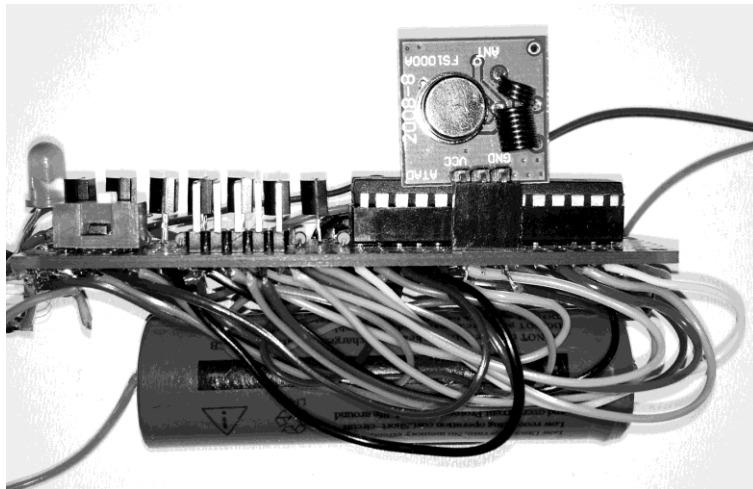
Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu.

Algorytm działania zaprezentowano na schemacie blokowym przedstawionym na rysunku 3. Przed przetwornikiem analogowo-cyfrowym konieczne jest zastosowanie dzielnika napięć w celu zwiększenia zakresu pomiarowego (Horowitz i in. 2003). Jego parametry należy dobrać do konkretnych zastosowań, ponieważ typowy zakres pomiarowy układu konwersji mieści się w zakresie kilku woltów (w zależności od modelu).

Użytkownik ma możliwość podawania parametrów wyzwalania oraz długości zapisu badanego sygnału. Dane pomiarowe przekazuje poprzez polecenia wysyłane do odbiornika poprzez port USB. Odbiornik interpretuje parametry i przekazuje je do nadajników sprawdzając jednocześnie czy komunikacja pomiędzy nimi przebiega w sposób prawidłowy i niezakłócony. Ustawione nadajniki są gotowe do wykonania pomiaru. Od tego momentu rejestrują one sygnał w sposób ciągły, nadpisując wyniki w pamięci RAM (zapis w pętli). Rozwiązanie takie umożliwia zaobserwowanie ciągu próbek przed pojawieniem się sygnału wyzwalającego pomiar właściwy (długość wektora wartości przed wzbudzeniem można ustawić jako jeden z parametrów). Wzbudzeniem jest tutaj badany sygnał, po przekroczeniu ustalonego progu (możliwość regulacji przed każdym pomiarem). Tak zarejestrowany sygnał właściwy (wraz z próbkami poprzedzającymi) zostaje zapisany w pamięci RAM, a następnie przesłany do odbiornika po otrzymaniu od niego pozwolenia. Pozwolenie na transmisję jest konieczne w szczególności, gdy pracuje kilka nadajników z jednym odbiornikiem. Zabezpiecza to przed sytuacją, w której nadajniki nadawałyby równolegle i zakłócały się wzajemnie. Zastosowano tutaj system wykrywania kolizji a urządzeniem nadrzędnym jest odbiornik, który decyduje o kolejności przesyłania danych pomiarowych. Finalne wyniki są transmitowane do komputera i dostępne w terminalu lub jako plik tekstowy.

Wykonywanie transmisji po pomiarze pozwala na wyeliminowanie zakłóceń sygnałów. Zamknięcie sondy pomiarowej w ekranowanej obudowie (Bogucki i in. 2007), gdzie odległość

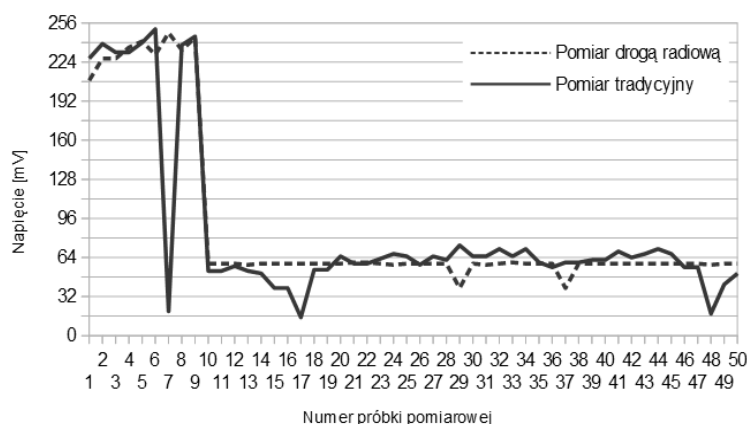
pomiędzy torem pomiarowym a miejscem prowadzenia pomiaru jest zredukowane do minimum pozwala na zredukowanie wpływu zakłóceń na jakość mierzonego sygnału. Prototyp urządzenia pomiarowego pokazano na rysunku 4. Składa się on z zasilania akumulatorowego, mikroprocesora sterującego oraz modułu komunikacji radiowej.



Rys. 4. Fotografia prototypu – sonda pomiarowa z nadajnikiem radiowym.

3. Wyniki i Dyskusja

W ramach badań nad opracowaniem rozwiązania umożliwiającego pomiary w środowisku o dużych zakłóceniach elektromagnetycznych zaproponowano prototypowy tor pomiarowy wykorzystujący transmisję bezprzewodową i pracujący w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie to zapewnia separację od miejsca prowadzenia pomiaru, bezpieczeństwo operatora oraz minimalizuje zakłócenia i szum właściwego sygnału badanego. Możliwe jest to dzięki zredukowaniu linii pomiarowej do minimum i zastąpieniu jej sondą pomiarową pracującą bezpośrednio w miejscu prowadzenia badań. Wyniki wstępnych testów są zadowalające, a przykładowy wykres zarejestrowany przy pomocy pierwszego prototypu zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowy wykres zarejestrowanego sygnału w sposób bezpośredni i z wykorzystaniem opisanego układu pomiarowego.

Obserwowane są na nim dwa sygnały zarejestrowane w tym samym czasie. Pierwszy przy pomocy prototypowego toru pomiarowego opracowanego zgodnie z przeprowadzonym opisem oraz drugi,

będący pomiarem tradycyjnym. Redukcja zakłóceń jest istotna. Do bardzo znaczących zalet zaproponowanego systemu pomiarowego należy niska konsumpcja energii, która umożliwia długą pracę na zasilaniu akumulatorowym. Rozwiązanie tego typu może stanowić idealną alternatywę dla systemów pomiarowych, gdzie wykonuje się badania pojedyncze (jako sprzęt badawczo-pomiarowy). Dla systemów, które miałyby stale monitorować wyładowania i pracować w trybie ciągłym (stacjonarnie) lepszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie systemu światłowodowego z zasilaniem sond pomiarowych przy pomocy technologii PoF (ang. Power over Fiber – zasilanie światłowodem) (Helmers i in. 2017).

Pierwszy prototypowy system pomiarowy posiada pewne ograniczenia. Urządzenie działa z ograniczoną prędkością próbkowania do 15 KSPS, przez co nie jest możliwe pełne pokazanie zalet opisywanego rozwiązania. Różne zmiany pomiędzy wykresami na rys. 5 byłyby bardziej widoczne w przypadku większej prędkości próbkowania, a co za tym idzie, większej ilości danych oraz dokładniejszego odwzorowania badanego sygnału. Nie mniej jednak nawet przy ograniczonej prędkości próbkowania możliwe jest zaobserwowanie dodatniego wpływu zaproponowanego rozwiązania.

4. Wnioski

Zaproponowany system pomiarowy z wykorzystaniem przetwarzania w czasie rzeczywistym do pomiaru wyładowań oraz dużych prądów spełnił założenia. Dzięki gromadzeniu danych pomiarowych w ekranowanej sondzie pomiarowej i transmitowaniu ich po ustaniu sygnałów zakłócających udało się zniwelować wpływ szumu wynikającego z impulsów elektromagnetycznych. Zastosowanie technologii radiowej do komunikacji pomiędzy sondą pomiarową (nadajnikiem) a koncentratorem (odbiornikiem) pozwoliło na wygodny pomiar przy założeniu częstych zmian badanego miejsca. Schemat toru pomiarowego umożliwiający podłączenie kilku nadajników do jednego odbiornika pozwala na dowolną konfigurację systemu pomiarowego w zależności od potrzeb. Przeprowadzone badania z pierwszym prototypem pokazały, że urządzenie spełnia zamierzoną funkcję. Konieczne jest dalsze, szczegółowe przetestowanie prototypu oraz rozwinięcie go pod kątem możliwości pomiarowych. W szczególności należy zwiększyć rozdzielczość, co umożliwi na jeszcze dokładniejsze odwzorowanie badanego sygnału w postaci cyfrowej. Na chwilę obecną, zaproponowane rozwiązanie wyróżnia się oryginalnym podejściem i niespotykaną architekturą sprzętową. Brak wykorzystania światłowodów umożliwia większą dowolność konfiguracji oraz swobodę zmian w trakcie badań. Rozwiązanie zapewnia również bardzo duży zasięg, przez co urządzenie można zamontować na rakiemie lub balonie meteorologicznym w celu przeprowadzenia badań w powietrzu.

Informacje uzupełniające

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową polegającą na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich w roku 2017 w ramach zadania pn. „DS/M.ET.17.003”.

5. Literatura

- Assis AK, Chaib JP (2015) Amperes Elektrodynamics, Aperion, Montreal, 221-226
- Bogucki J, Chudziński A, Połujan J (2007) Emisja elektromagnetyczna urządzeń w praktyce, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne 1-2/2007, 85-95
- Buczek Ł, Wyderka S, Jaworski M (2012) Światłowodowy system szerokopasmowej rejestracji sygnałów elektrycznych w środowisku wysokich napięć i silnych zaburzeń elektromagnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny 9a/2012, 171-175
- Guido RH, Dee DP, Lothar S et al. (2010) The IEEE 802.11 Universe, IEEE Communications Magazine, January, 62 - 70

- Helmers H, Lackner D, Siefer G et al. (2016) Integrated power and data transceiver devices for power-by-light systems – a concept study, 32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, June 2016, Munich, Germany
- Horowitz P, Hill W (2003) Sztuka elektroniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa
- Nguyen TX, Ely JJ, Szatkowski GG (2012) Fiber-Optic Sensor for Aircraft Lightning Current Measurement, 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria
- Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 12 grudnia 2014 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego. (Dz.U. z 2014 r. poz. 1843)
- Vaisala (2017) https://my.vaisala.net/VaisalaImages/Lightning/GLD_20km_avg_2012-2016_world_map.png

9. Wykrywanie oraz eliminacja błędów grubych w pomiarach piezometrycznych zapory Dobczyce w wieloleciu 2012-2016

Detection and elimination of outliers in the measurement of piezometers located in Dobczyce dam in the period 2012-2016

Stanisław Lach

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska

Stanisław Lach: slach@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: błędy grube, zapory ziemne, bezpieczeństwo budowli wodnych

Streszczenie

Budowle hydrotechniczne z uwagi na swoje rozmiary należą do największych i najcięższych obiektów inżynierskich. Zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji budowli hydrotechnicznych wymaga ciągłego monitoringu (Kledyński 2011). Podstawową formą monitoringu obiektów hydrotechnicznych są m.in. wielokrotne, okresowe pomiary piezometryczne. Podczas obserwacji poziomu zwierciadła wody w piezometrze otwartym lub ciśnienia wody w piezometrze zamkniętym mogą pojawić się różnego rodzaju czynniki mogące być przyczyną zaburzenia tych pomiarów. Przyjmują one charakter systematyczny, przypadkowy lub oczywiście pomyłki. Przed przystąpieniem do analizy takich danych należy odrzucić błędy grube, mogące znacząco wpłynąć na jej wynik, jak również spowodować fałszywą ocenę lub interpretację badanego zjawiska. W takiej sytuacji konieczne jest zastosowanie pewnych testów statystycznych, dzięki którym możliwe będzie przyjęcie bądź odrzucenie pomiaru wątpliwego na przyjętym poziomie istotności α . W niniejszej pracy wykorzystano trzy testy statystyczne służące do identyfikacji oraz odrzucenia obserwacji odstających: dwa warianty testu Q-Dixona (test oznaczony symbolem N9 oraz N13), test Grubbsa i test Hampela. Zakres pracy obejmuje analizę pomiarów piezometrycznych dla zapory Dobczyce z wielolecia 2012-2016.

1. Wstęp

W Światowym Rejestrze Zapor, który prowadzony jest przez Międzynarodową Komisję Wielkich Zapor (ICOLD), Polska z 69 wielkimi zaporami zajmuje 16 miejsce wśród 35 krajów europejskich pod względem liczby posiadanych wielkich zapór. W ubiegłym wieku powstało w naszym kraju kilkadziesiąt wielkich zapór, których celem było zapewnienie ochrony przed powodzią, jak również pozyskanie energii oraz zaopatrzenie ludności w wodę. Ochronę budowli piętrzących przed uszkodzeniami realizuje się przez stałą obserwację ich pracy, kontrolę i ocenę stanu technicznego oraz podejmowanie działań związanych z poprawą bezpieczeństwa funkcjonowania tych obiektów.

W Polsce funkcjonuje ponad 3500 budowli stale piętrzących wodę. Wśród tych obiektów można wymienić m.in. 2284 jazy, 383 elektrownie wodne, 327 zapór oraz 130 szluz żeglugowych (Fiedler i in. 2003). Obiekty te pracują w zmiennych warunkach hydrologicznych oraz meteorologicznych i są stale narażone na takie zjawiska jak: intensywne nawałne opady atmosferyczne, osuwiska ziemi, lodowacenie wody oraz powódzie. Wraz z czasem eksploatacji wodnych budowli piętrzących wzrasta ich podatność na uszkodzenia stwarzające zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzi, a także bezpieczeństwa mienia i środowiska. Dotyczy to około 30% polskich budowli piętrzących wodę, które użytkowane są ponad 50 lat. Tak długi okres eksploatacji, według oceny Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapor, skutkuje zwiększoną liczbą uszkodzeń i wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia awarii.

Zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji budowli piętrzących, takich jak zapory, wymaga stałego monitoringu.

Monitoring budowli hydrotechnicznej polega na zorganizowanym sposobie obserwacji obiektu i zachodzących na nim procesów, zwykle ciągły lub długoterminowy. Są to zazwyczaj

systematyczne obserwacje, pomiary i badania tych obiektów, które służą do oceny ich stanu technicznego i bezpieczeństwa. Katastrofalna fala wezbraniowa, która jest z reguły następstwem nagłej awarii wysokiej zapory dokonuje ogromnych zniszczeń, spowodowanych głównie znaczną prędkością wody oraz głębokością zalewu. Konsekwencjami katastrof zapór są straty w liczbie ludności oraz starty materialne. Dlatego tak szczególnie ważna jest kontrola oraz monitoring piętrzących budowli hydrotechnicznych z wykorzystaniem systemów ostrzegawczo-alarmowych. O powodzeniu monitoringu możemy mówić wtedy, gdy dostarczy on odpowiedniego typu dane, w odpowiedniej ilości i we właściwym czasie. Dane te muszą mieć akceptowalną dokładność oraz formę, która pozwoli na dalszą interpretację i przetwarzanie. Podstawową formą monitoringu zapór ziemnych są m.in. wielokrotne, okresowe pomiary piezometryczne, dzięki którym możliwa jest kontrola filtracji przez budowlę piętrzącą, a tym samym ocena zachowania się konstrukcji. Przed przystąpieniem do analizy danych piezometrycznych należy jednak zidentyfikować i odrzucić obserwacje odstające (błędy grube), które w sposób znaczący mogą wpłynąć na jej wynik oraz spowodować fałszywą ocenę lub interpretację badanego zjawiska (Lach i Opyrchal 2017).

Postępowanie z wynikami pomiarów uznanymi za wątpliwe jest jednym z najbardziej kłopotliwych problemów, na które można natrafić podczas wykonywania jakiegokolwiek analizy danych. Wyniki takie są skutkiem jednorazowego wpływu ważnej, zakłócającej przyczyny, która działa w sposób przejściowy i tylko przy niektórych pomiarach. Pojedynczy wynik pomiarowy obciążony takim rodzajem błędu jest najczęściej wielkością skrajną (minimalną lub maksymalną) rosnąco uporządkowanego zbioru wyników. W przypadku serii pomiarowej, która obejmuje wyniki pomiarów dokonywanych w warunkach powtarzalności błąd taki jest łatwy do wykrycia oraz identyfikacji. Oznacza to, iż niezależne wyniki badań tych samych jednostek są uzyskiwane przy użyciu tej samej metody, przez tego samego obserwatora i tym samym sprzętem, w takich samych warunkach oraz stosunkowo krótkich odstępach czasu (PN-ISO 5725-1:2002P, PN-ISO 5725-2:2002P, Traple i Twardowski 2006, PN-ISO 3534-1:2009P).

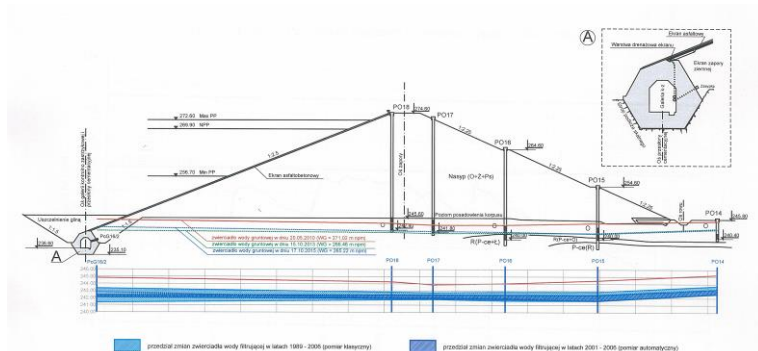
W przypadku okresowych pomiarów poziomu zwierciadła wody w piezometrze otwartym lub ciśnienia wody w piezometrze zamkniętym, obserwacje są rejestrowane jednorazowo dla każdego z piezometrów. Nie posiadamy więc próbki zawierającej po kilka wyników tej samej obserwacji dla tego samego piezometru, a dysponujemy jedynie pomiarami niezależnymi. W związku z tym, ewentualne zakłócenia w przebiegu zmian poziomu wody w piezometrach możemy zauważyć, porównując je z obrazem pochodzącym z poprzednich okresów pomiarowych. Jeżeli pomiar oraz obliczenia wykonywane są przez jednego obserwatora, który kontroluje i ma na uwadze warunki wykonania pomiaru, jak również ewentualnie występujące zakłócenia, możliwe jest odrzucenie odstającej obserwacji. W przypadku pomiarów piezometrycznych pożądane oraz celowe byłoby jego powtórzenie. Z reguły jednak osoba, która wykonuje obliczenia i analizy otrzymuje jedynie same wyniki pomiarów, bez dodatkowych informacji dotyczących ich przebiegu. W takiej sytuacji konieczne jest zastosowanie pewnych testów statystycznych, dzięki którym możliwe będzie przyjęcie lub odrzucenie pomiaru wątpliwego na przyjętym poziomie istotności α (Lach 2017). W artykule wykorzystano trzy testy statystyczne służące do identyfikacji oraz odrzucenia obserwacji odstających: dwa warianty testu Q-Dixona (test oznaczony symbolem N9 oraz N13), test Grubbsa i test Hampela. Zakres pracy obejmuje analizę pomiarów piezometrycznych dla zapory Dobczyce z wielolecia 2012-2016.

2. Materiał i metody

Zapora Dobczyce jest usytuowana w 60,1 km rzeki Raby, w gminie Dobczyce w województwie małopolskim. Do eksploatacji została oddana w 1986 roku. Na prawym brzegu poniżej zapory jest usytuowana elektrownia oddana do eksploatacji w 1993 roku (Rys.1). Podstawowe funkcje zbiornika to zaopatrzenie w wodę miasta Krakowa, redukcja fali powodziowej oraz retencja dla celów energetycznych, a jego główne parametry to:

Pojemność całkowita (przy Max PP)	141.74 mln m ³
Pojemność użytkowa (NPP – 269.90)	113.70 mln m ³
(NPP – 269.30)	107.87 mln m ³

Pojemność martwa (przy Min PP)	22.56 mln m ³
Rezerwa powodziowa (NPP – 269.90)	28.04 mln m ³
(NPP – 269.30)	33.87 mln m ³
Stany wody: Max PP	272.60 m n.p.m.
NPP	269.90 (269.30) m n.p.m.
Min PP	256.70 m n.p.m.

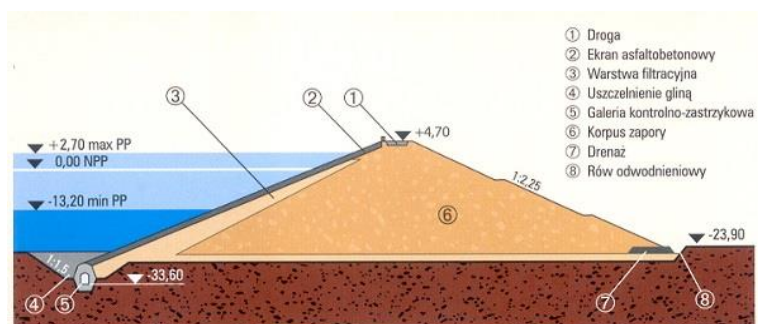


Rys. 1. Przekrój poprzeczny zapory Dobczyce w Hm 3+00 (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

Podłoże zapory stanowią piaskowce warstw istebniańskiej i godulskiej o spoiwie ilasto-wapiennym z przewarstwieniami łupków ilastych. W dnie doliny są przykryte warstwą utworów czwartorzędowych w postaci żwirów i otoczków z domieszką piasków. Na stromych zboczach z widocznymi odsłonięciami skalnymi występują gliny zwietrzelinowe.

W przekroju zapory strefa zwiętrzenia podłoża skalnego nie przekracza 2.0 m. Budowle betonowe zostały posadowione na niezwiętrzałej skale. Zapora ziemna została wykonana z materiałów miejscowych (piaski, żwiry, otoczaki), z ekranem asfaltobetonowym na skarpie odwodnej, opartym u podnóża na żelbetowej galerii kontrolno-zastrzykowej. Z poziomu galerii wykonano przesłonę cementacyjną (Rys.2). Podstawowe dane techniczne:

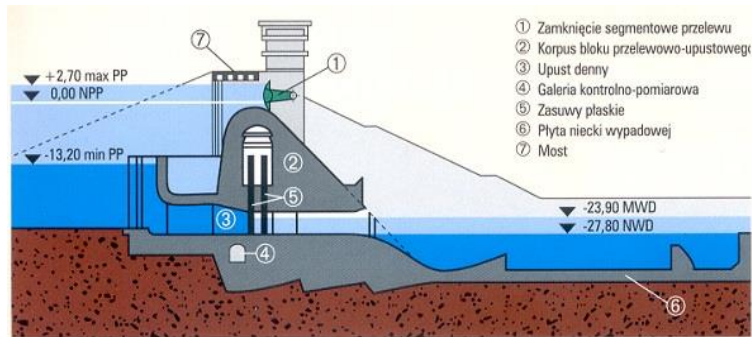
- Długość całkowita w koronie 617.0 m,
- Wysokość maksymalna 30.6 m,
- Szerokość korony 8.5 m,
- Nachylenie skarpy odwodnej 1:2.5,
- Nachylenie skarpy odpowietrznej 1:2.25,
- Kubatura nasypu 355 000 m³



Rys. 2. Przekrój zapory w Dobzyczach (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

Blok przelewowo-spustowy składa się z siedmiu sekcji betonowych łączących zaporę ziemną z prawym przyczółkiem (Górą Zamkową) (Rys. 3). Podstawowe dane techniczne:

- Wysokość bloku (sekcje przelewowe) 41.0 m
- Długość łączna 7 sekcji 107.9 m
- Światło przelewów w sekcjach B1, B2, B3 3 x 16.0 m
- Światło spustów dennych 4 x (3.2 x 4.5) m
- Sekcja B4 z przepławką dla ryb
- Sekcje głuche B5, B6, B7 łączą zaporę z prawym przyczółkiem
- Wydatek urządzeń upustowych przy Max PP 2 250 m³s⁻¹

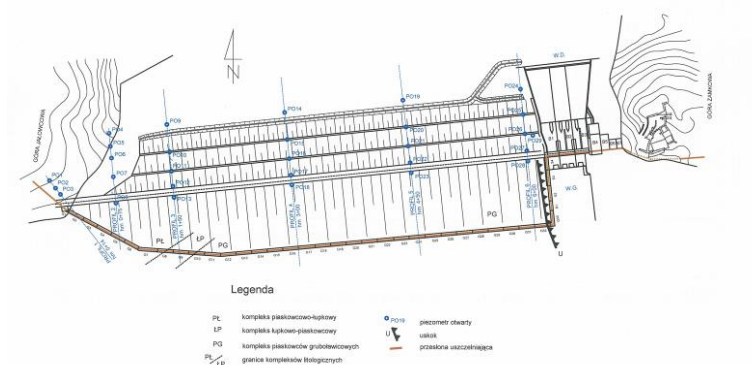


Rys. 3. Przekrój przez urządzenia upustowe zaporę w Dobczycach (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

Elektrownia przepływowa wyposażona w dwie turbiny Kaplana o pionowych osiach. Woda jest doprowadzana sztolnią wydrążoną w masywie Góry Zamkowej z ujęcia wieżowego zlokalizowanego w zbiorniku.

Moc instalowana	2.5 MW
Przełyk min/max	1.25/15.6 m ³ s ⁻¹
Spad min/max	14.8/30.7 m
Średnia roczna produkcji	9.6 GWh

Szkic rozmieszczenia aparatury pomiarowej dla zaporę w Dobczycach ukazano na Rys.4.



Rys. 4. Rozmieszczenie aparatury pomiarowej dla zaporę w Dobczycach (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

Dla zaporę Dobczyce zlokalizowanej w województwie małopolskim wykonano analizę pomiarów zmian zwierciadła wody w piezometrach otwartych (łącznie 27 piezometrów) obejmującą okres 5 lat (2012-2016). Dane piezometryczne udostępnione zostały przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie. Dla tej zaporę przeanalizowano sumarycznie 3 022 wyników.

W pracy wykorzystano trzy testy statystyczne służące do identyfikacji oraz odrzucenia obserwacji odstających: dwa warianty testu Q-Dixona (test oznaczony symbolem N9 oraz N13), test

Grubbsa oraz test Hampela (Grubbs 1969, Verma i Quiroz-Ruiz 2006, Taylor 2013). Dixon (1950, 1951, 1953) zaproponował sześć różnych wariantów testu statystycznego służącego do wykrywania wyniku obciążonego błędem grubym. Za pracą Barnetta i Lewisa (1994) w literaturze przedmiotu testy te są zwyczajowo oznaczane symbolami N7 oraz N9-N13. W niniejszej pracy skoncentrowano się na dwóch wariantach: testach oznaczonych symbolami N9 (weryfikacja hipotezy o pojedynczej obserwacji odstającej) oraz N13 (weryfikacja hipotezy o parze największych lub najmniejszych obserwacji odstających).

Test Q-Dixona jest wykorzystywany w celu sprawdzenia, czy w danym zbiorze danych nie występuje wynik obciążony błędem grubym. Warunkiem koniecznym dla stosowania opisywanego testu jest liczność zbioru obserwacji z przedziału 3-100. Za pomocą testu Q-Dixona można każdorazowo odrzucić z analizowanego zbioru danych tylko pojedynczy odstający wynik lub parę wyników odstających. W niektórych opracowaniach można odnaleźć warianty testu Q-Dixona dla serii pomiarowych składających się od 3 do 30 lub nawet 100 obserwacji (Konieczka i in. 2014). W Tab.1 przedstawiono pary hipotez testowanych w każdym wariancie testu.

Tab. 1. Hipotezy testowane w wariancie N9 oraz N13 dla testu Q-Dixona (opracowanie własne).

Test N9	
Testowanie górnej wartości odstającej	Testowanie dolnej wartości odstającej
Hipoteza zerowa (H_0): $x_{(n)}$ nie jest wartością odstającą; Hipoteza alternatywna (H_1): $x_{(n)}$ jest wartością odstającą. Statystyka testowa: $Q_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$	Hipoteza zerowa (H_0): $x_{(1)}$ nie jest wartością odstającą; Hipoteza alternatywna (H_1): $x_{(1)}$ jest wartością odstającą. Statystyka testowa: $Q_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$
Test N13	
Testowanie pary największych wartości odstających	Testowanie pary najmniejszych wartości odstających
Hipoteza zerowa (H_0): para $(x_{(n)}, x_{(n-1)})$ nie jest parą wartości odstających; Hipoteza alternatywna (H_1): para $(x_{(n)}, x_{(n-1)})$ jest parą wartości odstających. Statystyka testowa: $Q_n = \frac{x_n - x_{n-2}}{x_n - x_3}$	Hipoteza zerowa (H_0): para $(x_{(1)}, x_{(2)})$ nie jest parą wartości odstających; Hipoteza alternatywna (H_1): para $(x_{(1)}, x_{(2)})$ jest parą wartości odstających. Statystyka testowa: $Q_1 = \frac{x_3 - x_1}{x_{n-2} - x_1}$

Przed wykonaniem testu Grubbsa zbiór wyników eksperymentalnych (próbkę statystyczną) należy uszeregować w ciąg niemalejący. Błędem grubym może być obciążona największa ($x_{\max}$) lub najmniejsza ($x_{\min}$) wartość wyniku w analizowanej próbce. Następnie należy obliczyć wartości średniej oraz odchylenia standardowego w zbiorze wyników, obliczenie statystyki G_p , określenie liczebności zbioru danych poddanych analizie, odczytanie z tablic wartości krytycznej dwustronnego testu Grubbsa dla zadanego poziomu istotności α lub jej wyliczenie zgodnie ze wzorem:

$$G_{kr} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{t_{(\alpha/(2n), n-2)}^2}{n-2 + t_{(\alpha/(2n), n-2)}^2}}$$

Jak widać z powyższego wzoru, wartość krytyczna dwustronnego testu Grubbsa dla poziomu istotności α obliczana jest na podstawie wartości krytycznej rozkładu t -Studenta dla poziomu istotności $\alpha/(2n)$ i liczby stopni swobody równej $n - 2$, gdzie n oznacza liczbę pomiarów w serii.

Wykorzystując wzór na statystykę G_p stwierdzono iż stosowne maksimum jest osiągane dla największej obserwacji (x_n), tj.

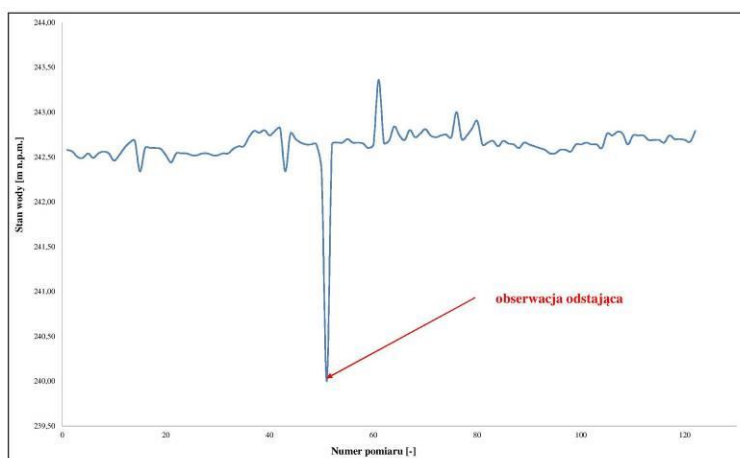
$$G_p = \frac{\max_{i=1, \dots, n} |x_i - \bar{x}|}{s} = \frac{|x_n - \bar{x}|}{s}.$$

Test ten jednorazowo, podobnie jak w przypadku testu Q-Dixona, daje możliwość wykrycia tylko jednej wartości odstającej, dlatego należy go powtarzać do momentu, gdy w zbiorze danych nie zaobserwuje się kolejnych wartości odstających od pozostałych wyników (Lach 2016b). Tradycyjne wnioskowanie w teście Grubbsa prowadzi się przy uwzględnieniu tylko jednego poziomu istotności (np. $\alpha=0.05$).

Test Hampela jest wykorzystywany w celu wykrycia w analizowanym zbiorze danych wyników znacznie odbiegających od wartości przeciętnych. Dużą i niewątpliwą zaletą testu jest łatwość jego przeprowadzenia, gdyż nie występuje tutaj ograniczenie dotyczące liczebności badanego zbioru. Należy, podobnie jak w przypadku testu Q-Dixona i Grubbsa, uszeregować dane w ciąg niemalejący. Następnie obliczyć wartości mediany M_e , odchyłeń r_i od mediany, wartości bezwzględnych $|r_i|$ oraz mediany odchyłeń $Me_{|r_i|}$ w analizowanym zbiorze. W końcowym etapie przeprowadzania tego testu należy wyznaczyć obserwacje spełniające warunek $|r_i| \geq 4,5Me_{|r_i|}$ lub równoważnie $|r_i| - 4,5Me_{|r_i|} \geq 0$. Wnioskowanie na temat charakteru badanej obserwacji następuje w oparciu o ocenę uzyskanych wyników analizy na podstawie określonych formuł. W związku z tym nie ma konieczności odczytywania wartości krytycznej statystyki testowej ze specjalnych tablic (Lach 2016a).

3. Wyniki

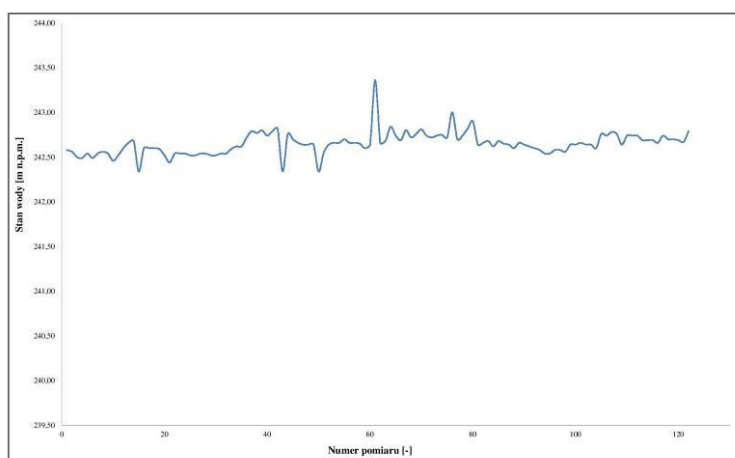
Uzyskane wyniki zestawiono w Tab.2. Ponadto na Rys.5 ukazano wykres zmian poziomów wody w piezometrze P7 zapory w Dobczycach przed dokonaniem identyfikacji oraz usunięciu obserwacji odstających, natomiast na Rys.6 przedstawiono wykres zmian poziomów wody w piezometrze P7 zapory w Dobczycach już po identyfikacji oraz usunięciu błędu grubego.



Rys. 5. Wykres zmian poziomów wody w piezometrze P7 zapory w Dobczycach przed dokonaniem identyfikacji oraz usunięciu obserwacji odstających (opracowanie własne).

Tab. 2. Zestawienie liczby wyników odstających dla statystycznych testów Q-Dixona, Grubbsa i Hampela dla zapory Dobczyce w latach 2012-2016 (opracowanie własne).

Oznaczenie piezometru otwartego	Liczba wykrytych obserwacji odstających dla statystycznych testów			
	Q-Dixona		Grubbsa	Hampela
	wariant N9	wariant N13		
P2	0	0	0	0
P2a	0	0	0	0
P3	0	0	0	0
P4	1	0	0	0
P5	0	0	0	23
P6	0	0	0	0
P7	1	1	1	1
P9	1	2	2	3
P10	0	0	1	5
P11	1	1	2	4
P12	0	1	2	2
P13	1	1	1	2
P14	0	0	2	3
P15	0	0	2	7
P16	1	1	3	6
P17	1	2	1	1
P19	2	2	2	2
P20	1	1	0	0
P21	0	0	5	10
P22	0	0	0	0
P23	0	0	0	0
P24	1	1	1	33
P25	1	1	2	6
P26	0	0	0	0
P27	0	1	0	0
P28	2	2	2	3
P29	1	1	2	2



Rys. 6. Wykres zmian poziomów wody w piezometrze P7 zapory w Dobczycach po identyfikacji oraz usunięciu obserwacji odstającej (opracowanie własne).

4. Dyskusja i wnioski

Dla zapory Dobczyce w latach 2012-2016 w przypadku 27 piezometrów otwartych testy statystyczne wykazały istnienie 17 obserwacji odstających (0,56% wszystkich wyników). Przed przystąpieniem do analizy danych piezometrycznych należy odrzucić błędy grube, które nawet

w przypadku jednej obserwacji odstającej mogą znacząco wpłynąć na jej wynik oraz spowodować fałszywą ocenę lub interpretację badanego zjawiska (Lach 2016). Pojedynczy wynik pomiarowy obarczony błędem grubym jest najczęściej wielkością skrajną (minimalną lub maksymalną) uporządkowanego zbioru wyników. Błędy grube, które mogą pojawić się podczas różnego rodzaju pomiarów (także w przypadku pomiarów piezometrycznych), powodowane są przez wiele czynników. Do najistotniejszych przyczyn powstawania błędów tego rodzaju zaliczyć można: pomyłki przy wykonywaniu odczytu lub zapisu wskazań instrumentów – najczęściej popełniane błędy przez obserwatora (np. niepoprawna numeracja punktów lub przypadkowa zamiana kolejności dwu sąsiednich liczb), uszkodzenia sprzętu pomiarowego, wykorzystanie sprzętu pomiarowego w niewłaściwy sposób, specyfika pomiaru, która związana jest z doбором odpowiedniej metody, zmiana warunków pomiarowych (np. niesprzyjające warunki pogodowe, oblodzenie itp.), nieodpowiedni sposób pomiaru (pobrania danych), przechowywania lub ich przygotowania do analizy, mechaniczne uszkodzenia punktów pomiarowych, wprowadzenie danych pomiarowych do bazy danych w niewłaściwy sposób.

Duża liczba wykrytych obserwacji odstających dla statystycznego testu Hampela (przykładowo piezometr P5 oraz P24) związana jest z konstrukcją tego testu. W sytuacji, gdy w zbiorze danych występuje duża liczba obserwacji o tych samych wartościach podczas obliczenia wartości odchyłań r_i od wartości mediany uzyskujemy wynik równy 0. Wartość mediany ze zbioru odchyłań również uzyskujemy równą 0, więc w przypadku, gdy moduł odchyłań r_i przyjmuje wartość większą od 0 to obserwacja jest traktowana jako odstająca. W związku z tym należy zachować uwagę i czujność kierując się wynikami obserwacji odstających uzyskiwanymi jedynie za pomocą tego testu.

5. Literatura

- Barnett V, Lewis T (1994) Outliers in Statistical Data. Wiley, New Jersey.
- Dixon WJ (1950) Analysis of extreme values. The Annals of Mathematical Statistics Vol. 21(4): 488–506.
- Dixon WJ (1951) Ratios involving extreme values. The Annals of Mathematical Statistics Vol. 22(1): 68–78.
- Dixon WJ (1953) Processing data for outliers. Biometrics Vol. 9(11): 74–89.
- Fiedler K, Jankowski M, Kłozę J i in. (2003) Przyczyny i skutki katastrof zapór oraz systemy ostrzegawcze i alarmowe, w tym ASTKZ, jako elementy technicznej kontroli zapór. Wydawnictwo Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW, Warszawa.
- Grubbs FE (1969) Procedures for detecting outlying observations in Samples. Technometrics Vol. 11(1): 1–21.
- Kledyński Z (2011) Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych. cz. 1. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 2: 54–61.
- Konieczka P, Namieśnik J, Zygmunt B (2014) Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Lach S (2016a). Zmodyfikowana metoda iloczynu skalarnego służąca do badania kierunku filtracji w zaporach ziemnych. Wydawnictwa AGH, Rozprawy Doktorskie. Monografie, Kraków.
- Lach S (2016b). Wykrywanie oraz eliminacja obserwacji odstających w hydrotechnice. Monografie. Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce: woda i ścieki / red. nauk. Jacek Leśny, Jędrzej Nyckowiak, Poznań.
- Lach S, Opyrchal L (2017). Using the modified scalar product approach for testing the direction of seepage through the earth-fill dam in Pieczyńska. Journal of Water and Land Development. No. 33 p. 89-98. DOI: 10.1515/jwld-2017-0023.
- Lach S (2017) Wykrywanie oraz eliminacja błędów grubych w pomiarach piezometrycznych dla zapory Koronowo w latach 2010–2015. Monografie. Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce: nauki techniczne i inżynieryjne, Cz. 5 / red. nauk. Jędrzej Nyckowiak, Bogdan H. Chojnicki, Poznań.
- Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie.

- PN-ISO 3534-1. 2009. Statystyka – Słownik i symbole – Część 1: Ogólne terminy statystyczne i terminy wykorzystywane w rachunku prawdopodobieństwa. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-ISO 5725-1. 2002. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Część 1: Ogólne zasady i definicje. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-ISO 5725-2. 2002. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów – Część 2: Podstawowa metoda określania powtarzalności i odtwarzalności standardowej metody pomiarowej. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Taylor JR (2013) Wstęp do analizy błędu pomiarowego. Tłumaczenie Adam Babiński i Rafał Bożek. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Verma SP, Quiroz-Ruiz A (2006) Critical values for six Dixon tests for outliers in normal samples up to sizes 100, and applications in science and engineering. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* Vol. 23(2): 133–161.

10. Interpretacja wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych na zaporze Klimkówka w roku 2015

Interpretation of the results of monitoring of the displacement of the Klimkówka Dam in 2015

Stanisław Lach⁽¹⁾, Katarzyna Angielska⁽²⁾

⁽¹⁾ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska

⁽²⁾ absolwentka kierunku Inżynieria Środowiska w specjalności *Inżynieria Komunalna* na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Stanisław Lach: slach@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: przemieszczenia, zapory ziemne, bezpieczeństwo budowli wodnych

Streszczenie

Celem pracy była ocena stanu technicznego oraz bezpieczeństwa zapory Klimkówka, która znajduje się na rzece Ropa w województwie małopolskim. Wyżej wymienioną ocenę wykonano w oparciu o analizę wyników przemieszczeń oraz dodatkowo uwzględniono zjawisko filtracji i przeglądy obiektu wykonane w 2015 roku. Zakres badań dotyczył okresu 03.2014-03.2015 i obejmował budynek elektrowni wodnej, mur oporowy, urządzenia-pomiarowe oraz pozostałe budowle hydrotechniczne związane z podłożem i zbiornikiem. Metodyka badań polegała na pomiarze bezwzględnych wartości przemieszczeń pionowych i poziomych, stanów wody górnej oraz dolnej i ciśnień piezometrycznych, wydatku przelewu i filtracji. Pomiary geodezyjne zostały ocenione na podstawie poprawności ich wykonania. Zmiany wynikające z przemieszczeń bezwzględnych odniesiono do wartości podwójnego średniego błędu wyznaczania. Pomiary przemieszczeń w 2015 roku wykazały znikome wartości przemieszczeń pionowych reperów kontrolowanych na korpusie zapory w odniesieniu do roku poprzedniego. Wartości tych przemieszczeń mieściły się praktycznie w granicach podwójnego średniego błędu wyznaczenia. Przebieg osiadań oceniono jako bezpieczny. Stateczność elementów konstrukcji betonowych nie budziła zastrzeżeń. Jakość betonów konstrukcyjnych elementów zapory była w stanie dobrym.

1. Wstęp

Monitoring i diagnostyka budowli pozwala na poznanie stanu technicznego obiektu hydrotechnicznego, szczególnie przydaje się w ocenie budowli piętrzących wodę (Lach 2017). Oznacza ona nie tylko istnienie niezbędnej nadwyżki nośności nad obciążeniami, gwarantującej integralność i stateczność konstrukcji, ale także staje się niezwykle istotnym komponentem ryzyka katastrofy wywołanej przerwaniem zapory, przy czym ryzyko jest tu rozumiane jako iloczyn prawdopodobieństwa przerwania zapory i strat ludzkich oraz materialnych, wywołanych poniżej obiektu z powodu jej nagłego zniszczenia (Kledyński 2011a). Budowle hydrotechniczne posiadają duże kubatury i są narażone na ciągły kontakt z wodą, zazwyczaj powierzchnią. Funkcja piętrzenia wody ma szczególne znaczenie, ponieważ filtracja staje się silnym oddziaływaniem na obiekt i podłoże (Opyrchal i Lach 2017). Na stan budowli wodnych poza filtracją ma wpływ kontakt z wodą płynącą, czego skutkiem mogą być rozmycia, zamulenia czy uszkodzenia kawitacyjne (Kledyński 2011b).

Prawne aspekty monitorowania budowli hydrotechnicznych zostały zawarte w ustawach: *Prawo budowlane* (Ustawa *Prawo budowlane* z dnia 7 lipca 1994 r. Dz.U. 1994 nr 156 poz. 1118 z późn. zm.) i *Prawo wodne* (Ustawa *Prawo wodne* z dnia 18 lipca 2001 r. Dz.U. 2001 nr 115 poz. 1229 z późn. zm.) oraz wydanych na ich podstawach przepisach, w tym techniczno-budowlanych (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579)), a także różnego rodzaju wytycznych i instrukcjach branżowych.

Konieczność wykonywania geodezyjnych pomiarów kontrolnych oraz pomiarów inwentaryzacyjnych dla określenia stanu technicznego i bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych wynika bezpośrednio z ustawy *Prawo budowlane*, ustawy *Prawo wodne* oraz związanych z tymi ustawami przepisów wykonawczych – rozporządzeń, a w szczególności z Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (2007). Ustawa *Prawo budowlane* (1994) zalicza budowle hydrotechniczne do obiektów budowlanych nakładając tym samym obowiązek stosowania wszystkich przepisów ustawy. Art. 5.1 stanowi, że budowla hydrotechniczna musi być użytkowana i utrzymywana zgodnie z przepisami, w tym techniczno-budowlanymi, obowiązującymi Polskimi Normami oraz zasadami wiedzy technicznej, w sposób zapewniający bezpieczeństwo konstrukcji i bezpieczeństwo użytkowania. Zgodnie z art. 62 obiekty budowlane powinny być w czasie użytkowania poddane co najmniej raz w roku okresowej kontroli dla sprawdzenia stanu technicznej sprawności i co najmniej raz na 5 lat dla sprawdzenia stanu sprawności technicznej i wartości użytkowej całego obiektu budowlanego. Ponadto zgodnie z art. 62.1.4 należy przeprowadzić każdorazowo kontrolę stanu bezpieczeństwa obiektu budowlanego w przypadku zaistnienia takich okoliczności jak:

- stwierdzenie nietypowych zjawisk podczas bieżącej eksploatacji obiektu,
- przejście fali powodziowej,
- nietypowe, intensywne zjawiska lodowe.

Ustawa *Prawo wodne* (2001) uściśla postanowienia prawa budowlanego w odniesieniu do poszczególnych rodzajów budowli wodnych, a takimi są w świetle ustawy budowle piętrzące przeznaczone do prowadzenia gospodarki wodnej czy energetyki. Właściciele lub zarządcy tych budowli są zobowiązani do zapewnienia należytego stanu technicznego, bezpieczeństwa i właściwego ich funkcjonowania, a także do prowadzenia badań i pomiarów umożliwiających ocenę stanu oraz bezpieczeństwa budowli, a w szczególności w zakresie filtracji przez budowlę, stanu galerii kontrolnej, stanu urządzeń upustowych oraz zmian na górnym i dolnym stanowisku budowli. W zależności od klasy obiektu kontroli mogą podlegać różne parametry m.in.: przemieszczenia pionowe (osiadania i wypiętrzenia), przemieszczenia poziome, nachylenia względem poziomu, wychylenia od pionu, ugięcia, drgania oraz odkształcenia liniowe, kątowe i postaciowe (Kledyński 2011b).

Przemieszczenie obiektu jest to zmiana położenia obiektu w przestrzeni bez zmiany jego wymiarów i kształtu. W interpretacji geometrycznej to translacje i obroty. W ogólnej klasyfikacji przemieszczeń wyróżniamy przemieszczenia bezwzględne i względne. Wyżej wymienione przemieszczenia sprowadzają się do wyznaczania zmian położenia punktów kontrolowanych w przyjętym układzie odniesienia, spełniającym kryterium całości. Wykonuje się to za pomocą urządzeń geodezyjnych w nawiązaniu do punktów odniesienia, które definiują układ współrzędnych (Bryś 1996).

2. Materiał i metody

Zbiornik wodny Klimkówka powstał w wyniku spiętrzenia wód zaporą ziemną wybudowaną w km 54+400 rzeki Ropy, w miejscowości Klimkówka, w województwie małopolskim. Powstały zalew ma długość około 6.5 km. Zaporę Klimkówka zaliczono do II klasy ważności. Obiekt został wybudowany w latach 1975-1993, a w roku 1994 został oddany do eksploatacji i po raz pierwszy napełniony (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie). W skład zbiornika wchodzi:

- zaporę czołową – ziemną,
- urządzenia upustowe,
- czaszę zbiornika,
- wał cokołowy w Uściu Gorlickim,
- dolne stanowisko zapory,
- elektrownia wodna.

Podstawowe parametry zbiornika (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie):

Poziomy piętrzenia (WG):

- Min PP 375.10 m n.p.m.
- NPP^{LETNIE} 394.99 m n.p.m.
- NPP^{ZIMOWE} 395.76 m n.p.m.
- Max PP 398.60 m n.p.m.

Stan wody na dolnym stanowisku (WD):

- SSQ 362.50 m n.p.m.

Pojemności charakterystyczne:

- martwa przy Min PP 2.18 hm³
- całkowita przy NPP^{LETNIE} 32.52 hm³
- całkowita przy NPP^{ZIMOWE} 34.54 hm³
- powodziowa przy NPP^{LETNIE} 10.00 hm³
- powodziowa przy NPP^{ZIMOWE} 8.00 hm³
- całkowita przy Max PP 42.53 hm³

Powierzchnia zalewu przy:

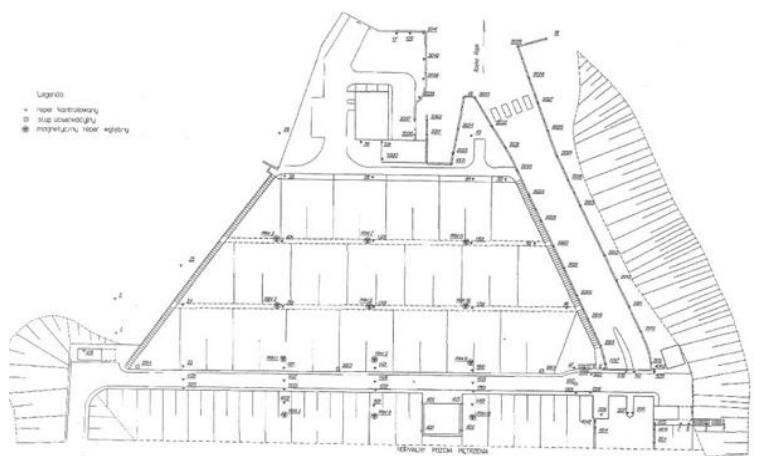
- Min PP 62.6 ha
- NPP^{LETNIE} 61.2 ha
- NPP^{ZIMOWE} 268.9 ha
- Max PP 291.3 ha

Konstrukcja zapory jest typu ziemnego z uszczelnieniem centralnym w postaci rdzenia z glin miejscowych i przesłony wodoszczelnej jednorzędowej, wykonanej z galerii kontrolno-zastrzykowej w głąb podłoża zbudowanego z piaskowców gruboławicowych z cienkimi przewarstwieniami łupka (flisz karpacki). Skarpę odpowietrzną dzieli 2 ławeczki o szerokości 2 m (Rys.1). Główne parametry korpusu zapory:

- długość w koronie 210 m
- szerokość korony 8.90 m
- wysokość maksymalna nad dnem doliny 33 m
- nachylenie skarpy odwodnej 1 : 2.5
- nachylenie skarpy odpowietrzej 1 : 2.2
- szerokość korpusu u podstawy 180 m
- rzędna korony 400.20 m n.p.m.
- rzędna górnej krawędzi parapetu szczelnego 401.00 m n.p.m.
- rzędna górnej ławeczki 389.60 m n.p.m.
- rzędna dolnej ławeczki 378.60 m n.p.m.

Materiał korpusu zapory stanowi zagliniona pospółka z otoczkami, która pochodzi ze złóż eksploatowanych w dnie doliny zalewu w odległości 1÷3 km od przekroju zaporowego. Grunty spoiste na rdzeń były pobierane ze złoża glin usytuowanego na lewym zboczu doliny, w granicach zalewu zbiornika. Galeria o długości 184 m usytuowana wzdłuż osi zapory ma szerokość 2.8 m i wysokość 3.0 m. Dylatacje sekcji galerii uszczelniono taśmą SICA o szerokości 35 cm na całym obwodzie. W części stropowej stosowano wypełnienie szczeliny kitem fugowym lub komponentami poliuretanowymi nad taśmą uszczelniającą, co miało zapobiegać przepływowi wody wzdłuż dylatacji pod rdzeniem. W trakcie eksploatacji stwierdzono, że uszczelnienia te nie są dostateczne i w 2008 roku wykonano prace doszczelniające między jazem a sekcją G-1, między sekcją G-3 i S-5 oraz między sekcją S-5 i G-5.

Do urządzeń upustowych zapory zalicza się przelew powierzchniowy wód powodziowych i upust denny. Przelew składa się z dwuprzęsłowego jazu ruchomego o świetle 2x7.5 m z zamknięciami klapowymi o wysokości piętrzenia 3.00 m z napędem mechanicznym oraz z żelbetowego bystrza o szerokości 15.0 m i spadku podłużnym 40% usytuowanego na prawym przyczółku zapory. Upust denny składa się z dwóch przewodów żelbetowych o przekroju 3.2x3.2 m



Rys. 3. Rozmieszczenie aparatury pomiarowej dla zapory Klimkówka (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

3. Wyniki

Okresowy pomiar sieci niwelacyjnej został wykonany w dniach 17÷20.03.2015 roku przy średnim poziomie wody górnej $WG = 395.80$ m n.p.m., średniej temperaturze powietrza $t_p = +7^\circ\text{C}$ i temperaturze w galerii kontrolnej $t_g = +9^\circ\text{C}$. Pomiar przeprowadzono metodą precyzyjnej niwelacji geometrycznej z użyciem klasycznego niwelatora precyzyjnego ZeissNI002 oraz niwelatora kodowego Leica DNA03. Niwelacja geometryczna polegała na wyznaczaniu różnic wysokości punktów przy spoziomowanej osi celowej instrumentu na podstawie odczytów na pionowo ustawionych łątach niwelacyjnych. W celu kontroli poprawności pomiaru większość ciągów niwelacyjnych łączono w zamknięte obwodnice, co pozwoliło wyznaczyć średni błąd niwelacji na jedno stanowisko niwelatora z wzoru (Lazzarini 1977):

$$m_o = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{f}{n} \right]_1^N} = \pm 0.07 \text{ mm}$$

gdzie:

f – wartość niezamknięcia obwodnicy,

n – liczba stanowisk niwelatora w obwodnicy,

N – liczba obwodnic.

Szkic sieci niwelacyjnej dla zapory Klimkówka pokazano na Rys.4.

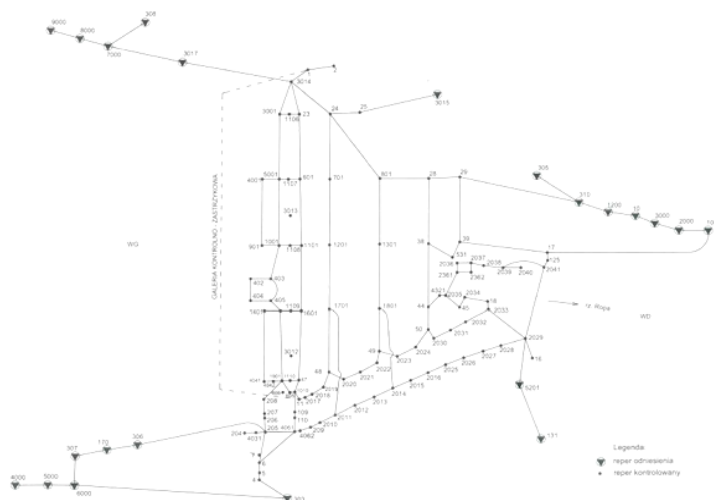
Po kontroli wyników pomiaru, przeprowadzono wyrównanie wstępne pomiarów: aktualnego i wyjściowego. Za wyjściowy przyjęto wyniki pomiaru zerowego z grudnia 1993 roku. Przeprowadzona analiza stałości wykazała wzajemną stałość 8 reperów odniesienia: 10, 303, 1000, 1200, 3000, 7000, 8000, 9000. Na podstawie przyjętych reperów stałych przeprowadzono łączne wyrównanie ostateczne i w jego wyniku otrzymano wartości bezwzględnych przemieszczeń reperów wraz z charakterystyką dokładnościową ich wyznaczania. Kontrolnie wyznaczono przemieszczenia w odniesieniu do pomiaru poprzedniego z 2013 roku. Suma przemieszczeń całkowitych wyznaczonych w okresach: 1994-2014 r. i 2014-2015 r. różni się o ± 0.3 mm od wyników przemieszczeń wyznaczonych bezpośrednio w okresie 1993-2015.

Średnie błędy wyznaczenia przemieszczeń pionowych nie przekraczają wielkości:

- dla reperów kontrolowanych korpusu i na przelewie $m_{\Delta} \approx \pm (0.35 \div 0.45)$ mm
- dla reperów kontrolowanych w galerii kontrolnej:
 - dla reperów na najniższym poziomie galerii $m_{\Delta} \approx \pm 0.65$ mm
 - dla pozostałych reperów galerii $m_{\Delta} \approx \pm (0.35 \div 0.60)$ mm

- dla reperów elektrowni i galerii energetycznej $m_{\Delta} \approx \pm (0.50 \div 0.70)$ mm

Za zidentyfikowane przemieszczenia pionowe należy uznać wielkości przekraczające podwójny błąd średni ich wyznaczenia. Wyznaczone przemieszczenia pionowe zestawiono w Tab.1, Tab. 2 oraz Tab.3.



Rys. 4. Szkic sieci niwelacyjnej zapory Klimkówka (Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie).

Tab. 1. Wyznaczanie przemieszczeń pionowych dla zapory Klimkówka w 2015 roku (opracowanie własne na podstawie danych RZGW Kraków)

Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności	Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności
1	-43.25	0.36	istotne	71	-4.63	0.66	istotne
2	-3.18	0.37	istotne	72	-4.96	0.67	istotne
4	0.44	0.43		73	-4.9	0.67	istotne
5	0.02	0.41		74	-5.96	0.67	istotne
7	-1.34	0.38	istotne	75	-1.53	0.68	
11	-3	0.38	istotne	76	-6.22	0.68	istotne
16	-0.46	0.45		77	-5.75	0.68	istotne
17	-6.18	0.35	istotne	78	-9.35	0.67	istotne
18	-2.18	0.4	istotne	79	-9.56	0.67	istotne
19	-2.85	0.55	istotne	80	-10.25	0.67	istotne
20	-2.32	0.53	istotne	81	-9.76	0.67	istotne
22	-3.48	0.41	istotne	82	-6.04	0.67	istotne
23	-24.4	0.36	istotne	83	-6.08	0.67	istotne
24	-2.5	0.34	istotne	84	-2.71	0.67	istotne
25	-2.79	0.35	istotne	85	-2.43	0.67	istotne
29	-25.23	0.35	istotne	86	-3.03	0.66	istotne
39	-12.94	0.34	istotne	87	-3.03	0.66	istotne
45	-39.86	0.37	istotne	88	-2.87	0.66	istotne
47	-35.16	0.36	istotne	89	-3.39	0.65	istotne
48	-9.39	0.35	istotne	90	-2.48	0.65	istotne
49	-4.1	0.34	istotne	92	-2.39	0.64	istotne
60	-5.41	0.57	istotne	93	-2.23	0.63	istotne
61	-5.55	0.59	istotne	94	-2.22	0.62	istotne

Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności	Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności
62	-5.25	0.6	istotne	98	-1.36	0.59	
63	-5.75	0.61	istotne	99	-2	0.57	istotne
64	-5.53	0.61	istotne	100	-1.6	0.56	istotne
65	-5.26	0.62	istotne	101	-1.65	0.55	istotne
66	-5.17	0.63	istotne	102	-1.55	0.53	istotne
67	-5	0.64	istotne	103	-1.5	0.52	istotne
68	-4.9	0.64	istotne	104	-0.03	0.5	
69	-4.93	0.65	istotne	105	0.55	0.48	
70	-5.14	0.66	istotne	106	0.01	0.44	

Tab. 2. Wyznaczanie przemieszczeń pionowych dla zapory Klimkówka w 2015 roku cd. (opracowanie własne na podstawie danych RZGW Kraków).

Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności	Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności
107	0.78	0.41		1401	-79.55	0.4	istotne
125	-3.32	0.37	istotne	1501	-98.23	0.36	istotne
170	7.9	0.42	istotne	1601	-70.76	0.36	istotne
204	1.24	0.42	istotne	1701	-35.88	0.35	istotne
205	-1.67	0.36	istotne	1801	-20.64	0.35	istotne
206	-1.26	0.38	istotne	1901	-26.86	0.37	istotne
207	-1.1	0.38	istotne	2011	-2.24	0.35	istotne
208	-1.5	0.38	istotne	2012	1.14	0.38	istotne
209	-2.36	0.37	istotne	2013	0.37	0.38	
402	-9.65	0.39	istotne	2014	-0.04	0.36	
403	-13.25	0.38	istotne	2015	-0.72	0.4	
404	-8.9	0.39	istotne	2016	-1.19	0.44	istotne
405	-12.21	0.38	istotne	2017	-3.23	0.38	istotne
512	-4.72	0.72	istotne	2018	-2.6	0.38	istotne
513	-9.77	0.71	istotne	2019	-3.09	0.35	istotne
514	-10.4	0.7	istotne	2020	-3.39	0.36	istotne
515	-12	0.69	istotne	2021	-3.01	0.37	istotne
516	-11.91	0.68	istotne	2022	-0.74	0.35	
517	-11.48	0.66	istotne	2023	0.68	0.36	
518	-11.37	0.64	istotne	2024	-2.64	0.36	istotne
519	-11.01	0.63	istotne	2028	2.07	0.46	istotne
520	-10.58	0.62	istotne	2029	-2.08	0.45	istotne
521	-9.77	0.61	istotne	2030	-2.71	0.38	istotne
522	9.45	0.59	istotne	2031	-2.83	0.39	istotne
523	-8.1	0.58	istotne	2032	-2.73	0.4	istotne
524	-8.19	0.56	istotne	2033	-2.21	0.4	istotne
525	-6.93	0.54	istotne	2034	-2.64	0.39	istotne
526	-6.43	0.51	istotne	2035	-3.63	0.38	istotne
527	-4.16	0.48	istotne	2036	-3.08	0.38	istotne
528	-3.74	0.48	istotne	2037	-2.32	0.39	istotne
529	-3.3	0.48	istotne	2038	-1.8	0.39	istotne
530	-4.71	0.46	istotne	2039	-1.76	0.4	istotne
531	-3.16	0.36	istotne	2041	-3.24	0.37	istotne
601	-56.02	0.36	istotne	2361	-2.54	0.39	istotne
700	-4.92	0.65	istotne	2362	-2.09	0.4	istotne
701	-33.01	0.35	istotne	3001	-31.91	0.35	istotne
801	-14.18	0.36	istotne	3014	-5.9	0.34	istotne
901	-76.48	0.39	istotne	4001	-67.12	0.38	istotne

Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności	Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności
1001	-84.84	0.36	istotne	5001	-76.01	0.36	istotne
1010	-4.14	0.37	istotne				
1050	-0.18	0.46					
1101	-61.98	0.36	istotne				
1106	-24.59	0.38	istotne				
1107	-57.13	0.38	istotne				
1108	-65.29	0.39	istotne				
1109	-72.09	0.39	istotne				
1110	-30.36	0.39	istotne				
1201	-37.94	0.36	istotne				
1301	-20.98	0.36	istotne				

Tab. 3. Wyznaczanie przemieszczeń pionowych dla zapory Klimkówka w 2015 roku cd. (opracowanie własne na podstawie danych RZGW Kraków).

Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności	Numer reperu	δ [mm]	Błąd średni [mm]	Ocena istotności
Repery odniesienia				PRZEMIESZCZENIA W OKRESIE 03.2014-03.2015			
R10	0.06	0.32					istotne
R303	-0.3	0.45		28	0.1	0.22	
R1000	0.79	0.36		38	-0.01	0.22	
R1200	0.5	0.33		44	-0.34	0.23	
R3000	0.76	0.32		50	-0.19	0.23	
R7000	-0.83	0.4		59	0.01	0.41	
R8000	-0.53	0.41		95	0.04	0.44	
R9000	-0.71	0.44		108	0.47	0.31	
U305	13.44	0.39	istotne	109	0.02	0.27	
U306	2.65	0.4	istotne	110	0.16	0.27	
308	1.49	0.5	istotne	605	-0.36	0.29	
U307	5.06	0.43	istotne	2010	-0.02	0.27	
U310	0.9	0.35	istotne	2025	-0.16	0.27	
2000	0.1	0.34		2026	-0.25	0.27	
U3015	-1.12	0.39	istotne	2027	-0.17	0.26	
3017	1.12	0.37	istotne	2040	-0.72	0.25	
U4000	4.72	0.52	istotne	4031	0.05	0.31	
U5000	6.39	0.49	istotne	4041	0.03	0.3	
U5201	-3.77	0.46	istotne	4042	-0.22	0.29	
U6000	8.73	0.47	istotne	4061	0.24	0.27	
				4062	0.05	0.28	
				4321	-0.3	0.24	
				5120	-0.31	0.35	
				5320	-0.07	0.26	
				R 131	0.33	0.36	

4. Dyskusja i wnioski

1. Sieć pomiarowo-kontrolna do wyznaczania przemieszczeń zapory Klimkówka jest w dobrym stanie technicznym i zapewnia prawidłowy pomiar bezwzględnych przemieszczeń pionowych oraz poziomych.
2. Pomiary przemieszczeń w roku 2015 wykazały znikome wartości przemieszczeń pionowych reperów kontrolowanych na korpusie zapory w odniesieniu do roku poprzedniego. Repery

w koronie zapory uległy osiadaniu o wartości do 1.2 mm, repery na skarpie odpowietrznej również osiadły o wartości do 0.7 mm. Wartości tych przemieszczeń mieściły się praktycznie w granicach podwójnego średniego błędu wyznaczenia.

3. Wyznaczone przemieszczenia korpusu zapory zachodziły równomiernie, a ich wartość była zróżnicowana zgodnie z wysokością położenia punktów kontrolowanych. Przebieg osiadań oceniono jako bezpieczny.

4. Stateczność elementów konstrukcji betonowych urządzeń przelewowych oraz galerii kontrolno-zastrzykowej i energetycznej zapory Klimkówka nie budził zastrzeżeń. Jakość betonów konstrukcyjnych elementów zapory była w stanie dobrym.

5. System ASTKZ generuje bardzo dużą ilość danych, które powinny być poddane wstępnej analizie i obróbce polegającej na: sygnalizacji awarii poszczególnych czujników, filtracji danych i graficznej wizualizacji wyników (w stosunku do wielkości spodziewanych). Brakuje niestety takiego oprogramowania.

6. Zapora może być eksploatowana zgodnie z „Instrukcją eksploatacji i utrzymania” oraz „Instrukcją gospodarowania wodą”, przy prowadzeniu bieżących obserwacji wskazań urządzeń kontrolno-pomiarowych oraz systematycznych oględzinach zapory.

5. Literatura

Bryś H (1996) *Geodezyjne pomiary odkształceń i przemieszczeń zapór wodnych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Kledyński Z (2011a) *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych. cz. 1*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr a: 54–61.

Kledyński Z (2011b) *Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych. cz. 2*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 2: 36–38.

Lach S (2017) Wykrywanie oraz eliminacja błędów grubych w pomiarach piezometrycznych dla zapory Koronowo w latach 2010–2015. Monografie. Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce: nauki techniczne i inżynieryjne, Cz. 5 / red. nauk. Jędrzej Nyckowiak, Bogdan H. Chojnicki, Poznań.

Lach S, Opyrchal L (2017). Using the modified scalar product approach for testing the direction of seepage through the earth-fill dam in Pieczyska. *Journal of Water and Land Development*. No. 33 p. 89-98. DOI: 10.1515/jwld-2017-0023.

Lazzarini T (1977) *Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia*. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.

Materiały udostępnione przez RZGW w Krakowie.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2007 nr 86 poz. 579).

Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414 z późn. zmianami).

Ustawa Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r. (Dz.U. 2001 nr 115 poz. 1229 z późn. zmianami).

11. Basen to nie tylko niecka z wodą - cz. 1. Wymagania stawiane wodzie basenowej

The swimming pool is not just a basin with water - part 1. Requirements for swimming pool water

Lempart Anna, Kudlek Edyta, Dudziak Mariusz

Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, Gliwice

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mariusz Dudziak, prof. w Pol. Śl.

Lempart Anna: anna.lempart@polsl.pl

Słowa kluczowe: instalacje wody basenowej, filtracja, dezynfekcja, chlor związany

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wymagania, jakie stawiane są wodzie basenowej zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. (Dz.U. 2015 poz. 2016), omówiono problemy eksploatacyjne obiektów basenowych, wyjaśniono, co oznacza "chlor związany" i dlaczego może mieć wpływ na zdrowie użytkowników basenów. Wyjaśniono z czego wynika specyficzny zapach w halach basenowych oraz jakie czynniki odpowiadają za podrażnienie błony śluzowej oczu oraz zaczerwienienia i suchość skóry po wyjściu z basenu.

Abstract:

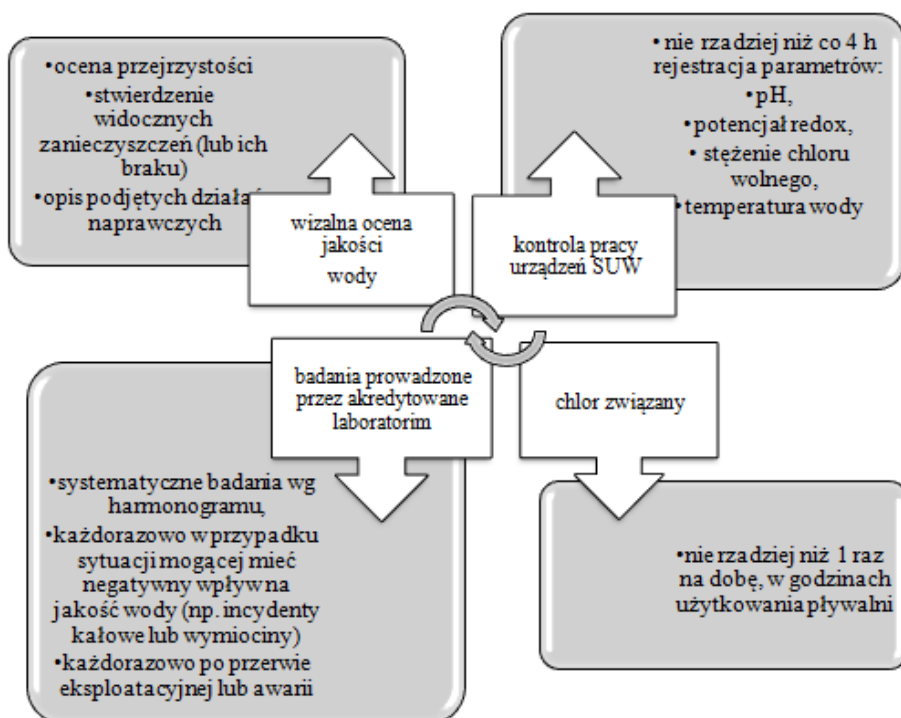
This paper presents the requirements for swimming pool water in accordance with the Regulation of the Polish Minister of Health of 9 November 2015 (Journal of Polish Laws 2015 item 2016). The operational problems of swimming pool facilities are also discussed and it is clarified what means "chlorine bound" and why this can affect the health of swimmers. It is explained why the specific smell in pool halls arises and what is responsible for the irritation of the mucous membrane of the eyes, pinching, redness and the dryness of the skin after leaving the pool.

1. Wstęp

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Dz. U. 2015 r. poz. 2016) określa zarówno wymagania mikrobiologiczne i fizykochemiczne stawiane wodzie dopływającej do niecek basenowych i wodzie w różnych nieckach, jak i częstotliwość pobierania próbek wody w pływalniach, metodyki referencyjne ich analiz oraz sposób oceny, czy woda w basenach spełnia te wymagania. Wraz z wejściem w życie tego rozporządzenia, to zarządcy pływalni zostali zobowiązani do dokonywania oceny jakości wody basenowej oraz oceny spełniania wymagań stawianych przez rozporządzenie. Państwowy inspektor sanitarny powinien wykonywać od tej pory jedynie zbiorczą roczną ocenę jakości wody basenowej.

Zgodnie z załącznikami do wspomnianego rozporządzenia (Dz. U. 2015 r. poz. 2016), obowiązkowej kontroli powinna być poddawana woda doprowadzana do niecki basenowej, woda w nieckach basenowych, woda w brodziku do płukania stóp oraz woda z instalacji ciepłej wody użytkowej. Wymagania zróżnicowano: nieco inne stawiane są wodzie w nieckach basenowych wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny niż w nieckach pozbawionych tych urządzeń. Jeszcze inne warunki powinny panować w nieckach basenowych udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3. Zarządca obiektu powinien dokonywać oceny jakości wody według harmonogramu ustalonego z właściwym inspektorem sanitarnym. Na taką ocenę składa się kilka elementów: wizualna ocena jakości, kontrola pracy urządzeń stacji uzdatniania wody oraz badania prowadzone przez akredytowane laboratorium, uwzględniające nieobjęty wcześniej obligatoryjną kontrolą parametr, tj. chlor związany (Rys. 1). Chlor związany to wskaźnik informujący o obecności ubocznych produktów dezynfekcji związkami chloru w wodzie basenowej.

Jego codzienny pomiar stał się „zmorą” dla zarządców pływalni. W wielu obiektach występują poważne problemy z utrzymaniem jego stężenia poniżej wartości dopuszczalnej.



Rys. 1. Elementy oceny jakości wody w niecce basenowej oraz częstotliwość wykonania poszczególnych czynności i badań (Lempart 2016).

2. Przegląd wymagań stawianych wodzie basenowej

W środowisku wody basenowej potencjalnie występować mogą różnorodne mikroorganizmy i drobnoustroje chorobotwórcze wprowadzane do basenów różnymi drogami. Największe zagrożenie dla zdrowia stanowi skażenie wody fekaliami wprowadzanymi albo przez osoby korzystające z kąpielni, albo (zwłaszcza w przypadku basenów odkrytych) przez bytujące w okolicy zwierzęta, np. ptaki. Potencjalnym źródłem występowania organizmów patogennych w wodzie basenowej są także niefekalne wydzieliny ludzkiego ciała, np. wymiociny, śluz lub ślina.

Aby woda w basenach publicznych nie stanowiła zagrożenia dla zdrowia użytkowników, powinna być pozbawiona obecności jakichkolwiek organizmów chorobotwórczych. W Polsce, wymagania w tym zakresie określa Załącznik nr 1 do Rozporządzenia (Dz. U. 2015 r. poz. 2016). Wydano także zalecenia Głównego Inspektoratu Sanitarnego opracowane na podstawie wytycznych Światowej Organizacji Zdrowia oraz zalecenia Zakładu Higieny Komunalnej NIZP-PZH dla jakości wody w basenach przeznaczonych dla niemowląt i dzieci w wieku od 6 miesięcy do lat 3 (WHO 2006, GIS 2014, NIZP 2012). W tabeli 1 zestawiono wymagania mikrobiologiczne stawiane wodzie basenowej. Wyniki badań mikrobiologicznych stanowią podstawę oceny przydatności wody do celów kąpielowych oraz weryfikację skuteczności prowadzonych procesów uzdatniania i dezynfekcji wody.

Zawsze w przypadku wykrycia skażenia mikrobiologicznego wody, w celu jego potwierdzenia i wyeliminowania, badanie powinno być powtórzone. Należy ponadto sprawdzić stężenie środka dezynfekującego, wartość pH i potencjał redoks oraz natychmiast wprowadzić działania naprawcze, jeżeli przynajmniej jeden z parametrów odbiega od zalecanego.

Tab. 1. Wymagania mikrobiologiczne, jakie powinna spełniać woda na pływalniach wg Rozporządzenia Ministra Zdrowia z 2015r. (Dz.U. 2015 r. poz. 2016) zaleceń GIS opracowanych na podstawie wytycznych WHO oraz zaleceń Zakładu Higieny Komunalnej NIZP-PZH (oprac. Lempart 2016).

Parametr	Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemu cyrkulacji		Woda w niecce basenowej		Woda w nieckach wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny		Woda w nieckach udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i dzieci do lat 3			Woda w natryskach
	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)	Zalecenia GIS	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)	Zalecenia GIS	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)	Zalecenia GIS	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)	Zalecenia GIS	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)	Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)
<i>Escherichia coli</i>	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml	-
Ogólna liczba mikroorganizmów w 36°C przez 48h	20/1ml	20/1ml	100/1ml	100/1ml	100/1ml	100/1ml	100/1ml	100/1ml	jak dla basenów kąpielowych dla innych użytkowników	-
Gronkowce koagulazododatnie	-	-	-	-	-	-	0/100ml	0/100ml		-
<i>Legionella</i> sp.	0/100ml	0/100ml	0/100ml dla t ≥ 30°C	0/100ml dla t ≥ 30°C	0/100ml	0/100ml	0/100ml	0/100ml		<100/100ml

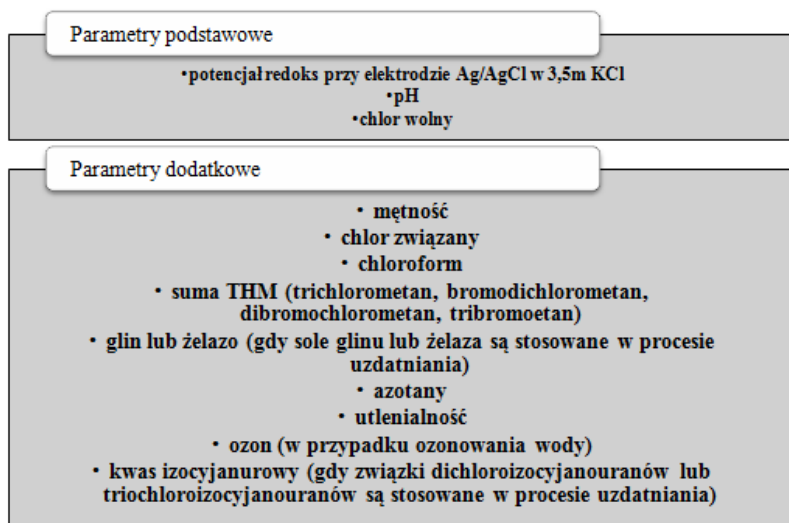
Odpowiednia dezynfekcja wody, czyli proces niszczenia i dezaktywacji wszelkich, patogenów jest w pływalniach prowadzony za pomocą środków chemicznych oraz metod fizycznych. W tym zakresie najczęściej stosowane są związki chloru (podchloryn sodu lub podchloryn wapnia), ozon oraz promieniowanie ultrafioletowe. Coraz większą popularnością cieszy się także stosowanie generatorów pola elektromagnetycznego i fal dźwiękowych w celu poprawy biologicznej jakości wody (Piechurski 2009). W wyniku tego procesu, do wody basenowej wprowadzane są chemikalia, głównie związki chloru, które w efekcie reakcji z materią organiczną występującą w wodzie naturalnie lub wprowadzoną z zewnątrz, mogą prowadzić do powstawania szkodliwych dla zdrowia ubocznych produktów dezynfekcji (DBP). Zewnętrznymi źródłami takiej materii organicznej są m.in. użytkownicy tych obiektów, którzy wprowadzają do wody organiczne składniki kosmetyczne, filtry przeciwsłoneczne oraz wydzieliny ludzkiego ciała, tj. pot, mocz, kał, śluz, czy cząsteczki skóry. Składają się one głównie ze związków azotu, tj. mocznik, amoniak, aminokwasy i kreatynina.

Występowanie zanieczyszczeń chemicznych w wodzie basenowej jest ograniczone przez wymagania fizykochemiczne, jakie powinna spełniać woda w pływalniach, określone w załączniku nr 2 do Rozporządzenia (Dz.U. 2015 r. poz. 2016). Parametry fizykochemiczne zostały podzielone na podstawowe oraz dodatkowe (Rys. 2). Należy zwrócić uwagę, iż wymagania dotyczące dodatkowych parametrów fizykochemicznych (opisanych w załączniku 2B), powinny być traktowane jako pomocnicze. Decydujące przy ocenie jakości wody basenowej oraz określeniu jej przydatności do kąpieli są wyniki badań mikrobiologicznych oraz parametrów podstawowych (opisanych w załączniku 2A).

Podobnie jak dla wymagań mikrobiologicznych, w przypadku parametrów fizykochemicznych określono ich wartości dopuszczalne w wodzie wprowadzanej do niecki basenowej z systemu cyrkulacji, w niecce basenowej, w nieckach wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny, w nieckach basenowych udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i małych dzieci do lat 3 oraz w brodziku do płukania stóp. Ponadto, wymagania rozdzielono dla wody słodkiej i wody słonej. Zróżnicowano także dopuszczalne wartości niektórych parametrów w zależności od pH wody. W tabeli 2 zestawiono wymagania fizykochemiczne stawiane wodzie basenowej.

Szczególnie problematyczne jest wymaganie stawiane przez Rozporządzenie (Dz.U. 2015 r. poz. 2016) granicznej zawartości chloru związanego. Niezależnie od rodzaju i wyposażenia niecki, zawartość ta nie powinna przekraczać 0,3mgCl₂/dm³. Parametr określany jako "chlor związany" określa stężenie w wodzie basenowej produktów ubocznych reakcji oksydacyjnej chloru. Są nimi m.in. mono-, di- oraz trichloraminy (Wyczarska-Kokot 2015) powstające w wyniku wiązania chloru z amoniakiem oraz trichlorometan jako efekt reakcji chloru z metanem. Przekroczenie

dopuszczalnego stężenia tych związków może powodować zmiany parametrów organoleptycznych wody - pojawia się charakterystyczny, nieprzyjemny zapach (Wyczarska-Kokot 2015). Powstające w wodzie basenowej produkty uboczne dezynfekcji w trakcie kąpieli są wdychane, wchłaniane przez skórę lub połykane podczas przypadkowego zachłyśnięcia. Chloraminy mogą powodować podrażnienie błony śluzowej oczu i dróg oddechowych użytkowników, zmiany skórne i astmę. Związki te są odpowiedzialne za „szczypanie” i zaczerwienienia skóry u pływaków, a także suchość skóry po wyjściu z basenu. Trihalometan natomiast jest związkiem mutagennym oraz może powodować zmiany rakowe. Niekorzystne skutki zdrowotne związane z ekspozycją na uboczne produkty dezynfekcji, takie jak astma lub rak pęcherza udokumentowano w badaniach epidemiologicznych u ludzi (Zwiener i in. 2007; Li i in. 2015).



Rys 2. Parametry fizykochemiczne, których dopuszczalne stężenie określa Rozporządzenie (Dz. U. 2015 r. poz. 2016; oprac. Lempart 2016).

Tab. 2. Wymagania fizykochemiczne stawiane wodzie basenowej wg Rozporządzenia Ministra Zdrowia z 2015r. (Dz. U. 2015 r. poz. 2016; oprac. Lempart 2016).

Parametr		Jednostka	Woda wprowadzona do niecki basenowej z systemu cyrkulacji	Woda w niecce basenowej	Woda w nieckach wyposażonych w urządzenia wytwarzające aerozol wodno-powietrzny	Woda w nieckach udostępnianych do nauki pływania dla niemowląt i dzieci do lat 3	Woda w brodziku do płukania stóp
Potencjał redoks	woda słodka 6,5SpH57,3 7,3SpH57,6	mV	-	min. 750 min. 770	min. 750 min. 770	min. 750 min. 770	-
	woda słodka 6,5SpH57,3 7,3SpH57,8			min. 700 min. 720	min. 700 min. 720	min. 700 min. 720	
pH	woda słodka woda słona	-	6,5-7,6 6,5-7,8	6,5-7,6 6,5-7,8	6,5-7,6 6,5-7,8	6,5-7,6 6,5-7,8	-
Chlor wolny	mgCl ₂ /dm ³		-	0,3-0,6	0,7-1,0	0,3-0,4	1,0-2,0
Mętność	NTU		max 0,3	max 0,5	max 0,5	max 0,5	-
Chlor związany	mgCl ₂ /dm ³		max 0,2	max 0,3	max 0,3	max 0,3	-
Chloroform	mg/dm ³		max 0,03	max 0,03	max 0,03	max 0,02	-
ΣTHM	mg/dm ³		max 0,1	max 0,1	max 0,1	max 0,1	-
Glin	mgAl/dm ³		-	max 0,2	max 0,2	max 0,2	-
Żelazo	mg Fe/dm ³		-	max 0,2	max 0,2	max 0,2	-
Azotany	mgNO ₃ /dm ³		max 20	max 20	max 20	max 20	-
Ozon	mgO ₃ /dm ³		max 0,05	-	-	-	-
Kwas izocyjanurowy	mg/dm ³		-	max 100	max 100	-	-
Utlenialność	mgO ₂ /dm ³		-	max 4	max 4	max 4	-

Rodzaj powstających produktów ubocznych dezynfekcji zależy od zastosowanego dezynfekanta. Podczas ozonowania wody, w wyniku utleniania jonów bromkowych, mogą powstawać bromiany, które zostały zakwalifikowane przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) do potencjalnych kancerogenów (tzw. grupa 2B).

3. Nowe grupy mikrozanieczyszczeń współcześnie identyfikowanych w wodzie basenowej

Najnowsze doniesienia literaturowe (Lambropoulou i in. 2002; Giokas i in. 2004; Cuderman i Heath 2007; Vidal i in. 2010; Corbel i in. 2012; Weng i in. 2014; Li i in. 2015; Teo i in. 2016; Ekowati i in. 2016; Suppes i in. 2017; Lempart i in. 2017) alarmują o występowaniu w wodzie basenowej antropogenicznych mikrozanieczyszczeń organicznych. Prowadzone na całym świecie badania wykazały obecność w wodzie basenowej wielu farmaceutyków (m. in. niesteroidowych substancji przeciwzapalnych, stymulantów, środków psychotropowych, antybiotyków, β -blokerów), składników kosmetyków o zdolności absorbowania promieniowania UV (m.in.. BP-3, 4MBC, OD-PABA, OMC, BMDBM, IM, PBS), fosforoorganicznych środków zmniejszających palność (TNBP, TCEP, TCIPP, TDCIPP, TPHP), środków odstrasżających owady (DEET) oraz parabenów (MeP, EtP, PrP, BuP, HeP, BzP, OcP, PHBA) stosowanych jako środki konserwujące w kosmetykach, lekach i żywności, a także jako substancje aktywne w produktach przeciwpotowych i przeciwlupieżowych.

W Polsce, w wodzie basenowej związki te nie są normowane (Dz.U. 2015 r. poz. 2016). Niestety, podobnie jest na całym świecie - ani niemiecka norma DIN 19643, która przez wiele lat stanowiła wyznacznik wymagań stawianych wodzie basenowej oraz pretendowała do zostania normą obowiązującą w całej Unii Europejskiej, ani wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia (WHO 2006) nie zwracają uwagi na występowanie w basenach mikrozanieczyszczeń organicznych pochodzenia antropogenicznego, często określanych w literaturze anglojęzycznej jako tzw. EOC, z ang. *Emerging Organic Contaminant*. Tymczasem, większość mikrozanieczyszczeń organicznych z tej grupy jest aktywna metabolicznie nawet w bardzo niewielkich stężeniach. Niektóre zawierają bioaktywne związki chemiczne, wykazujące właściwości modyfikacji procesów fizjologicznych organizmów żywych. Dla przykładu, środek zmniejszający palność TCEP u zwierząt laboratoryjnych powodował nowotwory oraz zaburzenia płodności i rozwoju (Corbel i in. 2009), a środek odstrasżający owady DEET jest uważany za toksycznie działający na układ nerwowy człowieka. Jest on szczególnie groźny w połączeniu z innymi chemikaliami (Bruchajzer i in. 2007), a takie właśnie połączenie wielu różnych substancji chemicznych występuje w nieckach basenowych.

Podziękowanie:

Pracę sfinansowano ze środków na badania kierunkowe młodych naukowców nr BKM / 554 / RIE-4/2017 przyznane dla Instytutu Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej

4. Literatura

- Bruchajzer E, Frydrych B, Szymańska JA (2007) Organophosphorus flame retardants – Toxicity and influence on human health. *Medycyna Pracy* 66: 235-264.
- Corbel V, Stankiewicz M, Pennetier C, Fournier D, Stojan J, Girard E, Dimitrov M, Molgó J, Hougard JM, Lapid B (2012) Evidence for inhibition of cholinesterases in insect and mammalian nervous systems by the insect repellent DEET. *BMC Biol.* 5:7-47
- Cuderman P, Heath E (2007) Determination of UV filters and antimicrobial agents in environmental water samples. *Anal Bioanal. Chem.* 387: 1343–1350.
- DIN 19643 Uzdatnianie wody w basenach kąpielowych i na pływalniach
- Ekowati Y, Buttiglieri G, Ferrero G, Valle-Sistac J, Diaz-Cruz MS, Barceló D, Petrovic M, Villagrasa M, Kennedy MD, Rodríguez-Roda I (2016) Occurrence of pharmaceuticals and UV filters in swimming pools and spas. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int* 23: 14431-14441.
- Giokas DL, Sakkas VA, Albanis TA (2004) Determination of residues of UV filters in natural waters by solid-phase extraction coupled to liquid chromatography–photodiode array detection and gas chromatography–mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* 1026: 289–293.

- Lambropoulou DA, Giokas DL, Sakkas VA, Albanis TA, Karayannis MI (2002) Gas chromatographic determination of 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone and octyldimethyl-p-aminobenzoic acid sunscreen agents in swimming pool and bathing waters by solidphase microextraction. *J. Chromatogr. A* 967: 243–253.
- Li JH, Wang ZH, Zhu XJ, Deng ZH, Cai CX, Qiu LQ, Chen W, Lin YJ (2015) Health Effects from Swimming Training in Chlorinated Pools and the Corresponding Metabolic Stress Pathways. *PLoS ONE* 2015: 1-14.
- Li W, Shi Y, Gao L, Liu J, Cai JY (2015) Occurrence and human exposure of parabens and their chlorinated derivatives in swimming pools. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22: 17987–17997.
- Lempart A (2016) Analiza jakościowego i ilościowego bilansu wody i ścieków dla obiektu basenowego. Praca magisterska. Promotor: dr in. Joanna Wyczarska-Kokot. Politechnika Śląska. Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki. Gliwice.
- Lempart A, Kudlek E, Dudziak M (2017) The occurrence of micropollutants from PPCPs macro group in swimming pool water, Central European Conference ECOpole'17. Abstracts.
- Państwowa Inspekcja Sanitarna (2014) Wytyczne Głównego Inspektoratu Sanitarnego w sprawie wymagań jakości wody oraz warunków sanitarno-higienicznych na pływalniach.
- Piechurski F. (2009) Ocena metod wspomagania dezynfekcji wody basenowej cz. 1. Pływalnie i baseny 3: 76-85.
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Dz. U. 2015 r. poz. 2016).
- Suppes LM., Huang CH, Lee WN, Brockman KJ (2017) Sources of pharmaceuticals and personal care products in swimming pools. *Journal of Water and Health* 15: 829-833.
- Teo TL, Coleman HM, Khan SJ (2016) Occurrence and daily variability of pharmaceuticals and personal care products in swimming pools. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23: 6972-6981.
- Vidal L, Chisvert A, Canals A, Salvador A (2010) Ionic liquid-based single-drop microextraction followed by liquid chromatographyultraviolet spectrophotometry detection to determine typical UV filters in surface water samples. *Talanta* 81: 549–555.
- Weng SC, Sun P, Ben W, Huang CH, Lee LT, Blatchely E R (2014) The Presence of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Swimming Pools, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 12: 495–498.
- Wyczarska-Kokot J (2015) Comparison of chloramine concentration in swimming pool water depending on swimming pool intended use. *Ecol. Chem. Eng. A* 22(1): 27-37.
- Zalecenia ZHK NIZP-PZH dotyczące wymagań sanitarno-higienicznych dla obiektów basenowych i jakości wody w basenach przeznaczonych dla niemowląt i dzieci w wieku od 6 miesięcy do 3 lat. 2012.
- Zwiener C, Richardson SD, De Marini DM, Grummt T, Glauner T, Frimmel FH (2007) Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water. *Environ. Sci. Technol.* 41: 363–372.

12. Basen to nie tylko niecka z wodą - cz. 2. Instalacje oczyszczania wody basenowej.

Swimming pool is not just a basin with water - part 2. Pool water treatment installations.

Lempart Anna, Kudlek Edyta, Dudziak Mariusz

Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, Gliwice

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Mariusz Dudziak, prof. w Pol. Śl.

Lempart Anna: anna.lempart@polsl.pl

Słowa kluczowe: instalacje wody basenowej, filtracja, dezynfekcja, chlor związany

Streszczenie

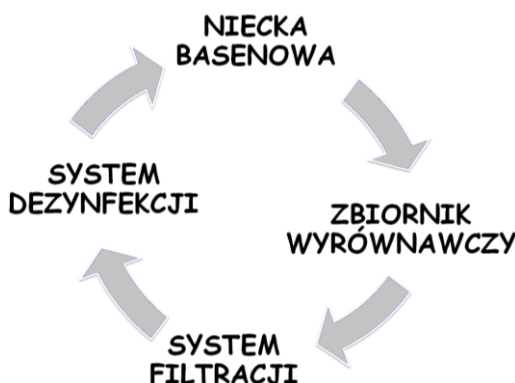
Podczas użytkowania basenów, w sposób ciągły są do nich wprowadzane różne zanieczyszczenia pochodzące zarówno od osób kąpiących się, jak i z otoczenia. W wodzie basenowej obecne mogą być m.in. amoniak, mocznik, aminokwasy, resztki jedzenia lub kosmetyków, środki ochrony roślin, składniki preparatów owadobójczych, kurz, wydzieliny ludzkiego ciała, włosy, a także mikroorganizmy i drobnoustroje. Zanieczyszczenia te są usuwane z wody basenowej dzięki zapewnieniu stałego przepływu wody przez instalacje oczyszczania, które na co dzień są ukryte przed oczyma pływających. W niniejszej pracy przedstawiono urządzenia, które stanowią podstawę właściwej eksploatacji basenu oraz wytłumaczono, na czym polegają wykorzystywane w nich procesy.

1. Wstęp

Współczesne baseny to skomplikowane i zaawansowane technologicznie obiekty, których podstawowym zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa i komfortu użytkowników. Zużywają jednak bardzo dużo wody, ciepła i energii. Obniżenie kosztów ich utrzymania umożliwia praca instalacji basenowych w systemach obiegu zamkniętego z czynnym przelewem (rys. 1). Prawidłowa eksploatacja tych instalacji umożliwia przedłużenie czasu całkowitej wymiany wody w nieckach basenów pływackich nawet do 1 roku. Czystość biologiczną wody w basenie, pomimo tak rzadkiej wymiany, gwarantują nowoczesne systemy pracujące w oparciu o podstawowe procesy jednostkowe, tj. koagulacja, filtracja i dezynfekcja. Zapewnienie stałego przepływu wody basenowej przez instalacje oczyszczania pozwala na usunięcie wprowadzanych do niej zanieczyszczeń, mikroorganizmów i drobnoustrojów chorobotwórczych. Cała objętość wody znajdująca się w basenie powinna przepłynąć przez system oczyszczania co najmniej 3-4 razy w ciągu doby.

2. Zasada pracy instalacji basenowej

Świeżo oczyszczona i zdezynfekowana woda doprowadzana jest do niecki basenowej systemem dysz lub kanałów zlokalizowanych w dolnej części ścian lub dnie. Stały dopływ wody w strefie przydennej powoduje wypieranie wody z części przypowierzchniowej, która jest zbierana przez rynny przelewowe, a z nich, poprzez układ kanałów odpływowych, odprowadzana do zbiornika wyrównawczego. Stamtąd, pompy cyrkulacyjne tłoczą wodę do instalacji oczyszczania, na którą składają się systemy filtracji i dezynfekcji. Świeżo oczyszczona woda, spełniająca wymagania stawiane jej przez Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dn. 9.11.2015 (Dz. U nr 2015, poz. 2016) oraz zalecenia Głównego Inspektora Sanitarnego (GIS 2014) i Zakładu Higieny Komunalnej (NIZP-PZH 2012), wraca do niecki basenowej systemem dysz lub kanałów.



Rys. 1. Uproszczony schemat obiegu wody basenowej.

3. Rola zbiornika wyrównawczego

Zbiorniki wyrównawcze zlokalizowane są poniżej lustra wody, zazwyczaj w pomieszczeniach tzw. podbasenia, najczęściej bezpośrednio pod niecką basenową (jeśli to możliwe). Mogą być wykonane z termoplastycznych tworzyw sztucznych PP lub PEHD, jako zbiorniki żelbetowe z wykładziną z płytek ceramicznych lub z folii PVC, z duroplastów żywic z włóknem szklanym, ze stali kwasoodpornej lub ze stali z wykładziną wewnętrzną. Powinny być zamknięte lub przykryte np. lekkim przekryciem w postaci płyt poliwęglanowych i wentylowane grawitacyjnie. Ponadto wymagane jest zapewnienie swobodnego zwierciadła wody w zbiorniku oraz wyposażenie go w przelew bezpieczeństwa oraz spust umożliwiający całkowite opróżnienie (Piechurski 2011).

Zadaniem zbiornika wyrównawczego jest przyjęcie wody przelewowej spływającej grawitacyjnie z basenu kanałami przelewowymi. Ponadto, zbiornik przyjmuje (poprzez przerwę powietrzną, która spełnia rolę zabezpieczenia antyskażeniowego) świeżą wodę wodociągową pokrywającą ubytki eksploatacyjne (Sokołowski 1998). Woda gromadzona w zbiorniku jest także wykorzystywana do płukania źródeł filtracyjnych.

Według normy DIN19643 na objętość użytkową zbiornika składają się:

- objętość wody wypieranej przez kąpiących,
- zapas wody do płukania,
- objętość wody przelewowej.

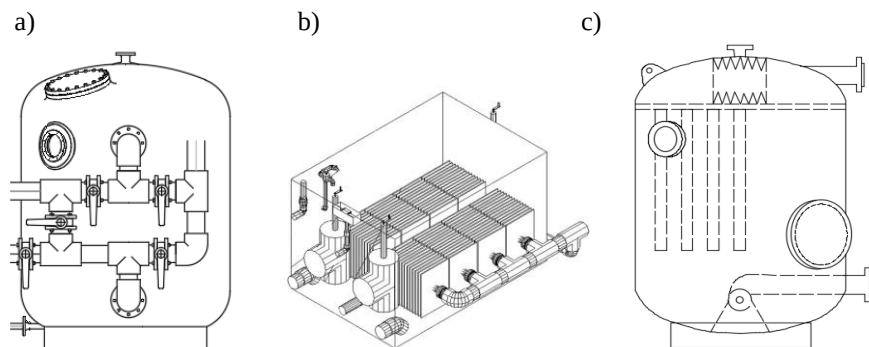
Woda ze zbiornika przelewowego, za pomocą pomp obiegowych, tłoczona jest do filtrów. Bardzo ważnym elementem obiegu wody basenowej są filtry wstępne, znane również jako prefiltry lub filtry siatkowe. Zlokalizowane powinny być tuż za zbiornikiem przelewowym, a przed pompami obiegowymi, zapewniającymi stały przepływ wody w instalacji basenowej. Mogą być one zespolone z pompą lub stanowić oddzielny zbiornik (Piechurski 2008). Filtry wstępne zabezpieczają urządzenia instalacji oczyszczania wody basenowej przed uszkodzeniem. Wyłapują bowiem zanieczyszczenia włókniste takie jak włosy, czy też guziki, biżuterię oraz części garderoby.

4. Systemy filtracji wody basenowej

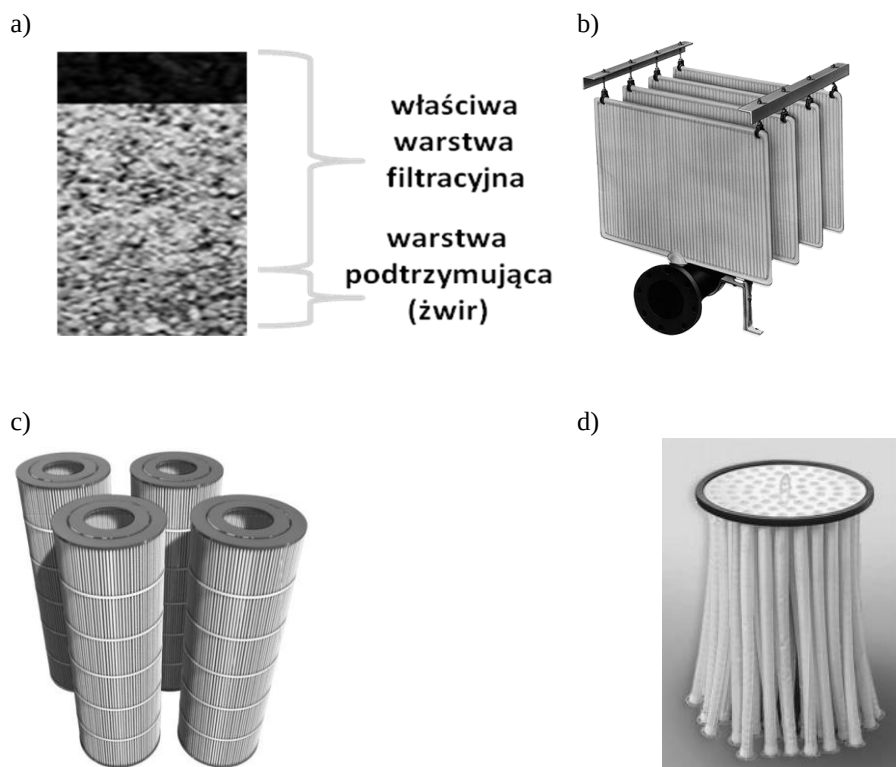
Głównym elementem systemu oczyszczania wody basenowej są filtry. Przepływ wody przez złoża stanowiące ich wypełnienie pozwala na zatrzymywanie zanieczyszczeń w wyniku procesów mechanicznych. W trakcie filtracji, z wody basenowej usuwane są więc wszelkie zawiesiny i ciała stałe (Piechurski 2008).

Ze względu na konstrukcję filtra oraz panujące w nim warunki przepływu wody, wyróżnić można filtry ciśnieniowe (rys. 2a), podciśnieniowe otwarte (rys. 2b) lub zamknięte (rys. 2c). Wypełnienie filtra stanowić może złoże warstwowe (rys 3a) lub tkanina filtracyjna z namywanym

materiałem filtracyjnym w postaci wkładów filtracyjnych modułowych (rys. 3b), świecowych (rys. 3c) lub samooczyszczających się sprężyn (rys. 3d).



Rys. 2. Rodzaje filtrów stosowanych w technologii wody basenowej a) filtry ciśnieniowe b) filtry podciśnieniowe otwarte c) filtry podciśnieniowe zamknięte (opracowanie własne na podstawie materiałów reklamowych firm: COM-PAC oraz TECHNOL).



Rys. 3. Rodzaje złożów filtracyjnych stanowiących wypełnienie filtra basenowego a) złożo warstwowe b) modułowe wkłady filtracyjne c) świece filtracyjne d) samooczyszczające się wkłady sprężynujące (źródło: katalogi techniczne oraz materiały reklamowe firm: Pleatco, Mer-Made, Culligan).

Jako materiał filtracyjny stanowiący złożo warstwowe w filtrach basenowych najczęściej stosowane są: piasek kwarcowy, żwir, węgiel aktywny, szkliwo wulkaniczne (perlit), zeolit, ziemia krzemkowa (diatomit) lub szkło filtracyjne (kruszone albo aktywowane). Natomiast na tkaninę

stanowiąca wypełnienie filtrów podciśnieniowych namywane mogą być włókna celulozy, ziemia krzemkowa, perlit lub włókna szklane.

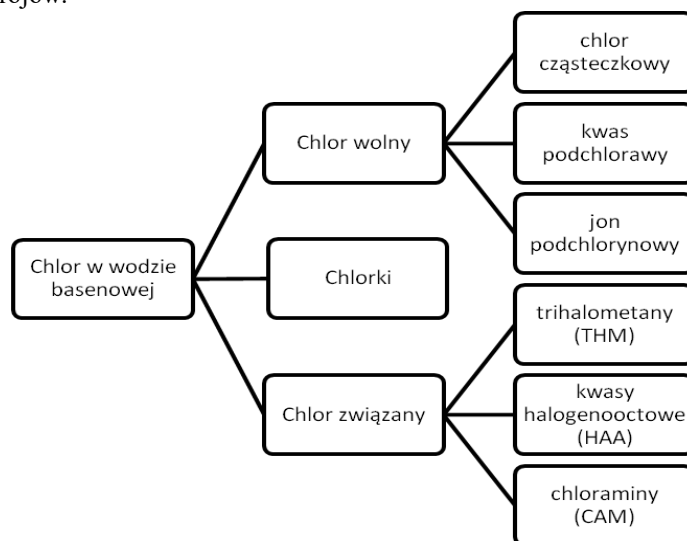
W celu zwiększenia efektywności filtracji do instalacji wody basenowej dozowane są koagulanty. Ich zadaniem jest wspomóc usuwanie z wody zanieczyszczeń, których rozmiary są zbyt małe do zatrzymania w procesie filtracji, tj. substancji rozpuszczonych, koloidalnych oraz bardzo drobnej zawiesiny. Najczęściej stosowane są koagulanty w postaci roztworu siarczanu glinu, siarczanu sodu, siarczanu żelaza, hexahydratu chlorku glinu, hexahydratu chlorku żelaza, chlorku wodorotlenku glinu lub siarczanu chlorku wodorotlenku glinu (Piechurski 2008). Koagulant powinien być dozowany przed filtrem, w sposób ciągły do przepływającej wody obiegowej za pomocą pompki membranowej.

5. Systemy dezynfekcji wody basenowej

Aby woda w basenie nie stanowiła zagrożenia dla zdrowia użytkowników, musi spełniać szereg wymagań mikrobiologicznych i fizykochemicznych określonych w załącznikach do Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dn. 9.11.2015 w sprawie wymagań jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Dz. U nr 2015, poz. 2016). Dezaktywację wszelkich organizmów chorobotwórczych zapewnia proces dezynfekcji. Może być on prowadzony poprzez zastosowanie środków chemicznych lub dwustopniowo z wykorzystaniem dodatkowych fizycznych lub chemicznych metod wspomagania.

Najpopularniejszym dezynfektantem jest chlor, który w technologii basenowej stosowany jest jako roztwór podchlorynu sodu lub podchloryn wapnia w formie pastylek. Podchloryn sodu może być dostarczany do obiektu basenowego w postaci gotowego roztworu lub wytwarzany w miejscu dozowania w wyniku procesu elektrolizy membranowej. Rzadziej stosowanymi dezynfektantami są: brom, jod i jony srebra w połączeniu z chlorem (Wyczarska-Kokot 2013). Chlor - jako dezynfektant - pozwala na oczyszczenie wody basenowej ze związków organicznych, które nie zostały wcześniej usunięte podczas procesów koagulacji i filtracji. Jest on "zużywany" w wodzie basenowej na trzy sposoby (rys. 4) (Sokołowski 1998):

- tworząc chlorki, w wyniku reakcji ze związkami nieorganicznymi,
- tworząc w wyniku reakcji z substancjami organicznymi uboczne produkty dezynfekcji DBP (z ang. *Disinfection B -Products*), opisywane w praktyce basenowej również jako tzw. "chlor związany".
- w postaci chloru wolnego odpowiada za zniszczenie wprowadzanych do wody basenowej drobnoustrojów.



Rys. 4. Formy chloru występujące w wodzie basenowej (Lempart 2016).

Powstające w wyniku chlorowania liczne produkty uboczne dezynfekcji mogą powodować chemiczne skażenie wody i powietrza w hali basenowej (WHO 2006). W badaniach epidemiologicznych odnotowano niekorzystne skutki zdrowotne u ludzi związane z ekspozycją na uboczne produkty dezynfekcji, takie jak astma lub rak pęcherza (Li i in. 2015; Zwiener 2007). Z uwagi na wyższy stopień chlorowania oraz zwiększoną zawartość materii organicznej w wodzie basenowej DBP powstają w znacznie większych ilościach niż w wodzie pitnej. Dotychczas zidentyfikowano ponad 600 różnych rodzajów tych związków i wciąż odkrywane są nowe. Przede wszystkim, wśród produktów dezynfekcji wody wyróżnia się trihalometany (THM), kwasy halogenooctowe (HAA) oraz chloraminy (CAM) (Chowdhury i in. 2014; Kanan i Karanfil 2011).

Wśród metod wspomagania dezynfekcji zastosowanie znalazły metody wykorzystujące promieniowanie ultrafioletowe, ozonowanie oraz coraz bardziej popularne generowanie pola elektromagnetycznego i fal dźwiękowych, czy dodatkowe dozowanie silnych utleniaczy. Włączanie tych procesów w układ technologiczny oczyszczania wody basenowej pozwala na stosowanie mniejszych dawek chloru w końcowym etapie jej dezynfekcji oraz zmniejszenie ilości powstających produktów ubocznych dezynfekcji (Wyczarska-Kokot 2013).

Wspomaganie dezynfekcji promieniowaniem ultrafioletowym polega na naświetlaniu wody przepływającej przez lampy o odpowiedniej mocy (Piechurski 2008). Promienie UV wpływają bezpośrednio na komórki organizmów powodując reakcje chemiczną w ich DNA, której efektem jest uszkodzenie materiału genetycznego. W ten sposób z wody usuwane są wszelkie szkodliwe mikroorganizmy. Lampy UV nie zabezpieczają jednak wody przed skażeniem wtórnym. Wykazano również, że zastosowanie lamp UV pozwala na redukcję chloramin, a w efekcie obniżenie zawartości chloru związanego w wodzie basenowej (Wyczarska-Kokot 2009).

Stosowanie ozonu, dzięki jego bardzo silnym właściwościom utleniającym, pozwala zarówno na obniżenie zawartości materii organicznej, jak i utlenianie produktów ubocznych chlorowania. Ponadto, ozon zapewnia dezaktywację wirusów, niszczenie grzybów oraz utlenianie fenoli, detergentów i pestycydów (Piechurski 2009), co jest niemożliwe do osiągnięcia w przypadku dezynfekcji tylko z wykorzystaniem związków chloru. Jednak ze względu na dużą toksyczność ozonu, może być on stosowany jedynie na bardzo krótkim odcinku instalacji basenowej. Nie może przedostawać się do niecki basenowej, gdyż mógłby zagrażać zdrowiu i życiu osób kąpiących się. Po zadawkowaniu ozonu i intensywnym wymieszaniu, należy zapewnić czas kontaktu z wodą ok. 2 minuty, a następnie usunąć wszelkie produkty jego rozkładu przez filtr wypełniony węglem aktywnym. W wodzie nie może pozostać więcej niż 0,05 mg O₃/L (Piechurski 2009; Wyczarska-Kokot 2013). Metoda ozonowania, podobnie jak metoda naświetlania wody promieniami UV, nie chroni wody przed wtórnym skażeniem i musi być powiązana z końcową dezynfekcją związkami chloru.

Systemy generujące pole elektromagnetyczne i fale dźwiękowe w środowisko wody basenowej montowane są na powierzchni zewnętrznej przewodu doprowadzającego wodę basenową do złoża filtracyjnego. W wyniku działania takiego systemu, z cząsteczek wapna obecnego w wodzie uwalniane są wolne elektrony zwiększając możliwość jonizacji wody. Bezpośrednim tego efektem jest wzrost stężenia wolnego chloru bez dodatkowego zużycia środka dezynfekującego, wzrost potencjału redoks, stabilizacja pH wody basenowej oraz skrócenie czasu płukania wstecznego (Mazur 2014). Żaden element tych systemów nie ma fizycznego kontaktu z wodą, dzięki czemu nie dochodzi do elektrolitycznego rozkładu jej części składowych.

Optymalizacja pracy systemu oczyszczania wody basenowej może odbywać się również poprzez dodatkowe stosowanie silnego utleniacza, który nie będzie przyczyniać się do powstawania chloramin, a jednocześnie zniszczy prekursorzy DPB (Dudko i Wyczarska-Kokot 2014). Producenci chemii basenowej proponują stosowanie w tym zakresie opracowanych przez siebie środków chemicznych. Istotą tej metody jest rozszerzenie standardowej technologii oczyszczania wody basenowej o dodatkowy proces oksydacji wody (Wyczarska-Kokot 2013).

6. Podsumowanie

Opisane w pracy nowoczesne technologie stosowane w systemach oczyszczania wody basenowej gwarantują uzyskanie wody w basenach odpowiadającej wymaganiom stawianym jej

przez Rozporządzenie Ministra Zdrowia (Dz. U nr 2015, poz. 2016) oraz zalecenia Głównego Inspektora Sanitarnego (GIS 2014), Zakładu Higieny Komunalnej (NIZP-PZH 2012) i Światowej Organizacji Zdrowia (WHO 2006).

Okazuje się jednak, że stosowane współcześnie klasyczne metody oczyszczania wody basenowej nie są skuteczne w usuwaniu z niej mikrozanieczyszczeń organicznych określanych jako *emerging organic contaminants* (EOC) obejmujących szereg związków chemicznych m.in.: aktywne składniki farmaceutyków i środków kosmetycznych (PPCPs, z ang. Pharmaceuticals and Personal Care Products), surfaktanty, konserwanty, środki zmniejszające palność (FRs, z ang. Flame Retardants), związki zaburzające gospodarkę hormonalną określane jako EDC (z ang. Endocrine Disrupting Compounds), biocydy oraz hormony (Włodarczyk-Makuła 2013). Związki te mogą być wprowadzane do basenów m.in. wraz z produktami metabolizmu człowieka, wydzielinami ludzkiego ciała. Są też wnoszone na skórę i włosach osób kąpiących się. W prowadzonych aktualnie badaniach w Instytucie Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Lempart i in. 2017) wykazano obecność wielu mikrozanieczyszczeń z tej grupy w próbkach wody pobieranych z basenów o różnych funkcjach i różnych rozwiązaniach układu oczyszczania wody basenowej. Wyniki tych badań budzą więc wątpliwość, czy aktualnie stosowane metody oczyszczania wody basenowej zapewniają takie jej właściwości, które nie stanowią zagrożenia dla zdrowia użytkowników. Współczesna technologia basenowa wymaga oceny pod kątem usuwania mikrozanieczyszczeń z wody basenowej. Współobecne w wodzie basenowej substancje różnego typu mogą bowiem współdziałać ze sobą, powodując negatywne skutki zdrowotne. Dlatego badania dotyczące występowania mikrozanieczyszczeń organicznych w środowisku wody basenowej oraz ich przemian zachodzących w instalacjach wydają się być konieczne.

Podziękowania

Praca sfinansowana ze środków na badania kierunkowe młodych naukowców przyznane dla Instytutu Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej nr BKM/554/RIE-4/2017

7. Literatura

- DIN 19643 Uzdatanianie wody w basenach kąpielowych i na pływalniach
- Chowdhury S., Alhooshani K., Karanfil T. (2014) Disinfection by-products in swimming pool: Occurrences, implications and future needs. *Water Res.* 53: 68-109.
- Dudko M., Wyczarska-Kokot J. (2014) Nowe rozwiązania czyli uzdatnianie wody basenowej z dodatkiem dwutlenku chloru, *Pływalnie i Baseny* 16: 100-104.
- Kanan A., Karanfil T. (2011) Formation of disinfection by-products in indoor swimming pool water: the contribution from filling water natural organic matter and swimmer body fluids. *Water Res.* 45: 926-32.
- Lempart A. (2016) Analiza jakościowego i ilościowego bilansu wody i ścieków dla obiektu basenowego, praca magisterska, promotor: dr in. Joanna Wyczarska-Kokot, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Gliwice
- Lempart A., Kudlek E., Dudziak M. (2017) The occurrence of micropollutants from PPCPs macro group in swimming pool water., Central European Conference ECOpole'17, 4-7 October, 2017. Abstracts
- Li J. H., Wang Z. H., Zhu X. J., Deng Z. H., Cai C. X., Qiu L. Q., Chen W., Lin Y. J., (2015) Health Effects from Swimming Training in Chlorinated Pools and the Corresponding Metabolic Stress Pathways, *PLoS ONE*, 10: 1-14
- Mazur D. (2014) Anti Bio - inwestycja, która przynosi oszczędności. *BasenProf. Portal branży basenowej* [www.basenprof.pl ; dostęp on-line dn. 28.12.2017].
- Państwowa Inspekcja Sanitarna (2014) Wytyczne Głównego Inspektoratu Sanitarnego w sprawie wymagań jakości wody oraz warunków sanitarno-higienicznych na pływalniach
- Piechurski F. (2008) Technologie i urządzenia do oczyszczania wody basenowej, *Pływalnie i baseny* 1: 4-10.

- Piechurski F. (2009) Woda na 5+. Ocena metod wspomagania dezynfekcji wody basenowej cz. 1, Pływalnie i baseny 3: 76-85
- Piechurski F. (2011) Jaki system się opłaca ? cz. 2. Warunki projektowania instalacji cyrkulacji wody basenowej. Pływalnie i baseny 8: 98-105
- Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. w sprawie wymagań, jakim powinna odpowiadać woda na pływalniach (Dz. U. 2015 r. poz. 2016)
- Sokołowski Cz. (1998) Wymagania sanitarno-higieniczne dla krytych pływalni MZiOS, Departament Zdrowia Publicznego, PZliTS, Warszawa, nr arch. 760.
- Włodarczyk-Makula M. (2013) Wybrane mikrozanieczyszczenia organiczne w wodach i glebach, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej
- World Health Organization (2006) Guidelines for safe recreational water environments. Volume 2. Swimming pools and similar environments. Geneva.
- Wyczarska-Kokot J. (2009) System dezynfekcji wody basenowej wspomagany naświetlaniem promieniami UV 12/2009.
- Wyczarska-Kokot J. (2013) Nowoczesne i innowacyjne technologie oczyszczania wody basenowej cz. 2, Rynek Instalacyjny 3/2013.
- Wyczarska-Kokot J. (2013) Nowoczesne i innowacyjne technologie oczyszczania wody basenowej cz. 4, Rynek Instalacyjny 5/2013.
- Zalecenia ZHK NIZP-PZH dotyczące wymagań sanitarno-higienicznych dla obiektów basenowych i jakości wody w basenach przeznaczonych dla niemowląt i dzieci w wieku od 6 miesięcy do 3 lat. 2012.
- Zwiener C., Richardson S. D., De Marini D. M., Grummt T., Glauner T., Frimmel F. H. (2007) Drowning in disinfection byproducts? Assessing swimming pool water., Environ. Sci. Technol. 41: 363–372.

13. Metodyka oznaczania zawartości węglowodorów w wodach powierzchniowych

Methodology of determining the hydrocarbon content in surface waters

Oliwia Liberek, Dawid Kajkowski, Tomasz Czyżewski, Renata Fabianowicz, Iza Strzelczak, Zachariasz Chabowski, Patrycja Kalbarczyk, Mateusz Bębenista, Karol Adamski, Ada Stanuszkiewicz, Paweł Grabowski

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska
Opiekun naukowy: dr inż. Paweł Grabowski

Oliwia Liberek: oliwialiberek@gmail.com

Słowa kluczowe: związki ropopochodne, chromatografia, zanieczyszczenie środowiska

Streszczenie

Zwiększenie liczby pojazdów wpływa na ciągły wzrost zużycia paliw kopalnych, które może być przyczyną zanieczyszczenia środowiska. Podczas wydobywania i transportu ropy naftowej oraz eksploatacji jej produktów istnieje ryzyko wycieków, mających miejsce na skutek awarii instalacji przemysłowych, nieszczelności rurociągów czy kolizji drogowych. Uwalniane do środowiska węglowodory ropopochodne są często substancjami szkodliwymi dla organizmu człowieka. Zazwyczaj rozkładają się one w powierzchniowych warstwach gleby, jednak brak obecności odpowiednich bakterii może spowodować, że zostaną przetransportowane dalej przez spływy powierzchniowe i podziemne do pobliskich zbiorników wodnych. Nawet niewielkie stężenia tych związków zmieniają smak oraz zapach wody. Co więcej, substancje ropopochodne mogą akumulować się w rybach powodując bezpośrednie zagrożenie dla człowieka. Dlatego też niezbędnym jest usystematyzowanie metodyki badań, która pozwoli na dokładne oznaczenie związków ropopochodnych w wodach powierzchniowych. W niniejszej pracy zweryfikowano metodykę określoną w normie PN-EN ISO 9377-2 oraz ustalono warunki prowadzenia pomiaru za pomocą chromatografii gazowej. Badaniom poddano próbki wody deszczowej oraz wody powierzchniowej z jezior i rzek znajdujących się na terenie miasta Płocka oraz w jego okolicy. Zróżnicowanie próbek pozwoliło na ustalenie metodyki niezależnej od pochodzenia wody, a dokładne zweryfikowanie poszczególnych etapów procedury umożliwiło poprawne oznaczenie zawartych w nich węglowodorów ropopochodnych.

1. Wstęp

Jednym z bardziej niebezpiecznych zanieczyszczeń, które przedostają się do wód powierzchniowych, czyli do środowiska gruntowo-wodnego są substancje pochodzące z przerobu ropy naftowej. Zgodnie z danymi na 2002 rok w Polsce zużyto około 13 mln ton produktów naftowych, a przewidywane zapotrzebowanie na ropę naftową i jej pochodne w 2010 roku wynosiło około 27 mln ton (Rocznik statystyczny „GUS”, 2003). Blisko 39% zdarzeń mogących stwarzać zagrożenia dla środowiska naturalnego stanowią właśnie różnego rodzaju wycieki produktów naftowych. Źródła występowania tego rodzaju zanieczyszczeń koncentrują się zazwyczaj w pobliżu takich obiektów jak stacje paliw, zakłady przetwórstwa ropy naftowej – rafinerie, rurociągi przemysłowe, bazy magazynowe i przeładunkowe, tereny przemysłowe oraz poprzemysłowe, lotniska i bazy wojskowe, a także torowiska i bocznice kolejowe. Do zanieczyszczeń może dochodzić w trakcie długoletniej eksploatacji nieszczelnych instalacji lub wskutek pojedynczych dużych awarii czy kolizji drogowych bądź kolejowych.

Substancjami ropopochodnymi nazywa się węglowodory, które wchodzi w skład ropy naftowej i mogą różnić się od siebie właściwościami chemicznymi, biologicznymi oraz fizycznymi. Związki te pochodzą głównie z olejów, materiałów pędnych, gazów spalinowych i smarów. Mogą również być uwalniane do środowiska w wyniku kolizji czy przeładunku podczas transportu oraz podczas wydobywania ropy naftowej i eksploatacji jej produktów. Węglowodory te wykazują się właściwościami neurotycznymi, hepatotoksycznymi, teratogennymi oraz kancerogennymi. Są one

dostarczane do środowiska wodnego nieprzerwanie np. podczas spłukiwania ich w trakcie opadu z zanieczyszczonych powierzchni uszczelnionych. Związki ropopochodne rozkładają się w powierzchniowej warstwie gleby, niestety w przypadku braku odpowiednich bakterii mogą parować i przedostawać się także do atmosfery. W postaci opadów są transportowane do jezior i rzek poprzez spływy powierzchniowe i podziemne. Obecność związków ropopochodnych w wodach wpływa na smak oraz zapach wody nawet w bardzo małych stężeniach. Jednym z poważniejszych problemów z tym związanych jest ryzyko akumulacji węglowodorów w rybach żyjących w zanieczyszczonych zbiornikach wodnych. W efekcie substancje ropopochodne mogą wywierać szkodliwy wpływ na zdrowie ludzi spożywających „zatrute” ryby. Ze względu na negatywny wpływ na środowisko należy kontrolować i oznaczać ich obecność w określony sposób. Ważnym jest, aby oznaczenie było odpowiednio wykonane, gdyż wówczas otrzymane wyniki można porównać z oczekiwanymi, co umożliwi stosowną ocenę badań. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska wymaganą metodą oznaczania takich próbek jest chromatografia gazowa, a sposób przygotowania próbek określa norma PN-EN ISO 9377-2: Jakość wody. Oznaczanie indeksu oleju mineralnego. Za pomocą tej metody można określić sumę stężeń związków ropopochodnych, zawartych w wodach powierzchniowych oraz ściekach, o czasie retencji zawartym pomiędzy wymyciem n-dekanu, a n-tetrakontanu.

Celem badań przedstawionych w poniżej pracy było ustalenie warunków pomiaru substancji ropopochodnych w wodzie oraz zweryfikowanie metodyki ich oznaczania.

2. Metodyka badań

2.1 Przygotowanie roztworu ekstrahenta

Najwydajniejszym ekstrahentem związków ropopochodnych z gleb i wód jest eter naftowy. Dodatkowo posiada on krótki czas retencji, co znacząco usprawnia wykonywanie pomiarów za pomocą chromatografii gazowej. W celu przygotowania roztworu ekstrahenta odmierzone 20 cm³ n-dekanu i przelano go do kolby miarowej o pojemności 1 dm³, którą następnie uzupełniono do kreski eterem naftowym. Przygotowany roztwór był wyjściowym roztworem do przygotowania roztworu ekstrakcyjnego. Właściwy roztwór ekstrakcyjny uzyskano przez rozcieńczenie przygotowanego roztworu eterem naftowym w stosunku 1:10. W badaniach wykorzystano również roztwór n-tetrakontanu. Nie dodawano go jednak do roztworu ekstrakcyjnego z uwagi na względnie długi czas retencji i możliwość nie wymycia całkowitej ilości wprowadzonej na kolumnę chromatograficzną.

2.2 Przygotowanie próbki

Próbki pomiarowe przygotowano w następujący sposób:

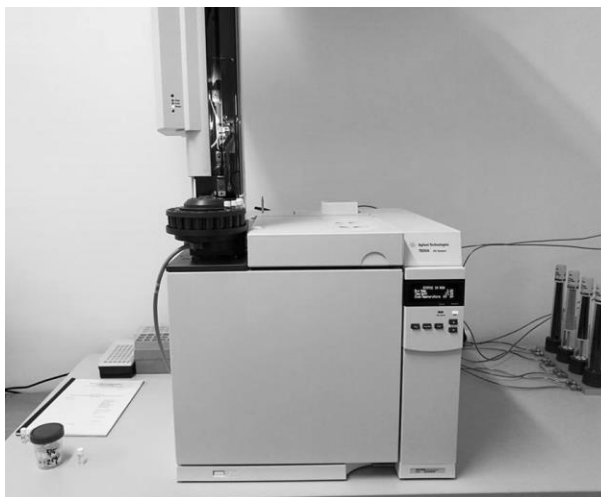
- 1) Z każdej z próbek odmierzone 900 cm³ wody i zakwaszono do pH około 2. W tym celu użyto kwasu azotowego(V), z uwagi na fakt, że kwas chlorowodorowy może wytrącać trudno rozpuszczalne sole. Ważne było, żeby ewentualne osady zostały rozpuszczone.
- 2) Do każdej z próbek dodawano 80 g siarczanu(VI) magnezu w celu ich wysolenia, czyli zmniejszenia rozpuszczalności związków organicznych w wodzie na skutek zmiany siły jonowej roztworu. Siarczan(VI) magnezu należy wprowadzać do próbki porcjami ze względu na silnie egzotermiczną reakcję hydrolizy soli.
- 3) Do tak przygotowanych próbek dodawany był ekstrahent w ilości 50 cm³. Następnie próbkę wytrząsano 30 minut w celu przeprowadzenia węglowodorów zawartych w wodzie do fazy organicznej.
- 4) Mieszaninę przelewano do rozdzielacza o pojemności 1 dm³, a po rozwarstwieniu fazy wodnej od fazy eterowej dokładnie rozdzielano. Nieuważne oddzielenie fazy wodnej od organicznej mogłoby utrudniać kolejny etap przygotowania próbki, czyli zatężanie. Dlatego w celu osuszenia faz eterowych dodawano żel krzemionkowy w celu pozbycia się pozostałej ilości wody.
- 5) Zatężenie obejmowało przepuszczenie próbek przez kolumny z Florisilem. Kolumny te były uprzednio aktywowane poprzez przepuszczenie 5 cm³ eteru naftowego. Po

przepuszczeniu próbek przez kolumny przemywano je 10 cm³ rozpuszczalnika, aby wymyć z niej zaadsorbowane w nich węglowodory.

- 6) Ostatnimi czynnościami, które zostały wykonane na etapie przygotowania próbek do analizy chromatograficznej było zateżenie ich poprzez odparowanie do sucha.
- 7) Następnie zalewano je 1 cm³ eteru naftowego w celu wymycia z naczyń laboratoryjnych i przeniesienia ich do naczynek pomiarowych.

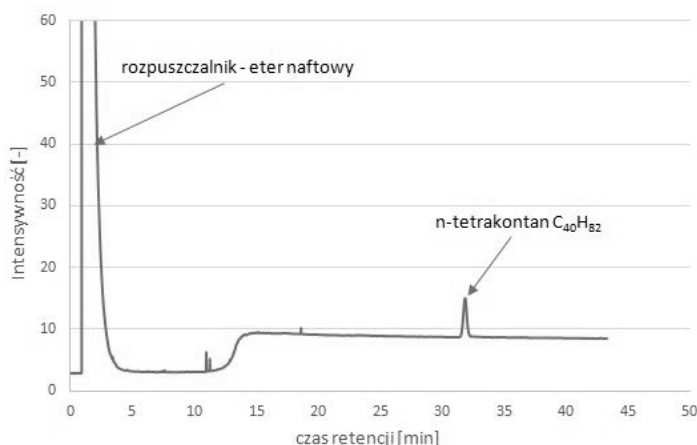
2.3 Analiza chromatograficzna

Otrzymane próbki analizowano na chromatografie gazowym 7820a firmy Agilent Technologies wyposażonym w autosampler na 16 próbek oraz dwa detektory: ciepłoprzewodnościowy (ang. *Thermal-Conductivity Detector*, TCD) i płomieniowo-jonizacyjny (ang. *Flame-Ionization Detector*, FID). Ze względu na większą czułość w stosunku do związków organicznych do analizy wybrano detektor płomieniowo-jonizacyjny FID. Podstawą analizy był standard ASTM® D5134 Qualitative Reference Refinery Standard Kit o numerze referencyjnym 48268 zakupiony w Sigma Aldrich.



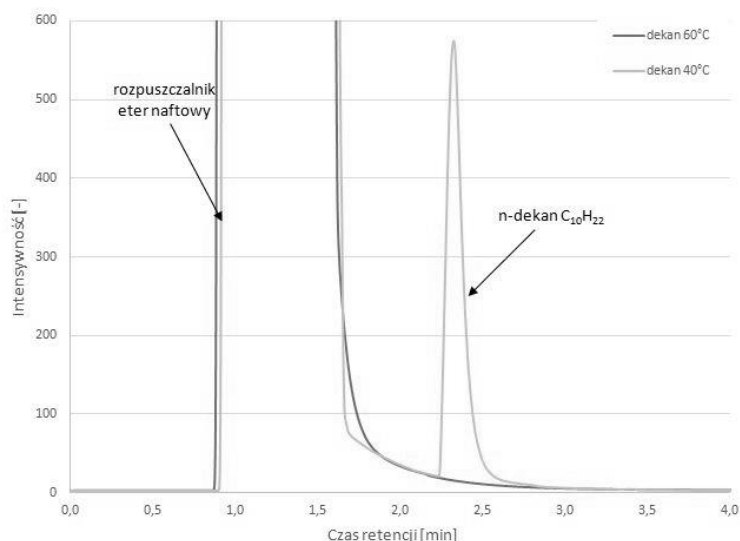
Rys 1. Chromatograf gazowy.

Do badania pobierano 0,2 µl roztworu. Analizę próbek prowadzono przez 54 minuty. Czas ten jest podyktowany czasem retencji n-tetrakontanu który wynosił 31,9 minuty. Dłuższe wymywanie związków z kolumny pozwala na jej oczyszczenie z ewentualnych cięższych węglowodorów, które mogły znajdować się w wodach powierzchniowych.



Rys. 2. Chromatogram dla n-tetrakontanu.

Detektor oraz dozownik utrzymywane były w temperaturze 300°C, natomiast pomiar rozpoczynał się, gdy temperatura pieca chromatografu wynosiła 40°C. Następnie piec rozgrzewano do 250°C. Dobór temperatury pomiaru wykonano w oparciu o chromatogramy wzorca. W temperaturach wyższych niż 40°C czas retencji n-dekanu pokrywał się z czasem retencji eteru naftowego, który stosowany był jako rozpuszczalnik. Wykonanie pomiaru w powyższym zakresie temperatur umożliwiało identyfikację piku należącego do n-dekanu, który był składnikiem wzorca wewnętrznego.

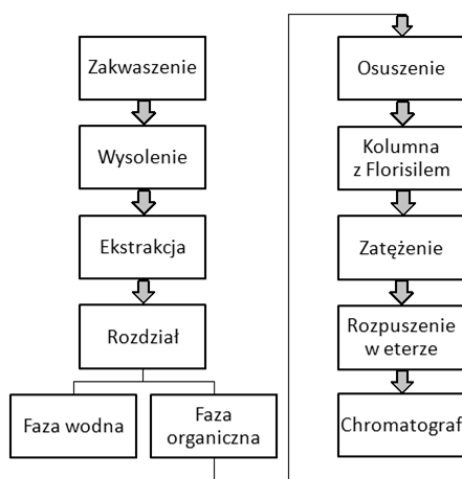


Rys. 3. Chromatogramy dla n-dekanu w zależności od temperatury pomiaru.

Przez kolumnę przepuszczano gazy o następujących przepływach objętościowych: hel 5 ml min⁻¹, wodór 40 ml min⁻¹, powietrze 400 ml min⁻¹. Aby nie obciążać wypełnienia kolumny n-tetrakontanem oraz uniknięcia możliwości niecałkowitego wymycia z kolumny nie był on dodawany do próbek jako wzorec wewnętrzny. Pod uwagę brano tylko piki, które występowały po czasie 2,5 minuty od rozpoczęcia wymywania, ze względu na czas retencji n-dekanu.

2.4 Schemat blokowy

Schemat przedstawiający kolejne etapy wykonania oznaczenia przedstawiono na rysunku 4.



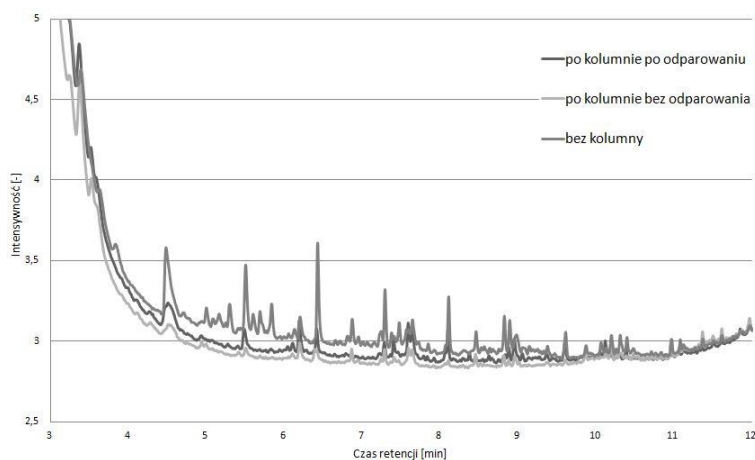
Rys 4. Etapy wykonania oznaczenia zawartości węglowodorów w wodach powierzchniowych

3. Wyniki i dyskusja

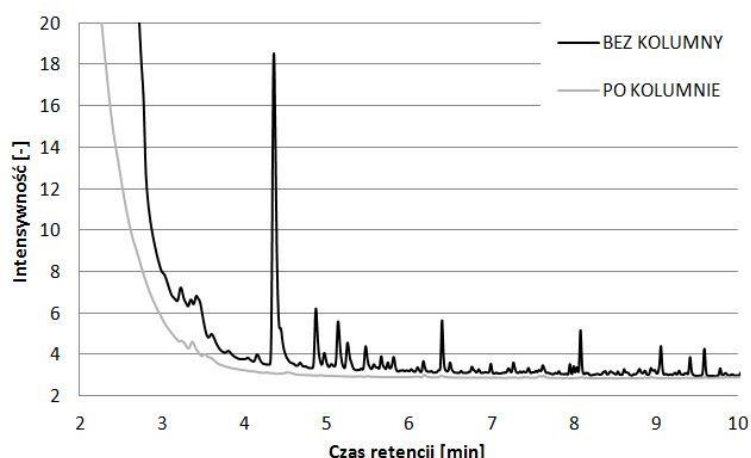
Przy analizowaniu metodyki oznaczania substancji ropopochodnych zawartej w normie PN-EN ISO 9377-2 skupiono się na poszczególnych etapach wykonania oznaczenia.

Warto zwrócić uwagę, że zakwaszanie próbek według zalecenia zawartego w normie nie jest etapem obowiązkowym, jednak w rzeczywistości ma ono znaczący wpływ na dalsze przygotowanie próbki. Najlepszym kwasem do tego celu jest kwas azotowy(V), ponieważ jego sole są substancjami dobrze rozpuszczalnymi. Wytrącające się z próbek sole mogłyby utrudniać rozdział faz oraz adsorpcję węglowodorów na kolumnienkach z Florisilem. Następnym etap – wysolenie – stosowany jest tylko, gdy istnieje możliwość tworzenia się emulsji. Jednak wskazane jest jego wykonanie, szczególnie dla próbek, które mogą zawierać niewielkie stężenia substancji ropopochodnych. Dodanie zbyt małej ilości siarczanu(VI) magnezu lub całkowite pominięcie tego kroku może skutkować niecałkowitym wyekstrahowaniem węglowodorów ropopochodnych z warstwy wodnej, przez co tylko niewielkie ilości węglowodorów znajdą się w fazie organicznej (mierzonej na chromatografii gazowej). Część węglowodorów zostanie rozproszona w fazie wodnej, która zostanie poddana utylizacji. W konsekwencji otrzymamy wynik obciążony będzie dużym błędem pomiarowym wynikającym ze złej metodyki przygotowania próbek. Dodatkowo wysolenie, jak już wcześniej wspomniano, zapobiega tworzeniu się emulsji, co ma istotny wpływ na dobry rozdział fazy wodnej od fazy eterowej. Obecność nawet niewielkiej ilości wody w fazie organicznej powoduje rozpuszczanie się substancji zawartej na kolumnienkach ($\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{Florisil}$), co uniemożliwia dalsze przepuszczanie próbki i adsorpcję węglowodorów. Chcąc całkowicie pozbyć się tego problemu należy zastosować środek suszący np. żel krzemionkowy. Jest to etap nie uwzględniony w normie, niemniej jednak jest on kluczowy.

Porównując chromatogramy dla przykładowych próbek można wywnioskować, że użycie kolumnienek adsorbujących jest niezbędne. Zachodzi na nich adsorpcja węglowodorów ropopochodnych, zaś pozostałe związki nie są wiązane z wypełnieniem kolumny. Dzięki temu otrzymane chromatogramy stają się przejrzyste i łatwiejsze do interpretacji. Chromatogram dla próbki pobranej przed kolumną z Florisilem zawiera wiele innych pików, które pochodzą od substancji o podobnych czasach retencji co oznaczane węglowodory. Próbkę pobraną po oczyszczeniu kolumny zatęża się poprzez odparowanie ekstraktu do objętości 1 cm^3 . Jak widać na poniższych chromatogramach etap ten można niekiedy pominąć, ponieważ nie zauważa się znaczącej różnicy stężeń substancji ropopochodnych w próbkach po kolumnie. Niemniej jednak pozostały 1 cm^3 objętości niekoniecznie będzie czystym ekstraktem, dlatego lepszym rozwiązaniem jest całkowite odparowanie rozpuszczalnika do sucha, a następnie zalanie próbki 1 cm^3 eteru naftowego i poddanie go „na świeżo” analizie chromatograficznej co przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Chromatogramy przykładowej próbki pobranej przed kolumną adsorpcyjną oraz po kolumnie adsorpcyjnej bez odparowania i po jej odparowaniu.



Rys. 6. Chromatogramy przykładowej próbki pobranej przed kolumną adsorpcyjną i po kolumnie adsorpcyjnej.

4. Wnioski

Zweryfikowanie poszczególnych etapów metodyki pozwoliło na poprawne oznaczenie zawartości węglowodorów w wodach powierzchniowych. Przygotowanie próbek wody powierzchniowej w celu oznaczenia zawartości substancji ropopochodnych wymaga dużej dokładności, która jest niezbędna do uzyskania wiarygodnych wyników. Zwracając uwagę na to jak szkodliwe, zarówno dla środowiska, jak i dla organizmu człowieka, mogą okazać się nawet niewielkie stężenia tych substancji warto jest doprecyzować metodykę ich oznaczania. Dokładne wykonanie każdego z poszczególnych etapów wpływa znacząco na wynik końcowy. Ważnym aspektem jest również ograniczenie ilości czynności związanych z przygotowaniem próbki, ponieważ każda zmiana naczynia powoduje niewielkie straty węglowodorów osadzających się na ściankach. Niemniej jednak zastosowanie wzorców wewnętrznych w postaci n-dekanu i n-tetrakontanu umożliwia praktyczne wyeliminowanie tego problemu.

5. Literatura

Badowska E, Grylik D (2012) Wpływ metodyki przygotowania próbek na oznaczanie indeksu oleju mineralnego zgodnie z normą PN-EN ISO 9377-2. www.eko-dok.pl/2012/04.pdf

Polska norma PN-EN ISO 9377-2 (2003) Jakość wody. Oznaczanie indeksu oleju mineralnego. Część 2: Metoda z zastosowaniem ekstrakcji rozpuszczalnikiem i chromatografii gazowej. Warszawa.

Rocznik Statystyczny GUS (2003) Warszawa.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz. Ustaw nr 137 poz. 984 z późn. zmianami.

14. Badanie zawartości węglowodorów w jeziorach wokół miasta Płocka

Study of hydrocarbon content in lakes around the city of Płock

Oliwia Liberek, Dawid Kajkowski, Tomasz Czyżewski, Renata Fabianowicz, Iza Strzelczak, Zachariasz Chabowski, Patrycja Kalbarczyk, Mateusz Bębenista, Karol Adamski, Ada Stanuszkiewicz, Paweł Grabowski

Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska
Opiekun naukowy: dr inż. Paweł Grabowski

Oliwia Liberek: oliwialiberek@gmail.com

Słowa kluczowe: związki ropopochodne, wody powierzchniowe, chromatografia

Streszczenie

Zwiększenie przerobu ropy naftowej oraz eksploatacji jej produktów przyczynia się do zanieczyszczania środowiska naturalnego, w tym wód powierzchniowych oraz gruntowych. Wycieki substancji ropopochodnych są jednym z bardziej niebezpiecznych zagrożeń dla organizmów żyjących w ich pobliżu. Niezbędnym działaniem jest stałe monitorowanie środowiska i przeciwdziałanie jego skażeniom. Celem badań omówionych w niniejszej pracy był pomiar zawartości związków ropopochodnych w próbkach wody powierzchniowej pobranej z dziewięciu jezior znajdujących się wokół miasta Płocka. Badania wykazały, że węglowodory przedostają się do wód powierzchniowych w bardzo małych ilościach (rzędu $\text{nl}\cdot\text{ml}^{-1}$ wody). Większym zagrożeniem dla jezior mogą okazać się związki pochodzące z nawozów sztucznych oraz środki ochrony roślin, które wraz z wodami opadowymi przedostają się do jezior przez spływy powierzchniowe z pobliskich pól uprawnych.

1. Wstęp

Substancje ropopochodne są jednymi z bardziej niebezpiecznych zanieczyszczeń, które przedostają się do wód powierzchniowych. Są to związki węglowodorowe, pochodzące z przerobu ropy naftowej, różniące się właściwościami chemicznymi i fizycznymi. Pomimo słabej rozpuszczalności w wodzie, w dużych stężeniach mogą prowadzić do jej skażenia. Węglowodory te wykazują często właściwości hepatotoksyczne, kancerogenne, neurotyczne i teratogenne.

Do środowiska przedostają się w wyniku wycieków mających miejsce na skutek kolizji drogowych, awarii przemysłowych, eksploatacji produktów naftowych czy ich przeładunku w czasie transportu. W przybliżeniu 40% zdarzeń powodujących zanieczyszczenia gleb oraz wód gruntowych to zdarzenia z udziałem substancji ropopochodnych (benzyn, olejów napędowych i opałowych). Jest to powiązane z rozwojem urbanizacji (przemysłu, motoryzacji czy rozbudową szlaków komunikacyjnych), która przyczynia się do zmian hydrogeologicznych i gruntowo-wodnych, powodując zmniejszenie ilości wód podziemnych oraz obniżenie ich jakości. (Piekutin 2011)

Substancje ropopochodne do środowiska wodnego (w tym jezior) mogą być dostarczane w sposób ciągły poprzez spłukiwanie ich podczas opadu z zanieczyszczonych powierzchni uszczelnionych. Ponadto w przypadku braku obecności odpowiednich bakterii na powierzchni gleby oraz obniżonej chłonności gleby mogą przedostawać się do głębszych warstw, skąd zostaną wypłukane przez spływy podziemne. Nawet w przypadku małych stężeń zmieniają smak oraz zapach wody. Co więcej wywierają szkodliwy wpływ na zdrowie ryb, a następnie ludzi, którzy są ich konsumentami. Podwyższona zawartość związków ropopochodnych w wodach może przyczyniać się do eutrofizacji zbiorników wodnych.

Oprócz związków ropopochodnych w wodach powierzchniowych zwłaszcza w jeziorach i rzekach obecne są również różnego rodzaju środki ochrony roślin, czyli pestycydy, które dostają się poprzez spływanie wód opadowych z pól uprawnych np. do jezior. Związki te mogą również być dostarczane wraz ze ściekami komunalnymi, z ferm hodowlanych, jak i w skutek zastosowania pestycydów do impregnowania drewna. Pestycydy, podobnie jak związki ropopochodne mają niekorzystny wpływ na środowisko i wykazują się właściwościami kancerogennymi oraz immunosupresyjnymi. (Bojakowska i Gliwicz 2005) W niekorzystny sposób wpływają na ryby żyjące

w „zatrutych” wodach poprzez akumulację w ich organizmach, a następnie na zdrowie człowieka (Zakrzewski 1995).

Ze względu na negatywny wpływ tych substancji na środowisko naturalne kontroluje się ich stężenia zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. oraz normą PN-EN ISO 9377-2: Jakość wody. Oznaczanie indeksu oleju mineralnego i PN-73/C-04608/09. Woda i ścieki. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie 2,4-D; MCPA; mekopropu i dichloropropu metodą chromatografii cienkowarstwowej.

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie zawartości węglowodorów w jeziorach znajdujących się wokół miasta Płocka. W związku z czym w badaniach posłużono się normą PN-EN ISO 9377-2.

2. Materiał i metody

Do badań pobrano próbki z dziewięciu jezior znajdujących się w pobliżu miasta Płocka. Zgodnie z mapą (Rys. 1.) były to: 1 – jezioro Zdrowskie, 2 – jezioro Ciechomickie, 3 – jezioro Górskie, 4 – jezioro Łąckie Duże, 5 – jezioro Białe, 6 – jezioro Lucieńskie, 7 – jezioro Soczewka, 8 – jezioro Józefowskie, 9 – jezioro w Gozdowie.



Rys. 1 Lokalizacja jezior, z których pobrano próbki do badań.

Próbki pomiarowe zostały przygotowane zgodnie z metodą opisaną w pracy (Liberek i in. 2018), która przebiegała następująco:

- Z każdej próbki pobrano 900 cm³ wody i zakwaszono kwasem azotowym(V) do pH 2.
- Dodawano 80 g siarczanu(VI) magnezu w celu wysolenia.
- Następnie dodawano 50 cm³ ekstrahenta przygotowanego wcześniej. W celu sporządzenia ekstrahenta odmierzone 20 cm³ n-dekanu, wleto go do kolby miarowej o pojemności 1 dm³ i uzupełniono eterem naftowym do kreski. Właściwy

roztwór ekstrakcyjny uzyskano przez rozcieńczenie otrzymanego roztworu 1:10 eterem naftowym.

- W następnej kolejności próbkę wytrząsano przez 30 minut w celu przeprowadzenia węglowodorów do fazy organicznej.
- Mieszaninę przelano do rozdzielacza o pojemności 1 dm³, odczekano aż dojdzie do rozwarstwienia się faz, a następnie dokładnie rozdzielano.
- Fazę eterową osuszano żelom krzemionkowym.
- Próbkę zatężano przepuszczając je przez kolumny do ekstrakcji w fazie stałej z Florisilem, które wcześniej kondycjonowano przepłukując je eterem naftowym w ilości 5 cm³.
- Aby wymyć z kolumn zaadsorbowane węglowodory, po przepuszczeniu próbek przemycano je 10 cm³ rozpuszczalnika.
- Próbkę odparowywano do sucha.
- Następnie w celu wymycia ich z naczyń laboratoryjnych i przeniesienia do naczyniek pomiarowych zalewano je 1 cm³ eteru naftowego.

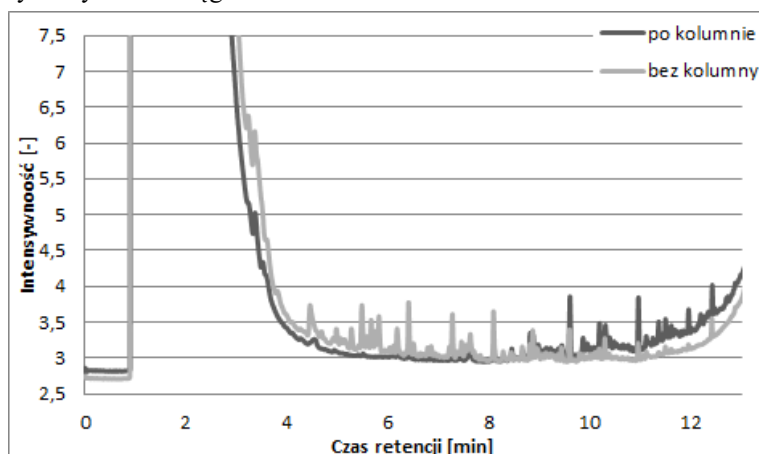
Tak przygotowane próbki poddawano analizie chromatograficznej.

3. Wyniki i dyskusja

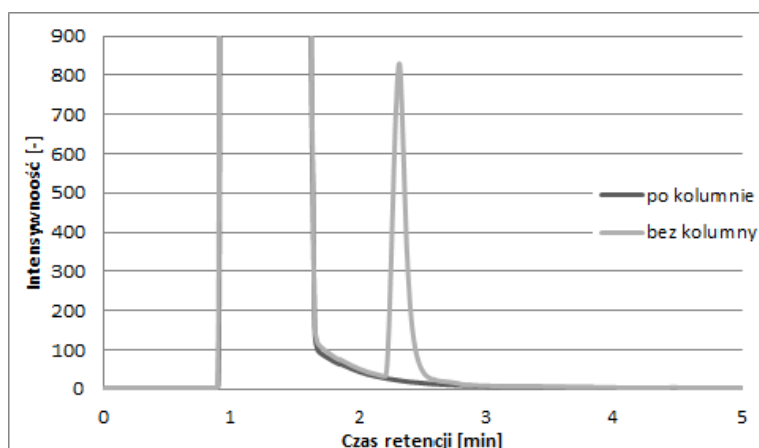
Badaniom poddano próbki bezpośrednio po ekstrakcji, jak również po przepuszczeniu przez kolumny do ekstrakcji w fazie stałej (SPE).

Na wszystkich chromatogramach próbek nie przepuszczanych przez kolumnę SPE obserwowano piki, które pochodziły od substancji nieropopochodnych, takich jak nawozy sztuczne, pestycydy, herbicydy czy funicydy. Związki te mogły zostać przetransportowane do jezior, poprzez spływy powierzchniowe, z pobliskich pól uprawnych. Kolumnienki adsorpcyjne z Florisilem umożliwiły oczyszczenie badanych próbek z wyżej wymienionych związków oraz zatężyły substancje ropopochodne, które były przedmiotem analizy chromatograficznej. Ze względu na ograniczony ruch łodzi z silnikami spalinowymi, na badanych jeziorach nie obserwuje się podwyższonego stężenia węglowodorów ropopochodnych na chromatogramach zarejestrowanych dla próbek przepuszczonych przez kolumny.

W próbce z jeziora Górskiego (nr 3) (Rys. 2 i Rys. 3) nie odnotowano podwyższonego stężenia węglowodorów pochodzących z cięższych frakcji, pomimo zlokalizowania jeziora w pobliżu ruchliwej drogi krajowej nr 60. Pobliską drogą krajową jeździ duża ilość pojazdów ciężarowych, które często przewożą produkty naftowe. Sugerowałoby to, że jezioro zostanie w znaczącym stopniu zanieczyszczone poprzez ewentualne wycieki. Analiza chromatograficzna potwierdza jednak, że firmy transportowe należycie dbają o ochronę środowiska naturalnego i nie dopuszczają do niekontrolowanych wycieków węglowodorów.

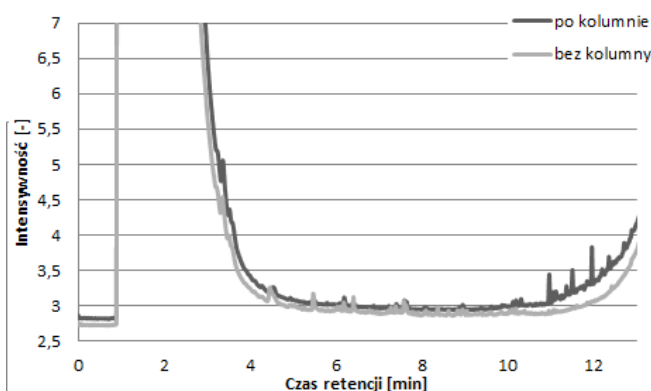


Rys. 2 Chromatogram próbki nr 3.

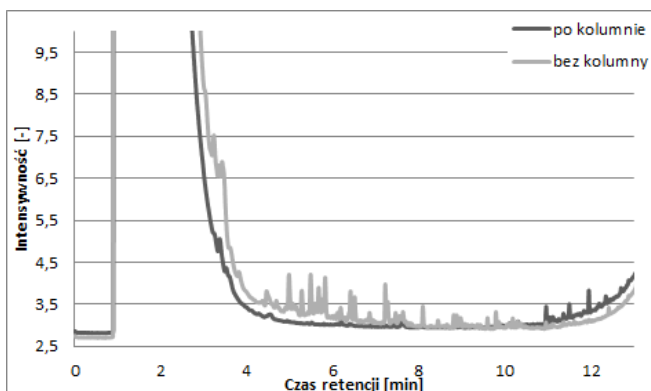


Rys. 3 Chromatogram próbki nr 3.

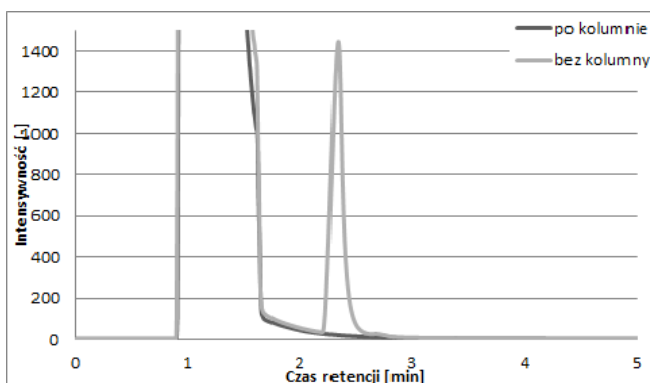
W większości przeanalizowanych próbek zaobserwowano jedynie niewielkie piki mogące pochodzić od węglowodorów ropopochodnych. Ich stężenie jest bardzo niskie i związane jest raczej z eksploatacją olejów smarowych aniżeli wykorzystywaniem paliw do napędzania silników spalinowych w autach lub maszynach rolniczych.. Obserwacje te potwierdzają chromatogramy uzyskane na rysunku 4 dla próbki z jeziora Lucieńskiego, jeziora Soczewka – rysunek 7. Analogiczne chromatogramy uzyskano dla próbek z jezior: Zdwońskiego, Ciechomickiego, Łąckiego Dużego oraz jeziora w Gozdowie.



Rys. 4 Chromatogram próbki nr 6.

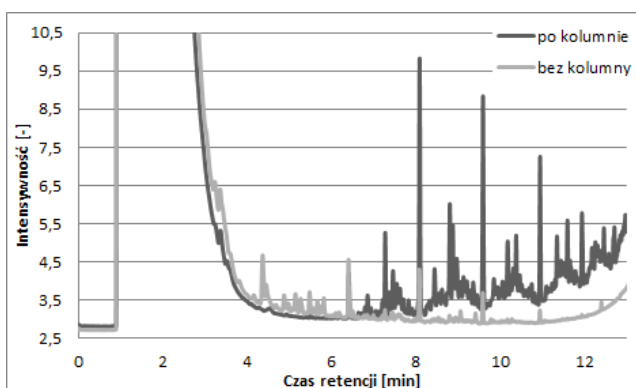


Rys. 5 Chromatogram próbki nr 7.

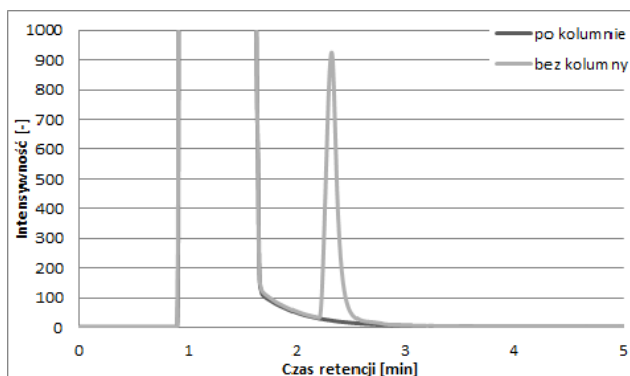


Rys. 6 Chromatogram próbki nr 7.

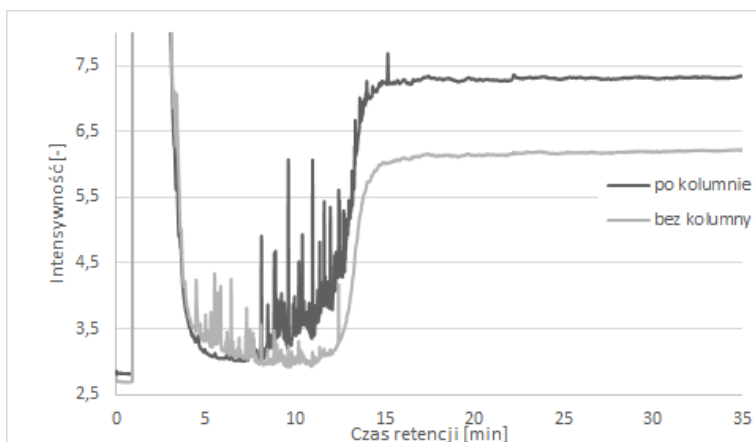
W próbkach z jeziora Białego i Józefowskiego, odpowiednio próbki nr 5 i 8 (rys. 7, 8, 9 i 10) występują piki związków o czasie retencji powyżej 8 minut. Prawdopodobnie są to substancje ropopochodne pochodzące z cięższych frakcji ropy naftowej, takich jak oleje napędowe czy smarowe. Mogą one przedostawać się do pobliskich zbiorników wodnych w wyniku eksploatacji pojazdów z nieszczelnymi układami paliwowymi. Dodatkowo, ze względu na dużą ilość ośrodków agroturystycznych w okolicy jeziora Białego (próbka nr 5) może występować tam ruch łodzi, których układ zasilania wymaga użycia ciężkich olejów smarowych. Oleje te mogą być odpowiedzialne za śladowe ilości zanieczyszczeń zawartych w próbce.



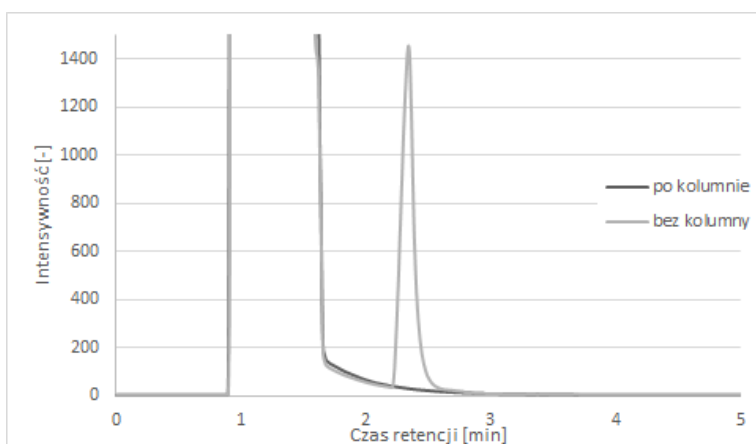
Rys 7 Chromatogram próbki nr 5.



Rys. 8 Chromatogram próbki nr 5.



Rys. 9 Chromatogram próbki nr 8.



Rys. 10 Chromatogram próbki nr 8.

Podczas ekstrakcji wykorzystywano 50 cm³ roztwory ekstrakcyjnego o stężeniu n-dekanu 1,46 mg·ml⁻¹. W związku z powyższym porównując powierzchnię pików n-dekanu i węglowodorów ropopochodnych, w żadnej z próbek sumaryczne stężenie węglowodorów ropopochodnych nie przekroczyło ilości 15 mg·l⁻¹, czyli określonej przez Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r.

4. Wnioski

Badania wykazały, że substancje ropopochodne nie są obecne lub występują w bardzo małych ilościach rzędu mg·ml⁻¹ wody w jeziorach wokół miasta Płocka. Duży wpływ na czystość tych zbiorników ma ograniczenie ruchu łodzi z silnikami spalinowymi. Dodatkowo można stwierdzić, że pojazdy przejeżdżające pobliskimi drogami posiadają sprawne układy paliwowe, a pobliscy mieszkańcy są świadomi zagrożeń jakie niosą substancje ropopochodne, dlatego też nie czyszczą swoich samochodów w pobliżu jezior. Co więcej, większość jezior umiejscowiona jest na południe od terenu miasta. Ruchy powietrza występujące w tych okolicach przenoszą większość zanieczyszczeń w stronę północnego-wschodu, dlatego też w wyniku opadów do badanych jezior nie przedostają się nieczystości pochodzące z miejscowego przemysłu.

Dodatkowym zagrożeniem dla organizmów żyjących w środowisku wodnym mogą okazać się substancje pochodzące ze środków ochrony roślin, których piki zaobserwowano na chromatogramach próbek przed przepuszczeniem przez kolumny adsorpcyjne do SPE. W wyniku

bliskości pól uprawnych duża ilość pestycydów, herbicydów czy funicydów może przedostawać się do wód powierzchniowych, które często są miejscem rekreacji dla mieszkańców miasta i okolic.

5. Literatura

- Bojakowska I, Gliwicz T (2005) Chloroorganiczne pestycydy i polichlorowane bifenyle w osadach rzek Polski. *Przegląd Geologiczny* 8: 649-655
- Liberek i in. (2018) Metodyka oznaczania zawartości węglowodorów w wodach powierzchniowych. *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce*. Warszawa
- Piekutin J. (2011) Zanieczyszczenie wody gruntowej związkami organicznymi. *Inżynieria Ekologiczna* 26: 95-102
- Polska norma PN-EN ISO 9377-2 (2003) Jakość wody. Oznaczanie indeksu oleju mineralnego. Część 2: Metoda z zastosowaniem ekstrakcji rozpuszczalnikiem i chromatografii gazowej. Warszawa.
- Polska Norma PN-73/C-04608/09. Woda i ścieki. Badania zawartości pestycydów. Oznaczanie 2,4-D; MCPA; mekopropu i dichloropropu metodą chromatografii cienkowarstwowej. Warszawa
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz. Ustaw nr 137 poz. 984 z późn. zmianami.
- Zakrzewski S.F. (1995) Podstawy toksykologii środowiska. PWN. Warszawa

15. Biosurfaktanty lipopeptydowe: produkcja, właściwości i zastosowanie

Lipopeptide biosurfactants: production, properties and application

Łomińska Marta, Legawiec Krzysztof Jan, Bastrzyk Anna

Zakład Inżynierii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska

Marta Łomińska: 217616@student.pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: surfaktyna, iturina, fengicyna, CMC, zielone surfaktanty

Streszczenie

Biosurfaktanty lipopeptydowe takie jak surfaktyna, iturina oraz fengicyna należą do grupy najbardziej poznanych biocząsteczek produkowanych przez mikroorganizmy. W swojej cząsteczce posiadają cykliczny łańcuch peptydowy, składający się z reszt aminokwasów niebiałkowych oraz łańcuch kwasu β -hydroksykwasu tłuszczowego lub alkoholu tłuszczowego. Brak negatywnego wpływu na środowisko oraz unikatowe właściwości sprawiają, że związki te mogą znaleźć zastosowanie, jako zielone surfaktanty, w wielu gałęziach przemysłu jako detergenty, emulgatory czy czynniki biobójcze.

1. Wprowadzenie

Większość produktów użytku codziennego w swoim składzie zawiera związki powierzchniowo czynne. Również wiele technologii przemysłowych wspomaganych jest dodatkiem surfaktantów. Oszacowano, że całkowita produkcja surfaktantów na świecie wynosi ponad 15 milionów ton. Zużywanie takiej ilości surfaktantów stanowi zagrożenie dla środowiska naturalnego. Większość tych substancji jest bardzo powoli biodegradowalna, oraz w dużych ilościach wpływa niekorzystnie na organizmy żywe. Z obawy o piękno otaczającej nas przyrody w ostatnich latach wiele prac poświęcono nad poszukiwaniem substancji pochodzenia naturalnego o podobnych właściwościach, tak zwanych zielonych surfaktantów. W ostatnich kilkudziesięciu latach okazało się, że alternatywą do zastąpienia syntetycznych surfaktantów mogą być związki produkowane przez mikroorganizmy, biosurfaktanty. Są to naturalne związki powierzchniowo czynne (ZPC) produkowane głównie przez bakterie, drożdże i grzyby. Podobnie jak surfaktanty syntetyczne w swojej cząsteczce posiadają ugrupowania hydrofilowe oraz grupę hydrofobową. W porównaniu do syntetycznych związków, te naturalne charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością pod względem budowy chemicznej, ich część hydrofilową mogą tworzyć reszty aminokwasowe, węglowodany, oraz mono-, oligo- i polisacharydy (Lang 2002). Ugrupowanie hydrofobowe natomiast może stanowić nasycony bądź nienasycony łańcuch kwasu tłuszczowego, hydroksylowego kwasu tłuszczowego lub alkoholu tłuszczowego. Ta różnorodność w strukturze zwiększa potencjał aplikacyjny tych związków w przemyśle. Innymi bardzo ważnymi cechami tych związków przemawiającymi za ich wykorzystaniem w technologiach przemysłowych są całkowita biodegradowalność, niska toksyczność, produkcja na materiałach odpadowych, bardzo duża aktywność powierzchniowa przy małych stężeniach oraz zdolność biobójcza.

W niniejszej pracy zaprezentowano biosurfaktanty lipopeptydowe produkowane przez szczepy *Bacillus*, *Lactobacillus* i *Streptomyces*. Biocząsteczki te stanowią grupę bardzo silnych związków powierzchniowoczynnych o działaniu przeciwwirusowym oraz przeciwwgrzybicznym.

2. Opis zagadnienia

2.1 Budowa i właściwości biosurfaktantów lipopeptydowych

Biosurfaktanty lipopeptydowe wydzielane są zewnątrzkomórkowo przez różne szczepy bakterii, takie jak *Bacillus*, *Lactobacillus* oraz *Streptomyces*. Chociaż badania nad poznaniem struktury i właściwości fizykochemicznych biosurfaktantów trwają już od dziesięcioleci, nie wszystkie z nich są dokładnie opisane w literaturze. Do najbardziej poznanych biosurfaktantów lipopeptydowych można zaliczyć surfaktynę, iturinę oraz fengicinę, związki te produkowane są

głównie przez szczep *Bacillus subtilis*. Charakteryzują się one nieco odmienną budową strukturalną, co zostało przedstawione w tabeli (Tab. 1). Strukturalnie są one utworzone z łańcucha reszty hydroksykwasu tłuszczowego lub alkoholu tłuszczowego połączonego z tzw. ugrupowaniem peptydowym. W ugrupowaniu peptydowym zlokalizowane jest ugrupowanie izomorficzne, różniące się składem oraz długością łańcucha, a także swoistą sekwencją aminokwasów. Taka budowa cząsteczki umożliwia biosyntezę kilku form izomorficznych przez ten sam szczep (Pacwa-Płociniczak i Płaza 2011).

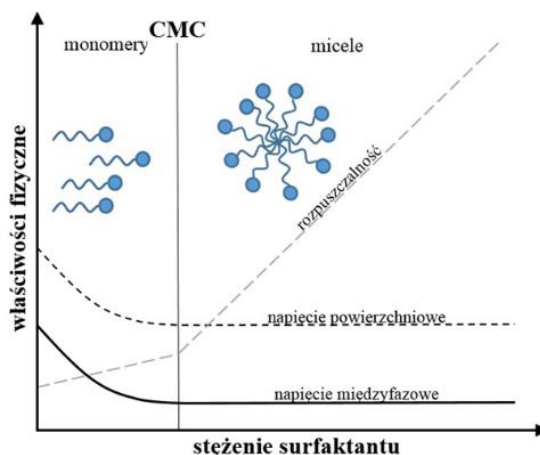
Tab. 1 Struktury biosurfaktantów polipeptydowych produkowanych przez szczep *Bacillus subtilis*. Opracowano na podstawie Perez-Garcia i in. (2011).

Nazwa	Struktura
Surfaktyna	$ \begin{array}{c} \text{CO}-\text{L-Glu}-\text{L-Leu}-\text{D-Leu} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3-(\text{CH}_2)_9-\text{CH} \\ \\ \text{O}-\text{L-Leu}-\text{D-Leu}-\text{L-Asp} \end{array} $
Ituryna	$ \begin{array}{c} \text{CO} \rightarrow \text{L-Asn} \rightarrow \text{D-Tyr} \rightarrow \text{D-Asn} \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \text{CH}_2 \qquad \qquad \qquad \text{L-Glu} \\ \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \text{CH}_2-(\text{CH}_2)_{n+1}-\text{CH} \\ \\ \text{NH} \leftarrow \text{L-Ser} \leftarrow \text{D-Asn} \leftarrow \text{L-Pro} \end{array} $
Fengicyna	$ \begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}-\text{CO} \rightarrow \text{L-Glu} \rightarrow \text{D-Orn} \rightarrow \text{L-Tyr} \rightarrow \text{D-Ala} \rightarrow \text{Tyr} \rightarrow \text{L-Glu} \rightarrow \text{D-X} \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \downarrow \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \qquad \text{O} \leftarrow \text{L-Ile} \leftarrow \text{D-Tyr} \leftarrow \text{L-Glu} \leftarrow \text{L-Pro} \end{array} $

Surfaktyna (~1,36 kDa) w swojej cząsteczce posiada łańcuch β -hydroksykwasu tłuszczowego, który zawiera od 12 do 17 atomów węgla. Natomiast część peptydową tworzy cykliczny łańcuch zbudowany z 7 reszt α -aminokwasowych. W cząsteczce surfaktyny występuje wiązanie laktonowe. Najczęściej, część peptydowa surfaktyny ma postać przedstawioną w (Tab. 1), gdzie występują 2 reszty aminokwasowe obdarzone ujemnym ładunkiem elektrycznym, glutaminian (Glu) i asparginan (Asp). Prowadząc badania nad poszukiwaniem nowych szczepów produkujących biosurfaktanty odnaleziono formy surfaktyny, gdzie w części peptydowej zamiast reszt leucyny znajdowały się aminokwasy takie jak, walina (Val) lub izoleucyna (Ile) (Baumgart i in. 1991). Analizy chemiczne pokazały, że cząsteczka ituryny składa się również z 7 reszt aminokwasowych tworzących cykliczny peptyd połączony z łańcuchem β -hydroksykwasów tłuszczowych o długości od 14 do 17 atomów węgla. Biosurfaktant ten charakteryzuje się niską masą molową (1,04 kDa dla ituryny A). Dotychczas odkryto cztery jej struktury: A, A2, C oraz D. Natomiast fengicyna, zwana w literaturze także filiplastyną, nieco odbiega w swej budowie od wyżej wymienionych biosurfaktantów lipopeptydowych. W jej składzie dostrzec można 10 reszt aminokwasowych w tym dwie reszty niewystępujące zarówno w surfaktynie jak i iturynie, ornitynę oraz tyrozinę. Łańcuch alkoholu tłuszczowego może osiągać długość od 14 do 17 atomów węgla (Pathak i in. 2012), przez co substancja ta jest zdolna do występowania w formie różnych izomerów. Cykliczny łańcuch

peptydowy w cząsteczce fengicyny składa się z ośmiu reszt aminokwasowych (Tyr, Thr, Glu, Ala, Pro, Gln, Tyr oraz Ile), które tworzą formację deka-peptydową połączoną wiązaniem laktonowym.

Ze względu na amfifilowy charakter cząsteczki, biosurfaktanty lipopeptydowe posiadają zdolność gromadzenia się na granicy faz tym samym obniżając wartość napięcia powierzchniowego oraz międzyfazowego. W układach wodnych w zależności od stężenia, cząsteczki biosurfaktantu mogą występować w formie monomerycznej lub tworzyć agregaty zwane micelami (Rys. 1). Stężenie biosurfaktantu przy którym zaczynają powstawać micelle nosi nazwę krytycznego stężenia micelizacji (CMC).



Rys. 1 Zależność właściwości fizycznych od stężenia biosurfaktantu.

Wartości CMC dla surfaktyny, ituriny i fengicyny wynosi 10; 25 i 12 μM , odpowiednio (Liu i in. 2015). Surfaktyna wykazuje bardzo dobre właściwości powierzchniowe, obniża napięcie powierzchniowe wody ($72 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$) do $27 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

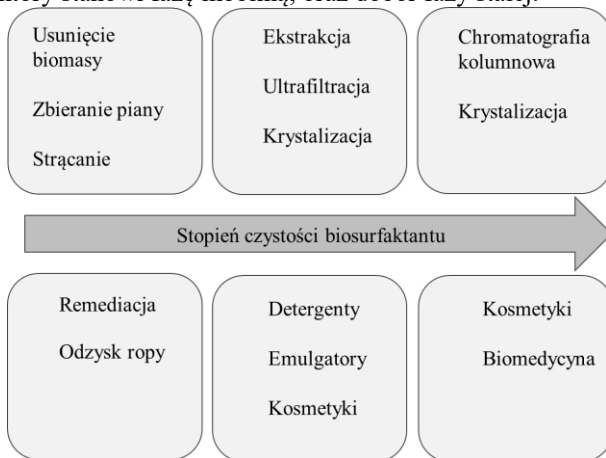
2.2 Produkcja i oczyszczanie biosurfaktantów lipopeptydowych

Na skalę laboratoryjną biosurfaktanty otrzymuje się poprzez prowadzenie hodowli mikroorganizmów w określonych warunkach w bioreaktorach okresowych lub ciągłych. Mikroorganizmy zdolne do biosyntezy biosurfaktantów pozyskiwane są ze środowiska naturalnego np. z gleby zanieczyszczonej ropą czy z zimnych mórz i oceanów. Biosynteza tych związków zależy od parametrów kontrolujących wzrost bakterii, takich jak pH, temperatura, skład pożywki oraz intensywności mieszania. Obecnie dostępne techniki pozwalają na dokładne zbadanie szlaku metabolicznego mikroorganizmu w wyniku którego powstają cząsteczki biosurfaktantów. Wiedza ta wraz z narzędziami inżynierii genetycznej wykorzystywana do tworzenia rekombinowanych szczepów produkujących w dużych ilościach biosurfaktanty o ściśle określonej strukturze chemicznej. Mimo coraz bardziej postępującej wiedzy, wykorzystywanie biosurfaktantów w przemyśle jest bardzo małe. Powodem tego jest wysoki koszt produkcji, generowany przez ceny pożywek niezbędnych do funkcjonowania mikroorganizmu. Aby zmniejszyć koszty produkcji, do podłoża wprowadzono materiały odpadowe, głównie pochodzenia rolno-spożywczego. Z danych literaturowych wynika, że biosurfaktanty lipopeptydowe mogą być produkowane na podłożu zawierającym melasę, odpady z przetwarzania buraków cukrowych, ścieki browarnicze, serwatkę czy produkt uboczny z ekstrakcji oliwek.

Bardzo ważnym aspektem przy produkcji biosurfaktantu jest otrzymanie bioproduktu o pożądanym stopniu czystości. Bardzo wysoki stopień czystości biosurfaktantu wymagany jest przy aplikacji tych związków w medycynie i produktach kosmetycznych. Na schemacie (Rys. 2) przedstawiono metody odzyskiwania biosurfaktantów z płynu pohodowlanego oraz potencjalne ich zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu w zależności od czystości produktu.

Oczyszczanie biosurfaktantów lipopeptydowych jest procesem wieloetapowym, w trakcie którego stosuje się różne metody. Surfaktyna posiada bardzo dobre właściwości pianotwórcze, co

wykorzystuje się przy wstępnej izolacji tego biosurfaktantu. Podczas prowadzenia hodowli na powierzchni płynu tworzy się piana, która jest zbierana (frakcjonowana), a następnie po usunięciu biomasy poddawana dalszym etapom oczyszczania. Biomase z piany czy płynu pochodzącego najczęściej usuwa się przez wirowanie, a pożądaný bioprodukt jest w kolejnym etapie strącany (pH 2, 4°C). Powstały osad zawierający biosurfaktanty jest oddzielany z układu i rozpuszczany w wodzie (pH 7), dalsza separacja biocząsteczek może odbywać się przez ultrafiltrację, ekstrakcję lub z wykorzystaniem chromatografii kolumnowej. W metodach membranowych wykorzystuje się zdolność biosurfaktantów do tworzenia miceli. Agregaty micelarne są zatrzymywane, natomiast cząsteczki zanieczyszczeń przechodzą przez pory membrany. Metoda ta pozwala skutecznie odseparować surfaktynę z układu z wydajnością około 98% przy zastosowaniu dwustopniowego procesu ultrafiltracji. W pierwszym stopniu membrana skutecznie zatrzymuje micelle biosurfaktantu, które następnie są niszczone przez dodanie do permeatu 50% roztworu metanolu, w drugim stopniu ma miejsce oddzielenie monomerów surfaktyny od zanieczyszczeń białkowych. Zadawalające wyniki osiągnięto stosując w pierwszym stopniu membranę PES-100kDa, a w kolejnym PES-50kDa (Andrade i in. 2016). Ekstrakcyjne metody separacji biosurfaktantów lipopeptydowych wymagają doboru odpowiednich rozpuszczalników tak aby zapewnić jak najlepszy rozdział substancji z układu. Z danych literaturowych wynika, że do odzyskiwania surfaktyny, fungicyny i ituryny z zadawalającą wydajnością stosuje się rozpuszczalniki, takie jak, octan etylu, chloroform/metanol (2:1) oraz dichlorometan. Zastosowanie chromatografii kolumnowej w oczyszczaniu biosurfaktantów prowadzi do uzyskania produktu o największym stopniu czystości, co pozwala na zastosowanie tych związków w kosmetykach oraz w aplikacjach medycznych. W metodzie tej wykorzystuje się różnice w szybkości przemieszczania się cząsteczek względem fazy stałej. Bardzo ważne jest dobór odpowiedniego eluentu, który stanowi fazę mobilną, oraz dobór fazy stałej.



Rys. 2 Schemat przedstawiający etapy procesu oczyszczania biosurfaktantów.

2.3 Zastosowanie biosurfaktantów lipopeptydowych w przemyśle

W ciągu ostatnich kilku lat znacznie wzrosło zainteresowanie biosurfaktantami, ze względu na ich przydatne właściwości użytkowe. Znalazły zastosowanie jako emulgatory, deemulgatory, środki zwilżające, środki rozpraszające, środki pianące, funkcjonalne składniki żywności i detergenty. Biosurfaktanty lipopeptydowe znajdują głównie zastosowanie w przemyśle medycznym i wydobywczym, oraz w rolnictwie i ochronie środowiska.

3.1.1 Zastosowanie w medycynie

Spośród wszystkich biosurfaktantów lipopeptydy są szczególnie interesujące ze względu na ich dużą aktywność powierzchniową i potencjał antybiotyczny. Mogą one działać jako środki antywirusowe i antybakteryjne. Ich właściwości zależą od szczepu bakterii, który je produkuje oraz warunków prowadzenia hodowli (Rodrigues i in. 2006). Zastosowanie biosurfaktantów lipopeptydowych w medycynie zostało przedstawione w tabeli (Tab.2).

Surfaktyna wykazuje bardzo silną aktywność biologiczną, dzięki czemu jest dobrym środkiem przeciwwirusowym. Przeciwwirusowe działanie biosurfaktantu wynika z tego, że cząsteczka surfaktyny ma zdolność przenikania do podwójnej warstwy lipidowej wirusa. Wywołuje to całkowity rozpad osłonki lipidowej, która zawiera białka odpowiedzialne za adsorpcję i penetrację wirusa do komórki docelowej. Dzięki takiemu działaniu nie dochodzi do infekcji komórki wirusem (Menna i Kanwar 2015). Studia literaturowe pokazują, że surfaktyna jest aktywna przeciwko wirusom, takim jak wirus gorączki lasu Semliki, wirus opryszczki pospolitej (HSV), wirus opryszczki ospowatej, wirus pęcherzykowego zapalenia jamy ustnej, wirus niedoboru odporności, kaliciwirus oraz wirus mysiego zapalenia mózgu i rdzenia kręgowego (Vollenbroich i in. 1997). Interesujące są doniesienia, że aktywność biobójcza zależy od długości łańcucha karboksylowego w części hydrofobowej cząsteczki biosurfaktantu. Zwiększanie ilości atomów węgla w części hydrofobowej surfaktyny skutkuje silniejszym działaniem bakteriobójczym, jak również przeciwrzybicznym. W ostatnich latach podjęto badania nad próbami zastosowania surfaktyny w terapii przeciwnowotworowej. Intensywne badania dowiodły, że biosurfaktant ten wykazuje silne działanie cytostatyczne i cytotoksyczne na linie komórkowe raka piersi T47D i MDA-MB-231, oraz MCF-7.

Tab. 2. Zastosowanie biosurfaktantów lipopeptydowych w medycynie (Kim i in. 1998; Ahimoui i in. 2001).

Biosurfaktant	Zastosowanie
<i>Surfaktyna</i>	• działanie przeciwbakteryjne • hamowanie tworzenia skrzepu fibryny • hemoliza i tworzenie kanałów jonowych w błonach lipidowych • działanie przeciwnowotworowe • aktywność antywirusowa
<i>Iturina</i>	• aktywność przeciwdrobnoustrojowa i działanie grzybobójcze • wpływ na morfologię i strukturę błony komórek drożdży • wzrost przewodności elektrycznej biomolekularnych membran lipidowych

Iturina wykazuje nie tylko właściwości przeciwwirusowe ale również ma silne działanie przeciwrzybicze. Mechanizm działania ituriny związany jest z wnikaniem cząsteczki biosurfaktantu do błony komórkowej mikroorganizmu. Powoduje to zmiany w strukturze błony prowadzące do zwiększenia jej przepuszczalności. Na skutek tych uszkodzeń komórka traci niezbędne metabolity do prawidłowego funkcjonowania i ostatecznie dochodzi do lizy komórki (Baindara i in. 2015).

Ponadto badania wykazały, że biosurfaktanty lipopeptydowe skutecznie hamują działanie enzymu, fosfolipazy A2 odpowiedzialnego za wywołanie procesów zapalnych w organizmie (Wei, i in. 2010). Dlatego prowadzone są badania nad zastosowaniem surfaktyny i fungicyny, naturalnych probiotyków, w terapii leczenia stanów zapalnych w organizmie np. (zapalenie jelita grubego i cienkiego, zapalenie płuc).

Studia literaturowe pokazują, że biosurfaktanty lipopeptydowe wpływają negatywnie na wzrost biofilmu (Seydlova i Svobodova, 2008). Aktywność ta daje możliwość zastosowania tych związków jako antyadhezyjne powłoki biologiczne materiałów medycznych, zmniejszając w ten sposób infekcje szpitalne i stosowanie syntetycznych odpowiedników.

3.1.2 Zastosowanie w przemyśle wydobywczym

Głównym zastosowaniem biosurfaktantów lipopetydowych w przemyśle wydobywczym są procesy odzyskiwania ropy naftowej. Stosując tradycyjne metody można odzyskać od 40 do 45% oleju, zaś dzięki technologii z wykorzystaniem biosurfaktantów znacznie zwiększa się wydajność procesu zwłaszcza gdy przepuszczalność skały zbiornikowej jest nieczadawalająca (Banat i in. 2010). Biosurfaktanty gromadzą się na granicy międzyfazowej olej/woda obniżając napięcie międzyfazowe i tworzą stabilne emulsje, co znacznie polepsza ruchliwość oleju w porach skały, a tym samym zwiększa wydajność procesu. Obecność tych związków również może zmieniać zwilżalność skał, co ułatwia odzysk ropy naftowej (El-Sheshtawy i in. 2015).

Obecnie prowadzone są badania nad zastosowaniem tych biocząsteczek w procesie flotacji ziaren mineralnych. Badania pokazują, że biosurfaktanty mogą modyfikować powierzchnię minerału, tym samym sprzyjając adhezji pęcherzyka powietrza do powierzchni ziarna. Prowadząc flotacje z udziałem biosurfaktantów lipopetydowych produkowanych przez szczep *Srteptomyces* lub szczep *Bacillus* zaobserwowano selektywny rozdział minerałów, co stanowi bardzo ważny aspekt w procesach przeróbki kopalin (Didyk Mucha i Sadowski 2012).

3.1.3 Zastosowanie w ochronie środowiska

Biosurfaktanty lipopetydowe, zwłaszcza te produkowane przez szczepy *Bacillus*, mogą być stosowane w procesie bioremediacji po wycieku ropy naftowej, który stanowi jedną z głównych przyczyn zanieczyszczenia gleby i wód powierzchniowych. Usuwanie wycieków przy pomocy syntetycznych środków powierzchniowo czynnych nie jest możliwe, ze względu na ich toksyczny wpływ na środowisko. Biosurfaktanty, często nazywane „zielonymi surfaktantami”, są potencjalną alternatywą dla tych szkodliwych substancji, dzięki doskonałej aktywności powierzchniowej oraz bardzo dobrym właściwościom emulgującym. Ułatwiają one solubilizację i asymilację ropy naftowej przez florę i faunę w środowisku. Badania pokazały, że surfaktyna skutecznie działa w stosunku do węglowodorów alifatycznych (Kołwzan 2014). Analizując dane literaturowe można zauważyć, że surfaktyna efektywnie usuwa nie tylko węglowodory, ale również jony miedzi (Kołwzan 2014). Biosurfaktanty te zatem również mogą być stosowane w remediacji metali ciężkich ze skażonych terenów.

Środki powierzchniowo czynne powszechnie stosowane są w detergentach, więc i w tym przypadku biosurfaktanty mogą zastąpić syntetyczne surfaktanty. Dzięki rosnącej świadomości społecznej dotyczącej zanieczyszczenia środowiska i zbiorników wodnych przez środki powierzchniowo czynne wytwarzane chemicznie, co raz częściej stosuje się biosurfaktanty np. w środkach do prania. Biosurfaktanty, takie jak surfaktyna są stabilne w szerokim zakresie pH (7,0-12,0), a podgrzewanie ich w wysokiej temperaturze nie powoduje utraty ich właściwości powierzchniowo czynnych. Wykazują one dobrą zdolność do tworzenia emulsji z olejami roślinnymi i są kompatybilne z komercyjnymi detergentami do prania.

3.1.4 Zastosowanie w rolnictwie

Biosurfaktanty lipopeptydowe znalazły również zastosowanie w rolnictwie do zwiększania jakości gleby pod uprawy rolne. Obecność zanieczyszczeń organicznych bądź nieorganicznych negatywnie wpływa na wzrost roślin. Jednym ze sposobów zwiększenia rozpuszczalności biologicznie niebezpiecznych związków chemicznych, jest zastosowanie biosurfaktanów jako czynników mobilizujących (Fakruddin 2012). Czynniki te zwiększają rozpuszczalność hydrofobowych związków organicznych (HOC) tym samym poprawiając parametry gleby. Ponadto te biologicznego pochodzenia cząsteczki pomagają drobnoustrojom adsorbować się na powierzchni ziaren gruntu, co ułatwia przyswajanie zanieczyszczeń z gleby. Również w rolnictwie surfaktanty są stosowane do hydrofilizacji ciężkich gleb w celu uzyskania dobrej zwilżalności i równomiernego rozprzodzenia nawozu w glebie.

Aktywność przeciwdrobnoustrojowa biosurfaktanów pozwala na stosowanie ich jako środków do produkcji biopestycydów do ochrony roślin (Liu 2015). Przykładowo surfaktyna mająca silne właściwości antybiotyczne działa przeciwko bakteriom Gram-ujemnym, a także wykazuje działanie owadobójcze przeciwko muszkom owocowym. Takie zastosowanie może rozwiązać

problem stosowania chemikaliów o szerokim spektrum działania, przez co powodują niepożądane efekty oraz pojawiania się populacji owadów odpornych na pestycydy.

4. Podsumowanie

Ze względu na coraz większą świadomość społeczeństwa nad szkodliwością syntetycznie otrzymywanych surfaktantów poszukuje się nowych odpowiedników spełniających wymagania „zielonej chemii”. W ostatnich latach zaobserwowano znaczący wzrost prac nad poszukiwaniem naturalnych związków powierzchniowo czynnych pochodzenia naturalnego, a zwłaszcza tych produkowanych przez mikroorganizmy z szczególnym naciskiem na mikroorganizmy niepatogenne. Analizując dostępne dane możemy zaobserwować stopniowe wprowadzanie naturalnych surfaktantów zwanych biosurfaktantami do produktów użytkowych, jak również ich wykorzystywanie w procesach technologicznych.

Dane literaturowe opisują wiele zastosowań biosurfaktantów lipopeptydowych, zwłaszcza w medycynie oraz nanotechnologii. Biosurfaktanty lipopeptydowe, a zwłaszcza surfaktyna, wykazują dobrą aktywność przeciwnowotworową mogą stanowić nowe rozwiązania w terapiach w leczeniu chorób nowotworowych. W nanotechnologii sprawdzają się jako czynniki redukujące jony do formy metalicznej oraz stabilizujące powstałe nanocząstki metali. W rolnictwie mogą zastąpić syntetyczne aktywne składniki w środkach do ochrony roślin uprawnych. Ze względu na bardzo dobre właściwości emulgujące, pianotwórcze oraz zwilżające biosurfaktanty te mogą być wykorzystywane jako efektywne i przyjazne środowisku emulgatory czy kolektory w przemyśle wydobywczym.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2014/15/D/ST8/00544.

5. Przegląd literatury

- Ahimou F, Jacques P, Deleu M, (2001) Surfactin and iturin A effects on *Bacillus subtilis* surface hydrophobicity. *Enzyme Microb. Technol.* 2001; 27: 749–54.
- Andrade CJ, Barros FFC, Andrade LM et al. (2016) Ultrafiltration based purification strategies for surfactin produced by *Bacillus subtilis* LB5A using cassava wastewater as substrate, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 91: 3018-3027.
- Baindara P, Mandal SM, Chawla N et al. (2015) Characterization of two antimicrobial peptides produced by *Bacillus subtilis* strain SK.DU.4 isolated from a rhizosphere soil sample. *AMB Express.* 3(2): 1-11.
- Banat IM, Martinotti M, Franzetti A et al. (2010) Microbial biosurfactant production, applications and future potential *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 87: 427-444.
- Didyk Mucha AM, Sadowski Z (2012) Flotation of serpentinite and quartz using biosurfactants, *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 48(2): 607-618.
- El-Shehtway HS, Aiad I, Osman ME et al. (2015) Production of biosurfactant from *Bacillus licheniformis* for microbial enhanced oil recovery and inhibition the growth of sulfate reducing bacteria. *Egypt. J. Pet.* 24(2): 155-162.
- Fakruddin M (2012) Biosurfactant: Production and Application, *J. Pet. Environ. Biotechnol.* 3(4): 1-5.**
- Kim K, Jung SY, Lee DK et al. (1998) Suppression of inflammatory responses by surfactin, a selective inhibitor of platelet cytosolic phospholipase A2. *Biochem. Pharmacol* 55: 975–85.
- Kołwzan B (2014) Możliwości wykorzystania biosurfaktantów w technologiach oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego. *Ochrona Środowiska* 36(2): 3-18.
- Lang S, (2002) Biological amphiphiles (microbial biosurfactants), *Curr. Opin. Colloid Inter. Sci.* 7: 12-20.
- Liu JF, Mbadinga SM, Yang SZ et al. (2015) Chemical Structure, Property and Potential Applications of Biosurfactants Produced by *Bacillus subtilis* in Petroleum Recovery and Spill Mitigation. *Int. J. Mol. Sci.* 16(3): 4814-4837.

- Meena KR, Kanwar SS (2015) Lipopeptides as the antifungal and antibacterial agents: application in food safety and therapeutics. *BioMed Res. Int.* Article ID 473050: 1-9.
- Pacwa-Płociniczak M, Plaza GA, Piotrowska-Seget Z et al. (2011) Environmental application of biosurfactants: Recent Advances. *Int. J. Mol. Sci* 12(1): 633-654.
- Pathak KV, Keharia H, Gupta K et al. (2012) Lipopeptides from the banyan endophyte, *Bacillus subtilis* K1: mass spectrometric characterization of a library of fengycins. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 23(10): 1716-1728.
- Perez-García A, Romero D, Vincente de A (2011) Plant protection and growth stimulation by microorganisms: biotechnological applications of Bacill in agriculture. *Current Opin. Biotechnol.* 22: 187-193.
- Rodrigues L, Banat IM, Teixeira J et al. (2006) Biosurfactants: potential applications in medicine. *J. Antimicrob. Chemother.* 57: 609–618.
- Seydlová G, Svobodová J (2008) Review of surfactin chemical properties and the potential biomedical applications. *Cent. Eur. J. Med.* 3(2): 123-133.
- Vardar-Sukan F, Kosaric N (2010) Biosurfactants, *Encyclopedia of Microbiology*. 1 A-C Second Edition American Press: 618-635.
- Vallenbroich D, Ozel M, Vater J et al. (1997) Mechanism of inactivation of enveloped viruses by the biosurfactant surfactin from *Bacillus subtilis*. *Biologicals* 25: 286-297.
- Wei YH, Wang LC, Chen WC et al. (2010) Production and characterization of fengycin by indigenous *Bacillus subtilis* F29-3 originating from a potato farm. *Int. J. Mol. Sci.* 11(1): 4526-4538.

16. Strategie utrzymania ruchu w zakładach produkcyjnych

Maintenance strategies in factories

Grzegorz Piecuch

Katedra Informatyki i Automatyki, Politechnika Rzeszowska

Piecuch Grzegorz: gpiecuch@kia.prz.edu.pl

Słowa kluczowe: predictive maintenance, produkcja, maszyny CNC, uczenie maszynowe, sztuczna inteligencja

Streszczenie

Znanych jest kilka strategii utrzymania ruchu w zakładach produkcyjnych. W większości zakładów stosuje się tzw. strategię reaktywną i prewencyjną. Od wielu lat znana jest również strategia predykcyjna (ang. *PdM – Predictive Maintenance*), która dopiero od pewnego czasu coraz bardziej zyskuje na popularności, a jej zalety coraz częściej dostrzegają przedsiębiorstwa. Polega ona na tym, aby z wyprzedzeniem wykryć awarię maszyny zanim ona nastąpi lub się pogłębi. Pozwala to na wczesną reakcję służb i w konsekwencji duże oszczędności przedsiębiorstwa w kontekście ekonomicznym. Artykuł omawia wady i zalety poszczególnych metod, a w odniesieniu do predykcyjnego utrzymania ruchu przedstawia również sposoby na skuteczną diagnozę stanu maszyny.

1. Wstęp

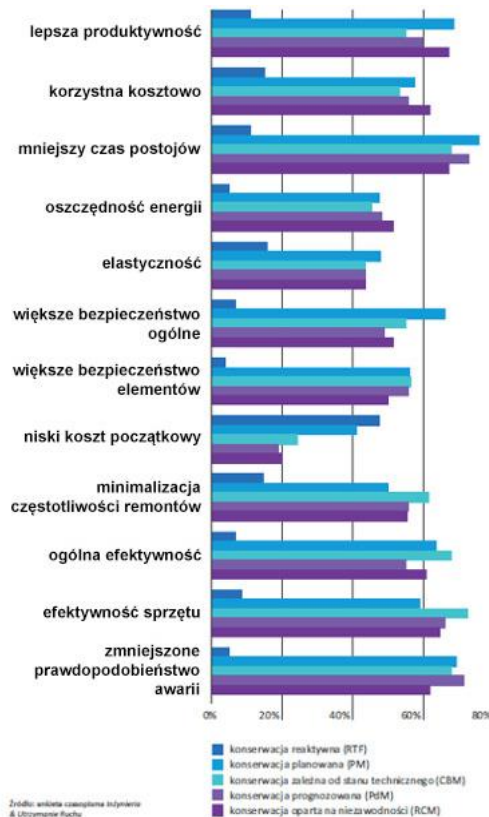
Podczas procesu produkcyjnego w fabryce opiekę nad jego prawidłowością sprawują tzw. Służby Utrzymania Ruchu do których zalicza się przede wszystkim specjalistów takich jak: automatycy, elektrotechnicy, mechanicy i pokrewnych. Do ich zadań należą m.in. zadania z zakresu obsługi, napraw, konserwacji, przeglądy i ogólna dbałość o stan techniczny maszyn. Główny cel zespołu SUR można zatem zdefiniować jako zapewnienie płynności realizacji zleceń produkcyjnych przy wykorzystaniu przyjętej w zakładzie strategii utrzymania ruchu. Wyróżnia się cztery strategie: reaktywną, prewencyjną, predykcyjną i proaktywną (Kaczmarz i in. 2015). W chwili obecnej w polskich zakładach produkcyjnych dominuje podejście reaktywne (51%) czyli najmniej efektywne i optymalne. W ogólnym spojrzeniu zauważalna jest jednak tendencja wzrostowa udziału strategii wyższego rzędu (Abramczyk 2016).

2. Wady i zalety strategii utrzymania ruchu – w poszukiwaniu idealnego podejścia

Każde z wymienionych podejść ma wady i zalety, różnią się one przede wszystkim zastosowaniem. Wśród nich nie można wyróżnić strategii idealnej, ponieważ do drobnych obiektów, mało awaryjnych czy też redundantnych z powodzeniem można zastosować reaktywny model. Ze względów ekonomicznych nie będzie opłacalne zastosowanie do nich drogich predykcyjnych systemów, ponieważ często tego typu system swoją wartością może wielokrotnie przewyższać wartość obiektu. Prewencyjne podejście stosowane z kolei jest do obiektów zużywających się, ale w sposób znany i w miarę przewidywalnym czasie. Służby są w stanie zaplanować przegląd, wymianę podzespołów czy też naprawę. Predykcyjne utrzymanie ruchu przeznaczone jest do obiektów krytycznych czyli strategicznych z punktu widzenia zakładu. Są to obiekty, które są wysoce specjalizowane, drogie, mocno obciążone produkcją, których nie da się szybko zastąpić czy naprawić. Do takich obiektów technicznych zalicza się również maszyny o losowym rozkładzie uszkodzeń i kosztownych przeglądach okresowych, których częstotliwość w przeciwieństwie do strategii prewencyjnej można znacząco ograniczyć poprzez ciągłe monitorowanie stanu maszyny i reagowanie w razie konieczności. Ostatnią ze strategii jest metoda proaktywna polegająca na analizie historii eksploatacji RCFA (ang. *Root Cause Failure Analysis*) oraz FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*). W tym przypadku kluczowym elementem jest analiza przyczyny wystąpienia awarii, tak, aby w przyszłości nie dopuścić do ponownego tego typu zdarzenia. W chwili obecnej w zakładach produkcyjnych dominuje strategia reaktywnego i prewencyjnego utrzymania ruchu, a najmniej rolę odgrywa proaktywne podejście. Celem jest odwrócenie procentowego

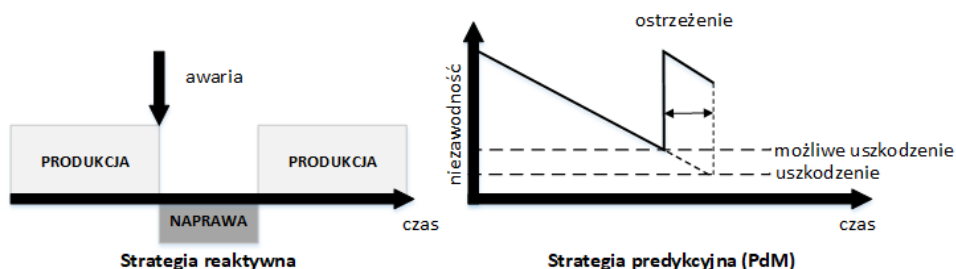
udziału poszczególnych metod tak, aby podejście reaktywne stanowiło zdecydowaną mniejszość a proaktywne większość. Nie należy jednak całkiem marginalizować strategii reaktywnej ze względu na część obiektów w zakładzie, co do których stosowanie bardziej zaawansowanych technik jest zbędne. Na niezawodnościowe utrzymanie ruchu składają się zatem cztery strategie, które razem pozwalają na sprawną reakcję na awarię bądź symptomy anomalii w pracy maszyn.

Wśród Czytelników czasopisma Inżynieria & Utrzymanie Ruchu przeprowadzono ankietę, w której respondenci wskazywali na zalety poszczególnych strategii. Autorka ankiety w swoich badaniach uwzględniła jeszcze dodatkowo konserwację planowaną. W wynikach przedstawionych na (Rys. 1) zauważyć można że nad strategią reaktywną zdecydowaną przewagę mają wszystkie pozostałe. Wynika to z tego, że jeżeli już dojdzie do awarii to często ma to negatywny wpływ na cały proces produkcyjny w zakładzie.



Rys. 1. Główne zalety poszczególnych strategii utrzymania ruchu (Abramczyk 2016).

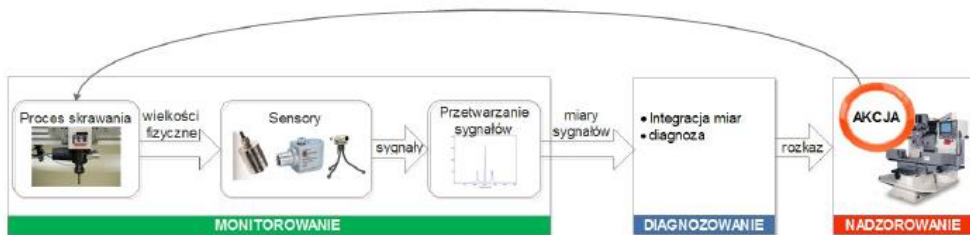
Różnicę w podejściu doskonale obrazują wykresy przedstawione na (Rys. 2).



Rys. 2. Zestawienie strategii reaktywnej i predykcyjnej w jednostce czasu.

3. Metody diagnostyki maszyn

Ze względu na uzasadnioną zwiększoną aktywność zakładów produkcyjnych we wdrażaniu strategii predykcyjnej, w niniejszym rozdziale przedstawione zostaną metody diagnostyki maszyn, na podstawie których podejmowane są decyzje (automatyczne lub przez człowieka) co do dalszej eksploatacji danej maszyny. Monitorowanie elastycznych gniazd produkcyjnych możemy podzielić również ze względu na kontrolę wyłącznie stanu narzędzia – TCM (ang. *Tool Condition Monitoring*) i kontrolę procesu obróbki – PCM (ang. *Process Condition Monitoring*). W obu tych przypadkach diagnozowanie stanu jest tylko częścią całej struktury logicznej, którą przedstawia (Rys. 3).



Rys. 3. Struktura logiczna monitorowania stanu maszyn (Piecuch 2015).

Diagnozować maszyny można na wiele różnych sposobów, używając różnych sprawdzonych metod i czujników. W zależności od użytej metody anomalie w pracy maszyny można wykryć odpowiednio wcześniej. Poniżej (Tab.1.) wyszczególniono metody oceny w kolejności od najsłabszej do najlepszej.

Tab. 1. Metody diagnostyki maszyn.

Metoda oceny	Czas pomiędzy trafną diagnozą a możliwą awarią
Organoleptyczna	Godziny – dni
Wizyjna	Dni – tygodnie
Akustyczna	Dni – tygodnie
Termiczna	Tygodnie
Elektryczna	Tygodnie – miesiące
Drganiowa	Tygodnie – miesiące
Olejowa	Miesiące
Ultradźwiękowa	Miesiące – lata

Najlepszym stosunkiem skuteczności metody do kosztów jej zastosowania są niewątpliwie metody wykorzystujące takie wielkości fizyczne jak drgania i ultradźwięki.

Diagnostykę ultradźwiękową wykorzystać można m.in. do poniższych aplikacji (nota katalogowa czujnika Ultra-Trak 750):

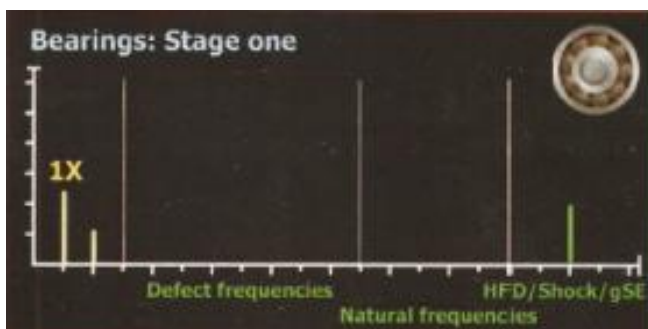
- monitorowanie stanu łożysk,
- szczelność (przecieki w instalacjach wodnych i powietrznych)
- kawitacja,
- detekcja wylądowań niezupełnych, iskrzenie.

Bardziej rozpowszechnioną metodą jest jednak diagnostyka drganiowa, która niesie ze sobą wiele informacji na temat stanu maszyny i jest najdokładniejsza (Żabicki 2011). Za jej pomocą rozpoznać można m.in. (Jemieliński 2002):

- degradację łożysk,
- niewyważenie wrzeciona lub narzędzia,
- nieosiowość,
- luzy mechaniczne,

- uszkodzenia sprzęgieł, pasów napędowych,
- kolizję,
- KSO (Katastroficzne Stępienie Ostrza),
- zużycie narzędzia.

Do oceny stanu maszyny niezbędne jest zarejestrowanie sygnału i późniejsza jego analiza, co jest diagnostyką doraźną (wewnętrzną dokonywaną przez SUR lub zewnętrzną – outsourcing) lub też nieustanne monitorowanie maszyn – diagnostyka ciągła za pomocą systemów informatycznych takich jak: EDOCS, eMaint, Maintenance Connection, Precognize. Bez względu czy jest to diagnostyka doraźna czy ciągła, dysponując sygnałem drganiowym ekspert lub system jest w stanie dokonać szybkiej i trafnej diagnozy. Z sygnału wyznacza się miary statystyczne takie jak RMS, kurtoza i inne, a następnie analizuje się je najczęściej w dziedzinie częstotliwości dokonując szybkiej transformaty Fouriera (FFT – ang. *Fast Fourier Transformate*), rzadziej w dziedzinie czasu i częstotliwościowo-czasowej (analiza falkowa). Charakterystyczne prążki na wykresie FFT jednoznacznie wskazują symptomy awarii i jej przyczyny. Poniżej przedstawiono dla porównania pierwszy (Rys. 4) i piąty etap (Rys. 5) uszkodzenia łożyska (Mobius Institute 2005).



Rys. 4. Widmo FFT dla pierwszego etapu uszkodzenia łożyska (Mobius Institute 2005).



Rys. 5. Widmo FFT dla piątego etapu uszkodzenia łożyska (Mobius Institute 2005).

4. PdM w praktyce – przykłady

Jak przedstawiono powyżej, jedną z najbardziej efektywnych i opłacalnych strategii utrzymania ruchu jest Predictive Maintenance, którego niewątpliwą zaletą jest możliwość wykrycia usterki zanim ona faktycznie wystąpi. Służbom zawczasu daje to spektrum rozwiązań, które mogą zastosować, aby nie dopuścić do większej awarii i przestoju, które niesie za sobą przede wszystkim negatywne ekonomiczne skutki oraz te związane z bezpieczeństwem.

Z analizy literaturowej wynika, że najczęściej w praktyce PdM poddawane są takie obiekty jak: wrzeciona CNC, silniki indukcyjne, turbiny wiatrowe, roboty przemysłowe, transformatory, przekładnie. Najczęściej mierzonym sygnałem są wspomniane we wcześniejszej części artykułu wibracje i emisja akustyczna (w tym ultradźwięki), a ponadto napięcie/natężenie prądu, moc, moment

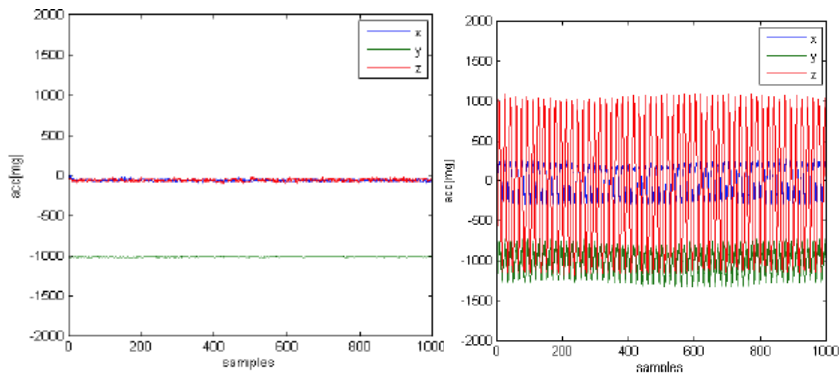
siły itp. Z tych sygnałów wyliczane są takie miary statystyczne jak RMS, odchylenie standardowe, kurtoza, średnia, wariancja, skośność, wartość szczytowa, energia itp. Następnie najczęściej wyznaczane jest FFT. Na końcu tego łańcucha czynności stoi człowiek lub system informatyczny podejmujący ostateczne decyzje co do tego czy aktualny proces należy przerwać i tym samym nie degradować w większym stopniu stanu maszyny, czy też można bez większych przeszkód dokończyć obróbkę, a dopiero po jej zakończeniu przeprowadzić serwis maszyny. W przypadku systemu informatycznego decyzja podejmowana jest de facto poprzez algorytm klasyfikacyjny, który poprzez analizę sygnału jest w stanie stwierdzić czy aktualny jest zbliżony czy też nie, do wzorcowego, którego został wcześniej nauczony. Do najczęściej stosowanych algorytmów klasyfikacyjnych zalicza się: sieci neuronowe, maszyny wektorów wspierających (SVM), metodę k-najbliższych sąsiadów (k-NN) i logikę rozmytą.

W artykule autorzy (Susto i in. 2013) przeprowadzili badania skuteczności rozpoznawania awarii systemu PdM na bazie procesu wytwarzania półprzewodników. System PdM został przetestowany na rzeczywistym zbiorze danych pochodzących z procesu produkcyjnego. Dane zebrano podczas 33 awarii. Obiektem badawczym była głowica (żarnik) maszyny implementującej jony (Rys. 6) do półprzewodnika, która często ulegała przepaleniu. Wykazano ścisły związek przepalenia głowicy z wartością pobieranego prądu. W artykule autorzy przedstawili porównanie pomiędzy systemami PvM a PdM, gdzie każdy z nich działał na bazie dwóch różnych klasyfikatorów: SVM (liniowy) oraz RBF SVM. W rezultacie stwierdzono wyższość systemu PdM nad PvM oraz większą skuteczność z wykorzystaniem algorytmu typu RBF SVM.

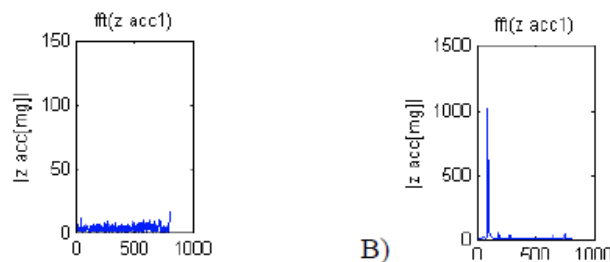


Rys. 6. Głowica (żarnik) maszyny implementującej jony (z lewej – nowy, z prawej – uszkodzony), (Susto GA i in. 2013).

Kolejnym przykładem zastosowania czujników do monitorowania i diagnozowania stanu maszyn jest artykuł (Saponara 2015), w którym przedstawiono strategię PdM w kontekście systemów wysokiego napięcia. Zgodnie z przeprowadzoną analizą FMECA najważniejsze kwestie dotyczące niezawodności systemu energetycznego stanowią anomalie związane z transformatorami trójfazowymi wysokiej mocy. W odniesieniu do metod gdzie zazwyczaj monitorowane są wyłącznie usterki termiczne i elektryczne, autorzy proponują rozproszoną sieć węzłów pomiarowych, w których zastosowano również wibrodiagnostykę. Degradacja mechaniczna jest śledzona za pomocą drgań mierzonych przy pomocy 3-osiowych akcelerometrów o czułości do 0,5 mg. Drgania przetwarzano na widmo FFT w zakresie 100 Hz – 1 kHz. Rys. 7 i 8 przedstawiają porównanie vibracji zarejestrowanych dla transformatora dobrego i uszkodzonego w dziedzinie czasu i częstotliwości.



Rys. 7. Porównanie sygnału przyspieszenia drgań w dziedzinie czasowej dla transformatora dobrego (z lewej) i uszkodzonego (z prawej).



Rys. 8. Porównanie widma FFT dla transformatora dobrego (z lewej) i uszkodzonego (z prawej). Szczególną uwagę należy zwrócić na rząd wielkości przyspieszeń – skala 10-krotnie wyższa dla wykresu B.

5. Podsumowanie

Przyjęta w zakładzie produkcyjnym strategia utrzymania ruchu ma kluczowe znaczenie dla funkcjonowania przedsiębiorstwa. Błędnie przyjęta taktyka postępowania w razie awarii bądź jej symptomami może powodować coraz większą degradację stanu danej maszyny, a w konsekwencji nawet jej poważne uszkodzenie i unieruchomienie. Wiąże się to nie tylko z bezpieczeństwem ludzi pracujących z takim sprzętem, ale również z dużymi stratami finansowymi firmy produkcyjnej, która nie jest w stanie wykonywać zleceń terminowo ze względu na to, że nie ma maszyny zastępczej lub wszystkie pozostałe są obciążone. Przyjęcie odpowiedniej strategii pozwala służbom UR zaplanowanie remontu często z dużym wyprzedzeniem czasowym, co zapewnia płynność produkcją, czyli główny cel zarówno służb jak i całego zakładu.

6. Literatura

- Abramczyk A (2016) Strategie utrzymania ruchu w polskich zakładach. Inżynieria & Utrzymanie Ruchu.
- Jemielniak K (2002) Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
- Kaczmar A, Miałkowski P, Nowicki R (2005) Wspomaganie utrzymania ruchu przez systemy diagnostyki. Polski Przemysł (12/2015): 58-61.
- Mobius Institute (2005) Vibration training quick reference.
- Nota katalogowa czujnika Ultra-Trak 750:
<http://www.uesystems.com/wp-content/uploads/2012/06/UT750.pdf>
- Piecuch G (2015) Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej w diagnozowaniu wrzeciona. Praca magisterska. Politechnika Rzeszowska.

- Saponara S, Fanucci L, Bernardo F i in. (2015) A Network of Vibration Measuring Nodes with Integrated Signal Processing for Predictive Maintenance of High Power Transformers. 2015 IEEE 9th International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP). IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated.
- Susto GA, Schirru A, Pampuri S i in. (2013) A predictive Maintenance System for Integral Type Faults based on Support Vector Machines: an Application to Ion Implantation. 2013 IEEE International Conference of Automation Science and Engineering (CASE): 195-200.
- Żabicki D (2011) Diagnostyka drganiowa stanu łożysk. Inżynieria & Utrzymanie Ruchu.

17. Uniwersalne narzędzie diagnostyczne do detekcji niewyważenia wrzeciona CNC

A universal diagnostic program for detecting imbalance of CNC spindle

Grzegorz Piecuch

Katedra Informatyki i Automatyki, Politechnika Rzeszowska

Grzegorz Piecuch: gpiecuch@kia.prz.edu.pl

Słowa kluczowe: uczenie maszynowe, predictive maintenance, Matlab&Simulink, wibrodiagnostyka, big data, data mining

Streszczenie

Artykuł przedstawia opracowane w środowisku Matlab&Simulink narzędzie diagnostyczne do detekcji niewyważenia wrzeciona CNC oraz innych anomalii występujących podczas pracy maszyny. Narzędzie analizuje sygnały rejestrowane przez czujniki drgań (akcelerometry), a następnie wykorzystuje kilka metod inteligencji obliczeniowej do wskazania stopnia niewyważenia układu. Oprogramowanie charakteryzuje się możliwością porównania skuteczności klasyfikatorów (wykreślanie krzywych ROC, macierzy rozbieżności), jak również ich parametryzowania, dlatego też dzięki temu możliwe jest dobranie odpowiedniej metody dla badanego problemu.

Oprogramowanie w dalszym ciągu jest w fazie rozwoju, a jego przeznaczenie zgodne z kierunkiem obranym przez przemysł. Zakłady produkcyjne coraz częściej wykorzystują strategię PdM (ang. Predictive Maintenance) do przewidywania awarii maszyn, które często spowodowane są nadmiernymi wibracjami. Niewyważenie wrzeciona maszyny CNC jest jednym z niebezpieczeństw, które na bieżąco należy monitorować.

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach dostęp do informacji jest powszechny, każde nowe urządzenie dostarcza nam wiele danych o swoich lub zewnętrznych parametrach. Dzienna ilość danych do przetworzenia powoli zaczyna człowieka przerastać. W przypadku maszyn zlokalizowanych w zakładach produkcyjnych w wielu przypadkach do czynienia mamy z zaawansowaną obróbką np. frezowanie czy toczenie detali. Aby produkt końcowy spełniał wymagania norm i klienta musi być wykonany w ściśle określonej technologii i warunkach, ze ściśle określonego materiału i z odpowiednio dobranymi parametrami obróbki. Nowoczesne maszyny często fabrycznie wyposażone są już przez producenta w różnego rodzaju czujniki, a w przypadku starszych maszyn coraz częściej firmy produkcyjne decydują się takie czujniki doinstalować. Wszystko po to, aby móc kontrolować kondycję maszyny i proces obróbczy. W ten sposób przeważnie zaawansowane systemy mogą śledzić mierzone wielkości fizyczne i ostrzegać operatora o np. zużywającym się narzędziu, postępującym niewyważeniu wrzeciona czy też stopniowej degradacji łożysk. Każdy z ciągłych pomiarów gromadzi mnóstwo danych liczbowych, których człowiek nie jest w stanie zinterpretować. Do tego celu człowiek musi wykorzystać zaawansowane systemy pozwalające na eksplorację danych i wydobycie z nich niezbędnej wiedzy (ang. *data mining*) (Krawiec i Stefanowski 2003).

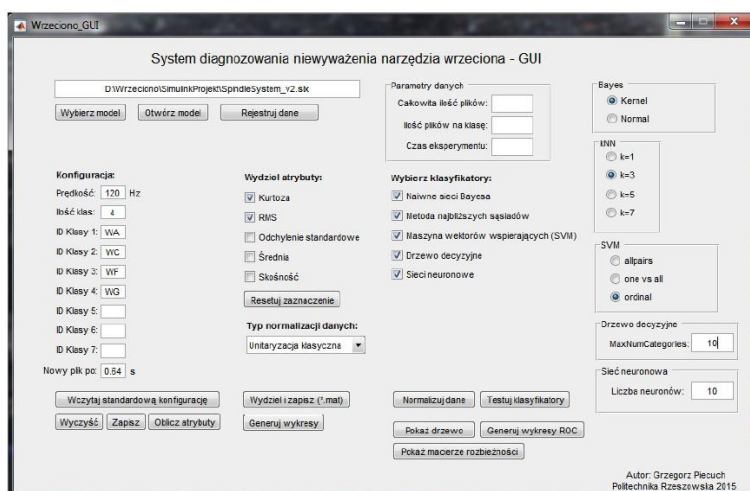
2. Koncepcja oprogramowania

Wedle założeń, opracowywane oprogramowanie powinno służyć do wykrycia nieprawidłowości w działaniu wrzeciona CNC ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska niewyważenia. Oprogramowanie oprócz funkcji diagnozowania powinno służyć również celom badawczym, które w dalszej kolejności pozwoliłyby na opracowanie ostatecznej i możliwie najlepszej wersji, korzystającej wyłącznie z przetestowanych wcześniej algorytmów inteligencji obliczeniowej. Aplikację napisano w pakiecie inżynierskim Matlab&Simulink dodając do niej, dla wygody użytkownika również interfejs graficzny (Rys.1) (Piecuch 2015).

Poniżej wyróżniono kilka najważniejszych funkcjonalności opracowanej aplikacji:

- przystosowanie do problemu wieloklasowego (możliwość określenia maksymalnie 14 klas),
- obliczanie miar statystycznych dla danego sygnału (m.in.: RMS, odchylenie standardowe, kurtoza, skośność)
- przygotowanie danych m.in.: normalizacja, krosvalidacja,
- generacja wykresów w/w miar statystycznych w dziedzinie czasu,
- uczenie i testowanie 5 różnych klasyfikatorów (sieć neuronowa, k-NN, SVM, drzewo decyzyjne, naiwny klasyfikator Bayesa)
- możliwość konfigurowania parametrów algorytmów klasyfikacyjnych,
- generacja wyników macierzy rozbieżności i krzywych ROC dla poszczególnych klasyfikatorów,
- generacja wskaźników oceny klasyfikatorów (wrażliwość, specyficzność, dokładność oraz AUC – pole pod krzywą ROC),
- porównanie klasyfikatorów,
- generacja sieci neuronowej na potrzeby testów w czasie rzeczywistym.

Opracowane oprogramowanie jest na tyle elastyczne, że pozwala testować klasyfikatory nie tylko na podstawie danych dotyczących niewyważenia, ale również za ich pomocą możliwe jest sklasyfikowanie (ang. *Pattern Recognition*) prędkości obrotowej wrzeciona (Piecuch 2017).



Rys.1. Widok głównego okna programu.

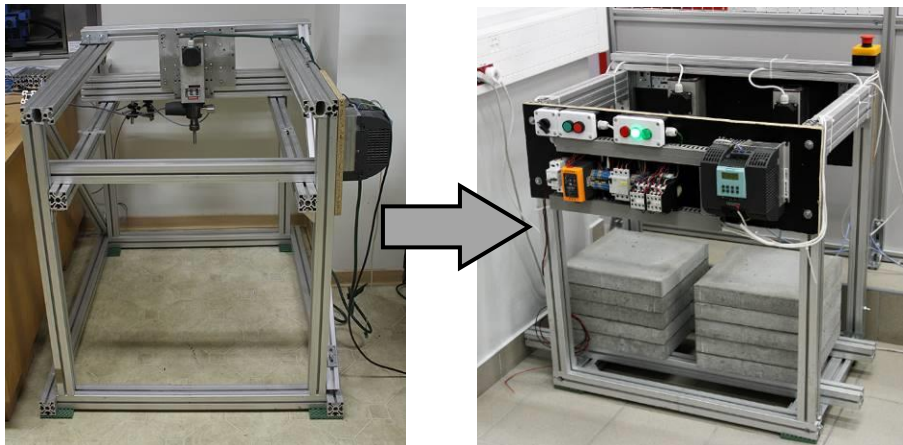
3. Stanowisko testowe

W celu pozyskania danych do testu aplikacji posłużono się rzeczywistą obrabiarką CNC HAAS YF-3YT (Rys. 3) oraz laboratoryjnym obiektem zbudowanym specjalnie do tego celu, wyposażonym w dwa wrzeciona małej mocy Teknomotor C41/47-C-3822-400 o maksymalnej prędkości obrotowej rzędu 24 000 obrotów/min (Rys.2). Jedno z wrzecion jest nowe, drugie zaś jest uszkodzone. Do każdego z nich przymocowano po jednym akcelrometrze Hansford Sensors HS-100ST1000706 zamocowanym w pobliżu łożyska tocznego.

Stanowisko testowe przedstawione w niniejszym artykule przeszło znaczącą ewolucję w stosunku do tego opisanego w (Piecuch 2015; Piecuch 2017)

Pionowe centrum obróbcze Haas charakteryzuje się wysoką mocą (22,4 kW) oraz maksymalną prędkością obrotową wrzeciona 10000 obr/min. Zastosowano akcelerometry Brüel & Kjaer 4507. W obu przypadkach, zarówno dla obrabiarki CNC i laboratoryjnego stanowiska sygnały trafiały na rozproszony system wejść/wyjść firmy Beckhoff wyposażony m.in. w moduły EL3632, skąd trafiały na komputer przemysłowy Beckhoff C6920, a następnie na komputer PC

z uruchomionym w trybie External pakietem Matlab&Simulink, który rejestrował niezbędne dane uczące. Cykl programu wynosił 2 ms, a dane zapisywane były do pliku co 640 ms, co oznacza że w ciągu 640 ms, program wykonywał się 320 razy. Dzięki temu iż moduły EL3632 posiadają funkcję nadpróbkowania (ang. *oversampling*), która ustawiona była na wartość 50 ostatecznie częstotliwość próbkowania wynosiła 25 kHz.



Rys.2. Stanowisko badawcze – przed rozbudową (po lewej) i po rozbudowie (po prawej).



Rys.3. Pionowe centrum obróbcze Haas YF-3YT.

4. Eksperymenty badawcze

Eksperyment badawczy nr 1 przedstawiony w niniejszym artykule polegał na sprawdzeniu czy za pomocą sygnału drganiowego w połączeniu z opracowanym programem istniała możliwość identyfikacji konkretnego wrzeciona przy zróżnicowanym poziomie niewyważenia, które symulowano za pomocą odważników dokręcanych do specjalnego wałka zamocowanego w uchwycie wrzeciona (Rys.4).

Testy przeprowadzono dla obu wrzecion. Dla każdego z nich zbadano poziom vibracji dla 3 przypadków: wałek bez odważnika, wałek z odważnikiem nr 1 (1,31 g), wałek z odważnikiem nr 2 (2,78 g). Wyróżniono dwie klasy: wrzeciono nr 1 – uszkodzone (klasa 1) oraz wrzeciono nr 2 – sprawne (klasa 2). Badania przeprowadzono w kilku krokach:

1. Za pomocą schematu opracowanego w Simulinku zarejestrowano dane uczące, których pliki posiadały specjalny identyfikator np.: WU120_A_xxxx.mat, WS120_B_xxxx.mat, gdzie: WU – wrzeciono uszkodzone, WS – wrzeciono sprawne, 120 – częstotliwość obrotowa

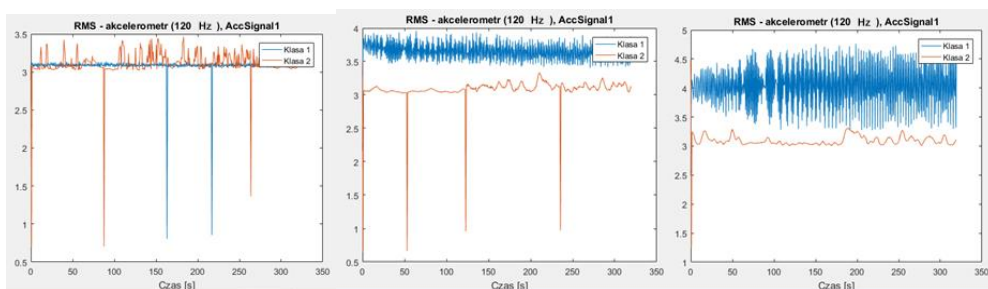
wrzeciona w [Hz], A – wałek bez odważnika, B – odważnik nr 1, xxxx – kolejne pliki danych.

2. Do opracowanej aplikacji wczytano dane podając odpowiednie identyfikatory plików określonych w pkt. 1.
3. Obliczono miary statystyczne zarejestrowanych sygnałów.
4. Wygenerowano wykresy przedstawiające parametr RMS w czasie.
5. Dokonano normalizacji danych metodą unitaryzacji klasycznej.
6. Dokonano 10-krotnej krosvalidacji.
7. Przetestowano dokładność rozróżnienia klas przez dwuwarstwową sztuczną sieć neuronową typu feed-forward z sigmoidalnymi funkcjami przejścia w warstwie ukrytej (10 neuronów) i wyjściowej, a także wsteczną propagacją błędów.
8. Wygenerowano wynikowe macierze rozbieżności (ang. *confusion matrix*).



Rys.4. Wprowadzone niewyważenie – widoczny odważnik wkręcony w wałek zamocowany w wrzecionie.

Dla przeprowadzonych pomiarów za pomocą opracowanej aplikacji wygenerowano poniższe wykresy (Rys.5).



Rys. 5. Wykresy wygenerowane przez program przedstawiają wartość parametru RMS w czasie obliczoną na podstawie przyspieszenia drgań, od lewej: wałek bez odważnika, wałek z odważnikiem nr 1, wałek z odważnikiem nr 2.

Z analizy wykresów wywnioskować można, że możliwe jest rozróżnienie obu wrzecion w każdym z przypadków. Zaobserwować można znaczącą różnicę pomiędzy wrzecionem sprawnym a uszkodzonym, gdzie amplituda sygnału jest zdecydowanie większa.

Testy off-line wygenerowanej sieci neuronowej pozwoliły uzyskać dobre lub doskonałe wyniki (Tazhibi i Bashardoost 2011). Poniżej przedstawiono wynikowe macierze rozbieżności wykreślane przez program (Rys.6).



Rys. 6. Wynikowe macierze rozbieżności przedstawiające wyniki klasyfikacji dwuklasowy problemu rozróżnienia wrzeciona uszkodzonego od sprawnego, od lewej: wałek bez odważnika, wałek z odważnikiem nr 1, wałek z odważnikiem nr 2.

Otrzymane wyniki były spodziewane – w przypadku odważników zamontowanych w wałku problem okazał się być w pełni liniowo-separowalny, zaś w przypadku gdzie w wrzecionie był zamontowany wyłącznie wałek sieć neuronowa miała problem z osiągnięciem bardzo dobrej dokładności. Bazować mogła w dużej mierze wyłącznie na różnicy amplitud sygnałów pomiędzy danymi pomiarowymi.

W niniejszej publikacji demonstrowane są wyłącznie możliwości opracowanego narzędzia, toteż Autor nie skupia się na złożonych wieloklasowych problemach, lecz pokazuje zasadę i kolejne kroki przeprowadzenia tego typu eksperymentów z wykorzystaniem aplikacji. Bardziej złożone eksperymenty przedstawiono w (Salamon 2017), gdzie Autor zmodyfikował i wykorzystał opisywaną aplikację m.in. do zbadania niewyważenia w zależności od położenia uszkodzonej płytki skrawającej w danym słocie głowicy.

Eksperyment badawczy nr 2 realizowany przy użyciu rzeczywistej obrabiarki CNC polegał na sprawdzeniu aktualnej prędkości obrotowej wrzeciona.

W tym celu wyszczególniono 3 klasy:

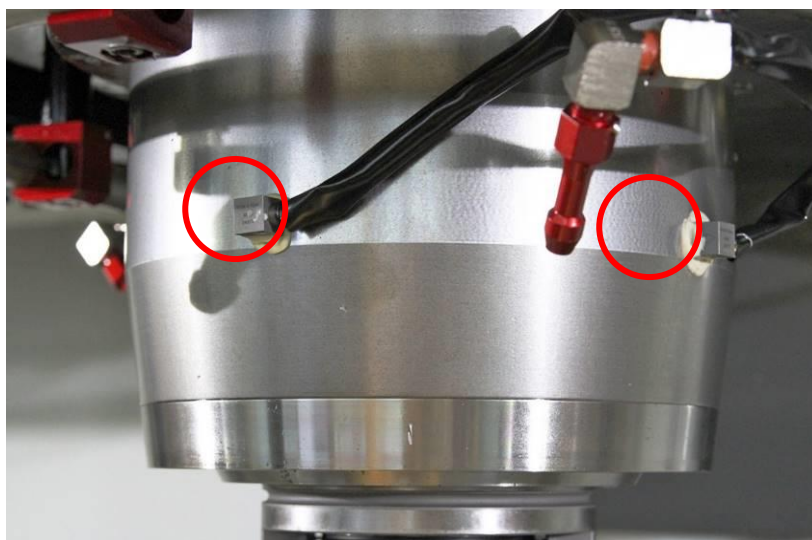
- 1200 obr/min – 20 Hz
- 2400 obr/min – 40 Hz
- 4000 obr/min – 66,(6) Hz

Co ważne, pomiarów dokonywano z zamontowaną w wrzecionie głowicą i nowymi nieuszkodzonymi płytkami skrawającymi (5 szt.). Tym samym nie wprowadzano ewentualnego dodatkowego niewyważenia spowodowanego różnicą wagową płytek (np. mikrouszkodzenia czy stępienie) wynikającą z nierównomiernego zużycia.

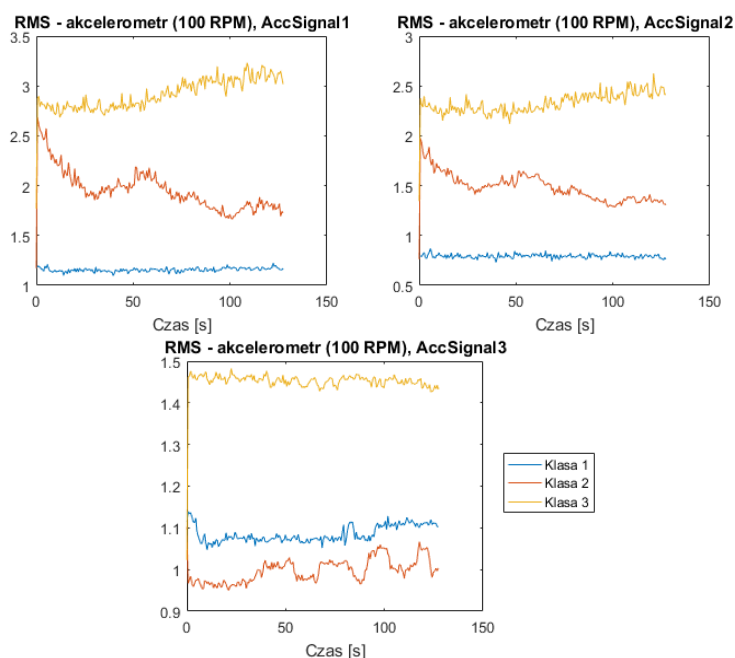
Analogicznie jak w eksperymencie nr 1 zarejestrowano dane uczące przy użyciu trzech akcelerometrów. Ich umiejscowienie zostało pokazane na Rys. 7. Na każdą z klas przypadło 200 plików zawierających łącznie 3,2 mln próbek. W dalszej kolejności wyznaczono parametr RMS oraz wyświetlono przebiegi tej miary statystycznej w funkcji czasu (Rys.8).

Podobnie jak w poprzednim eksperymencie zauważyć można iż klasy są względem siebie rozróżnialne, tym samym dowolny klasyfikator powinien osiągnąć bardzo dobry rezultat. Wygenerowana sieć neuronowa typu feedforward z wsteczną propagacją błędów, 20 neuronami w warstwie ukrytej oraz funkcjami aktywacji tansig (warstwa ukryta) i softmax (warstwa wyjściowa) rozpoznawała każdą z klas ze 100% dokładnością. Struktura sieci neuronowej została pokazana na Rys.9.

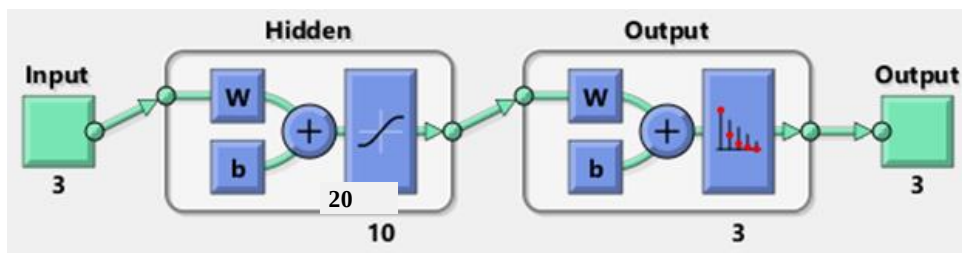
Jedną z możliwości aplikacji jest generowanie wykresu krzywych ROC (Rys.10), których analiza jest jedną z metod oceny jakości klasyfikatora. Im krzywa bardziej zbliżona jest do punktu (0,1), tym klasyfikator jest lepszy.



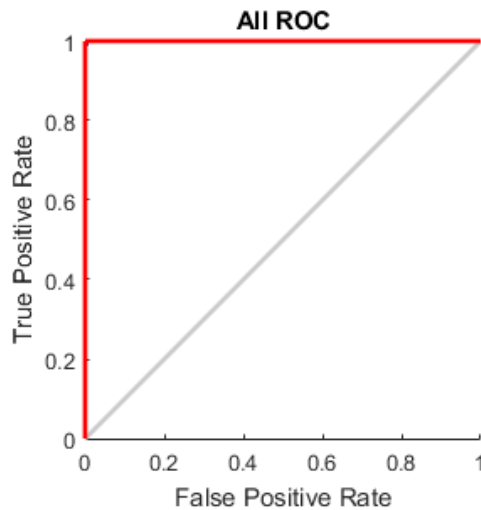
Rys. 8. Umiejscowienie akcelerometrów na wrzecionie obrabiarki CNC. Trzeci z czujników jest niewidoczny, umiejscowiony wewnątrz korpusu w osi Z.



Rys. 8. Miara statystyczna RMS w czasie dla 3 klas prędkości obrotowej wrzeciona zarejestrowana za pomocą 3 akcelerometrów (Salamon 2017).



Rys. 9. Struktura sieci neuronowej użytej w eksperymencie nr 2 (Salamon 2017).



Rys. 10. Wynikowa krzywa ROC dla eksperymentu nr 2 (Salamon 2017).

5. Podsumowanie

W ramach prowadzonych prac zaprojektowano i wykonano aplikację w środowisku Matlab&Simulink, która umożliwia podjęcie badań nad dokładnością klasyfikacji stanów maszyny poprzez różne algorytmy inteligencji obliczeniowej w podejściu klasycznym (z góry określone klasy i znane wcześniej możliwe przypadki) lub w podejściu detekcji nowości (ang. *novelty detection*) gdzie znany jest tylko poprawny stan pracy urządzenia. Oprogramowanie jest na tyle elastyczne, że można poddawać badaniom maszyny nie tylko w kontekście wibrodiagnostyki, ale też innych wielkości fizycznych dla maksymalnie 14 zdefiniowanych klas. Aplikacja nadal będzie rozwijana (w języku Python) pod kątem m.in. uczenia głębokiego w tym m.in. próba sprawdzenia skuteczności rekurencyjnej sieci neuronowej (RNN), badań w dziedzinie częstotliwości, a także jej mobilności, tak aby możliwe było jej zastosowanie w przemyśle np. do ekspertyz.

6. Literatura

- Krawiec K, Stefanowski J (2003) *Uczenie maszynowe i sieci neuronowe*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań.
- Piecuch G (2017) Wrzeciono małej mocy jako obiekt badawczy dla metod CI na przykładzie detekcji prędkości. *Dydaktyka Informatyki* 12(2017): 224-232.
- Piecuch G (2015) *Zastosowanie metod inteligencji obliczeniowej w diagnozowaniu wrzeciona*. Praca magisterska. Politechnika Rzeszowska.
- Salamon K (2017) *Zastosowanie sieci neuronowych typu wielowarstwowy perceptron prosty do detekcji niewyważenia układu wrzeciono-narzędzie obrabiarki CNC*. Praca magisterska. Politechnika Rzeszowska.
- Tazhibi M, Bashardoost N (2011) Kernel Smoothing For ROC Curve And Estimation For Thyroid Stimulating Hormone. *International Journal of Public Health Research Special Issue*.

18. Kierunki rozwoju metod zarządzania jakością w technologii montażu

Development of quality management in assembly technology

Piórkowski Paweł, Borkowski Wojciech

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Wacław Skoczylski, prof. nadzw. PWr

Paweł Piórkowski: pawel.piorkowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: BHP, programy kafeteryjne, Lean Green, 5S

Streszczenie

Artykuł opisuje wybrane kierunki rozwoju metod zarządzania jakością, które są szansą dla przedsiębiorstw zajmujących się montażem na osiągnięcie przewagi konkurencyjnej na rynku. Praca skupia się na zagadnieniach związanych z pracownikiem oraz nowoczesnymi systemami Lean. W artykule wskazano na zagrożenia i szanse związane z wykorzystaniem pracowników w systemach zarządzania jakością. Wskazano, gdzie mogą pojawić się problemy i gdzie zaangażowanie pracowników w procesy jakości jest konieczne. W zakresie filozofii Lean skupiono się natomiast na możliwościach łączenia jej z innymi metodami, technikami i filozofiami, tak aby uzyskać jak najlepsze rezultaty. Szczególną uwagę zwrócono na możliwości łączenia Lean z filozofią Six Sigma oraz technikami związanymi z ochroną środowiska i oszczędną gospodarką zasobami przedsiębiorstwa.

W pracy opisano również zagadnienia związane z psychologią i zadowoleniem pracownika z wykonywanej pracy. Jest to rzadko wykorzystywany aspekt poprawienia rezultatów pracy firm montażowych, który może niewielkim kosztem pomóc osiągnąć wzrost wydajności i efektywności montażu. Rola pracownika w kontekście metod zarządzania jakością jest niezwykle ważna, a świadomość tej roli w przedsiębiorstwach wciąż pozostawia wiele do życzenia.

1. Wstęp

Stosowanie metod i technik zarządzania jakością stało się już w polskich firmach montażowych codziennością. Większość z nich ma wprowadzone systemy zarządzania jakością, które są na bieżąco audytowane. Wiele z firm korzysta z dobrodziejstw filozofii, takich jak Lean, Six Sigma, czy Total Quality Management. Coś, co kilkanaście lat temu zapewniało przewagę nad konkurencją stało się powoli koniecznością. W związku z tym konieczne stało się odnalezienie nowych obszarów, które pozwolą wpłynąć pozytywnie na wyniki przedsiębiorstwa. Artykuł opisuje wybrane obszary, w których taką przewagę konkurencyjną można osiągnąć.

Szczególnie niedocenianym kierunkiem rozwoju firm stają się zagadnienia związane z pracownikiem. Wprowadzane metody zarządzania jakością nie wprost skupiają się na pracownikach, a to przecież od nich bardzo często zależy sukces wdrożenia poszczególnych metod i poziom konkurencyjności przedsiębiorstwa. Firmy montażowe często zapominają, że oprócz dłoni pracownika zatrudniają również jego umysł. Ponadto nie zdają sobie sprawy z tego, że to co dzieje się w głowie pracownika przekłada się także na jakość jego pracy fizycznej. W ostatnim czasie pojawił się zatem szereg metod, które mają na celu poprawienie jakości pracy pracownika poprzez zwiększenie jego motywacji, zmniejszenie poziomu stresu oraz wzrost zadowolenia z pracy. Zauważono, że pracownik doświadczony, zadowolony, zauważany oraz odpowiednio doceniony jest dla firmy dużo cenniejszy niż nawet najtańszy pracownik zatrudniany na krótki czas.

Kolejnym kierunkiem rozwoju, który został opisany w artykule są zagadnienia związane z utrzymywaniem i rozwijaniem aktualnie stosowanych w firmach metod zarządzania jakością ze szczególnym uwzględnieniem filozofii Lean i jednej z jej bazowych metod, czyli 5S. Skupianie się na wprowadzaniu kolejnych metod zarządzania jakością w firmie skutkuje często zaniedbywaniem metod już wprowadzonych. Ciągłe doskonalenie się jest niezbędnym elementem zarządzania jakością w firmie. W oparciu o filozofię Kaizen zauważa się pewne trendy związane z doskonaleniem filozofii

Lean. Szczupłe zarządzanie jest na tyle elastyczne i uniwersalne, że może być stosowane w każdej części przedsiębiorstwa i wzbogacane o nowe metody i techniki.

Jednym z niedocenianych obszarów, w których można pokusić się o poprawienie możliwości działań przedsiębiorstwa jest obszar związany ze szkoleniami BHP. Aktualnie szkolenia te mają niewielki wpływ na to, jakie zadanie podejmują pracownicy oraz w jaki sposób je wykonują. Poprawne zaplanowanie szkoleń BHP, uświadomienie pracownikom ich ważności oraz przekonanie do korzystania z wiedzy z zakresu ergonomii, bezpieczeństwa i higieny pracy jest jednym z najbardziej wymagających usprawnień obszarów działania przedsiębiorstwa.

2. Przegląd literatury

2.1 Programy kafeteryjne – wpływ na psychikę pracownika

Jednym z ważnych zadań stojących przed kadrą zarządzającą montażem jest dbanie o zadowolenie pracownika, gdyż przekłada się ono bezpośrednio na jakość wykonywanej przez niego pracy. Dobrym sposobem na docenienie pracownika są tak zwane programy kafeteryjne, które to pozwalają pracownikowi poczuć się docenionym i ważnym w danym przedsiębiorstwie. Świadczenia dla pracowników powinny być ustalone indywidualnie, w zależności od ich potrzeb. Nie muszą to być dodatki z górnej półki, takie jak służbowy samochód, czy telefon, ale nawet możliwość chodzenia na basen, siłownię, czy kręgielnię, będzie miłym dodatkiem do pensji i sprawi, że satysfakcja pracownika z wykonywanych zadań wzrośnie. Warto, aby tak skonstruować system świadczeń, by pracownik miał możliwość wyboru, a oferta dla niego była indywidualna i różniła się od zakresu świadczeń innych pracowników. Takie poczucie specjalnego traktowania również powoduje wzrost motywacji pracownika w zakresie wykonywanych obowiązków.

Stosowanie programów kafeteryjnych wiąże się z szeregiem zalet wśród których warto wymienić wzrost lojalności pracownika wobec firmy. Jeżeli pracownik odczuwa, że firma o niego dba, to będzie mniej chętny do tego by zmieniać pracę, co sprawia, że firmie łatwiej będzie zatrzymywać specjalistów i najlepszych pracowników. Programy kafeteryjne poprawiają też wizerunek firmy na zewnątrz i ułatwiają pozyskiwanie nowych specjalistów, dla których dodatkowe korzyści z pracy są bardzo istotnym czynnikiem. Dzięki dodatkowym bonusom, motywacja pracowników do pracy nie spadnie po początkowym okresie, tylko powinna utrzymywać się na stabilnym poziomie.

Nie tylko firma, ale także pracownicy odczuwają korzyści z programów kafeteryjnych. Indywidualne traktowanie i dodatkowe wynagrodzenie w różnych formach sprawia, że pracownicy czują się naprawdę ważną częścią przedsiębiorstwa, rośnie ich poczucie własnej wartości i maleje stres wiążący się z wykonywaniem przez nich obowiązków. Dzięki temu, że sami mogą decydować, jakie świadczenia chcą otrzymać, mogą uzyskać dokładnie, to czego potrzebują, co skutkuje rosnącą satysfakcją z pracy w przedsiębiorstwie. Częstym błędem jest niewłaściwe nagradzanie pracowników. Jeżeli pracownik jest młodym mężem z małym dzieckiem i ma zaciągnięty kredyt hipoteczny, znacznie chętniej przyjmie od firmy nagrodę w postaci spłacenia jednej raty kredytu niż w postaci karnetu na kręgielnię lub weekendowego wyjazdu na narty. Dzięki włączeniu pracownika w proces nagradzania, można uniknąć sytuacji, w których zamiast dodatkowo zmotywować pracownika, powodujemy u niego rosnącą frustrację.

W nagradzaniu pracowników należy się w szczególności opierać na psychologii motywacji. Nie wszystkie nagrody motywują pracownika w ten sam sposób, a niektóre przynoszą wręcz odwrotny skutek. Mimo tego, że fakty te znane są już od kilkudziesięciu lat, wciąż w wielu firmach nie stosuje się zalet systemu motywowania pracowników. Należy także pamiętać o tym, że różne grupy pracowników oczekują różnych nagród (Reykowski 1970). Pracownikom niewykwalifikowanym zależy głównie na stabilności zatrudnienia i rosnących zarobkach, pracownikom wykwalifikowanym na wzroście prestiżu i szansach awansu, natomiast grupie pracowników posiadających dzieci i rodziny zależy głównie na poczuciu bezpieczeństwa.

Coraz częstszą koniecznością staje się też monitorowanie stanu psychicznego pracownika. Prace montażowe często wykonywane są w pewnych powtarzalnych ciągach, co skutkuje dość dużym obciążeniem psychicznym pracownika. Aby temu przeciwdziałać należy stosować techniki, które

zmniejszają u pracownika stres. Zgodnie z tzw. modelem witaminowym (Broniewska 2010) wyróżnia się trzy czynniki, które można dawkować pracownikowi bez ograniczeń: dostępność środków finansowych, fizyczne bezpieczeństwo, wysoki status społeczny oraz sześć czynników, których pracownik powinien doświadczać w ograniczonym zakresie: możliwość sprawowania kontroli, możliwość wykorzystania umiejętności, cele narzucane z zewnątrz, możliwość nawiązywania kontaktów interpersonalnych, różnorodność, przejrzystość środowiska.

2.2 Badanie opinii pracowników

Ważnym elementem w kształtowaniu dobrych relacji z pracownikiem jest częsty dialog i badanie opinii pracowników. Pracownicy jako pierwsi często zauważają problemy w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa, kłopoty w przywództwie, rozmycie odpowiedzialności, czy też brak działania metod zarządzania jakością. Warto zatem korzystać z ich spostrzeżeń i dowiedzieć się, co mają do powiedzenia. Częste pytanie pracowników o opinię sprawia, że czują się ważnym elementem kultury przedsiębiorstwa, a ich zdanie jest bardzo istotne. Porozumienie na linii kadra zarządzająca – pracownicy na linii montażowej jest bardzo ważne, gdyż poczucie niezrozumienia znacząco obniża efektywność monterów. Według badań (Szostek 2009) około $\frac{3}{4}$ pracowników uważa, że menedżerowie nie rozpatrują ich skarg, nie postępują zgodnie z deklaracjami, nie dotrzymują obietnic i nie dają im możliwości rozwoju. Ponadto pracownicy wskazują na fakt, że ich wysoka wydajność nie jest doceniana, a niektórzy podwładni są faworyzowani. Problemy te skutkują rosnącą frustracją pracowników.

Wiele firm nie przeprowadza badań opinii pracowników w ogóle, choć możliwość dzielenia się opiniami przez pracowników wpływa pozytywnie na ich zadowolenie z pracy, co przekłada się później na ich lepszą produktywność. Wśród podstawowych przyczyn niewykonywania takich badań wskazuje się (Szostek 2010)

- brak czasu,
- brak osób odpowiedzialnych za przeprowadzenie badań,
- wysoki koszt badań,
- nieprzydatność badań,
- niewiedza o takiej metodzie zarządzania jakością

Tylko w niewielkim procencie największych firm w Polsce przeprowadza się badania opinii pracowników. W małych firmach takich badań praktycznie nie wykonuje się. Traci się w ten sposób możliwości uzyskania ważnych informacji na temat działania całego systemu przedsiębiorstwa i możliwość reagowania na negatywne sytuacje i problemy zgłaszane przez pracowników niższego szczebla. Przeprowadzenie badania opinii pracowników przynajmniej raz w roku powinno znacznie poprawić efektywność firmy montażowej.

2.3 Utrzymanie systemów zarządzania jakością na przykładzie 5S

Wprowadzenie systemów zarządzania jakością jest sprawą trudną i kosztowną. Okazuje się jednak, że jeszcze trudniejsze jest utrzymanie systemu zarządzania jakością na wysokim poziomie. Japońska filozofia Kaizen, czyli ciągłe doskonalenie się, wymaga by każdy proces stawał się z czasem coraz lepszy. W rzeczywistości polskie firmy mają ogromne problemy nie tylko z ulepszaniem swoich systemów zarządzania jakością, ale nawet z ustabilizowaniem ich na pewnym poziomie. Jedną z pierwszych i podstawowych metod zarządzania jakością, jaka powinna być wprowadzona w systemie montażowym jest metoda 5S. W praktyce, utrzymanie tego systemu często bywa kłopotliwe, co pokazują badania (tab.1)

Najlepsze wyniki systemu 5S udało się uzyskać podczas trzeciego audytu, następnie w firmie zanotowano spadek efektywności systemu 5S. Dopiero przy dwóch ostatnich audytach uzyskano wynik zbliżony do tego ze stanu początkowego. Jeżeli zapomina się o ciągłym doskonaleniu danego systemu, w efekcie system ten zaczyna działać coraz gorzej i nie pozwala na uzyskanie odpowiedniego poziomu jakości. Celem firm powinno być nie tylko wprowadzanie kolejnych metod zarządzania jakością, ale przede wszystkim kontrolowanie i badanie, w jaki sposób działają te, aktualnie już wprowadzone i czy nie wymagają audytu lub poważnych zmian.

Problemy z utrzymywaniem systemów zarządzania jakością są ściśle określone i wynikają głównie z rozmycia odpowiedzialności. Pracownicy często zapominają lub nie wiedzą, kto

odpowiada za dane obowiązki związane z metodą zarządzania jakością i z tego powodu zadania te są wykonywane źle lub nie są wykonywane w ogóle. Do innych przyczyn takiego stanu rzeczy zalicza się również (Predoń i Raszka 2010):

- problemy relacji międzyludzkich,
- problemy komunikacji,
- problemy organizacji pracy,
- brak standardów komunikacji i kompetencji,
- brak procedur generowania i przepływu dokumentacji systemu

Tab. 1. Wyniki szesnastu kolejnych auditów systemu 5-S w obszarze produkcyjnym (Niewczas 2010).

Audit	Wynik w [%]
1	82,1
2	82,1
3	98,2
4	96,4
5	80,4
6	85,7
7	78,6
8	73,2
9	60,7
10	76,8
11	85,7
12	83,9
13	83,9
14	76,8
15	94,6
16	96,4

2.4 Lean Six Sigma

Interesującą koncepcją związaną z filozofią zarządzania jakością jest łączenie różnych filozofii ze sobą i pewnego rodzaju hybrydyzacja metod i modeli zarządzania firmą. Jednym z takich pomysłów jest łączenie filozofii Lean z filozofią Six Sigma. Szczupłe zarządzanie z jednej strony i ograniczanie braków z drugiej strony może przynieść zaskakująco dobre efekty. Barierą dla wprowadzania tego typu hybryd jest jednak wysoki koszt i długi czas oczekiwania na końcowy efekt. Mimo wszystko wprowadzanie tych filozofii jednocześnie powinno być szybsze i tańsze niż wprowadzanie tych filozofii osobno. Do głównych zalet takiej hybrydyzacji należą (Lisiecka i Burka 2011)

- zwiększenie tempa wdrożenia systemu,
- możliwość wdrożenia większej liczby projektów,
- wzrost dochodów organizacji w krótkim czasie,
- szybsza adaptacja do zewnętrznych wydarzeń,
- mniejsza ilość energii poświęcona przez najwyższe kierownictwo.

Coraz bardziej modne stają się również rozszerzanie filozofii Lean o kolejne działy i elementy pracy przedsiębiorstwa. Stąd też pojawiły się kolejne dodatki do Lean, między innymi Lean Office, Lean and Energy oraz Lean and Environment. Lean Office dotyczy szczupłego zarządzania biurem i unikaniu marnotrawstwa podczas pracy nad rozdzielaniem i ewidencjonowaniem zadań, pracami księgowymi, czy analizą dokumentacji montażowej i technologicznej. Ograniczenie marnotrawstwa w biurze skutkuje ograniczeniem marnotrawstwa również na linii montażowej. Dzięki generowaniu mniejszej liczby dokumentów i szybszemu ich przepływowi, czas docierania papierowych informacji na linię montażową maleje i ogranicza się

liczbę przestojów. Lean Office stało się też początkiem metod opartych o mapowanie strumienia wartości w szczupłym przedsiębiorstwie, które ma za zadanie określić straty nie tylko w samych procesach i działach firmy, ale w szczególności pomiędzy nimi.

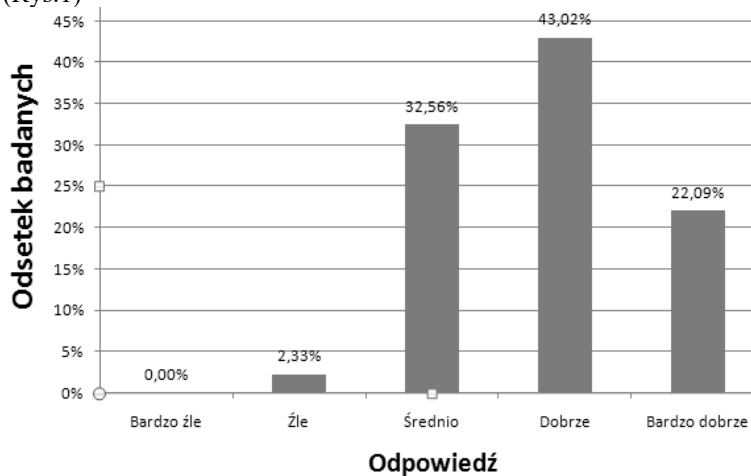
Lean Energy oraz Lean Environment są z kolei dwoma fundamentami filozofii Lean Green, która wykorzystuje szczupłe zarządzanie do eliminacji marnotrawstwa zasobów z myślą o środowisku naturalnym. Filozofia ta dotyczy tych obszarów, w których następuje zużycie zasobów przedsiębiorstwa (narzędzi, części materiałów, energii elektrycznej). Przy zastosowaniu Lean Green można znacząco zwiększyć powtórne wykorzystanie tych samych środków w różnych procesach montażowych oraz zaoszczędzić środki, które wydawane były na zakup energii elektrycznej, czy też nowych zasobów. Dzięki filozofii Lean Green można także uzyskać dodatkowe dofinansowanie ze środków na wspieranie ekologicznych rozwiązań, co również daje dodatkowe zyski przedsiębiorstwu.

2.5 Zarządzanie jakością, a BHP

Zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy to działanie nastawione na zredukowanie ryzyka utraty życia i zdrowia w pracy do akceptowalnego poziomu granicznego, a następnie utrzymanie go na takim samym lub niższym poziomie (Krzemień 2004). Definicja ta nie oddaje, jaki potencjał drzemie w metodach związanych z bezpieczeństwem i higieną pracy. Dbanie o zdrowie pracownika jest kluczowym elementem składowym jego efektywności, a odpowiednia ergonomia, która wchodzi w skład metod BHP pozwala pracownikowi dłużej cieszyć się dobrym zdrowiem i samopoczuciem, a w efekcie również lepszą efektywnością. Aby prawidłowo wprowadzić system BHP w przedsiębiorstwie montażowym należy zwrócić szczególną uwagę na (Pawłowska 2002)

- analizę ryzyka,
- ocenę ryzyka,
- regularne szkolenie pracowników w zakresie BHP,
- identyfikację prac szczególnie niebezpiecznych,
- opracowanie instrukcji pozwalających bezpiecznie wykonywać zadania,
- dokonanie zapisów dotyczących BHP,
- monitorowanie środowiska pracy,
- przygotowanie organizacji na możliwość zaistnienia wypadku.

Spełnienie wyżej wymienionych warunków pozwala stworzyć jasny i pełny obraz tego, w jaki sposób pracownik ma wykonywać swoje obowiązki. W rzeczywistości jednak pracownicy nie do końca rozumieją potrzebę istnienia BHP w firmie i nie wiedzą, do czego takie szkolenia są im potrzebne. Badania wskazują, że zaledwie 22% pracowników bardzo dobrze ocenia przydatność takich szkoleń (Rys.1)



Rys. 1. Ocena przydatności i możliwości praktycznego wykorzystania informacji dotyczących BHP (Lotko 2010)

Wielu pracowników nie rozumie także potrzeby stosowania takich szkoleń i uważa, że nie wynosi z nich potrzebnych informacji. Takie podejście może mieć opłakane skutki, gdyż niezrozumienie podstawowych zasad BHP oznacza, że pracownik nie wie, jak w sposób prawidłowy i bezpieczny dla siebie wykonać dane zadanie, a co za tym idzie rośnie ryzyko wystąpienia wypadku w pracy i pojawienia się uszczerbku na zdrowiu (Piórkowski 2011). Częste wypadki przy pracy wpływają na poczucie bezpieczeństwa pracowników, wymianę kadr i większy stres w pracy, co niekorzystnie wpływa na jakość gotowych produktów.

3. Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowane w artykule metody, techniki i pomysły na to, by usprawnić pracę firm zajmujących się montażem, to jedynie wycinek z całej palety pomysłów i rozwiązań, które mogą być zastosowane we współczesnym przedsiębiorstwie. Wybrane przez autora metody miały na celu jedynie pokazać pewne kierunki myślenia i trendy, wokół których powinno skupiać się współczesne zarządzanie jakością. Malejące bezrobocie oraz pojawiający się rynek zorientowany na pracownika w pewien sposób wymuszają dostosowanie metod zarządzania jakością do nowej sytuacji i postawienie pracownika w centrum wydarzeń i działań związanych z procesem montażu. Celem firmy powinno być utrzymywanie najlepszych pracowników, a jednocześnie dbanie o to, by ich efektywność pozostawała na niezmiennie wysokim poziomie. Pracownik w centrum uwagi, doceniany indywidualnie i w pełni wykorzystywany jest bezcennym zasobem przedsiębiorstwa i pozwala na polepszenie jakości pracy firmy.

Drugim obszarem działań związanych z pracownikami jest zachęcenie ich do stosowania metod zarządzania jakością w sposób systematyczny i trwały oraz do wykorzystywania wiedzy nabytej podczas szkoleń z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy. Pracownik, który wie jak zachować bezpieczeństwo na stanowisku pracy, to pracownik, który rzadziej ulega wypadkom w pracy. Pracownik, który zna podstawowe zasady ergonomii, to pracownik, który wykonuje swoją pracę w sposób efektywny i zdrowy dla swojego organizmu, dlatego warto aby czas poświęcony na szkolenia BHP nie był czasem straconym.

W najbliższej przyszłości nie tylko pracownicy będą wymagali innego podejścia, ale również filozofie i metody zarządzania jakością. Wskazane w artykule kierunki rozwoju filozofii Lean, której początki odnajdujemy w latach 90-tych są naturalną konsekwencją tworzenia coraz szczuplejszych i bardziej efektywnych działów w przedsiębiorstwach. Możliwość łatwego łączenia z innymi metodami i duża uniwersalność sprawiają, że prawdopodobnie Lean Management będzie głównym kierunkiem zmian w zarządzaniu przedsiębiorstwami montażowymi.

4. Literatura

- Broniewska M (2010) "Witaminy" dobrej i złej pracy, czyli o koncepcji motywacji P. Warra
Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa R.2010 nr 4 3-9
- Krzemień E (2004) Zintegrowane zarządzanie. Aspekty towaroznawcze. Jakość, środowisko, technologia, bezpieczeństwo.
- Lisiecka K, Burka I (2011) Koncepcja LEAN MANAGEMENT i kierunki jej rozwoju, „Problemy jakości” Nr 6, 18-25
- Lotko M (2010) Jakość informacji w zarządzaniu BHP „Problemy jakości” nr 12 43-45
- Niewczas M. (2010) Audit systemu 5-S, „Problemy jakości”, Kwiecień R42 nr 4, 21-26
- Pawłowska Z (2002) System zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy w przedsiębiorstwie
- Piórkowski P (2011) Problemy jakości montażu w aspekcie konkurencyjności wyrobu . Praca inżynierska.
- Predon B, Raszka A (2010) Dlaczego program 5-S czasami nie działa?, „Problemy jakości” R42, nr 5, 12-16
- Reykowski J (1970) Z zagadnień psychologii motywacji.
- Szostek D (2009) Badanie opinii pracowników jako jedno z narzędzi coachingu menedżerskiego, „Problemy jakości” R.41 nr 8 22-25
- Szostek D (2010) Opinie pracownicze, „Problemy jakości” R42 nr 3 24-26

19. Możliwości efektywnego wykorzystania pracowników w technologii montażu ręcznego

The possibility of effective use of employees in manual assembly technology

Piórkowski Paweł, Borkowski Wojciech

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Waław Skoczyński, prof. nadzw. PWr

Paweł Piórkowski: pawel.piorowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: BHP, marnotrawstwo, test MAST, analiza MTM

Streszczenie:

Artykuł opisuje wybrane aspekty związane ze zwiększeniem efektywności pracowników zajmujących się montażem ręcznym. Nowoczesne firmy zajmujące się montażem to często ogromne przedsiębiorstwa, zatrudniające setki pracowników, odpowiedzialnych za dziesiątki różnych zadań. Coraz większym wyzwaniem staje się badanie i monitorowanie ich efektywności, wyznaczanie im odpowiednich zadań oraz odpowiednie kontrolowanie ich aktualnych działań. Współczesna nauka pokazuje, że efektywność pracownika jest wypadkową dziesiątek różnych czynników, z których na część nie mamy wpływu. W niniejszej pracy zostaną opisane możliwości wpływania na efektywność pracowników, sposoby na korzystanie z pracowników w czasie, kiedy charakteryzują się największą efektywnością oraz zagadnienia związane z marnotrawstwem tego, co pracownik może zaoferować firmie montażowej.

W tekście pojawiają się informacje na temat wpływu BHP na efektywność pracownika, zostanie przedstawiony test zdolności manualnych MAST, który pozwala kierować pracownikami do odpowiednich zadań oraz analizy: MTM i chronometrażu, mające na celu monitorowanie efektywności pracownika i ocenę podejmowanych przez niego działań.

1. Wstęp

Aktualnie w Polsce mamy do czynienia z rosnącym bezrobociem, które powoduje, że nisko wykwalifikowani pracownicy, a tacy najczęściej znajdują zatrudnienie na liniach montażowych, mają do wyboru wiele ofert pracy. Maleje konkurencja pomiędzy pracownikami, co może odbić się negatywnie na efektywności pracowników. Firmy zajmujące się montażem często nie mają dużego wyboru, w kwestii zatrudniania nowych osób, co powoduje, że coraz większą rolę przykłada się do maksymalizowania wykorzystania pracowników, których się posiada. Możliwości zwiększania efektywności pracowników są często niedoceniane, a często wystarczy tylko kilka małych zmian w zarządzaniu przedsiębiorstwem, aby uzyskać lepszą produktywność firmy bez inwestycji w infrastrukturę, czy metody zarządzania jakością.

Jednym z częstych powodów spadku efektywności pracowników jest ich nadmierne obciążenie fizyczne oraz psychiczne. Pracownik znużony oraz zmęczony nie charakteryzuje się wysoką efektywnością. Przez 8 godzin zmiany nie ma możliwości, by utrzymać produktywność pracownika na jednym i takim samym poziomie, ale istnieją sposoby niwelowania wpływu zmęczenia na jego efektywność, poprzez odpowiednie zaplanowanie czynności montażowych z uwzględnieniem obciążenia pracownika.

Innym sposobem na poprawę efektywności pracownika może być przydzielanie go do zadań, w których radzi sobie najlepiej. Do tego celu można wykorzystać istniejące już metody analizy montażu. Należą do nich metoda analizy MTM oraz metoda analizy chronometrażu. W analizie MTM istnieje zbiór ruchów podstawowych, na podstawie których możemy ocenić, czy pracownik radzi sobie z ich wykonywaniem lepiej niż przeciętnie, czy też gorzej. W analizie chronometrażu możemy na bieżąco monitorować, to jak pracownik radzi sobie z aktualnie wykonywanymi zadaniami, z uwzględnieniem wielu różnych czynników. Istnieje również zbiór testów manualnych, który może być pomocny w ustaleniu mocnych stron naszego pracownika.

Zwiększenie efektywności pracownika można także uzyskać, analizując wszystkie czynności, jakie ma do wykonania podczas swojej zmiany i określając, czy każda z nich jest niezbędna do wykonania. Często wystarczy jedynie usunąć z zakresu obowiązków pracownika czynności, które są zwykłym marnotrawstwem czasu, a przez to zwiększyć udział w całkowitym czasie pracy, czynności, które dodają wartość do gotowego produktu. Marnotrawstwo to w tej chwili jedna z głównych przyczyn relatywnie niskiej efektywności pracowników w firmach zajmujących się montażem.

2. Przegląd literatury

2.1 Marnotrawstwo

Literatura (Damrath 2012) wskazuje, że pod pojęciem marnotrawstwa mogą kryć się tak naprawdę trzy pojęcia, określone trzema japońskimi słowami: muda, mura i muri, które oznaczają odpowiednio: marnotrawstwo, nieregularność oraz nadmierne obciążenie. W zarządzaniu jakością główną uwagę poświęca się pojęciu muda. Również w montażu jest to jeden z kluczowych aspektów odpowiadający za efektywność przedsiębiorstwa. Marnotrawstwo objawia się na wiele sposobów, a część z nich dotyczy bezpośrednio pracowników.

Do rodzajów marnotrawstwa związanych z pracownikiem można zaliczyć między innymi: utraconą kreatywność, poprawianie błędów, zbędne przemieszczanie materiału, nadmierny ruch oraz oczekiwanie (Ohno 2008). Utracona kreatywność to ten z rodzajów marnotrawstwa, o którym pamięta się najrzadziej, a przecież pracownicy bardzo często wykazują inicjatywy, bądź są autorami świetnych pomysłów, które niejednokrotnie poprawiłyby pracę innych osób i efektywność procesu montażu w firmie. Niestety, w przedsiębiorstwach spotykają się oni z barierą ze strony kierownictwa, przez co ich motywacja do proponowania usprawnień w montażu spada. W efekcie przekłada się to na brak zapobiegania innym rodzajom marnotrawstwa. Poprawianie błędów to marnotrawstwo szczególnie dla firmy kosztowne. Skala strat firmy jest nieporównywalnie mniejsza, gdy błąd zauważy się podczas montażu dwóch pierwszych części, niż wtedy, gdy usterka ujawniona zostanie dopiero u klienta końcowego. Koszty transportu, reklamacji, demontażu i szukania usterki, a często wymiany przedmiotu na nowy bywają ogromne. W związku z tym trzeba zwrócić szczególną uwagę na możliwości zapobiegania błędom oraz wyciągania wniosków z każdej kolejnej usterki, która pojawia się w firmie. Zbędne przemieszczanie materiału, często połączone z nadmiernym ruchem, powoduje straty związane z wykonywaniem czynności, które nie dają wartości dodanej. Niestety, zdarza się, że źródłem tego marnotrawstwa jest sam pracownik, który na przykład woli trzy razy przynieść po jednej części, by w tym czasie sobie odpocząć, niż pokonać trasę pomiędzy miejscem montażu, a magazynem części tylko jeden raz. Wykrycie tego marnotrawstwa powinno być powiązane z ciągłą obserwacją zarówno montera, jak i procesu montażu. Warto w tym celu posłużyć się jedną z metod zarządzania jakością, na przykład mapowaniem strumienia wartości. Oczekiwanie to marnotrawstwo, które jest kosztowne, ale zarazem najłatwiejsze do zdiagnozowania. Jeżeli pracownik nic nie robi, to jego przełożony bardzo szybko potrafi to zauważyć. W takiej sytuacji wystarczy przydzielić pracownikowi odpowiednie zadania. Częstym błędem jest niestety kierowanie pracownika do zadań, które tak naprawdę są nieważne i nie przynoszą żadnych rezultatów. Wtedy pracownik czuje się bardziej zmęczony, a firma z jego wysiłku nie ma żadnego pożytku. Ważne jest, aby odpowiednio przemyśleć zadania, które zostaną przydzielone pracownikowi, który nie jest obciążony pracą.

Nieregularność w procesach montażowych wynika z tego, że w proces montażu ręcznego jednego przedmiotu zaangażowanych jest kilka bądź kilkanaście osób. Częstym przypadkiem jest sytuacja, kiedy rozpoczęcie pracy jednego montera jest uzależnione od zakończenia pracy innego montera. W takim przypadku mamy do czynienia z klasyczną sytuacją, nazywaną pojęciem „wąskie gardło”. Tylko jeden pracownik jest obciążony w 100 procentach pracą, pozostali przez krótszy lub dłuższy czas odpoczywają. W efekcie pojawia się marnotrawstwo związane z oczekiwaniami lub pracownicy wykonują zadania wolniej niż mogliby, gdyby nie byli uzależnieni od „wąskiego gardła”. Tego rodzaju strat ciężko całkowicie uniknąć, ale balansowanie stanowisk i uniezależnianie kolejnych

etapów montażu poprzez odpowiedni podział na podzespoły montażowe, może być pomocnym narzędziem służącym do ograniczania nierównomierności w procesach montażowych.

Nadmierne obciążenie powiązane jest z bezpieczeństwem i higieną pracy, zakresem obowiązków pracownika, obciążeniami fizycznymi oraz psychicznymi występującymi na jego stanowisku pracy. Im większe to obciążenie jest, tym bardziej pracownik jest zmęczony, a jego efektywność bardziej spada. Jeżeli obciążenie jest niepotrzebne, a występuje, to pojawia się podwójna strata wynikająca ze zmniejszonej siły i koncentracji pracownika oraz wykonywania czynności zbędnych i niedodających wartości w procesie montażu. W celu określenie odpowiedniego obciążenia pracownika powinno wykonać się odpowiednie badania.

2.2 Badanie obciążenia pracowników

Pomiar wydatku energetycznego pracowników jest zagadnieniem względnie nowym w technologii montażu, chociaż podstawy teoretyczne, które powstały w oparciu o zagadnienia bezpieczeństwa i higieny pracy są znane już od ponad pięćdziesięciu lat. Obciążenie pracowników jest głównym czynnikiem, który wpływa na zwiększenie zmęczenia pracownika i spadek jego efektywności. (Matuszek i Byrska 2012). Zanim jednak zacznie się pracować nad obniżeniem obciążenia fizycznego pracownika, trzeba je dokładnie zmierzyć. Pomiar uzależniony jest od trzech czynników: ilości wydatku energetycznego, monotypowości ruchów oraz obciążenia statycznego. Istnieje wiele rodzajów pomiaru obciążenia pracownika i wciąż powstają nowe (Szubert i in. 2008), ale zdecydowanie najczęściej wykorzystywaną metodą jest metoda chronometrażowo – kaloryczna Lehmana (Prędecka i in. 2016). W metodzie chronometrażowo – kalorycznej Lehmana, wysiłek zależy od następujących czynników:

- pozycji ciała,
- rodzaju czynności,
- rodzaju pracy.

Dla każdego z wyżej wymienionych czynników uwzględnia się wysiłek energetyczny konieczny do wykonania czynności z nimi związanej, a następnie wartości te się sumuje. Stopień ciężkości pracy określa się w oparciu o odpowiednią tabelę (Tab.1) i jeżeli stopień ciężkości pracy jest wysoki, powinno się zmienić zakres czynności wykonywanych przez pracownika, aby ten stopień zmniejszyć.

Tab. 1. Ocena ciężkości pracy według wielkości wydatku energetycznego podczas pracy zawodowej w kcal i kJ na dobę (Olszewski 1998).

Wielkość wydatku energetycznego podczas pracy zawodowej		Ocena stopnia ciężkości pracy	
w kcal/dobę	w kJ/dobę	ocena słowna	przedział punktowy
0-500	0-2000	lekka	0
501-1000	2000-4184	umiarkowana	1-25
1001-1500	4185-6276	średnia	26-50
1501-2000	6277-8368	ciężka	51-75
2001-2500	8369-10460	bardzo ciężka	76-100
2501-3000	10461-12552	niezmiernie ciężka	101-125
3001-3500	12553-14650	wyczerpująca	126-150

Inną metodą jest tzw. metoda gazometryczna, która określa pomiar wydatku energetycznego, uzależniając go od pomiaru wymiany gazowej pracownika. Pracownik wykonuje pracę w specjalnej aparaturze, dzięki której można oszacować, ile litrów powietrza uczestniczy w wymianie gazowej. Na tej podstawie określa się trzy grupy wydatku energetycznego:

- 0,5-1 l/min, lekki,
- 1-2 l/min, umiarkowany,
- powyżej 2 l/min, ciężki.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na obciążenie pracownika jest monotypowość ruchów, która powoduje nie tylko fizyczne obciążenie pracownika, ale także obciążenie psychiczne. Głównymi zmiennymi charakteryzującymi monotypowość ruchów jest liczba powtórzeń tych samych ruchów wykonywanych przez pracownika oraz siła, jakiej musi użyć podczas wykonywania tych ruchów. Trudno jest jednak o określenie jednoznacznych kryteriów, a takie samo obciążenie ruchami monotypowymi dwóch różnych pracowników może skutkować u nich różnym obciążeniem psychicznym i fizycznym. Mimo tego, istnieją pewne zalecenia dotyczące określania stopnia uciążliwości ruchów monotypowych (Tab.2).

Tab. 2. Ocena obciążenia ruchami monotypowymi (Tytyk 2001).

Ocena stopnia uciążliwości		Liczba powtórzeń operacji	
słowna	punktowa	siła do 100N	siła ponad 100N
mała	1-30	do 300	do 800
średnia	31-60	300-800	800-1600
duża	61-100	powyżej 800	powyżej 1600

Ostatnim czynnikiem wpływającym na obciążenie pracownika jest obciążenie statyczne. Podobnie, jak w przypadku monotypowości ruchów, trudno jest o określenie jednoznacznych kryteriów, według których można ocenić ten rodzaj obciążenia na stanowisku montażowym. Przyjmuje się jednak, że obciążenie statyczne w przypadku operacji montażowych zawsze jest co najmniej średnie. Uważa się, że na wartość obciążenia statycznego mają wpływ:

- wychylenie ciała,
- stopień wymuszenia,
- rodzaj postawy,

Badania obciążenia pracowników są jedną z metod poprawienia ich efektywności. Monitorując wydatek energetyczny, obciążenie statyczne oraz stopień monotypowości ruchów na stanowisku montażowym oraz wprowadzając odpowiednie usprawnienia mające na celu obniżenie obciążenia fizycznego i psychicznego pracownika związane z każdym z trzech powyżej wymienionych kryteriów, można sprawić, że monter będzie na swoim stanowisku pracy o wiele bardziej wypoczęty, a co za tym idzie również bardziej efektywny. Problemem związanym z badaniem obciążenia pracownika jest jednak koszt jego wykonania. Często koszty te liczy się w tysiącach złotych na każde stanowisko, co oznacza, że koszt badania i obniżenie obciążenia pracownika może się nie zwrócić. Do wykonania takich badań powinno zatem wybierać się tylko stanowiska, w których to obciążenie jest szczególnie wysokie.

2.3 Test zdolności manualnych MAST

Ważnym zadaniem przy zatrudnianiu pracownika montażowego jest określenie jego mocnych i słabych stron. Każdy człowiek wykonuje pewne czynności manualne lepiej lub gorzej. Podczas montażu ręcznego, w zależności od montowanego przedmiotu dominują pewne określone rodzaje połączeń montażowych oraz ruchów, które monter wykonuje. Zanim skieruje się montera do odpowiednich zadań warto wykonać swego rodzaju test kompetencji, który określi, jakie czynności wykonuje on lepiej, a jakie gorzej. Jednym z tego typu testów jest tzw. test zdolności manualnych MAST.

MAST, czyli „Manual Ability Scanning Test” jest metodą wymyśloną w Holandii. Istnieją różne odmiany tego testu, najpopularniejszą z nich jest tzw. test MAST-Ruward, składający się z 19 zadań, mających na celu określenie zdolności manualnych pracownika (Piórkowski 2011). Zadania w teście MAST są proste i nie wymagają dużych umiejętności ze strony montera, ale pomagają określić w jakim czasie pracownik potrafi wykonać konkretne zadanie (Rys.1)

Wyniki testu MAST mogą posłużyć nie tylko do przydzielenia pracownika do odpowiednich zadań, ale także do określenia, którzy pracownicy wymagają dodatkowego szkolenia w zakresie odpowiednich zadań. Jeżeli dany monter słabo radzi sobie, na przykład z łączeniem małych elementów (Rys.2), to warto zainwestować w szkolenie tego pracownika w zakresie łączenia małych

elementów lub pozwolić mu przeciwżyć wykonanie zadania z testu MAST przez jedną lub dwie zmiany, tak aby osiągnął odpowiedni poziom, który pozwala wykonać zadanie montażowe w określonym czasie. Dzięki testom MAST możemy także grupować pracowników w odpowiednie zespoły, w których znajdują się osoby o podobnych możliwościach manualnych, dzięki czemu można ograniczyć bezczynność i oczekiwanie, gdyż pracownicy będą wykonywać swoje zadania montażowe w tym samym lub zbliżonym do siebie tempie.



Rys. 1. Pracownik umieszcza przedmioty w symetrycznych otworach podczas testu MAST (<http://www.testendiagnose.nl/index.php/het-meten-van-motorische-capaciteiten-bij-test-en-diagnose/handvaardigheid-testen-met-mast-en-ruward-onderzoek-bij-test-en-diagnose>)



Rys. 2. Pracownik łączy dwa małe elementy podczas testu MAST (<http://www.testendiagnose.nl/index.php/het-meten-van-motorische-capaciteiten-bij-test-en-diagnose/handvaardigheid-testen-met-mast-en-ruward-onderzoek-bij-test-en-diagnose>)

Oczywiście testy zdolności manualnych MAST to tylko jeden z wielu rodzajów testów, jakie można wykonać. Każda firma może przygotować własne testy w oparciu o dominujące w procesie montażu czynności. Można również do wykonania tego typu testów wykorzystać istniejące już w procesie montażowym przedsiębiorstwa części i wykonywać testy na rzeczywistym urządzeniu. Dzięki odpowiedniemu testowaniu można zwiększyć efektywność pracowników poprzez regularne poprawianie ich słabych punktów oraz odpowiednie rozdzielanie zadań pomiędzy nich.

2.4 Analiza MTM i taktowanie

Aby poprawić efektywność wykonywania czynności przez pracowników, firma powinna mieć wiedzę o tym, w jakim czasie zatrudniony przez nich człowiek powinien zrobić wymagane zadania. Taką wiedzę pozwala nam uzyskać analiza MTM. Analiza ta to jedna z najbardziej rozpowszechnionych metod normowania czasu operacji, służąca do poprawy efektywności pracy oraz wyznaczająca czas pracy konieczny na wykonanie danego zadania (Żurek i in. 2010).

Analiza MTM uzależnia wynikowy czas poświęcony na wykonanie konkretnego zadania od wielu czynników, które związane są między innymi z postawą pracownika, kierunkiem patrzenia, obciążeniami, jakie występują na linii montażowej, czy też częstotliwością wykonywania zadań. Mając do dyspozycji dziesiątki różnych ruchów podstawowych, które mają swoje odpowiednie rodzaje, jesteśmy w stanie z bardzo dużą dokładnością określić, ile powinien wynosić czas na wykonanie konkretnego zadania. Ta wiedza jest konieczna i niezbędna, aby przeprowadzić prawidłowy proces taktowania.

Taktowanie ma na celu stworzenie takich warunków pracy w firmie montażowej, aby wszystkie stanowiska pracy, w tym stanowiska pracy montażu ręcznego były optymalnie obciążone. Taktowanie można przeprowadzać zarówno na etapie planowania, jak i w trakcie prowadzonych prac, w oparciu o rzeczywiste wartości czasowe. Podstawą taktowania jest pełna informacja o czasie wykonywania kolejnych procesów i zadań, następnie zadania te należy rozdzielić w taki sposób, aby na linii montażowej było jak najmniej marnotrawstwa czasu, aby wszystkie stanowiska były obciążone w podobny sposób i aby wąskie gardła w jak najmniejszym stopniu wpływały na pracę pozostałych stanowisk.

Za pomocą analizy MTM i taktowania można uzyskać informację o tym, w jakim czasie wykonuje się kolejne zadania oraz w jakim stopniu obciążone są kolejne stanowiska montażowe. Posiadając tę wiedzę można wykorzystać inne narzędzia opisane w tym artykule, mające na celu poprawę efektywności pracownika. Wiedząc, gdzie występują wąskie gardła i wiedząc, gdzie jest największe obciążenie stanowisk należy skierować największą uwagę właśnie na tę część procesów montażowych i spróbować zmniejszyć obciążenie pracownika, spróbować znaleźć pracownika, który te same zadania potrafi wykonywać szybciej lub pozwolić pracownikowi wziąć udział w szkoleniach, które sprawią, że czas wykonywania przez niego zadań montażowych będzie możliwie najkrótszy.

2.5 Analiza chronometrażu

Mimo, że analiza MTM uwzględnia bardzo wiele rodzajów ruchu, to nigdy nie będzie w stanie uwzględnić każdej czynności wykonywanej przez montera. Z tego powodu, do ustalenia odpowiedniego czasu montażu, który można później wykorzystać w taktowaniu, można wykorzystać metodę zwaną analizą chronometrażu. Analiza chronometrażu pozwala na ustalenie, bazując na pewnej, z góry określonej liczbie pomiarów, czasu koniecznego do wykonania pewnej liczby zadań lub ruchów roboczych (Żurek i in. 2006).

Analiza chronometrażu jest bardzo łatwa do wykonania i wymaga posiadania jedynie kartki papieru, czegoś do pisania oraz urządzenia do pomiaru czasu, najczęściej stopera. Podstawową informacją w tej analizie jest oczywiście czas wykonania określonej czynności. W ramach wykonywania tej analizy warto jednak notować inne informacje, dotyczące liczby części, liczby połączeń montażowych, danych dotyczących montera, takich jak jego płeć, wzrost, czy waga oraz jego stopnia zmęczenia, dnia tygodnia, godziny pracy i innych tego typu danych. Na bazie analizy chronometrażu można bowiem stworzyć z jednego strony coś podobnego do testu MAST, gdzie będzie można określić przydatność montera do wykonywania określonych czynności, a z drugiej strony istnieje możliwość stworzenia bazy danych na temat procesu montażu różnych urządzeń, na temat monterów oraz na temat warunków montażu, które są najbardziej korzystne.

Ustalanie normy czasu pracy na podstawie pomiaru wykonanego w warunkach rzeczywistych ma też swoje wady. Przede wszystkim analiza chronometrażu ogranicza się do dużych wielkości serii, gdyż w produkcji małoseryjnej, wielkość serii jest za mała, by opłacało się w ten sposób ustalić normę czasu. Częstym problemem jest też nieuczciwość pracowników, którzy wiedząc, że czas ich próby jest mierzony, specjalnie wykonują pewne czynności wolniej, aby ustalona w ten sposób norma czasu nie była dla nich zbyt wymagająca.

3. Podsumowanie i wnioski

Czynności związane z możliwością zwiększenia efektywności pracowników na liniach montażowych można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich należą czynności związane z określeniem stanu faktycznego dotyczącego odpowiednich czasów pracy pracownika za pomocą

różnych metod. Do drugiej natomiast zaliczamy czynności związane z rzeczywistym wzrostem efektywności pracownika.

Do określenia stanu faktycznego bardzo dobrze nadają się: analiza MTM oraz analiza chronometrażu. Obie te metody mogą posłużyć jako źródło informacji, które można wykorzystać w procesie taktowania. Informacje dotyczące obciążeń występujących w procesie montażu ręcznego najlepiej pozyskać, korzystając z metody chronometrażowo-kalorycznej Lehmana lub z metody gazometrycznej. Dobrymi źródłami informacji na temat mocnych i słabych stron pracownika są natomiast testy zdolności manualnych, między innymi test MAST oraz wymieniona wcześniej w tym akapicie analiza chronometrażu.

Zwiększenie efektywności pracownika może zostać dokonane na kilka różnych sposobów. Jednym z nich jest redukcja marnotrawstwa podczas wykonywanej przez pracownika pracy, którą można ograniczyć między innymi poprzez zmniejszenie bezczynności pracownika, ograniczenie liczby jego ruchów, wyeliminowanie czynności, które nie dodają wartości do gotowego urządzenia. Poprawienie efektywności pracownika można również uzyskać poprzez odpowiednie wykorzystywanie jego umiejętności. Czynności, które pracownik wykonuje najefektywniej, powinny być wykonywane przez niego najczęściej, czynności, które pracownik wykonuje najmniej efektywnie, powinny być wykonywane przez niego, jak najrzadziej. Kolejnym sposobem wzrostu efektywności pracownika jest szkolenie go w zakresie czynności, w których ma największe możliwości poprawienia się (czyli tych, które aktualnie wykonuje najsłabiej). Ważnym elementem składowym dbania o efektywność pracowników jest dbanie o to, by się nie przemęczali poprzez ograniczanie ich wysiłku energetycznego, obciążenia statycznego oraz stopnia monotypowości ruchów. Warto też, by pracownicy pracowali w warunkach, najbardziej dla nich komfortowych, co przekłada się na ich dobre samopoczucie, lepszą kreatywność, a także efektywność.

4. Literatura

- Damrath F (2012) Increasing Competitiveness of Service Companies: Developing Conceptual Models for Implementing Lean Management in Service Companies.
- Matuszek J, Byrska K (2012) Ocena uciążliwości pracy na wybranych stanowiskach roboczych na podstawie określania wydatku energetycznego, Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji pod red. R. Knosali.
- Ohno T (2008) System Produkcyjny Toyoty. Więcej niż produkcja na dużą skalę
- Olszewski J (1997) Podstawy ergonomii i fizjologii pracy.
- Piórkowski P (2011) Problemy jakości montażu w aspekcie konkurencyjności wyrobu . Praca inżynierska.
- Prędecka A, Węgrzyn M, Sowa M i in. (2016) Ocena wydatku energetycznego na stanowisku pracy piekarza metodą chronometrażowo-tabelaryczną wg Lehmana Zeszyty Naukowe SGSP, nr 59/3/2016.
- Szubert J, Szubert S, Bortkiewicz A (2008) Nowa metoda wyznaczania wydatku energetycznego człowieka, Medycyna Pracy 59(3), 215- 222.
- Tytyk E (2001) Projektowanie ergonomiczne.
- Żurek J, Ciszak O, Cieślak R (2010) Pracochłonność procesu montażu rzeczywistego i wirtualnego metodą MTM, Technologia i Automatyzacja Montażu 2/2010, 29-34.
- Żurek J, Ciszak O, Cieślak R i in. (2006) Metody badania czasu pracy w procesach montażu Technologia i automatyzacja montażu 3/2006, 43-46.

20. Zadania optymalizacyjne w elektroenergetyce

Optimization tasks in power engineering

Karol Sidor

Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Piotr Miller prof. PL

Karol Sidor: karolsidor11@wp.pl

Słowa kluczowe: optymalizacja rozcięć, metody optymalizacji, straty mocy czynnej

Streszczenie:

W artykule przedstawiono przegląd i klasyfikację metod i technik optymalizacji wykorzystywanych w elektroenergetyce. Zaprezentowane i omówione zostały zagadnienia z dziedziny elektroenergetyki, które podlegają optymalizacji. Jednym z takich zagadnień jest problematyka optymalizacji rozcięć w sieci średniego napięcia. Obliczeń optymalizacyjnych dokonano dla zamodelowanego fragmentu sieci średniego napięcia. Do analizy sieci przyjęto znajomość topologii sieci oraz zróżnicowanych poziom obciążeń węzłów odbiorczych. Problem optymalizacyjny polegał na wyznaczeniu optymalnego miejsca rozcięcia w sieci średniego napięcia.

1. Wstęp

Przemysł elektroenergetyczny jest jedną z gałęzi przemysłu, która ciągle bardzo dynamicznie rozwija się, a popyt na energię nieustannie wzrasta. Wytwarzanie i przesyłanie energii elektrycznej warunkuje sprawne funkcjonowanie gospodarki. Dynamiczny rozwój technologii przyczynił się do poszukiwania nowych lepszych rozwiązań dla systemów elektroenergetycznych. Rozwój przemysłu elektroenergetycznego i sprostanie rozporządzeniom dotyczącym systemu elektroenergetycznego wymaga poszukiwania optymalnych rozwiązań techniczno-ekonomicznych w celu ciągłego ulepszania funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Poprawę efektywności energetycznej i minimalizację kosztów wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej uzyskuje się z wykorzystaniem różnych metod i techniki optymalizacji zarówno tradycyjnych jak i nowoczesnych.

2. Optymalizacja

Optymalizacja jest dziedziną zajmującą się metodami wyznaczania optymalnego (najlepszego) rozwiązania problemu z punktu widzenia określonego kryterium. Zadanie optymalizacyjne polega na wyznaczeniu najlepszego rozwiązania spośród wszystkich dostępnych rozwiązań problemu. Funkcją celu jest tutaj funkcja dla, której poszukiwane jest optymalne rozwiązanie. Problem optymalizacyjny polega na znalezieniu $\hat{x} \in A$ takiego że, $f(\hat{x}) \leq f(x)$ dla każdego, $x \in A$, a punkt $\hat{x}$ jest minimum globalnym funkcji f na zbiorze A .

Sformułowanie zadania optymalizacyjnego polega na:

- wyborze zmiennych występujących w zadaniu,
- określeniu funkcji celu,
- określeniu ograniczeń.

Formułując zadanie optymalizacyjne należy zwrócić szczególną uwagę na:

- zadania stawiane systemowi,
- kryterium realizacji zadań,
- ograniczenia krępujące wybór sposobu realizacji zadania.

W celu przeprowadzenia optymalizacji stosuje się odpowiednie metody i techniki umożliwiające rozwiązanie problemu. Zadania optymalizacyjne rozwiązywane są metodami, które klasyfikuje się w następujący sposób:

- Metody klasyczne
 - metody liniowe (LP),
 - metody nieliniowe (NLP),
 - metody dwustronne (QP),
 - metody sieciowe (NFP),
- Metody heurystyczne
 - sieci neuronowe (NN),
 - algorytmy ewaluacyjne (EA),
- Metody hybrydowe
 - optymalizacje probabilistyczną,
 - systemy rozmyte.

Ponadto możemy wyróżnić następujące metody optymalizacji:

- metody optymalizacji bez ograniczeń,
- metody optymalizacji z ograniczeniami.

Klasyczne metody optymalizacji polegają na prowadzeniu poszukiwań w kolejnych etapach na pełnych i cząstkowych rozwiązaniach. Metody klasyczne są łatwiejsze w implementacji, wolniejsze a także mają tendencję do błędzenia w pobliżu minimum funkcji celu. Klasyczne metody optymalizacji startują z obranego punktu początkowego wyszukując w jego pobliżu minimum funkcji celu. Metody te są mało efektywne w przypadku złożoności problemu i braku danych umożliwiających ustalenie postaci analitycznej badanej zależności.

Heurystyczne metody optymalizacji cechują się znaczną odpornością na złe uwarunkowanie zadania optymalizacyjnego i minima lokalne funkcji celu. Metody te są połączeniem matematyki i podejść heurystycznych są ukierunkowane na zwiększenie prawdopodobieństwa osiągnięcia minimum funkcji celu.

Metody hybrydowe łączą w sobie cechy metod klasycznych i heurystycznych w celu eliminacji niekorzystnych cech poszczególnych metod bądź wzmocnienia cech korzystnych. Metody te charakteryzują się złożonością obliczeniową i sprawdzają się jedynie w określonych problemach.

3. Zastosowanie optymalizacji w elektroenergetyce

Rozwijający się przemysł elektroenergetyczny jak i również potrzeba zwiększenia efektywności i wydajności energetycznej przyczyniła się do stosowania optymalizacji w elektroenergetyce. Obecnie optymalizacja w elektroenergetyce znajduje szerokie zastosowanie, a swoim obszarem obejmuje między innymi : minimalizację kosztów wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, poprawę efektywności w energetycznej sieci przesyłowej i dystrybucyjnej a także optymalizację pracy i utrzymania systemu elektroenergetycznego. Optymalizację w elektroenergetyce stosuje się również do rozwiązywania różnych problemów związanych z pracą i funkcjonowaniem całego systemu elektroenergetycznego (Paska 2013) .

Klasyczne metody optymalizacji w elektroenergetyce wykorzystuje się do rozwiązywania problemów związanych z obsługą systemu elektroenergetycznego, problemów związanych z układem zasilania, a także do rozwiązywania problemów z konfiguracją sieci dystrybucyjnych i przesyłowych.

Heurystyczne metody optymalizacyjne wykorzystywane są do rozwiązywania problemów gospodarki wysyłkowej i systemów wielostronnych, optymalizacji kosztów bilansowania systemu elektroenergetycznego, a także do rozwiązywania złożonych problemów optymalnego przepływu energii (Bachorek 2012).

Hybrydowe metody optymalizacyjne stosuje się głównie do rozwiązywania problemów optymalnego przepływu energii i zadań jednostkowych, do optymalizacji strategii rozwoju sieci dystrybucyjnych, a także optymalizacji rozpyłów mocy w systemie elektroenergetycznym.

W dziedzinie elektroenergetyki optymalizacji podlegają następujące grupy zagadnień:

- rozpyły mocy i energii (optymalizacja rozpyłów mocy biernej),
- kalkulacja kosztów (wytwarzania energii, przesyłu energii),

- konfiguracja sieci (optymalizacja rozcięć sieci).

Rozpływy mocy i energii w systemie elektroenergetycznym jest ważnym zagadnieniem, które poddawane jest optymalizacji w celu zmniejszenia strat przesyłowych energii. Optymalizacja przepływu energii to optymalizacja rozptywu mocy biernej w systemie elektroenergetycznym, optymalizacja kompensacji mocy biernej, a także optymalizacja środków kompensacji mocy biernej.

Koszty w elektroenergetyce są kolejnym zagadnieniem, które podlega optymalizacji. Optymalizacji poddawane są koszty związane przede wszystkim z wytwarzaniem, przesyłem i dystrybucją energii elektrycznej. Optymalizacji podlegają również koszty bilansowania mocy, koszty produkcji energii elektrycznej, koszty strat energii elektrycznej, koszty roczne struktury sieci elektroenergetycznej.

Układy struktury sieci elektroenergetycznej poddawane są optymalizacji w celu osiągnięcia pożądanych zmian w funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego. Optymalizacja konfiguracji sieci elektroenergetycznej sprowadza się do optymalizacji sieci rozdzielczych średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nN), optymalizacji rozległych sieci dystrybucyjnych, optymalizacji rozcięć sieci, a także optymalizacja układu pracy sieci elektroenergetycznej.

4. Przykład optymalizacji

Optymalizacja rozcięć w sieci średniego napięcia (SN) służy wyborowi najlepszej lokalizacji rozcięć sieci rozdzielczej (Brożek i Bachorek 2014). W celu rozwiązania zadania optymalizacyjnego wykorzystano oprogramowanie komputerowe realizujący obliczenia iteracyjne metodą Newtona. Problem optymalizacyjny polega, na wyznaczeniu optymalnego miejsca rozcięcia w sieci średniego napięcia (SN) tak, aby straty mocy czynnej powstające w jej obwodach były jak najmniejsze. Zadanie optymalizacyjne polegać będzie na wyznaczeniu rozptyłów mocy a następnie strat mocy czynnej w sieci SN, w celu ustalenia optymalnego miejsca rozcięcia w tej sieci. W celu rozwiązania problemu, konieczna jest znajomość obciążeń odbiorów. Optymalizacja zostanie przeprowadzona dla zamodelowanego obwodu sieci SN w którym znamy obciążenia stacji transformatorowych. Przedstawiony obwód sieci SN zasilany jest z dwóch stacji WN/ SN.

Funkcją celu zadania optymalnej lokalizacji rozcięć sieci SN są straty mocy czynnej obciążeniowe, które są wyznaczane na podstawie rozptyłów mocy w sieci. Funkcję celu opisuje zależność:

$$FC = \Delta P \rightarrow \min \quad (1)$$

Przedstawione zadanie optymalizacyjne charakteryzuje się złożonością obliczeniową ze względu na konieczność obliczeń rozptyłów mocy dla każdego badanego miejsca rozcięcia sieci (Buchta 2012). W prezentowanym zadaniu optymalizacyjnym uwzględniono że, na jednym odcinku linii mogą wystąpić maksymalnie dwa punkty rozcięcia. Do rozwiązania omawianego problemu posłuży oprogramowanie komputerowe Plans SN.

Schemat poszukiwania optymalnego rozcięcia sieci :

1. Utworzenie modelu sieci i ustalenie punktów podziału sieci we wszystkich odcinkach,
2. Realizacja cyklicznych działań takich jak :
 - ustalenie miejsca rozcięcia sieci,
 - obliczenie rozptyłów mocy w analizowanej sieci,
 - określenie strat mocy czynnej.
3. Realizacja zadań z punktu 2 do momentu znalezienia punktu rozcięcia w którym straty mocy czynnej są najmniejsze.

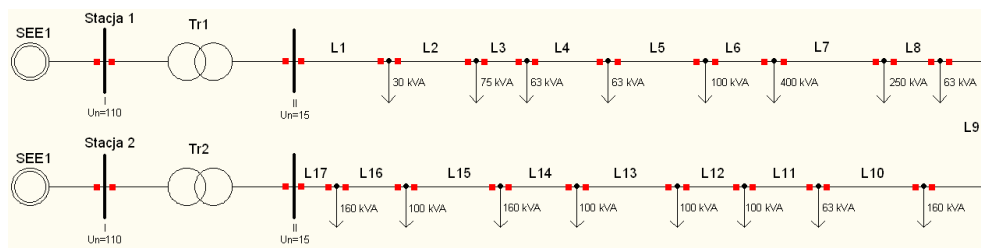
W omawianym procesie optymalizacyjnym miejsce optymalnego rozcięcia w sieci elektroenergetycznej SN ustala się wykorzystując cykliczne działania przedstawione w schemacie

powyżej. Optymalnym miejscem rozcięcia w sieci będzie ten odcinek, w którym straty mocy czynnej obciążeniowej będą najmniejsze (Helt 2012).

Prezentacja wyników obliczeń

Do opracowania obliczeń zamodelowano fragment sieci dystrybucyjnej średniego napięcia (SN), której uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1. Do analizy sieci przyjęto następujące założenia:

- znajomość obciążeń wszystkich odbiorów,
- zróżnicowany poziom obciążenia odbiorów,
- podział sieci realizowany we wszystkich odcinkach,
- maksymalne obciążenie całego systemu równe 40 % mocy zainstalowanej.



Rys. 1. Schemat analizowanej sieci SN.

Analizowany fragment sieci elektroenergetycznej to sieć SN o napięciu znamionowym 15 kV w której występują linie napowietrzne. Opisywana sieć obejmuje łącznie 17 odbiorów o mocach od 30- 400 kVA. Długość toru głównego sieci wynosi 18.83 km, w którym występuje 19 węzłów dzielących magistralę na 20 odcinków.

Obliczeń optymalizacyjnych dokonano dla zamodelowanego fragmentu sieci pracującego:

- w normalnych warunkach pracy,
- ze zmiennym obciążeniem,
- ze źródłami generacji rozproszonej.

Przeprowadzona została również symulacja, w której badano optymalne miejsce rozcięcia w sieci modelowej przy losowej zmianie obciążeń. Symulacja miała na celu określenie prawdopodobieństwa wystąpienia w danym odcinku linii najmniejszych strat mocy czynnej obciążeniowej w warunkach pracy sieci zbliżonych do rzeczywistych (Helt i Zduńczyk 2014).

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych przedstawione zostały w tabelach zawierających straty mocy czynnej występujące w liniach i transformatorach na danym odcinku linii elektroenergetycznej.

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla sieci elektroenergetycznej pracującej w warunkach normalnych przedstawiono w tabeli 1.

W tabeli 1 przedstawiono straty mocy czynnej występujące w liniach i w transformatorze w zależności od miejsca rozcięcia w sieci. Przedstawione zestawienie strat mocy czynnej obciążeniowej pozwala na określenie optymalnego miejsca rozcięcia w sieci. Dla zaprezentowanego przypadku optymalnym punktem rozcięcia w sieci jest lina L8, w której straty mocy czynnej są najmniejsze i wynoszą 6,318 kW.

W przypadku zmiany w konfiguracji sieci, wystąpienia w sieci źródeł generacji lub przyłączenia nowych odbiorów wymagane jest przeprowadzenie optymalizacji sieci ponownie. W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla sieci elektroenergetycznej pracującej ze zmiennym obciążeniem.

Tab. 1. Straty mocy czynnej w sieci modelowej pracującej w warunkach normalnych.

Lokalizacja rozcięcia sieci	Straty mocy czynnej w liniach [kW]	Straty mocy czynnej w transformatorze [kW]	Straty łączne [kW]
L1	- 8,793	-4,089	- 12,882
L2	- 8,400	-4,087	-12,487
L3	-7,476	-4,082	-11,558
L4	-6,771	-4,079	-10,851
L5	-6,110	-4,076	-10,187
L6	-5,174	-4,071	-9,246
L7	-2,718	-4,059	-6,778
L8	-2,261	-4,057	-6,318
L9	-2,533	-4,058	-6,591
L10	-2,727	-4,059	-6,786
L11	-2,272	-4,057	-6,33
L12	-3,138	-4,061	7,199
L13	-3,668	-4,064	-7,733
L14	-4,342	-4,067	-8,410
L15	-5,693	-4,074	-9,768
L16	-6,712	-4,079	-10,791
L17	-8,634	-4,089	-12,724

W tabeli 2 przedstawiono straty mocy czynnej jakie występują w liniach i transformatorach w przypadku pracy sieci ze zmiennym obciążeniem. W zaprezentowanym zestawieniu można zauważyć łączne straty mocy zmieniają się dynamicznie w zależności od obciążenia. Miejsce optymalnego punktu rozcięcia w sieci zmienia się dynamicznie wraz ze zmianami obciążeń. Dla zaprezentowanego przypadku optymalnym punktem rozcięcia w sieci będzie linia L11 w której straty mocy czynnej są najmniejsze i wynoszą 4,593 kW.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla sieci elektroenergetycznej pracującej z dwoma źródłami generacji rozproszonej o mocach 8 kW i 20 kW.

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie strat mocy czynnej w liniach i transformatorach dla sieci modelowej pracującej z generacją rozproszoną. Źródła generacji rozproszonej o mocach 8kW i 20kW zostały przyłączone odpowiednio do sieci. Generator 8kW przyłączono do linii L6 natomiast generator 20kW do linii L13. Zaprezentowane wyniki pokazują jak kształtują się straty mocy czynnej w sieci pracującej z generacją rozproszoną. Dla zaprezentowanego przykładu optymalnym punktem rozcięcia w sieci będzie linia L11 w której straty mocy czynnej wynoszą 4,554 kW. Przedstawione wyniki obliczeń pozwalają stwierdzić że, wystąpienie w sieci elektroenergetycznej źródeł generacji mocy ma wpływ na lokalizację punktu rozcięcia sieci a także na łączne straty mocy czynnej w sieci i zależy od mocy generatora i miejsca jego przyłączenia.

Dla przedstawionego modelu sieci SN przeprowadzono symulację (30 losowań), która polegała na losowej zmianie obciążenia w sieci i wyznaczaniu optymalnego miejsca rozcięcia w sieci.

Celem symulacji było zbadanie jak zmienia się punkt rozcięcia sieci w przypadku nagłych zmian obciążenia sieci. W tabeli 4 przedstawiono wyniki symulacji.

Tab. 2. Straty mocy czynnej w sieci modelowej pracującej z losowo zmiennym obciążeniem.

Lokalizacja rozcięcia sieci	Straty mocy czynnej w liniach [kW]	Straty mocy czynnej w transformatorze [kW]	Straty łączne [kW]
L1	-2,084	-4,042	-6,127
L2	-1,946	-4,042	-5,988
L3	-1,718	-4,040	5,758
L4	-1,592	-4,040	-5,632
L5	-1,433	-4,039	-5,472
L6	-1,291	-4,038	-5,330
L7	-0,608	-4,034	-4,642
L8	-0,562	-4,034	-4,597
L9	-0,601	-4,034	-4,636
L10	-0,644	-4,034	-4,679
L11	-0,559	-4,034	-4,593
L12	-0,700	-4,034	-4,734
L13	-0,803	-4,035	-4,839
L14	-0,982	-4,035	-5,018
L15	-1,545	-4,038	-5,584
L16	-2,052	-4,040	-6,092
L17	-2,481	-4,042	-6,524

Tab. 3. Straty mocy czynnej w sieci modelowej pracującej z generacją rozproszoną.

Lokalizacja rozcięcia sieci	Straty mocy czynnej w liniach [kW]	Straty mocy czynnej w transformatorze [kW]	Straty łączne [kW]
L1	-1,712	-4,040	-5,753
L2	-1,590	-4,039	-5,630
L3	-1,647	-4,040	-5,687
L4	-1,523	-4,039	-5,562
L5	-1,366	-4,038	-5,405
L6	-1,227	-4,037	-5,265
L7	-0,564	-4,033	-4,597
L8	-0,523	-4,033	-4,556

Lokalizacja rozcięcia sieci	Straty mocy czynnej w liniach [kW]	Straty mocy czynnej w transformatorze [kW]	Straty łączne [kW]
L9	-0,570	-4,033	-4,603
L10	-0,616	-4,033	-4,649
L11	-0,521	-4,033	-4,554
L12	-0,636	-4,033	-4,670
L13	-0,732	-4,033	-4,765
L14	-0,899	-4,034	-4,933
L15	-1,437	-4,036	-5,474
L16	-1,927	-4,038	-5,966
L17	-2,345	-4,040	-6,385

Tab. 4. Wyniki symulacji.

Lokalizacja rozcięcia sieci	Ilość rozcięć/ Ilość losowań	Prawdopodobieństwo [0-1]
L1	0/30	0
L2	0/20	0
L3	0/30	0
L4	0/30	0
L5	0/30	0
L6	0/30	0
L7	3/30	0,1
L8	10/30	0,33
L9	4/30	0,13
L10	0/30	0
L11	13/30	0,43
L12	0/30	0
L13	0/30	0
L14	0/30	0
L15	0/30	0
L16	0/30	0
L17	0/30	0

W tabeli 4 zaprezentowano prawdopodobieństwo wystąpienia w danym odcinku linii najmniejszych strat mocy czynnej. Przeprowadzono badania, które polegały na losowej zmianie

obciążenia w sieci i wyznaczaniu optymalnego miejsca rozcięcia w tej sieci. przeprowadzonej symulacji dla 30 losowań. Z tabeli wynika że, istnieją cztery lokalizacje w sieci w które potencjalnie mogą być optymalnym miejscem rozcięcia tej sieci. Przy czym optymalne rozcięcia w sieci najczęściej występują na liniach L8 i L11. Wyniki przeprowadzonej symulacji jednoznacznie pokazują że, dla przedstawionego modelu sieci SN najbardziej optymalnym miejscem rozcięcia sieci będzie linia L11.

5. Wnioski

W artykule zaprezentowano i omówiono zagadnienia z dziedziny elektroenergetyki, które podlegają optymalizacji. Przykład optymalizacji dotyczy optymalizacji rozcięć w sieci średniego napięcia. Obliczeń optymalizacyjnych dokonano dla następujących przypadków: praca sieci w warunkach normalnych, praca sieci ze zmiennym obciążeniem, praca sieci z generacją rozproszoną.

Wnioski z przeprowadzonych badań są następujące:

- zmiany rozkładu obciążenia w sieci mogą mieć wpływ na lokalizację optymalnego punktu rozcięcia w sieci,
- także obecność i lokalizacja źródeł generacji rozproszonej wpływa na poziom strat mocy czynnej, a w związku z tym na optymalny punkt rozcięcia,
- lokalizacja optymalnego punktu rozcięcia w sieci może zatem zmieniać się dynamicznie wraz z zmianami zachodzącymi w sieci co wiąże się z koniecznością ponownego przeprowadzenia optymalizacji rozcięć w tej sieci.

Powyższe wnioski uzasadniają wykorzystanie algorytmów optymalizacyjnych w narzędziach wspomagających pracę operatorów sieci dystrybucyjnych w ich zadaniach związanych z ustalaniem optymalnych konfiguracji tych sieci.

6. Literatura

- Bachorek W (2012) Zastosowanie algorytmu ewolucyjnego do optymalnej lokalizacji łączników w sieci rozdzielczej średniego napięcia. *Electrical Engineering* 70: 151-158.
- Brożek J, Bąchorek W (2014) Optymalizacja struktur elektroenergetycznych sieci promieniowych. *Electrical Engineering* 78: 35-42.
- Buchta F (2012) O efektach optymalizacji układów pracy sieci 110kV. *Przegląd Elektrotechniczny* 8: 104-107.
- Helt P (2012) Praktyczne aspekty wyznaczania optymalnych rozcięć w sieciach rozdzielczych. *Przegląd Elektrotechniczny* 8:80-83.
- Helt P, Zduńczyk P (2014) Możliwości optymalizacji konfiguracji rozległych sieci dystrybucyjnych SN i nN. *Przegląd elektrotechniczny* 9: 109-112.
- Paska J (2013) Ekonomiczny wymiar bezpieczeństwa elektroenergetycznego i niezawodności zasilania. *Rynek Energii* 2: 17-22.

21. UAV jako multiplatforma do pomiarów środowiskowych

UAV as a multiplatform used for enviarioment measurements

Sławomir Szymocha

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

Sławomir Szymocha: slawekszymocha@gmail.com

Słowa kluczowe: UAV, pomiary jakości powietrza , detekcja źródeł zanieczyszczeń.

Streszczenie

Popularyzacja bezzałogowych jednostek latających umożliwiła ich szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach życia jak i nauki. UAV przynoszą przesyłki robią zdjęcia z dużych wysokości, podążają za celem oraz rejestrują obrazy trójwymiarowe. Dzięki niewielkim rozmiarom nie są uciążliwe w transporcie, a ich uruchomienie oraz eksploatacja ogranicza się jedynie do włączenia sytemu i wymiany baterii. Pierwsze jednostki tego typu zarezerwowane były dla wojska oraz wybranych ośrodków badawczych o dużych zasobach finansowych. Sytuacja zmieniała się diametralnie wraz z zwiększeniem tego rodzaju urządzeń, cena średniej klasy jednostek spadła znacząco. Co zachęca do szerokiego ich zastosowania w przemyśle oraz strefie akademickiej. UAV z powodzeniem wykorzystane są w badaniach wizyjnych, wykorzystujących różnego rodzaju kamery oraz optykę. Najczęściej są to aplikacje w obszarze akwizycji danych na potrzeby skatalogowania obiektów czy też obrazowanie termiczne instalacji technicznych. Autor wykorzystuje bezzałogową jednostkę latającą jako platformę do pomiarów warunków środowiskowych. Badania obejmują pomiar składu powietrza, wykrywanie zanieczyszczeń oraz ich źródeł. System proponowany przez autora cechuje się możliwością pomiarów połączonych z koordynatami systemu GPS. Wyniki pomiaru można obserwować za pomocą strony www w czasie rzeczywistym lub pobierać dane z wbudowanego serwera. Prowadzony jest pomiar temperatury, wilgotności oraz stężenia wybranych związków chemicznych występujących w powietrzu. Równocześnie można prowadzić pomiar sześciu związków chemicznych. Wstępna analiza wyników przeprowadzana jest za pomocą narzędzia webowego, które generuje wykresy trajektorii oraz oznacza przekroczenia stężeń.

1. Wstęp

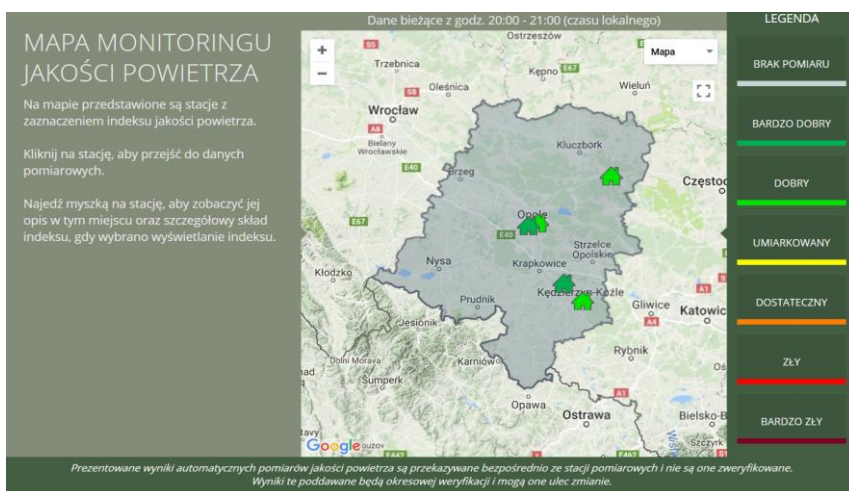
Dzięki wykorzystaniu bezzałogowych jednostek latających możliwe jest wykonywanie pomiarów w sposób do tej pory niemożliwy. Związane jest to przestrzennym aspektem akwizycji danych oraz jej dynamiką. Swoistego rodzaju przestrzenny pomiar był możliwy do tej pory dzięki balonom pomiarowym jednak ich sterowność była bardzo mała. Nagłe zmiany kierunku wiatru powodowały przemieszczenie się jednostki z wcześniej określonej lokalizacji oraz przemieszczenie punktu pomiarowego. Pomiar wewnątrz konstrukcji wielkogabarytowych oraz technicznych był znacznie utrudniony. Celem zniesienia dotychczasowych ograniczeń zwrócono uwagę na bezzałogowe statki powietrzne. Za ich wykorzystaniem przemawiała między innymi sterowność, zwiększająca się dostępność oraz spadająca cena. Możliwość montażu oprzyrządowania pomiarowego ograniczona jest przez gabaryty urządzeń, masę oraz warunki energetyczne samej aparatury. Na jednostkach latających montowane są urządzenia pomiarowe o różnym zastosowaniu począwszy od kamer termowizyjnych, a skończywszy na analizatorach składu wody czy powietrza. Pomiary wykonywane dzięki metodą wykorzystującym jednostki latające ograniczają koszty całego przedsięwzięcia oraz ich czas w porównaniu do klasycznych.

2. Opis zagadnienia

Pojęcie środowiska można rozpatrywać na wielu płaszczyznach, autor rozważa to pojęcie w aspekcie poznawczym. Do środowiska można zaliczyć elementy ożywione jak i nie ożywione oraz procesy zachodzące w danym ośrodku. Monitorowanie wybranych wartości środowiska umożliwia interpretacje zachodzących zjawisk oraz procesów. Jednym z najważniejszych składników

środowiska naturalnego jest powietrze, niezbędne do życia większości organizmów żywych zarówno roślinnych jak i zwierzęcych. Wdychanie przez ludzi powietrza o złych parametrach może powodować znaczne pogorszenie się zdrowia oraz wiele chorób. WHO alarmuje iż na świecie co roku może umierać nawet 7 milionów ludzi w związku z długotrwałą ekspozycją na powietrze o ogromnym stopniu zanieczyszczeń. (WHO 2014) Dla osób z niewydolnością układu oddechowego szczególnie ważne są poziomy pyłów zawieszonych w powietrzu głównie PM_{2,5} oraz PM₁₀. Pył wnikać do drzewa oskrzelowego osadzają się na jego ściankach utrudniając przepływ powietrza. Wnikając również do samych oskrzelików, powodując patologię układu Długotrwałe przebywanie w pomieszczeniach o ogromnym zapyleniu powoduje zwiększone prawdopodobieństwo zachorowania na pylice. (Góral i in. 2015) Pyły jednak nie są jedyną składową problemu zanieczyszczenia powietrza. Jako kolejne elementy należy wziąć pod uwagę związki tlenu węgla oraz dwutlenk węgla. Wydzielające się podczas procesów spalania różnego rodzaju paliwa grzewczego oraz procesów produkcyjnych. Podczas szeroko rozumianego procesu spalania w instalacjach przemysłowych powstają również tlenki siarki oraz azotu. Dodatkowym problemem są związki metali ciężkich np. : Pb, As, Cd, Ni. Powodują one zmiany w narządach organizmów również na poziomie komórkowym. Procesy produkcyjne w dużych zakładach plastyfikacji mogą powodować przenikanie do powietrza związku chemicznego o nazwie benzo(a)piren. Jednak jego głównym źródłem są piece CO nie spełniające norm. Temperatura spalania w takowym kotle jest zbyt niska co za tym idzie produkowane jest znacznie większa ilość szkodliwych związków. Problemem jest niska świadomość osób obsługujących tego rodzaju paleniska oraz ich ubóstwo. Jako paliwa używają oni niskokalorycznego węgla o ogromnym stopniu zanieczyszczeń, dodatkowo spalaniu podlegają materiały nie przeznaczone do tego np. różnego rodzaju polimery PET, ABS, PP etc. Związek benzo(a)pirenu jest wielopierścieniowym węglowodorem aromatycznym mającym bardzo silne działanie mutagenne na komórki. Badania dowodzą bezpośredniego związku tej substancji na wzrost zachorowalności na raka (kancerogenność). (Denissenko i in. 1996) Dodatkowo dowiedziono iż związek ten jest w stanie przeniknąć do płodu w organizmie matki oraz powodować jego różnorodne mutacje oraz również do nasienia i komórek rozrodczych. (Xu i in. 2014)

Klasyczna metoda pomiaru poziomu zanieczyszczeń odbywa się za pomocą stacjonarnych urządzeń pomiarowych. Jednostki te należące do ogólnopolskiego systemu pomiarowego, którego właścicielem oraz użytkownikiem jest „Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska”. Każdy z ośrodków wyznaczył strategiczne punkty pomiarowe gdzie zostały umieszczone jednostki pomiarowe. Większość z nich udostępnia swoje pomiary w czasie rzeczywistym dla ogółu społeczeństwa na swoich terytorialnych stronach, co ukazano na rysunku 1. Dwie z jednostek pomiarowych znajdują się w mieście wojewódzkim tj. w Opolu, jedna w Kędzierzynie reszta na terenach pozamiejskich.



Rys. 1. Wizualizacja Wojewódzkiego systemu pomiaru jakości powietrza (www.opole.pios.gov.pl).

Stacje pomiarowe mają najczęściej zabudowę kontenerową, ściany wykonane są z płyt warstwowych tj. warstwa blachy, warstwa styropianu, warstwa blachy. Ma to zapewnić stabilne warunki środowiskowe szczególnie stabilną temperaturę. Nagłe spadki oraz wzrosty temperatury mogą powodować zaburzenia systemów pomiarowych co za tym idzie zafałszować wynik. Stacja pomiarowa wyposażona jest we własny system ogrzewania oraz chłodzenia, jeśli wymaga tego sposób pomiaru. Warunek temperaturowy może zostać pominięty jeśli dokonywany jest jedynie pomiar pyłów zawieszonych (PM10) za pomocą metody laserowej. Czujniki nie skompensowane cieplnie mogą zachowywać się nie liniowo w warunkach odbiegających od normalnych. Powietrze wtłaczane jest do komór pomiarowych za pomocą gazu obojętnego każdy z czujników dokonuje odrębnego pomiaru. Wartość pomiarowa przekazywana jest do jednostki centralnej bądź koncentratora za pomocą magistrali cyfrowej. Większość z czujników posiada standardowe magistrale komunikacyjne np. RS232, RS485, TCP/IP itd. Wynik pomiarowy zostaje przetworzony za pomocą jednostki centralnej. Obliczenia odbywają się na jednostce centralnej zamontowanej w kontenerze pomiarowym, bądź przekazywane do zewnętrznych systemów przetwarzających dane pomiarowe. Kopie danych w większości przypadków wykonywane są na kilka sposobów, zależnie od rodzaju urządzenia. Jeśli przekazuje ona dane do zewnętrznego systemu pomiarowo-obliczeniowego, zapis danych odbywa się dwójako. Kopia bezpieczeństwa wykonywana jest miejscowo na urządzeniu najczęściej na pamięci wewnętrznej bądź karcie „SD”. Kopia właściwa odbywa się na poziomie serwera zajmującego się obsługą aplikacji pomiarowej, bądź maszynie zdalnej z systemem operacyjnym. Jednak przeważająca ilość realizacji opiera się na rozwiązaniu webowym ze względu na dostępność usług oraz dużą ilość odbiorców.

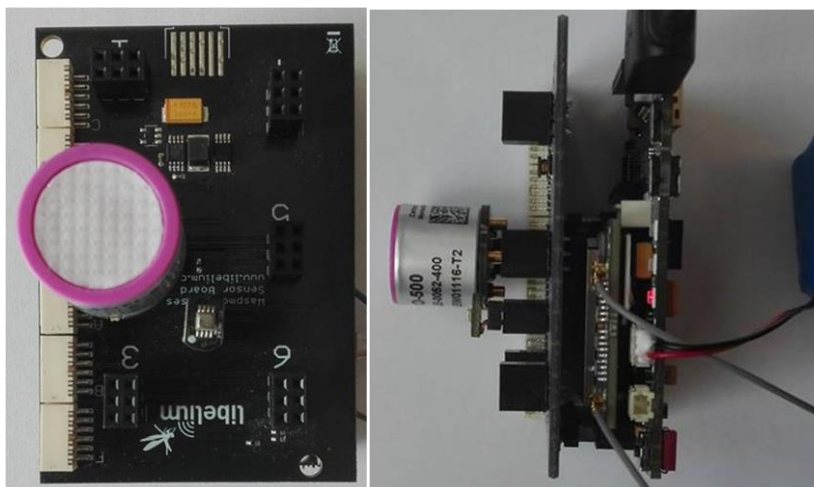
Miała ilość jednostek pomiarowych spowodowana jest również problemami z umiejscowieniem oraz mediami. Teren pod zabudowę musi zostać wykupiony przez odpowiednią organizację, bądź wynajęty do celów komercyjnych. Konieczność doprowadzenia mediów może ograniczać się jedynie do źródła zasilania. Wiąże się to jednak z samymi pracami przygotowawczymi, przekopy, przeprowadzenie przewodów, znalezienie punktu odbioru. Te same w sobie są problematyczne. Kolejnym ograniczeniem jest konieczność ubezpieczenia całej instalacji oraz ponoszenia kosztów użytkowania. Stacje pomiarowe uszkodzane są bardzo często przez akty wandalizmu tj. podpalenia, kradzieże uszkodzenia mechaniczne zewnętrznych czujników oraz wlotów powietrza.

Jakość pomiaru jednostek stacjonarnych jest bardzo wysoka ze względu na sposób pomiaru oraz rodzaj wyspecjalizowanych czujników. Ewaluacja wyników pomiaru odbywa się również za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania. Prognozowanie przyszłych zdarzeń oraz scenariuszy odbywa się za pomocą obecnych danych pomiarowych oraz historycznych. Jednakże największy wpływ na scenariusze mają dane historyczne. Estymowanie odbywa się za pomocą wyznaczania wag poszczególnych czynników w celu ustalania najbardziej prawdopodobnego ciągu wydarzeń. Mimo swoich zalet jednostki pomiarowe są stale związane z gruntem, co stanowi ich największą wadę. Te ograniczenia związane z umiejscowieniem sprawiają iż montaż nowych jednostek pomiarowych jest bardzo kłopotliwy i trudny w realizacji dla podmiotu.

Zjawisko popularnie zwane „SMOG” – iem staje się coraz bardziej powszechne w miastach o starej zabudowie oraz zmniejszonej gęstości miejskiej sieci ciepłowniczej. Niesie to za sobą zwiększenie ilości prywatnych kotłów centralnego ogrzewania. Różnorodność konstrukcji systemów grzewczych może powodować niedostosowanie temperatury spalania oraz paliwa opałowego. Emisje związków szkodliwych do atmosfery z prywatnych palenisk stanowią największe źródło zanieczyszczeń powietrza na terenach miejskich. Utrzymywaniu się pyłów zawieszonych oraz innych związków szkodliwych sprzyja ukształtowanie terenu oraz gęsta zabudowa. Moc grzewcza ciepłowni jest nie porównywalnie większa w stosunku do palenisk poszczególnych indywidualnych odbiorców, jednak potrafi generować o wiele mniej zanieczyszczeń. Związane jest to z zaawansowanymi technologiami spalania oraz układami filtracji. Dodatkowo każdy z zakładów zobowiązany jest do monitorowania poziomu zanieczyszczeń jakie generuje do środowiska oraz sporządzania odpowiedniego zestawienia. Pomiar przeprowadzany jest najczęściej za pomocą czujników oraz różnego rodzaju analizatorów.

3. Przegląd literatury

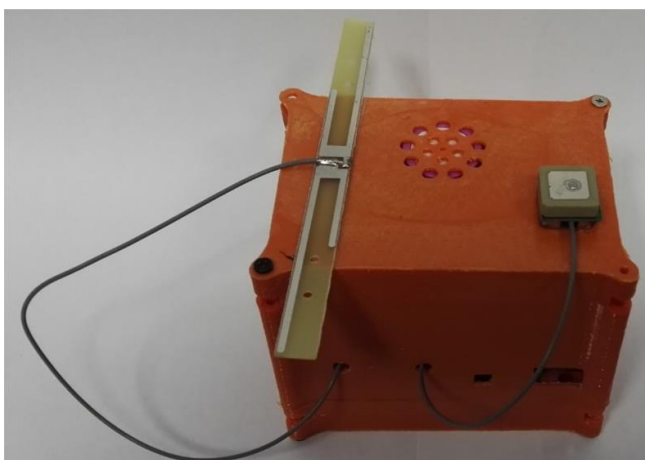
Diagnostyka zanieczyszczeń powietrza opiera się na pobieraniu określonych próbek oraz dostarczaniu ich do laboratorium, dokonywaniu pomiarów w wybranej lokalizacji oraz przesyłaniu ich wyników do jednostki centralnej. Do dokonywania pomiarów przestrzennych na terenach trudno dostępnych wykorzystywane są bezzałogowe jednostki latające UAV. Dzięki wykorzystaniu bezzałogowych jednostek latających możliwe jest sporządzenie mapy występowania określonego związku chemicznego czy też rozkładu pyłu zawieszonego. (Alvear i in. 2017)



Rys. 2. Widok płyty głównej z czujnikami (Opracowanie własne).

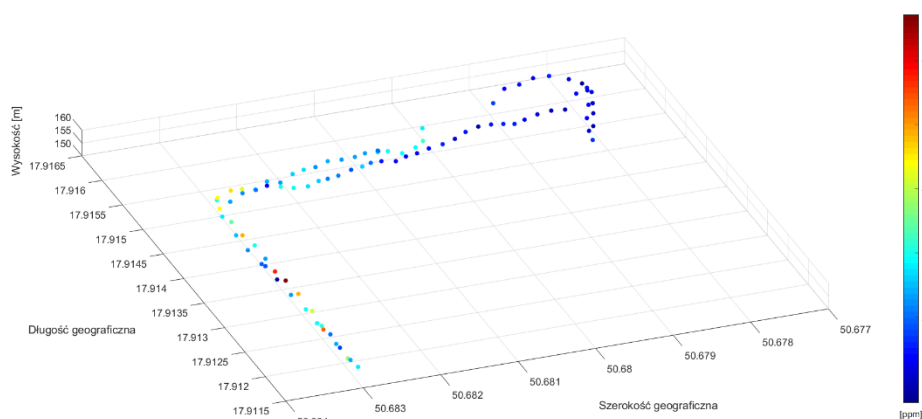
Autor w swojej aplikacji wykorzystuje scaloną platformę pomiarową firmy Libelium. Układ elektroniczny oparty jest o procesor z rodziny AVR. Płyta bazowa składa się z szeregu gniazd umożliwiających podłączenie wielu modułów rozszerzających, co ukazano na rysunku nr 2. Układ główny posiada zegar czasu rzeczywistego, wzorzec czasu wykorzystywany jest w ewaluacji wyników pomiarowych. Do płyty bazowej podłączone zostały moduły rozszerzeń takie jak odbiornik sytemu GPS, moduł komunikacji bezprzewodowej pracujący w standardzie GPRS, moduł czujników oraz bateria. Układ może zasilac się bezpośrednio z wbudowanego gniazda miniUSB lub też pracować na dowolnej baterii o napięciu 3,7 V DC. W płytę wbudowano regulator ładowania akceptuje on 2 źródła zasilania jako podstawowe wybrano gniazdo miniUSB. Natomiast zapasowym źródłem zasilania układu ładowania baterii powinno być ogniwo fotowoltaiczne. Do modułu czujników można podłączyć jednocześnie sześć czujników dokonujących niezależnego pomiaru określonych związków chemicznych w powietrzu. Dodatkowo można dokonywać pomiaru warunków środowiskowych za pomocą scalonego czujnika temperatury, wilgotności oraz ciśnienia. Pomiar warunków środowiskowych zapewnia możliwość odwzorowania poszczególnych zmian zależnych parametrów na podstawie zmiany ciśnienia, temperatury oraz wilgotności. Nasycenie powietrza przez pewne związki chemiczne zależne jest od wilgotności oraz temperatury. Przy bardzo dużej wilgotności powietrza oraz wysokiej temperaturze pomiar tlenków poszczególnych związków może okazać się nie prawidłowy.

Jednostka pomiarowa zaprojektowana została do dokonywania stacjonarnego pomiaru związków chemicznych w powietrzu. Autor zaprojektował nową obudowę w celu montażu systemu pomiarowego. Obudowa została zaprojektowana w oprogramowaniu klasy CAD, następnie całość została wydrukowana na drukarce 3D za materiału ABS. W projekcie uwzględniono otwory montażowe oraz wentylacyjne. Na górze obudowy zamontowano odbiornik sytemu GPS oraz antenę paskową systemu przesyłania danych GPRS. Całość urządzenia oraz obudowy przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obudowa wykonana za pomocą drukarki 3D (Opracowanie własne).

Pomiar wykonywany za pomocą czujników jest wstępnie przetwarzany przez płytę bazową oraz oprogramowanie wewnętrzne. Następnie wyniki zapisywane są miejscowo na karcie „SD” oraz przesyłane na serwer. Na stronie www następuje prezentacja danych w postaci wykresów oraz danych numerycznych. Przekroczenie dopuszczalnego pułapu danego związku sygnalizowane jest natychmiastowo odpowiednim komunikatem na stronie www. Autor dokonał wstępnego testu swojego systemu na terenie miasta Opole. Wyniki pomiaru zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Prezentacja wyników pomiaru w oprogramowaniu MatLab (opracowanie własne)

Celem łatwiejszej interpretacji wyniki pomiarowe powiązano bezpośrednio z koordynatami systemu GPS. Dzięki takiemu powiązaniu możliwe jest szybkie określenie punktu przekroczenia danej wartości oraz ustalenie przyczyny zaburzenia. Autor posiłkował się również naziemnymi jednostkami pomiarowymi. Celem porównania odczytanych danych z jednostki latającej oraz kilku jednostek naziemnych. Dane można było porównać dzięki sygnaturze czasu RTC. Konstrukcja autora cechuje się niską wagą oraz możliwością montażu systemu pomiarowego do dowolnej jednostki latającej o udźwigu do 500 g. Montaż następuje za pomocą uniwersalnych opasek zaciskowych.

Do osobnej klasy urządzeń pomiarowych opartych o bezałogowe latające platformy pomiarowe, należą mobilne laboratoria. Za przykład może tutaj posłużyć urządzenie DR1000 kanadyjskiej firmy Scentroid. Jako platformę latającą zastosowano jednostkę UAV DJI1000, najprawdopodobniej z powodu jego udźwigu oraz stabilności. Całość systemu przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Materiały reklamowe formy Scentroid (Scentroid 2017).

System ten opiera się na platformie Android, posiada on zaimplementowaną programowo usługę przesyła danych za pomocą bezprzewodowego łącza danych. Sterowanie odbywa się za pomocą poleceń wydawanych przez przeglądarkę. Odczyt wartości czujników odbywa się co 2 sekundy. Urządzenie może dokonywać pomiaru dzięki pięciu czujnikom związków chemicznych zawartych w powietrzu. Dodatkowo możliwy jest pomiar wartości pyłów zawieszonych dla frakcji PM 1; 2,5; oraz 10. Możliwe jest również pobieranie próbki powietrza do worka pomiarowego w celu jego dalszej ewaluacji na terenie laboratorium stacjonarnego. Producent zastosował długą kapilarę w celu pobierania próbki powietrza z poza wiru wytwarzanego przez śmigła wielosilnikowej maszyny latającej. Jest to obecnie dość często stosowany zabieg w celu uniknięcia zafałszowania pomiaru poprzez wtłaczanie znacznej ilości związku bezpośrednio do wlotu czujnika pomiarowego. Powietrze wprowadzane jest prawdopodobnie do systemu pomiarowego za pomocą turbinki wtłaczającej. Należy zwrócić uwagę iż urządzenie posiada dwa niezależne wloty powietrza jeden dostarcza próbkę powietrza do układu pomiaru pyłów zawieszanych. Drugi natomiast dostarcza próbkę powietrza do systemu analizowania składu chemicznego powietrza. Rysunek 6. (DR1000 Brochure)



Rys. 6. Wloty powietrza systemu pomiarowego (Scentroid 2017).

4. Podsumowanie

Zaprezentowane przez autora możliwości wykorzystania bezzałogowego pojazdu latającego do celów pomiarowych są bardzo szerokie. Jednostka UAV stanowi uniwersalną platformę do

budowy systemów pomiarowych cechujących się wysoką mobilnością oraz koniecznością dokonywania pomiarów w krótkim czasie. Użytkownik samodzielnie może dokonać skatalogowania obiektu przemysłowego za pomocą metod wizyjnych bez udziału dodatkowego personelu czy też sprzętu. Ogranicza to znacznie koszty związane z inspekcjami oraz ich czas. Pomiar może odbywać się również w sposób zautomatyzowany za pomocą koordynatów GPS. Pole wykreślone za pomocą przelotu testowego lub też zadane dzięki aplikacji może zostać wielokrotnie powtarzane autonomicznie. Praca operatora ogranicza się jedynie do nadzorowania poprawności pracy platformy latającej. Obecnie metoda ta stosowana jest bardzo szeroko w inspekcjach farm fotowoltaicznych oraz detekcji ich uszkodzeń. Skróciło to znacznie proces inspekcji oraz zwiększyło jego efektywność.

Dzięki zastosowaniu jednostek latających małych rozmiarów niektóre z badań dopiero mogły zostać przeprowadzone zgodnie z planami badaczy. Pomiar gazów w przestrzeni był do tej pory możliwy za pomocą balonów pomiarowych oraz dużych jednostek latających lub też stacjonarnych czujników. Dopiero zastosowanie małych bezzałogowych jednostek latających umożliwiło wykonywanie dynamicznych pomiarów składu powietrza oraz wykrywanie różnego rodzaju zanieczyszczeń. Autor obecnie stosuje z powodzeniem system pomiaru jakości powietrza oparty o bezzałogową jednostkę latającą napędzaną czterema silnikami wirnikowymi.

Mimo wielu zalet jakie posiadają jednostki UAV ich podstawową wadą jest nośność oraz czas pracy w powietrzu. Urządzenia zasilane dzięki baterią mogą latać na jednej jednostce baterii do 15-25 min zależnie od konstrukcji. Do wielu zastosowań czas ten jest wystarczający jednak dla długotrwałych pomiarów zbyt krótki. Zdaniem autora przełomem stanie się stworzenie wysoce wydajnych baterii o ogromnej pojemności w stosunku do mas, co wydłużyło by czas pracy jednostki w powietrzu.

Spadek cen jednostek UAV zwiększył ich popularność w różnego rodzaju aplikacjach zarówno przemysłowych badawczych jak i rekreacyjnych. Trend ten może jedynie się zwiększać w perspektywie upływu czasu, związane jest to z ogromnym potencjałem tych urządzeń. Swoista masowość ich występowania również zwiększyła ilość dokonywanych odkryć oraz sposobów ich wykorzystania co można zaliczyć do naturalnego procesu zwiększania dostępu do technologii.

5. Literatura

- Alvear O, Zema NR, Natalizio E, et al. (2017) Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility, *Journal of Advanced Transportation* 2017: 1-4.
- Denissenko MF, Pao S, Tang M, et al. (1996) Preferential Formation of Benzo[a]pyrene Adducts at Lung Cancer Mutational Hotspots in P53; *Science* 274(5286): 430-432.
- Góral B, Romanowska-Słomka I, Horzela I (2015) Ocena możliwości ograniczenia narażenia na czynniki szkodliwe w kopalni granitu, *Zeszyty naukowe Politechniki Poznańskiej* 66: 5-26.
- Scentroid (2017) DR1000 Flying Laboratory - Drone Environmental Monitoring, <https://scentroid.com/wp-content/uploads/2017/04/DR1000-Brochure.pdf>: 1-13.
- WHO (2014) Public health environmental and social Determinants of Health, PHE 63.
- Xu G, McMahan CA, Walter CA (2014) Early-life exposure to benzo[a]pyrene increases mutant frequency in spermatogenic cells in adulthood, *PLoS One* 9(1): 1-7.

22. Metody dezodoryzacji w wybranych zakładach przetwarzania odpadów

The deodorization methods in selected waste treatment plants

Wiśniewska Marta

Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

Opiekun naukowy: prof. nzw. dr hab. inż. Andrzej Kulig

Wiśniewska Marta: marta.wisniewska.89@wp.pl

Słowa kluczowe: mechaniczno-biologiczne przetwarzanie odpadów, odory, odpady, uciążliwość zapachowa

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiony został problem uciążliwości zapachowej w obiektach gospodarki komunalnej, a dokładniej w zakładach przetwarzania odpadów. Ponadto wskazane zostały różne metody dezodoryzacji gazów, a także ich praktyczne zastosowanie w wybranych instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych, tj. zlokalizowanych w: Poświętnem, Kobiernikach, Starym Lesie oraz Radiowie, a także w innych zakładach na terenie Polski. W pracy wskazano również działania mogące przyczynić się do ograniczenia uciążliwości zapachowej w obiektach gospodarki komunalnej. Dokonano również subiektywnej oceny problemu uciążliwości zapachowej w omawianych zakładach połączonej z oceną mieszkańców z nimi sąsiadujących.

1. Wstęp

Zakłady przetwarzania odpadów stanowią istotne potencjalne źródło oddziaływania zapachowego, dostrzegane głównie przez ludność mieszkającą w pobliżu tych zakładów. Efektem oddziaływania zakładów są skargi mieszkańców na uciążliwość odorową, które kierowane są do jednostek samorządowych (np. urzędy gmin), regionalnych dyrekcji ochrony środowiska, wojewódzkich inspekcji ochrony środowiska, czasem bezpośrednio do zakładu bądź innych niewymienionych organów państwowych (Kulig 2004).

Wrażenia węchowe, które wywołuje emisja gazów z zakładów przetwarzania odpadów, uznawane są za nieprzyjemne. Gazy te powszechnie nazywane są odorami (Szynkowska i in. 2009). Odory mogą być mieszaninami nawet kilkuset związków, ale tylko część z nich wywołuje specyficzną woń. Do grup związków, które wywołują największą uciążliwość zapachową zalicza się związki azotu (tj.: aminy, indol, skatol), związki siarki (tj.: siarkowodór, merkaptany, wielosiarczki), jak również lotne kwasy organiczne, a także fenol i jego pochodne. Uciążliwość zapachowa określana jest jako dyskomfort spowodowany między innymi wyżej wymienionymi związkami (odorantami), które mogą oddziaływać w sposób negatywny na pojedynczą osobę bądź grupę ludzi. Uciążliwość ta jest wynikiem niepożądanych zapachów, które mogą spowodować pogorszenie samopoczucia (Kulig 2004 i Sówka i in. 2010).

Minimalizowanie emisji zanieczyszczeń, które powodują uciążliwość zapachową polega na zapobieganiu unosowi związków odorotwórczych lub dezodoryzacji gazów odlotowych. Różnica między dezodoryzacją, a standardowym oczyszczaniem gazów sprowadza się do zamierzonego celu omawianych działań. W przypadku oczyszczania gazów dąży się do usunięcia wszystkich zanieczyszczeń, a w przypadku dezodoryzacji celem jest usunięcie tych, które są odorantami (Kośmider i Mazur-Chrzanowska 2012).

Zapobieganie emisji można w różnoraki sposób. W zakładach przetwarzania odpadów istotne jest, aby zhermetyzować miejsca prowadzenia najbardziej odorotwórczych procesów technologicznych, tj.: strefę rozładunku i magazynowania odpadów, halę sortowni, kompostownię, a w przypadku spływania odcieków oraz wód poprocesowych do zbiornika bezodpływowego również opróżnianie zbiornika przez wóz asenizacyjny powinno odbywać się w pomieszczeniu zamkniętym. Do czynności zapobiegających uciążliwości zapachowej zaliczyć możemy także przestrzeganie procedur eksploatacyjnych w stosunku do prowadzonych procesów technologicznych, biosuszenie,

ujmowanie gazów procesowych i poddawanie ich termicznemu przekształcaniu, wykorzystywanie preparatów biologicznych, izolowanie oraz okrywanie pryzmy warstwami słomy bądź dojrzałym kompostem, a także maskowanie zapachu. Część z tych czynności (np.: maskowanie, czy używanie preparatów biologicznych) zaliczana jest jednocześnie do metod dezodoryzacji gazów (Lelicińska 2005).

Dezodoryzacja stosowana jest tam, gdzie dochodzi do unosu i emisji gazów, w których składzie znajdują się związki będące odorantami. Jednym z rodzajów miejsc, w których wykorzystuje się różne metody dezodoryzacji są zakłady mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. W celu sprawdzenia prawidłowości wyboru danej metody, należy ocenić jej skuteczność. Jedynym jej potwierdzeniem jest spostrzeżenie oczekiwanych efektów wykorzystania konkretnej metody w skali o charakterze przemysłowym w zakładach należących do tej samej branży. Jeżeli jest to niemożliwe, np. z powodu trudności w dostępie do obiektów, niezbędne jest wykonanie testów skuteczności (Kośmider i Mazur-Chrzanowska 2012).

2. Materiały

Na podstawie dostępnej literatury oraz innych źródeł sporządzono przegląd dostępnych metod służących minimalizacji emisji związków odorotwórczych oraz omówiono procesy (fizyczne, chemiczne lub biologiczne) wykorzystywane podczas ich stosowania. W celu przeprowadzenia analizy stosowanych metod dezodoryzacji w wybranych zakładach przetwarzania odpadów dokonano wizytacji w czterech zakładach (w Poświętnem, Kobiernikach, Starym Lesie i w Warszawie) oraz zapoznano się z dokumentacją dotyczącą pracy zakładów, jak również zapoznano się z raportem końcowym ekspertyzy dotyczącej instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (Jędrzak i den Boer 2015), w której zawarte są dane związane z oczyszczaniem powietrza poprocesowego w badanych zakładach.

Analizy stosowanych metod dezodoryzacji dokonano w czterech zakładach przetwarzania odpadów, które posiadają instalację mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. Zakłady te zlokalizowane są w Poświętnem koło Płońska, Kobiernikach koło Płocka, Stary Lesie koło Starogardu Gdańskiego oraz w Warszawie. W ramach analizy zapoznano się z dokumentacją techniczną każdego zakładu oraz zacytowano opinie kierowników zakładów sprawie ewentualnych skarg okolicznych mieszkańców na uciążliwość zapachową.

3. Metody

W celu dezodoryzacji gazów odlotowych stosowane są metody:

- absorpcja w wodzie,

Absorpcja w wodzie stosowana jest przede wszystkim do oczyszczania gazów zawierających znaczące ilości zanieczyszczeń, które rozpuszczają się w wodzie (tj.: amoniaku, ditlenku siarki, ditlenku węgla, fluorowodoru, chlorowodoru, chloru oraz tetrafluorku węgla). Metoda ta powoduje proces ich wymywania, dzięki czemu może być również stosowana jest w celu odsiarczania spalin.

Do zalet wykorzystywania tej metody z pewnością można zaliczyć stosunkowo niskie koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne, jak również nieskomplikowaną aparaturę, której obsługa nie powoduje zagrożenia życia i zdrowia pracowników. Pomimo licznych zalet metoda ta posiada również wady. Do nich zaliczyć można powstające uciążliwe ścieki, wtórną emisję związków odorotwórczych ze ścieków, wysokie koszty związane z pompowaniem, ale również zjawisko korozji instalacji.

- absorpcja z reakcją chemiczną,

Absorpcja z reakcją chemiczną jest metodą stosowaną m. in. w obiektach gospodarki komunalnej. Charakteryzuje się przede wszystkim dużą skutecznością w swym działaniu, a także dość prostą konstrukcją instalacji. Efektem ubocznym tej metody również są problematyczne pod względem zagospodarowania ścieki. Ponadto stosowane czynniki stanowią realne zagrożenie dla zdrowia pracowników. Istnieje również ryzyko dla środowiska w przypadku zaistniałych wycieków reagentów. Poza tym zastosowane materiały konstrukcyjne powinny zawierać materiały chemoodporne.

- metoda Kurmeiera

Metoda Kurmeiera polega na dawkowaniu reaktywnego gazu (np. chloru, który stanowi czynnik zarówno utleniający, jak i chlorujący) do gazów, które poddawane są oczyszczaniu. Czynność ta powinna odbywać się przed wejściem do wieży absorpcyjnej, która wypełniona jest kamieniem wapiennym oraz polewana wodą. Metoda ta z powodzeniem może być stosowana w przypadku obiektów gospodarki komunalnej, a niewątpliwą jej zaletą jest wysoka skuteczność, ale także niskie koszty eksploatacyjne. W wyniku tej metody również powstają uciążliwe ścieki, a używanie czynników reaktywnych stwarza zagrożenie dla zdrowia pracowników, ale i dla samej instalacji (ryzyko korozji) (Kośmider i Mazur-Chrzanowska 2012).

- ozonowanie,

Metoda ozonowania w fazie ciekłej sprowadza się do zastosowania ozonowanej wody bądź wodnych roztworów kwasów lub zasad, np. podchlorynu sodu czy nadmanganianu potasu nasyconych ozonem. Zadaniem wodnego roztworu jest zraszanie wypełnienia w skruberze. Zraszanie odbywa się w obiegu zamkniętym. Reakcje chemiczne z udziałem ozonu w fazie ciekłej zachodzą znacznie szybciej niż ma to miejsce w fazie gazowej. W przypadku dozowania ozonu w fazie gazowej, ozon doprowadzany jest do substancji odorowej. Następnie zachodzi utlenianie związków organicznych. W ten sposób powstają produkty pośrednie, które następnie ulegają przemianom w aldehydy oraz ketony. Zaletą ozonowania w fazie gazowej jest wysoka skuteczność w przypadku dużej ilości związków (tj.: alkenów, amin, organicznych związków siarki), ale również niskie koszty zarówno inwestycyjne, jak i eksploatacyjne. Do wad należy zaliczyć krótkotrwałość ozonu (co jest przyczyną konieczności dozowania gazu w miejscu jego wytwarzania) oraz jego wysoka toksyczność. Metoda ta z pewnością nie jest bezobsługowa. Powinna być stosowana pod ścisłą kontrolą, m. in. ze względu na to, iż efektywność procesu zależy od takich parametrów jak: temperatura gazów oraz rodzaj odorantu (Departament Powietrza i Klimatu 2016 i Ozonek 2010).

- spalanie termiczne i katalityczne

Spalanie jest procesem utleniania zachodzącego pod wpływem temperatury (650-800°C). Spalanie termiczne polega na utlenianiu gazów charakteryzujących się palnością oraz odorantów poprzez ich podgrzanie w piecu wraz z powietrzem bądź tlenem. Metoda ta jest bardzo często stosowana m. in. w spalarniach odpadów. Może być stosowana do większości związków organicznych nawet przy ich wysokich stężeniach. Ponadto istnieje możliwość odzysku ciepła z instalacji, jak również pozyskanie ciepłej wody użytkowej (wtórny odzysk). W przypadku nieutrzymywania zalecanych parametrów procesu, może nastąpić emisja substancji zapachowych oraz powstawanie sadzy (wynik spalania niecałkowitego przy niedostatecznej ilości tlenu). Metoda ta generuje koszty zależne od zużycia paliwa. W sytuacji dużego zapylenia gazów, konieczne jest uprzednie zastosowanie odpylaczy, a jeżeli wykazują zbyt dużą wilgotność, należy usunąć z nich także parę wodną.

Spalanie katalityczne, w odróżnieniu od spalania termicznego zachodzi w dużo niższej temperaturze (350-400°C). Dzieje się tak za sprawą katalizatora, na którego powierzchni przebiega proces utleniania gazów. Za pośrednictwem katalizatora można uzyskać ten sam stopień spalania, co w przypadku spalania termicznego, ale przy mniejszym zużyciu paliwa. Ponadto w tym przypadku nie ma konieczności uprzedniego odpylania gazów (gdy zapylenie jest niewielkie) oraz usuwania z nich wilgoci, co jest niewątpliwą zaletą procesu. Wadą spalania katalitycznego jest wrażliwość katalizatora, jak również tworzenie się produktów ubocznych w postaci tlenku siarki (IV) oraz chlorowodoru. Poza tym istnieje ryzyko erozji złoża katalizatora, a także konieczne jest zapewnienie niezmiennego stężenia zanieczyszczeń, co wiąże się z przeprowadzaniem częstych kontroli.

- metoda sorpcyjno-oksydacyjna

Metoda ta stanowi połączenie adsorpcji oraz utleniania termicznego. Stosowana jest przede wszystkim do oczyszczania gazów o niskich stężeniach zanieczyszczeń. Zanieczyszczenia te powinny mieć charakter rozpuszczalników, których proces utleniania nie spowoduje produkcji innych zanieczyszczeń. Metoda ta charakteryzuje się wysokimi kosztami inwestycyjnymi i dość niskimi kosztami eksploatacyjnymi. Ze względu jednak na wymagania procesu, ma ona ograniczony zakres możliwości zastosowania.

- metoda kondensacyjna

Metoda kondensacyjna wykorzystuje technikę separacji i polega na tym, iż ten związek wchodzący w skład mieszaniny gazowej, który charakteryzuje się największą lotnością przechodzi w stan nasycenia i zmienia stan skupienia w ciekły. Metoda jest stosunkowo prosta, natomiast wymaga dużego zapotrzebowania na energię oraz uprzedniego oczyszczenia gazów. Wykazuje wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne (Departament Powietrza i Klimatu 2016).

- metody biologiczne

Metody biologiczne charakteryzuje wykorzystanie tych mikroorganizmów, które posiadają zdolność do utleniania różnego rodzaju związków chemicznych pochodzenia organicznego oraz nieorganicznego. Ich ogólna zasada działania polega na przepuszczeniu zanieczyszczonego gazu przez aktywne złożo mikrobiologiczne. Zanieczyszczenia zatrzymywane są na złożu, a następnie utleniane przez znajdujące się w złożu mikroorganizmy. Produktami tego procesu są woda i dwutlenek węgla. Metody biologiczne realizowane są przy użyciu biofiltrów oraz biopłuczek (Estrada 2013).

- modyfikacja zapachu

Metoda ta opiera się na wprowadzaniu substancji posiadającej właściwości lotne, której zadaniem jest zmiana charakteru zapachu bądź odbierane wrażenie intensywności zapachu. Modyfikacja zapachu może być realizowana poprzez: maskowanie (stosowanie takiej substancji zapachowej, która pozwoli uzyskać zapach bardziej akceptowalny), przeciwdziałanie zapachowi (mieszanie odorantu ze związkiem go zwalczającym) oraz neutralizację (efekt zmiany reakcji między receptorami chemicznymi nosowymi i cząsteczkami substancji zapachowej) (Departament Powietrza i Klimatu 2016).

4. Wyniki

- Zakład Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem

Zakład ten jest własnością Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej z siedzibą w Płońsku. Instalacja mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych znajdująca się na terenie Zakładu wyposażona jest w części mechanicznej m. in. w separatory oraz kabiny sortownicze, w których następuje segregacja ręczna odpadów. Część mechaniczna zlokalizowana jest w zamkniętej hali technologicznej sortowni o dużym stopniu hermetyzacji (wentylacja mechaniczna, szczelne betonowe podłogi, zamknięte wrota). Sortownia wyposażona jest także w instalację zamgławiania, która służy dezodoryzacji gazów odorotwórczych (bariera antyodorowa) (Wiśniewska i Lelicińska-Serafin 2017).

System zamgławiania wykorzystywany jest w przypadku dużych powierzchni oraz emisji odorów o charakterze niezorganizowanym. Powstająca mgła wytwarzana jest za pomocą systemów wysokociśnieniowych. Służy ona równomiernemu rozprzestrzenianiu cząsteczek o mikroskopijnej wielkości, co pozwala jej na dłuższe utrzymywanie się w powietrzu, a tym samym poprawia właściwości neutralizujące. Skład możliwych do stosowania środków neutralizujących, jest tajemnicą producenta.

Instalacja zamontowana jest pod stropem hali sortowni jako pięć linii zamgławiających, których dysze rozstawione są co 3-5 m. Metoda ta może być eksploatowana w sposób ciągły bądź cykliczny. Instalacja nie powinna być jednak uruchamiana w okresie zimowym ze względu na istniejące ryzyko zamarzania, aczkolwiek nie stanowi to większego problemu, ponieważ w tym okresie uciążliwość zapachowa jest najmniejsza.

Część biologiczna w Zakładzie w pierwszym etapie prowadzona jest w komorach z systemem BIODEGMA. Każda z komór (łącznie sześć) posiada uchylne wrota wjazdowe oraz skrzydła dachu. Zarówno dach, jak również wrota oraz ściany wewnętrzne pokryte są membraną półprzepuszczalną. System ten zapewnia wodo- oraz powietrznoszczelną strukturę, co skutecznie ogranicza uciążliwość zapachową. Powietrze z komór nie jest ujmowane, ani oczyszczane. Dostawca zastosowanej w Zakładzie technologii daje gwarancję, iż membrana znajdująca się wewnątrz komór działa jak bariera o charakterze fizycznym dla unoszących się ze stabilizowanych lub kompostowanych odpadów gazów, a także mikroorganizmów (Jędrzak i den Boer 2015).

Drugi etap biologicznego przetwarzania odpadów w zakładzie w Poświętnem odbywa się na placu na otwartej powierzchni w sąsiedztwie boksów przeznaczonych do intensywnej stabilizacji (pierwszy etap procesu). Etap ten, w przeciwieństwie do etapu pierwszego, przebiega ze znacznie mniejszą emisją gazów i z reguły nie stanowi problemu dla pracowników oraz okolicznych mieszkańców (Lelicińska 2005).

- Zakład Utylizacji Odpadów Komunalnych w Kobiernikach

Część mechaniczna wchodząca w skład instalacji przetwarzania odpadów w zakładzie w Kobiernikach zlokalizowana jest, tak jak w zakładzie w Poświętnem w zamykanej hali sortowni, charakteryzującej się dużym stopniem hermetyzacji. W przeciwieństwie jednak do poprzedniego zakładu, w tym przypadku sortownia nie jest wyposażona w separatory. Segregacja dostarczanych odpadów odbywa się tylko ręcznie. W hali sortowni nie jest stosowana żadna metoda służąca dezodoryzacji gazów.

Część biologiczna na terenie Zakładu realizowana jest w żelbetonowych boksach (12 boksów) oddzielonych od siebie ścianą o wysokości 1,5 m (pierwszy etap procesu). Wszystkie boksy znajdują się pod wiatą. W boksach usypywane są pryzmy z odpadów. Stopniowo, podczas ich usypywania, odpady przykrywane są membraną półprzepuszczalną oraz mocowane do podłoża. Takie rozwiązanie służy minimalizacji emisji odorów. Ponadto struktura membrany sprawia, iż na jej powierzchni na wewnętrznej stronie tworzy się film wodny, działający jak biofiltr, a woda zatrzymuje związki odorowe (gwarancja dostawcy technologii). Drugi etap, tak jak w poprzednim zakładzie, również odbywa się na placu na otwartej powierzchni (w pryzmach, bez membrany).

- Zakład Utylizacji Odpadów w Starym Lesie

Podobnie jak zakład w Kobiernikach, zakład w Starym Lesie również nie stosuje żadnej metody dezodoryzacji w części mechanicznej. Tak jak we wcześniej analizowanych zakładach, część mechaniczna w Zakładzie Utylizacji Odpadów znajduje się w zamykanej hali sortowni z możliwością hermetyzacji w znacznym stopniu, w której segregacja odpadów odbywa się przy użyciu separatorów oraz w kabinach sortowniczych.

Część biologiczna w Zakładzie realizowana jest w dwojaki sposób w zależności od materiału wsadowego. W przypadku odpadów ulegających biodegradacji pochodzących ze strumienia odpadów zmieszanych stabilizacja odpadów odbywa się w na placu na otwartej powierzchni. W przeciwieństwie do zakładu w Kobiernikach, najpierw pryzmy są w całości usypywane, a dopiero w kolejnym etapie przykrywane są membraną półprzepuszczalną i mocowane. W tym przypadku dostawca technologii membranowej również gwarantuje działanie membrany o charakterze biofiltra. Drugi etap procesu również odbywa się na otwartej powierzchni (w pryzmach, bez membrany).

W sytuacji, gdy materiał wsadowy stanowią odpady ulegające biodegradacji zebrane selektywnie, część biologiczna (pierwszy etap) odbywa się w kontenerach (system Kneer). Kontenery wyposażone są w filtry naturalne w postaci kory sosnowej, zapobiegające emisji odorów. Drugi etap realizowany jest na zadaszanej płycie.

- Zakład Unieszkodliwiania Odpadów „Radiowo”

W przypadku Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów „Radiowo” na terenie hali wyladowczej, na której znajduje się również sortownia, zamontowana jest instalacja maskująca gazy. Hala sortowni nie jest wyposażona ani w separatory ani w kabiny sortownicze. Hala, mimo iż jest zamykana, nie ma możliwości hermetyzacji w takim stopniu, jak w przypadku poprzednich zakładów.

Część biologiczna realizowana jest w żelbetonowych boksach na otwartej przestrzeni. Usypane z odpadów pryzmy w pierwszym etapie przykrywane są membranami półprzepuszczalnymi (tworzącymi barierę fizyczną zgodnie z zapewnieniami dostawcy technologii. Drugi etap również odbywa się na wolnym powietrzu, ale już bez membrany. Zakład wyposażony jest w cztery biofiltry kompostowe jednopoziomowe otwarte. Zainstalowane zostały one, gdy biostabilizacja odpadów odbywała się w systemie DANO (obecnie funkcjonuje system membranowy). Aktualnie biofiltry w tym Zakładzie charakteryzują się niską skutecznością, m. in. z powodu nieprawidłowej eksploatacji (Lelicińska 2005 i Kulig i in. 2015).

- Przegląd innych zakładów przetwarzania odpadów na terenie Polski (Jędrzak i den Boer 2015)

Każdy zakład, którego działalność opiera się na przetwarzaniu odpadów jest potencjalnym źródłem odorów. Nie wszystkie jednak zakłady wykorzystują dostępne metody w celu zminimalizowania emisji gazów powodujących uciążliwość zapachową zarówno dla mieszkańców, jak również samych pracowników obsługujących zakład. Według przeprowadzonego przeglądu zakładów przetwarzania odpadów komunalnych najczęściej stosowany jest biofiltr, ewentualnie biofiltr z biopłuczką w większości przypadków tylko w części biologicznej. Poniżej przedstawione zostały zastosowane rozwiązania w zakładach, będących przedmiotem przeglądu:

- Zakład Recyklingu, Utylizacji, Przerobu i Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych i Przemysłowych w Rudnej Wielkiej
Sposób oczyszczania gazów odlotowych: biofiltr, który stanowi złożę biologiczne wykonane z kolejno ułożonych warstw karpiny iglastej, kory sosnowej, włókna kokosowego wymieszanego z torfem oraz karpiny iglastej.
- Zakład Kompleksowego Zagospodarowania Odpadów Komunalnych w Tychach
Powietrze poprocesowe zarówno z części mechanicznej jak i biologicznej kierowane jest do dwustopniowej instalacji oczyszczania powietrza. Pierwszy stopień oczyszczania to płuczka służąca do wiązania amoniaku za pomocą kwasu siarkowego, który znajduje się w specjalnym zbiorniku, który stanowi część instalacji. Drugi stopień oczyszczania gazów odlotowych składa się z dwóch biofiltrów, których złożę wypełnione jest zrębkami drewna, ściółką lub materiałem podobnym.
- Zakład Unieszkodliwiania Odpadów w Toruniu
Biologiczne przetwarzanie w zakładzie realizowane jest w systemie BIODAGMA oraz w systemie MUT. Powietrze poprocesowe z instalacji MUT oczyszczane jest w płuczce wodnej oraz na niskoobciążonym biofiltrze powierzchniowym, który wykonany jest w konstrukcji żelbetonowej. Złożę biofiltra wypełnione jest kompostem o granulacji mniejszej niż 20 mm, a także materiałem strukturalnym ułożonym na warstwie zrębków.
- Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych w Puławach
Układ oczyszczania powietrza tworzy płuczka chemiczna z możliwością automatycznego dozowania kwasu siarkowego, za pomocą którego następuje wytrącanie amoniaku z powietrza poprocesowego. Biofiltr natomiast złożony jest z dwóch komór. Jego złożę wypełnione jest korą drzew iglastych i ułożone na ruszcie podtrzymującym, który umożliwia równomierne obciążenie powierzchni powietrzem poprocesowym. Konstrukcję biofiltra tworzą trzy żelbetowe ściany, które od frontowej strony zamknięte są panelami z drewna. Posadzka ukształtowana jest ze spadkiem w kierunku punktu odwodnieniowego, znajdującego się przy wjeździe do biofiltra. Do tego obiektu doprowadzona jest również instalacja wodociągowa na potrzeby zraszania złoża oraz kanalizacja technologiczna.
- Karkonoskie Centrum Gospodarki Odpadami w Ściegnach-Kostrzycy
Biologiczne przetwarzanie w Zakładzie realizowane jest za pomocą instalacji Kneer (kompostownia kontenerowa) oraz instalacji tunelowej. Instalacja Kneer posiada jeden biofiltr, który tworzy aktywne złożę biologiczne składające się z kilku naprzemiennie ułożonych warstw torfu, kory i kompostu. Biofiltr ten umieszczony jest w kontenerze stalowym. Powietrze poprocesowe z instalacji tunelowej oczyszczają trzy biofiltry ze złożem wykonanym z preparowanych zrębków korzeni drzew, z czego dwa umieszczone są w obudowie z tworzywa sztucznego, a jeden w obudowie z metalu. Ruch powietrza w każdym biofiltrze wymuszany jest wentylatorem wywiewnym.
- Zakład Przetwarzania Odpadów w Czerwonym Borze
Powietrze poprocesowe z części biologicznej kierowane jest przez płuczkę wodną na biofiltr z pomiarem temperatury oraz ręcznym zraszaniem. Biofiltr tworzy otwarty zbiornik betonowy. Złożę biofiltra wypełnione jest karpiną i korą sosnową z dodatkiem drewna.
- Regionalna Instalacja Przetwarzania Odpadów Komunalnych „EKO DOLINA” sp. z o. o.

- Powietrze, które ujmowane jest za pomocą wentylatorów, kierowane jest w pierwszej kolejności na płuczkę wodną, a następnie na złożo biofiltra. W płuczce wodnej, która eksploatowana jest przy użyciu wody (obieg zamknięty) następuje wstępne oczyszczanie oraz nawilżanie powietrza procesowego, jak również jego chłodzenie poprzez wymieszanie z powietrzem o niższej temperaturze, pochodzącym z wentylacji hali kompostowni. Złożo biofiltra wypełnione jest karpiną drzew liściastych. Kondensat pary wodnej, a także wody opadowe z biofiltra odprowadzane są do zbiornika perkolatu, który stanowi część płuczki gazów.
- Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Komunalnych „Orli Staw”
Hala kompostowni na terenie Zakładu stanowi obiekt zamknięty, który wyposażony jest w instalację wentylacyjną wyciągową (ogólną) oraz podciśnieniową (procesową). Wentylacja wyciągowa odpowiedzialna jest za utrzymanie podciśnienia w hali kompostowni oraz niedopuszczanie do emisji nieoczyszczonego gazu do atmosfery. Wentylacja ogólna z górnej części hali kompostowni oraz powietrze, które jest odsysane z przestrzeni pod tunelami kierowane jest do płuczki biologicznej zraszanej wodą, a w kolejnym etapie do biofiltra. Złożo biofiltra stanowi warstwa mieszanki zrębków i wiórów sosnowych.

5. Dyskusja i wnioski

Po zapoznaniu się z subiektywną oceną pracowników zakładów w Poświętnem, Kobiernikach, Starym Lesie oraz w Warszawie najmniej skarg od mieszkańców na uciążliwość zapachową wpływa do Zakładu w Poświętnem. Można przypuszczać, iż fakt ten wynika z zastosowania instalacji dezodoryzacyjnej oraz z wykorzystanej technologii stabilizacji i kompostowania odpadów (kompostownia tunelowa). Najwięcej skarg wpływa do Zakładu w Warszawie. W tym przypadku mamy do czynienia z nieizolowaną kompostownią oraz strefą rozładunku, magazynowania i przetwarzania odpadów. Zainstalowane biofiltry w obecnie realizowanym systemie membranowym charakteryzują się niską skutecznością, a gwarancja dostawy technologii membranowej w tej sytuacji najwyraźniej nie ma potwierdzenia w praktyce.

Istnieje duża różnorodność metod dezodoryzacji gazów, ale tylko dobranie odpowiedniej przynosi oczekiwane efekty w postaci zadowalającej minimalizacji oddziaływania zapachowego. Oprócz dobrania odpowiedniej metody dezodoryzacji istotne jest właściwe prowadzenie procesów technologicznych, w tym również operacji jednostkowych. Jedną z takich operacji, która przeprowadzana jest w zakładzie w Kobiernikach stanowi stopniowe (w miarę usypywania przyzmy) przykrywanie odpadów poddawanych obróbce biologicznej membraną. Operacja ta nie jest praktykowana w Zakładzie w Starym Lesie, co może stanowić jedną z przyczyn ilości skarg mieszkańców. Pracownicy obu zakładów potwierdzają, iż mieszkańcy skarżą się na uciążliwość zapachową, z tym że większe nasilenie skarg przejawia się w zakładzie w Starym Lesie.

Zastosowanie w praktyce czynności zapobiegających uciążliwości zapachowej oraz stosowanie właściwej metody dezodoryzacji daje możliwość na zmniejszenie, a może nawet wyeliminowanie emisji substancji złośliwych, co za tym idzie, także ograniczenie skarg mieszkańców.

6. Literatura

- Departament Powietrza i Klimatu (2016) Kodeks przeciwdziałania uciążliwości zapachowej, Warszawa.
- Estrada JM, Lebrero R, Quijano G, et al. (2013) Strategies for Odour Control, (w:) Odour Impact Assessment Handbook, Wiley.
- Jędrzak A, den Boer E (2015) Raport końcowy III etapu ekspertyzy mającej na celu przeprowadzenie badań odpadów w 20 instalacjach do mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów, projekt współfinansowany w ramach Programu Operacyjnego Pomoc Techniczna 2007-2013
- Kośmider J, Mazur-Chrzanowska B (2012) Odory, wyd. PWN.

- Kulig A (2004) Metody pomiarowo-obliczeniowe w ocenach oddziaływania na środowisko obiektów gospodarki komunalnej, OW PW.
- Kulig A, Szyłak-Szydłowski M, Lelicińska-Serafin K, i in. (2015) Ocena oddziaływania zapachowego instalacji mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów i składowiska odpadów w Radiowie, Raport WIŚ PW 03a-15/KOiKŚ.
- Lelicińska K (2005) Ograniczenie uciążliwości zapachowej w kompostowaniu odpadów, Przegląd Komunalny 11: 125-129.
- Ozonek J (2010) Dezodoryzacja gazów odlotowych metodą ozonowania, (w:) Współczesna problematyka odorów, WNT.
- Sówka I, Zwoździak J, Szklarczyk M i in. (2010) Charakterystyka wybranych metod badań terenowych stosowanych w ocenie zapachowej jakości powietrza wokół obiektów przemysłowych, (w:) Współczesna problematyka odorów, WNT.
- Szynkowska MI, Wojciechowska E, Węglińska A, i in. (2009) Odory. Aktualny problem w ochronie środowiska, Przemysł chemiczny 88(6): 712-720.
- Wiśniewska M, Lelicińska-Serafin K (2017) Biologiczne przetwarzanie odpadów komunalnych w Przedsiębiorstwie Gospodarki Komunalnej w Płońsku na przykładzie odpadów odebranych z obszaru gminy Bodzanów, (w:) Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem, OW PB.

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 Bartoszuk, 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 Bleszyński, 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 Chęłpiński, dr Dorota Chrobak-Chmiel, dr Agnieszka Chruścikowska, dr hab. Andrzej Ciążęła, prof. dr hab. Jan Cielichowski, dr hab. inż. Adam Cwudziński, prof. dr hab. inż. Anna Cysewska-Sobusiak, dr Paweł Czarnecki, 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 Drozd, 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 Dziecioł, 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 Góźdź, dr Marcin Graż, 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 Kazuń, 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 Kołodziejski, 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 Kruszniewska-Rajs, dr inż. Krzysztof Krzysztofowicz, dr Waldemar Kuczma, dr inż. Edyta Kudlek, dr Joanna Kula-Gradzik, 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 Pajak, 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 Rejdak, dr hab. Piotr Romańczyk, dr inż. Andrzej Roszkowski, dr hab. Lucyna Rotter, dr Monika Różańska-Boczuła, 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 Sulek, dr hab. Lech Szczegół, dr inż. Mirosława Szewczyk, dr Sebastian Szklenar, dr Agnieszka Szkudlarek, dr Łukasz Szleszkowski, dr hab. Magdalena Szulc-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-Stępnia, 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 Złotkowski, 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 inżynieryjne - Część I – Budownictwo i architektura
(online: ISBN 978-83-66139-08-4; druk: ISBN 978-83-66139-09-1)
10. Nauki techniczne i inżynieryjne - Część II (online: ISBN 978-83-66139-11-4; druk: ISBN 978-83-66139-10-7)
11. Nauki techniczne i inżynieryjne - Część III (online: ISBN 978-83-66139-12-1; druk: ISBN 978-83-66139-13-8)
12. Nauki techniczne i inżynieryjne - Część IV (online: ISBN 978-83-66139-15-2; druk: ISBN 978-83-66139-14-5)
13. Nauki techniczne i inżynieryjne - 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)