



Interdyscyplinarne prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Maria Grądz

MONOGRAFIE

Interdyscyplinarne prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

WDWEI



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
ul. Nadbystrzycka 38 A
20-618 Lublin

Interdyscyplinarne prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Maria Grądz



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

Lublin 2019

XXI Warsztaty Doktoranckie WEiI PL

dr hab. Tomasz Zientarski, prof. PL – Przewodniczący Komitetu Naukowego

dr hab. inż. Jerzy Montusiewicz, prof. PL – Wiceprzewodniczący Komitetu

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko – Rektor PL

dr hab. inż. Anna Halicka, prof. PL – Prorektor ds. współpracy z otoczeniem społeczno-biznesowym

dr hab. inż. Paweł Drożdżel, prof. PL – Prorektor ds. studenckich

prof. dr hab. inż. Henryka Stryczewska – Dziekan WEiI

dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. PL – Kierownik Studiów Doktoranckich

prof. dr hab. inż. O. Hotra

dr hab. inż. P. Kisała, prof. PL

prof. dr hab. M. Kosmulski

dr hab. inż. J. Kolano, prof. PL

prof. dr hab. inż. J. Sikora

dr hab. inż. P. Miller, prof. PL

prof. dr hab. inż. A. Wac–Włodarczyk

dr hab. inż. J. Partyka, prof. PL

prof. dr hab. inż. W. Wójcik

dr hab. inż. J. Pawłat, prof. PL

dr hab. inż. H. Banach, prof. PL

dr hab. inż. J. Sikora, prof. PL

dr hab. inż. D. Czerwiński, prof. PL

dr hab. inż. P. Surdacki, prof. PL

dr hab. inż. R. Goleman, prof. PL

dr hab. inż. P. Węgierek, prof. PL

dr hab. E. Jartych, prof. PL

dr hab. P. Żukowski, prof. PL

Recenzenci

prof. dr hab. inż. O. Hotra

dr inż. Nataliya Dorosh

dr hab. inż. T. Kołtunowicz, prof. PL

dr inż. Oksana Boyko

dr inż. W. Surtel

dr hab. inż. P. Miller, prof. PL

dr inż. Piotr Krupski

dr inż. Joanna Szulżyk-Cieplak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2019

ISBN: 978-83-7947-376-2

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81)538-46-59,
www.wydawnictwo.pollub.pl

Spis treści

Magdalena Michalska

Techniki diagnozowania skóry7

Monika Mańko

Metody klasyfikacji zmian dermatologicznych19

Magdalena Michalska

Przegląd sposobów segmentacji zmian skórnych.....33

Dawid Zarzeczny

Urządzenie typu Lab on a Chip do analizy wpływu danego materiału na organizmy żywe46

Magdalena Michalska

SIAscopy w badaniach skóry60

Patryk Panas

Pomiar kąta obrotu przy użyciu światłowodowych struktur TFBG71

Piotr Stępiak

Obliczenia numeryczne światłowodowych siatek Bragga w zastosowaniach.....83

Karol Fatyga, Łukasz Kwaśny

Poprawa sprawności izolowanej przetwornicy DC/DC poprzez zastosowanie prostowania synchronicznego95

Łukasz Kwaśny

Symetryzacja sieci prosumenckich z wykorzystaniem czteroprzewodowego, hybrydowego przekształtnika z magazynem energii109

Ewelina Krawczak

Barwnikowe ogniwa słoneczne – przyszłość energetyki odnawialnej XXI wieku? 123

Konrad Zuchora

Mikrosystemy elektroenergetyczne w aspektach pracy generacji rozproszonej137

Arkadiusz Urzędowski, Joanna Styczeń

BIM – nadażyć za rewolucją w budownictwie 149

Aleksander Chudy

Elektromobilność – wyzwanie i szansa159

Joanna Styczeń, Arkadiusz Urzędowski

Wykorzystanie analizy wielorozdzielczej w diagnostyce procesu spalania172

Arkadiusz Urzędowski, Monika Flis, Joanna Styczeń

Analiza nierówności powierzchni na modelach bryłowych z wykorzystaniem
narzędzi komputerowego wspomagania projektowania182

*Magdalena Michalska

Techniki diagnozowania skóry

Streszczenie: Rozdział zawiera opis podstawowych metod obrazowania skóry: dermatoskopii, obrazowania wielospektralnego, ultrasonografii, optycznej tomografii koherencyjnej, obrazowania za pomocą rezonansu magnetycznego i konfokalnej mikroskopii laserowej.

Słowa kluczowe: obrazowanie wielospektralne, ultrasonografia, optyczna tomografia koherencyjna, obrazowanie za pomocą rezonansu magnetycznego, konfokalna mikroskopia laserowa.

Skin Imaging Techniques

Abstract: This chapter describes the basic methods of skin imaging technique: dermatoscopy, multispectral imaging, ultra sound, optical coherence tomography, magnetic resonance imaging, confocal laser scanning microscopy.

Keywords: multispectral imaging, ultra sound, optical coherence tomography, magnetic resonance imaging, confocal laser scanning microscopy.

1. Wstęp

Diagnozę chorób skóry w dermatologii można wydać na podstawie kontroli wizualnej skóry, dzięki czemu jest ona w dużej mierze nieinwazyjna. Diagnoza lekarza opiera się na strukturze anatomicznej, kolorze, ułożeniu powierzchni zmian. Jeśli badana zmiana wydaje się w pierwszej ocenie niebezpieczne, zleca się wykonanie biopsji skóry, która ponownie daje możliwość mikroskopowego wizualnego badania zmiany.

Istnieją jednak ograniczenia w ocenie głębokości i wielkości zmian skórnych, a także wewnętrznych cech powierzchniowych. Daje to potrzebę obiektywnego nieinwazyjnego sposobu oceny skóry, dlatego powstało wiele metod obrazowania ludzkiej skóry. Dzięki ciągłemu rozwojowi szuka się nowych możliwości.

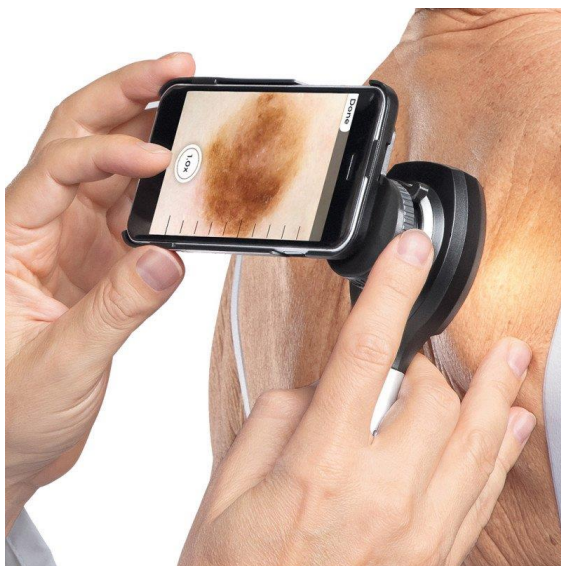
Do obecnie wykorzystywanych metod należy zliczyć: dermatoskopię, obrazowanie wielospektralne, ultrasonografię, optyczną tomografię koherencyjną, obrazowanie za pomocą rezonansu magnetycznego i konfokalną mikroskopię laserową.

*magdalena.michalska@pollub.edu.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

2. Dermatoskopia i obrazowanie wielospektralne

Do najczęściej używanej metody oceny zmiany skórnej jest wykorzystywana dermatoskopia, która jest nieinwazyjnym narzędziem diagnostycznym. Dzięki niej możliwa jest wizualizacja i ocena powierzchniowych zmian skórnych. Istnieją trzy główne tryby dermoskopii bazujące na świetle spolaryzowanym i niespolaryzowanych i metodzie kontaktowej lub bezkontaktowej [1–3].

Światło spolaryzowane pozwala na wizualizację głębszych struktur skóry, podczas gdy światło niespolaryzowane dostarcza informacji o strukturze powierzchniowej skóry. Większość nowoczesnych dermatoskopów pozwala użytkownikowi przełączać się między tymi dwoma trybami, które dostarczają komplementarnych informacji. Zastosowanie powiększenia i wysokiej rozdzielczości zdjęć pozwala lepiej przyjrzeć się badanej zmianie. Podstawą otrzymania obrazu dermatoskopowego jest silne źródło światła i soczewka powiększająca. Na rysunku 1 przedstawiono współczesny dermatoskop, rozwój techniki umożliwia przesyłanie zdjęć dermatoskopowych do aplikacji w celu wykonywania ich analiz. Coraz częściej w gabinetach dermatologów wykorzystywane są wideodermoskopy [4].



Rys. 1. Współczesny dermatoskop

Źródło: <https://www.praxisdienst.pl/pl/Medyczny/Diagnostyka/Diagnostyka+specjalistyczna/Dermatoskopy/Dermatoskop+HEINE+NC2+bez+plytki+kontaktowej.html>

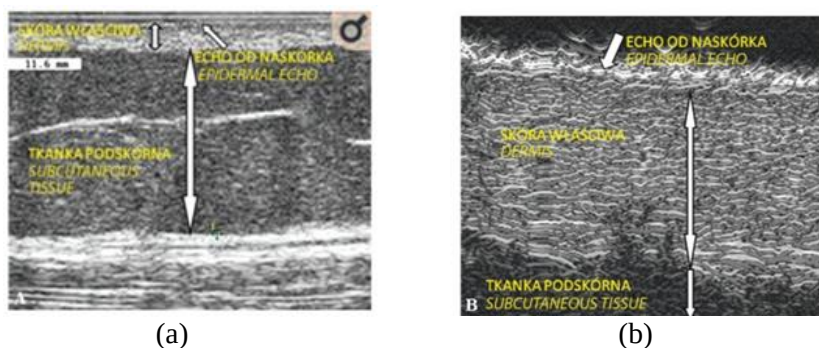
Obrazowanie wielospektralne opiera się o zjawiska związane z właściwościami optycznymi każdej z warstw skóry. Światło padające na skórę ulega odbiciu, załamaniu i absorpcji. Krzywa współczynnika odbicia widma opiera się na składzie materiału powierzchni obiektu. Światło o różnych długościach fal przenika przez skórę na różnych głębokości. Prowadzi to do oceny zmian pigmentowych przy określonych długościach fali światła od podczerwieni do bliskiego zakresu UV. Sekwencje zdjęć wykonanych przy różnych długościach fali światła nazywane są obrazami wielospektralnymi. Obecnie istnieje tylko kilka systemów, spektrofotometryczny zakres analizy śródskórnej (SIAscope) i MelaFind, które wykorzystują wielospektralne obrazy dermoskopowe jako dane wejściowe do późniejszej analizy komputerowej.

3. Ultrasonografia

W ostatnich latach skanowanie ultrasonograficzne stało się ważnym narzędziem diagnostycznym w dermatologii. Obrazy ultradźwiękowe powstają z powodu różnych właściwości akustycznych tkanek. Impulsy dźwiękowe o wysokiej częstotliwości są przekazywane do skóry, a następnie odbijane, załamywane lub odbijane od tkanek o różnej impedancji akustycznej.

Ultrasonografię dermatologiczną warstw skóry przeprowadza się za pomocą skanerów wysokiej częstotliwości od 20 do 50 MHz. Najlepiej używane jest skanowanie 20 MHz, które można wykorzystać do pomiaru grubości guza lub skóry. Do zmian grubości zachodzi podczas leczenia chorób zapalnych, trądzik skóry lub łuszczyca. Natomiast skanery o niższej częstotliwości od 3 do 10 MHz są używane do badania podskórnego lub węzłów chłonnych. Coraz większą popularność zdobywa ultrasonografia z sondami 7,5–10 MHz. Służy ona do wyszukiwania guzów podskórnych, oceny stopnia zaawansowania i obserwacji czerniaka [5]. Ostatnio rozwijają się przetworniki o wyższej częstotliwości (50–100 MHz). W [6] zostały wykorzystane w diagnostyce raka podstawnokomórkowego, czerniaka, atopowym zapaleniu skóry, grzybicy. W trybie A wyświetlana jest amplituda intensywności odbić na różnych głębokościach w skórze. Pionowy obraz przekroju, który jest bardziej znanym, nazywa się skanowaniem w trybie B, tzw. wyświetlanie jasności.

W [7] wykorzystano aparat wysokiej częstotliwości wyposażony w mechaniczne przetworniki. Powstałe obrazy ultradźwiękowe umożliwiły wizualizację trzech warstw skóry. Porównywano obrazy uzyskane za pomocą klasycznego skanera Philips HD11 XE z przetwornikiem liniowym i urządzenia ultradźwiękowego wysokiej częstotliwości Episcan z mechanicznym przetwornikiem 50 MHz. Oba te urządzenia dobrze ukazują tkanki skóry, ale Episcan daje obrazy o większym kontraście, co widoczne jest na rysunku 2.



Rys. 2. Obraz ultradźwiękowy skóry z widocznymi trzema warstwami: naskórek, skóra właściwa i tkanka podskórna: (a) obraz klasycznego skanera Philips HD11 XE z przetwornikiem liniowym; (b) obraz urządzenia ultradźwiękowego wysokiej częstotliwości Episcan z mechanicznym przetwornikiem 50 MHz

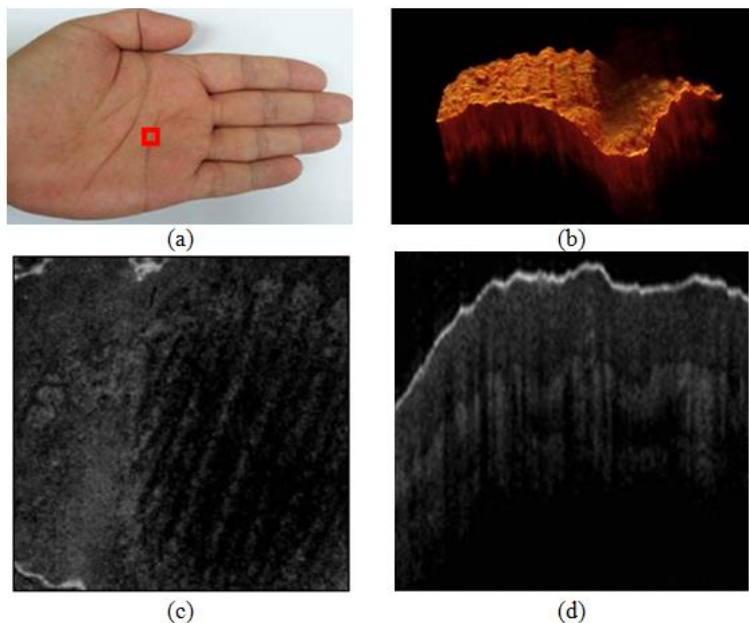
Źródło: Mlosek R. K., Malinowska S., Ultrasound image of the skin, apparatus and imaging basics, J Ultrason. 13(53), 212–221, 2013.

Obrazowanie za pomocą ultradźwięków daje więcej wszechstronności, bezpieczeństwa i ekonomicznej wydajności. Dostępne systemy obrazowania ultradźwiękowego są w stanie uzyskać rozdzielczość przestrzenną zbliżoną do rozdzielczości mikroskopii rezonansu magnetycznego. Wizualizacja ultradźwiękowa jest zwykle stosowana do pomiaru głębokości czerniaka. Obrazowanie ultradźwiękowe ma również ograniczenia i wady jako narzędzie badawcze. Do uzyskania dokładnych, powtarzalnych obrazów wysokiej jakości wymagana jest odpowiednia wiedza eksperta.

4. Optyczna tomografia koherencyjna

OCT wywodzi się z interferometrii o niskiej koherencji, która jest w stanie uzyskać dwu- i trójwymiarowe obrazy przekroju skóry w ciągu kilku sekund. Metoda wykorzystuje promieniowanie świetlne dostarczane ze źródła o niskiej koherencji (dioda superluminescencyjna) działającego przy długości fali z zakresu w pobliżu podczerwieni. Pomiar pozwala określić pozycję w tkance, w której światło zostało odbite. Odbijanie promieni świetlnych różnych składników tkanek zapewnia kontrast na zdjęciach.

Dwuwymiarowy obraz przekroju jest tworzony przez boczne skanowanie tkanki. Możliwa jest również rekonstrukcja trójwymiarowych map współczynnika odbicia uzyskanych przez dwuwymiarowe tablice sąsiednich skanów OCT. W [8] wykonano badania skóry za pomocą optycznej tomografii koherencyjnej, otrzymano trójwymiarowe i dwuwymiarowe obrazy przekrojowe skóry na dłoni pacjenta (Rys. 3).



Rys. 3. Obrazy OCT: (a) miejsce badania na dłoni pacjenta; (b) rekonstrukcja obrazu OCT w 3D; (c) obraz OCT w 2D (widok z góry); (d) obraz OCT w 2D (przekrój poprzeczny)

Źródło: Par E. S., Skin-Layer analysis using optical coherence tomography (OCT), Med Laser 3(1), 1–4, 2014.

Zobrazowanie głębszych warstw skóry jest możliwe dzięki (OCT) lub tomografii o niskiej koherencji. Poprawiają one rozproszenia w porównaniu z obrazami uzyskanymi przez konwencjonalną mikroskopię konfokalną, przy jednoczesnym utrzymaniu sygnału przy niskim poziomie światła [9]. Obrazy OCT można porównać ze skanami ultradźwiękowymi wysokiej częstotliwości w trybie B. Natomiast reprezentują one niejednorodności optyczne, a nie akustyczne badanej tkanki.

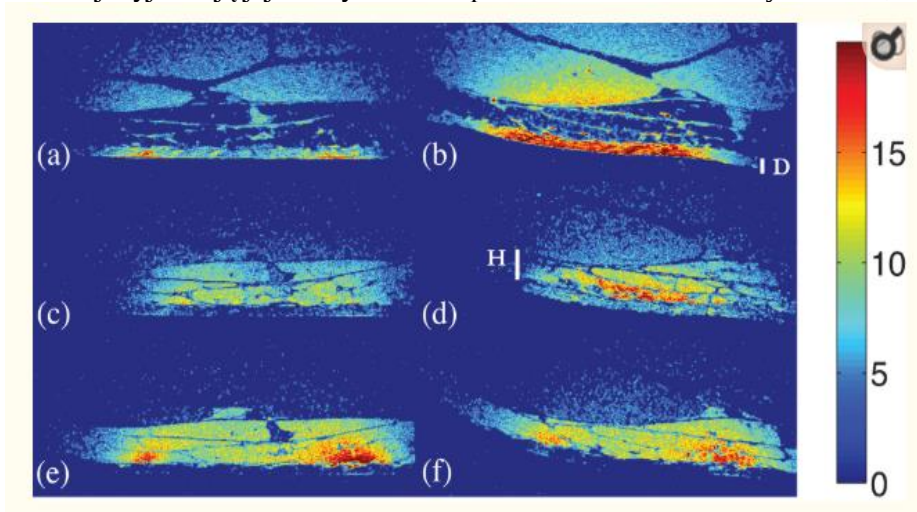
5. Obrazowanie za pomocą rezonansu magnetycznego

MRI skóry wymaga wysokiej rozdzielczości i wysokiej czułości, jest przydatne do badania powierzchniowych struktur skóry w wysokiej rozdzielczości. System MRI składa się z trzech podstawowych elementów: statycznego pola magnetycznego, cewki o częstotliwości radiowej (RF) oraz cewki gradientowej, które są włączane i wyłączane pulsacyjnie w celu wytworzenia liniowych gradientów pola magnetycznego przydatnego do obrazowania. Cewki RF są używane jako nadajnik do wzbudzania sygnału MR

i jako odbiornik do wykrywania sygnału MR. Technikę MRI często określa się jako sekwencję impulsów. Zmieniając sekwencję impulsów, można wytworzyć olbrzymi zakres obrazów o różnych rozdzielczościach przestrzennych oraz o różnym kontraście między tkankami na obrazie [10–12].

Zmiany w strukturze biologicznej skóry zanaajdują odzwierciedlenie w uzyskanym na obrazie kontraście i jasności. Dystrybucja komórkowa wody jest inna w tkance nowotworowej niż w normalnej skórze. Wzrost całkowitej gęstości protonów związany ze zmianami w strukturze wody zmienia ruchome protony w naskórku, skórze właściwej i tkance podskórnej [13].

Podczas badań klinicznych wykorzystuje się też różne wartości natężenia pola. Na rysunku 4 przedstawiono porównanie natężenia pola dla wartości 1,5 T i 3 T. Podczas badań [14] zaobserwowano, że SNR nieznacznie wzrasta w tkance podskórnej (oznaczone jako H) i prawie podwaja się w skórze właściwej (oznaczone jako D). Niska gęstość protonów i krótkie T2 skóry właściwej wyjaśniają jej niższy SNR niż podskórne widoczne na rysunku 4c, d.

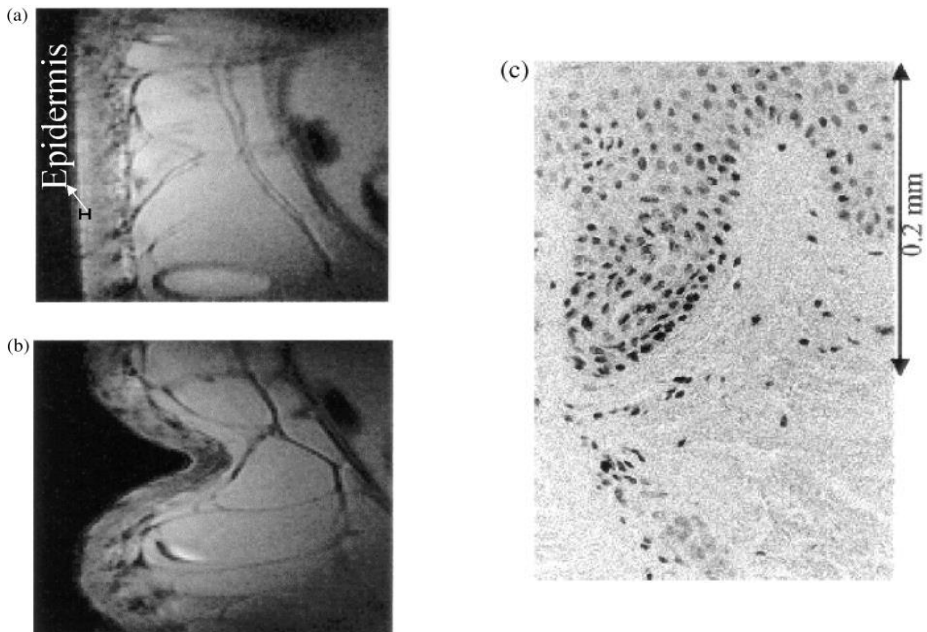


Rys. 4. Porównanie natężenia pola: mapy SNR przy 1,5 T (po lewej) i 3 T (po prawej), IDEAL-GRE (a, b), bSSFP (c, d) i FLASE (e, f)

Źródło: Barral J. K., Bangerter N. K., Hu B. S., Nishimura D. G., In vivo vigh-resolution magnetic resonance skin imaging at 1.5 T and 3 T, Magn Reson Med. 63(3), 790–796, 2010.

W [15] wykorzystano technikę MRI do badań nad toksycznością paliw odrzutowych na strukturach skóry. Wyodrębniono różne struktury skóry oznaczone kolorami i porównano kształty 3D naskórka i wielkości mieszków włosowych. Badania o wysokiej rozdzielczości umożliwiają zmierzenie zmiany naskórka skóry i wielkości mieszków włosowych, które ucierpiały z powodu toksyczności paliw odrzutowych. Oferują trójwymiarową wizualizację

przestrzenną zmian w strukturach skóry. Są również dobrą metodą oceny toksyczności i do porównania paliw odrzutowych. Metoda wykazała czułość 87,5% i swoistość 75%. Na odkształcenie powierzchni skóry wpływa zewnętrzny nacisk na dolne warstwy skóry, co pokazano na rysunkach 5a i 5b. Na rysunku 5a ukazany został lekki nacisk, który równomiernie rozkładał się na skórze i zapobiegał deformacji. Rysunek 5b pokazuje obecność małej rurki pod powierzchnią skóry. Z powodu małego nacisku deformacja jest nakładana równomiernie na warstwy skóry. Deformacja powierzchni skóry wskazuje na możliwość zastosowania takiej techniki do monitorowania elastyczności skóry w różnych zaburzeniach.



Rys. 5. Obraz MRI skóry ramienia (a), ramię spoczywa na płaskiej powierzchni; (b) rurka kapilarna została umieszczona pod skórą; (c) mikroskopia optyczna wysokiej rozdzielczości skóry ramienia

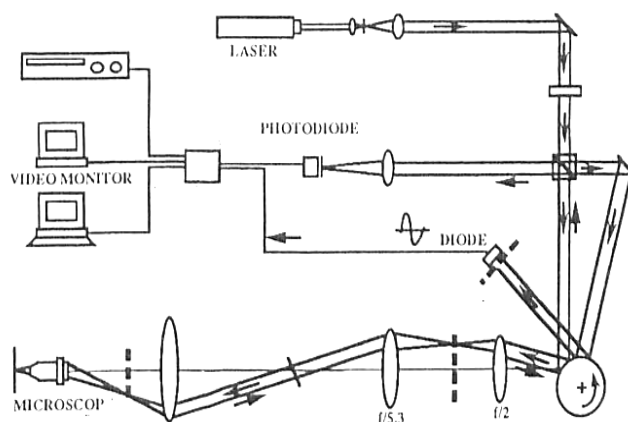
Źródło: F. Mirrashed J. C. Sharp, In vivo morphological characterisation of skin by MRI micro-imaging methods, 10 (3), 149–160, 2004

Prowadzone badania w [15] zwróciły uwagę na połączenie danych MT (kontrast przeniesienia magnetyzacji) i MRI z wykorzystaniem innych mechanizmów kontrastowych, co zapewnia doskonałą nieinwazyjną technikę do

wizualizacji i oceny ilościowej składników warstwy rogowej naskórka, skóry właściwej i tkanki podskórnej. Badania w przyszłości można rozszerzyć na stany chorobowe skóry lub proces starzenia się skóry. Powstała także technika MTC, gdyż badanie ilościowe MRI skóry wymaga techniki, która może dostarczyć informacji z krótkich czasów T2, których nie można bezpośrednio zaobserwować. MTC dostarcza danych umożliwiających ocenę interakcji warstw skóry z płynami śródmiąższowymi. Szczegóły uzyskane z wysokiej jakości obrazów skóry in vivo o różnym kontraście pozwoliły na różnicowanie warstw skóry, korelację danych MR ze znanymi cechami histologicznymi i składnikiem wody warstw skóry.

6. Konfokalna mikroskopia laserowa

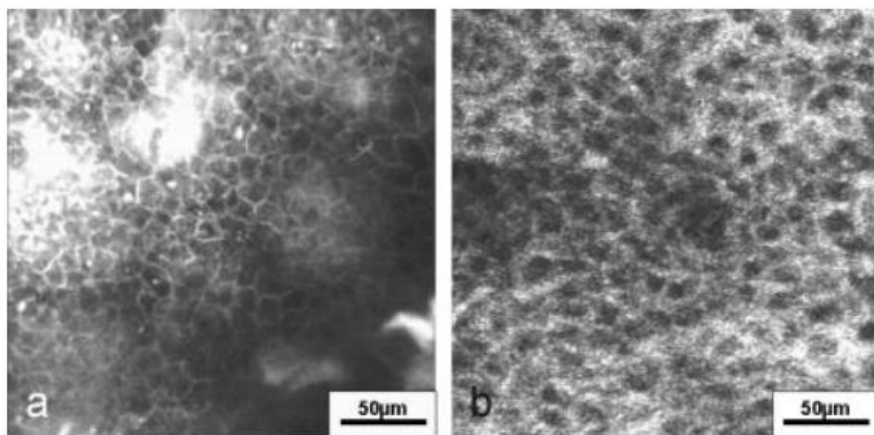
Mikroskop jest nieinwazyjnym narzędziem do obrazowania zmian skórnych i podpowierzchniowych, które nie są widoczne gołym okiem ani nawet przez dermoskopię. Laser zapewnia światło o wysokiej intensywności, które odbija się od dichroicznego lustra. Emitowane światło, dociera do próbki i jest rejestrowane przez detektor. W dowolnym momencie obserwuje się tylko jeden punkt próbki, nigdy nie powstaje pełny obraz próbki. Wykrywanie rozproszonego światła wraz z różnicami współczynnika załamania światła pomaga w uzyskaniu wysokiej rozdzielczości szczegółów komórkowych i kontrastu podczas badania cieniłych przekrojów [16]. W [17] zaproponowano schemat układu realizującego obrazowanie za pomocą konfokalnej mikroskopii laserowej (Rys. 6). W jego skład wchodzi: laser, układ lustek i soczewek, filtr, dioda, fotodioda, kontroler, video monitor, obiektyw mikroskopu.



Rys. 6. Schemat układu realizującego obrazowanie za pomocą konfokalnej mikroskopii laserowej

Źródło: Rajadhyaksha M., Grossman M., Esterowitz D., Webb R. H., Anderson R. R., In vivo confocal scanning laser microscopy of human skin: Melanin provides strong contrast, *Journal of Investigative Dermatology* 104 (6), 946–952, 1995.

W [18] optyczne, nieinwazyjne metody stały się skutecznymi narzędziami w diagnostyce i badaniach dermatologicznych. Z tych obiecujących technik obrazowania, tylko konfokalny skaningowy mikroskop laserowy (CSLM) zapewnia wizualizację podpowierzchniowych struktur skóry z rozdzielczością podobną do rozdzielczości mikroskopii świetlnej. Obecnie w praktyce dermatologicznej używany jest tryb odbicia, głównie w dziedzinie klinicznej i tryb fluorescencji w badaniach dermatologicznych. Przebadano 8 pacjentów o jasnej skórze na skórze głowy, przedramieniu, ręce i podudzie, badano również gruczoły potowe i mieszki włosowe pacjentów. Na rysunku 7 Przedstawiono warstwę ziarnistą naskórka w trybie fluorescencyjnym (a) i (b) odbicia. Porównanie zostało wykonane przez zeskanowanie ludzkiej skóry in vivo. Uzyskano i przeanalizowano reprezentatywne obrazy na różnych głębokościach i procedurach przygotowawczych. Na rysunku 7a widoczne są ciemne jądra i cytoplazma oraz jasne przestrzenie zewnątrzkomórkowe. Dla trybu odbicia (Rys. 7b) charakterystyczne są ciemne owalne jądra i jasna ziarnista cytoplazma.



Rys. 7. Warstwa ziarnista naskórka: (a) na obrazie fluorescencyjnym; (b) na obrazie w trybie odbicia

Źródło: Meyer L. E, Otberg N., Sterry W., Lademann J., In vivo confocal scanning laser microscopy: comparison of the reflectance and fluorescence mode by imaging human skin, *J. of Biomedical Optics*, 11(4), 044012, 2006.

Metody różnią się procedurą przygotowawczą, maksymalną głębokością obrazowania i uzyskanym kontrastem. Tryb odbicia pokazuje naturalnie występujące składniki tkanek, a fluorescencyjny CSLM osiąga kontrast poprzez podawanie barwnika fluorescencyjnego, co reprezentuje dynamiczny rozkład rozkładu emisji barwnika [19]. Oba tryby ukazują różne mikrostruktury skóry, zapewniając odmienne, konfokalne obrazy skóry, co daje różne informacje o stanie tkanki skórnej. Mikroskop laserowy może mieć ogromne implikacje kliniczne dla dermatologii w przyszłości. Obecnie dostępne systemy to VivaScope i Optiscan. VivaScope, wprowadzony w 1997 roku zapewnia dermatologom najwyższej jakości nieinwazyjne możliwości do wyświetlania obrazów skóry w wysokiej rozdzielczości [20].

7. Podsumowanie

Opisane wcześniej techniki obrazowania ludzkiej skóry są nieinwazyjne. Umożliwiają proces diagnostyki bez próbek, biopsji i bólu. Dają natychmiastowe wyniki i łatwość skanowania wielu obszarów, bez intensywnej procedury przygotowania do badania.

Różnorodność metod pokazuje, że istnieje możliwość wyboru metody obrazowania w zależności od cechy zmiany skórnej oraz od ich dostępności. MRI nie jest odpowiedni do wizualizacji skóry właściwej i podskórnej warstwy tłuszczu. Do wizualizacji naskórka i skóry właściwej można zastosować ultradźwięki 100 MHz. Jednak ze względu na zmniejszoną głębokość penetracji połączenie naskórka ze skórą można zobaczyć tylko w miejscach, w których skóra jest cienka. Dużą wadą ultradźwięków jest to, że potrzebuje wody. OCT można wykorzystać do porównania właściwości mechanicznych w przypadku skóry suchej i całkowicie nawodnionej. Mikroskopia konfokalna jest bardzo obiecującą techniką, która jest w stanie wizualizować pojedyncze komórki. Do zalet obrazowania konfokalnego należy zaliczyć możliwość obserwacji żywych komórek skóry w ich naturalnym środowisku. Ograniczenia obejmują małe głębokości obrazowania. Obrazowanie konfokalne fluorescencyjne będzie cennym narzędziem w badaniu i diagnozowaniu chorób naskórka i skóry właściwej. Metody konfokalne wykazują mocne i słabe strony w obrazowaniu żywej tkanki ludzkiej skóry, ale zapewniają pomyślne perspektywy dla przyszłości w dermatologii.

Literatura

[1] Argenziano G., Soyer H. P., *Dermoscopy of pigmented skin lesions – a valuable tool for early diagnosis of melanoma*, The Lancet. Oncology 2(7), 443–9, 2001.

[2] Lorentzen H., Weismann K., Petersen C. S., Larsen F. G., Secher L., Skødt V., *Clinical and dermatoscopic diagnosis of malignant melanoma*.

Assessed by expert and non-expert groups, Acta Dermato-venereologica 79(4), 301–4, 1999.

[3] Vestergaard M. E., Macaskill P., Holt P. E., Menzies S. W., *Dermoscopy compared with naked eye examination for the diagnosis of primary melanoma: a meta-analysis of studies performed in a clinical setting*, British Journal of Dermatology 159(3), 669–676, 2008.

[4] Rzegocka E., CX News, *FotoFinder – wyrafinowane narzędzie w nowoczesnej diagnostyce*, źródło: <http://www.cxnews.pl/fotofinder-wyrafinowane-narzedzie-w-nowoczesnej-diagnostyce>, 255.html.

[5] Jasaitiene D., Valiukeviciene S., Linkeviciute G., *Principles of high-frequency ultrasonography for investigation of skin pathology*, J Eur Acad Dermatol Venereol. 25, 375–382, 2011.

[6] Polańska A., Dańczak-Pazdrowska A., Jałowska M., Żaba R., Adamski Z., *Current applications of high-frequency ultrasonography in dermatology*, Advances Dermatol Alergol. 34(6), 535–542, 2017.

[7] Mlosek R. K., Malinowska S., *Ultrasound image of the skin, apparatus and imaging basics*, J Ultrason. 13(53), 212–221, 2013.

[8] Par E. S., *Skin-Layer analysis using optical coherence tomography (OCT)*, Med Laser, 3(1), 1–4, 2014.

[9] O'Leary S., Fotouhi A., Turk D., Sriranga P., Rajabi-Estarabadi A., Nouri K., Daveluy S., Mehregan D., Nasiriavanaki M., *OCT image atlas of healthy skin on sun-exposed areas*, Skin Reaserch & Technology 24 (4), 570–586, 2018.

[10] Sharma R., Locke B. R., *Jet fuel toxicity: skin damage measured by 900-MHz MRI skin microscopy and visualization by 3D MR image processing*, Magn Reson Imaging 28 (7), 1030–1048, 2010.

[11] Lee J., Bangerter N., Cunningham C., DiCarlo J., Hu B., Nishimura D., *3D high resolution skin imaging*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of ISMRM, Kyoto, Japan, 2004, 2004.

[12] Aubry S., Casile C., Humbert P., Jehl J., Vidal C., Kastler B., *Feasibility study of 3-T MR imaging of the skin*, Eur Radiol. 19, 1595–1600, 2009.

[13] Ablett S., Burdett N., Carpenter A., Hall L. D., Salter D. C., *Short echo time MRI enables visualisation of the natural state of human stratum corneum water in-vivo*, Magn Reson Imaging 14, 357–360, 1996.

[14] Barral J. K., Bangerter N. K., Hu B. S., Nishimura D. G., *In vivo high-resolution magnetic resonance skin imaging at 1.5 T and 3 T*, Magn Reson Med. 63(3), 790–796, 2010.

[15] Mirrashed F., Sharp J. C., *In vivo morphological characterisation of skin by MRI micro-imaging methods*, Skin Res Technol. 10 (3), 149–160, 2004.

[16] Suihko C., Swindle L. D., Thomas S. G., Serup J., *Fluorescence fibre-optic confocal microscopy of skin in vivo: microscope and fluorophores*, Skin Res. Technol. 11, 254–267, 2005.

[17] Rajadhyaksha M., Grossman M., Esterowitz D., Webb R. H., Anderson R. R., *In vivo confocal scanning laser microscopy of human skin: Melanin provides strong contrast*, Journal of Investigative Dermatology 104(6), 946–952, 1995.

[18] Meyer L. E., Otberg N., Sterry W., Lademann J., *In vivo confocal scanning laser microscopy: comparison of the reflectance and fluorescence mode by imaging human skin*, J. of Biomedical Optics 11(4), 044012, 2006.

[19]. Swindle L. D., Thomas S. G., Freeman M., Delaney P. M., *View of normal human skin in vivo as observed using fluorescent fiber-optic confocal microscopic imaging*, J. Invest. Dermatol. 121, 706–712, 2003.

[20] <http://www.lucid-tech.com/medical-imagers/vivascope-1500.asp>

Metody klasyfikacji zmian dermatologicznych

Streszczenie: Problematyka diagnostyki obrazowej w dermatologii ze wskazaniem na szczególne cechy zmian barwnikowych skóry jest nadal aktualna. Praca zawiera przegląd metod klasyfikacji zmian dermatologicznych, w szczególności czerniaka.

Słowa kluczowe: dermatologia, choroby dermatologiczne, klasyfikacja

Classification methods of dermatological diseases

Abstract: The problem of diagnostic imaging in dermatology and the indication of the specific features of pigmented lesions of the skin are still relevant. The paper contains an overview of classification methods of dermatological diseases, especially melanoma.

Keywords: dermatology, dermatological diseases, classification

1. Wstęp

Choroby dermatologiczne związane są najczęściej ze stanami zapalnymi lub nieprawidłowymi zmianami w strukturze naskórka lub jego głębszych warstwach. Mogą dotyczyć zarówno skóry właściwej, tkanki podskórnej czy samej powierzchni naskórka, nie wykluczając przy tym przydatków (a więc gruczołów potowych i łojowych) mieszków włosowych i paznokci. Procesy chorobowe mogą zachodzić w obrębie naczyń krwionośnych, naczyń limfatycznych oraz włókien nerwowych [1].

Nowoczesne techniki, takie jak np. dermatoskopia cyfrowa, których zadaniem jest pomoc w kwalifikacji zmian skórnych, chętnie wykorzystywane są przez lekarzy w celu prawidłowego rozpoznania jednostek chorobowych..

Niniejsza praca zawiera przegląd najpopularniejszych metod klasyfikacji zmian dermatologicznych stosowanych obecnie przez lekarzy, kluczowych w procesie diagnostyki chorób skóry a także narzędzia klasyfikacyjne znajdujące zastosowanie w diagnostyce medycznej.

*monika.manko@pollub.edu.pl, afiliacja: Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

2. Charakterystyka chorób skóry

Jednym z głównych elementów obrazu klinicznego stanowiącego podstawę rozpoznania chorób dermatologicznych są zmiany skórne zwane wykwitami. W literaturze rozróżnia się wykwity pierwotne i wykwity wtórne, a ich znajomość pozwala lekarzowi zdefiniować zmiany, widoczne na skórze gołym okiem. Opis zmian chorobowych uwzględnia zarówno cechy morfologiczne wykwitów (ich kształt, powierzchnię, ograniczenie umiejscowienia, postać, liczbę, barwę, wielkość, ewolucję i zejście), jak i objawy podmiotowe (bolesność, pieczenie skóry czy świąd) [2].

We wczesnym okresie ujawniania się zmian dermatologicznych na skórze pojawiają się wykwity pierwotne. Do grupy tej należą: plama, bąbel, grudka, guzek, guz, pęcherzyk, pęcherz i krosta. Natomiast w okresie dalszego rozwoju lub ustępowaniu choroby pojawiają się tzw. wykwity wtórne, do których zalicza się: nadżerkę, owrzodzenie, wrzód, rozpadlinę, strup, łuskę oraz bliznę. Rozróżnia się również stany chorobowe, których pod względem morfologicznym nie da się zakwalifikować do wykwitów pierwotnych, czyli: zliszajowacenie, spryszczenie, łuszczycowatość; określa się je jako stany narzucone skóry [2].

Ze względu na etiologię, choroby skóry można podzielić na:

- choroby bakteryjne,
- choroby wirusowe,
- choroby grzybicze,
- choroby pasożytnicze,
- choroby autoimmunologiczne,
- choroby alergiczne,
- choroby uwarunkowane genetycznie,
- choroby wywołane czynnikami fizykalnymi,
- choroby zawodowe,
- osutki polekowe [2].

Choroby skóry można również sklasyfikować biorąc pod uwagę charakter wykwitów pierwotnych (typ zmian skórnych),:

- dermatozy rumieniowe,
- dermatozy rumieniowo - złuszczające,
- dermatozy grudkowe,
- choroby pęcherzowe,
- łuszczycę i choroby łuszczycopodobne [2].

Opracowany został także podział chorób skóry uwzględniający charakterystyczny obraz mikroskopowy. W tej grupie wyróżniono:

- ziarniaki,
- chłoniaki,

- nowotwory złośliwe [2].

W dermatologii istnieje odrębny podział chorób skóry uwzględniający skłonność do zajmowania poszczególnych struktur. Należą do niego:

- choroby błon śluzowych,
- choroby gruczołów potowych,
- choroby gruczołów łojowych,
- choroby włosów i paznokci,
- choroby naczyńiowe skóry,
- zaburzenia barwnikowe [2,3].

Szczególne uwagę zwraca się na znamiona barwnikowe, ze względu na powszechność ich występowania u ludzi rasy białej oraz ich zdolność do przekształcenia się w czerniaka złośliwego. Rozróżnia się znamiona barwnikowe naskórkowe (np. plamy soczewicowate) oraz znamiona barwnikowe komórkowe. W innej klasyfikacji dzieli się znamiona barwnikowe na wrodzone oraz na nabyte. W dermatologii klinicznej istnieje również podział ogólny na znamiona zwykłe oraz atypowe [3].

Powstawanie znamion barwnikowych łączy się z procesem ogniskowego gromadzenia się w skórze komórek melanocytopodobnych lub zmienionych melanocytów. Nabyte znamiona barwnikowe występują u każdego dorosłego człowieka (przeciętnie 20–30 zmian u mieszkańca Europy Środkowej) [4]. Statystycznie największe ryzyko przekształcenia się tego typu zmian w zmiany nowotworowe obserwuje się w przypadku znamion wrodzonych oraz dysplastycznych.

Do cech znamion dysplastycznych zalicza się:

- liczebność: ich rozmiar jest większy niż rozmiar zwykłych znamion (5–15 mm),
- nieregularne obrysy i niejednolite zabarwienie,
- przejście bez ostrej granicy do skóry otaczającej znamię,
- płaska powierzchnia, o strukturze wybrukowanej lub nierównomiernie wyniosła w części środkowej [2].

Badania kliniczne znamion barwnikowych wykazały, że ich przekształcanie w nowotwory, szczególnie do postaci czerniaka złośliwego może nastąpić w przypadku, gdy:

- znamię powiększa swoje rozmiary wraz z upływem czasu,
- na powierzchni znamienia pojawia się nierównomierne przebarwienie w różnych odcieniach brązu oraz ogniskowymi odbarwieniami,
- w obrębie znamienia występuje odczyn zapalny,
- występują nadżerki i krwawienia [2].

Z obserwacji klinicznych wynika, że grupę ryzyka najbardziej narażoną na wystąpienie znamion mogących przekształcić się w nowotwory stanowią osoby o jasnej karnacji, z licznymi zmianami barwnikowymi oraz z zespołem znamion dysplastycznych. Osoby te powinny szczególnie uważać i obserwować swoją

skórę (latem stosować ochronę przed promieniowaniem słonecznym). Szerszą diagnostykę zaleca się w przypadku, gdy znamiona są: asymetryczne, różnobarwne, mają nierówne brzegi, mają średnice większą niż 6 mm. Klasyfikację wykwitów istotnych w dermatoskopowej diagnostyce różnicowej czerniaka złośliwego przedstawia (Rys. 1).

Wykwity istotne w dermatoskopowej diagnostyce różnicowej czerniaka złośliwego

Wykwity melanocytowe:

- czerniaki złośliwe
- znamiona melanocytowe:
 - w postaci wrodzonych malformacji
 - w postaci nowotworzenia nabytego (melanocyty są liczniejsze oraz ułożone w postaci gniazd, pasm, sznurów)

Wykwity niemelanocytowe:

- wykwity naczyniowe
- plamy melanocytowe
- łagodne rozrosty naskórka
- złośliwe rozrosty naskórka
- inne, np. choroby zapalne skóry

Rys. 1. Sposób klasyfikacji wykwitów istotnych w dermatoskopowej diagnostyce różnicowej czerniaka złośliwego [5]

Konsultacja dermatologiczna wskazana jest również, gdy zaobserwuje się pojawienie się cech wzmożonej aktywności znamion:

- nagły rozrost znamienia,
- zmiana barwy na ciemniejszą lub jaśniejszą,
- zaczerwienienie wokół znamienia,
- objaw „wylewania się barwnika” poza granice znamienia,
- uczucie świądu, bólu w obrębie znamienia,
- krwawienie.

Należy pamiętać, że nie wszystkie znamiona odpowiadające powyższym kryteriom mają charakter nowotworowy. Analiza defektów dermatologicznych należy do procesu diagnostyki, bazującej na wiedzy oraz opinii lekarza, który na podstawie obserwacji i wywiadu z pacjentem dokonuje właściwej klasyfikacji.

Inna, nieco zmodyfikowana klasyfikacja znamion melanocytowych pojawia się w pracach Bernarda Ackermana:

- znamię Clarka,
- znamię Reeda,
- znamię Spitz,
- znamię wrodzone z podtypami:

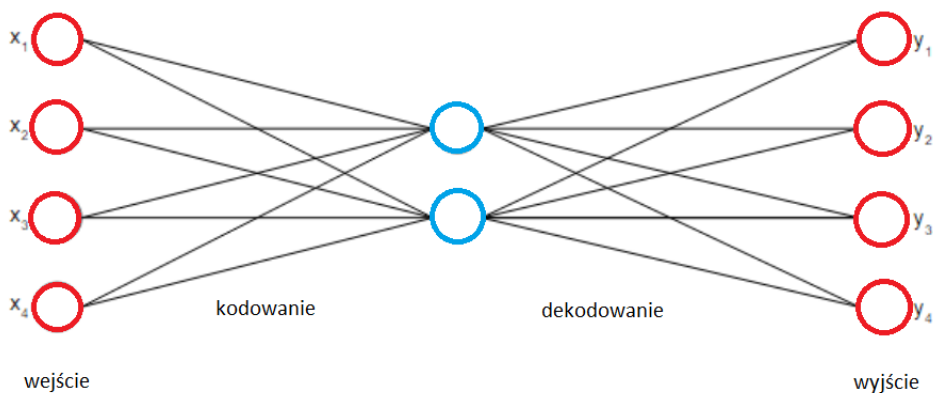
- ze znamieniem Ackermana („znamień powierzchniowe”),
- ze znamieniem Zitteliego („znamień powierzchniowe i głębokie”),
- znamień wrodzone mieszane,
- znamień Unny i Mieshera,
- znamień błękitne [2].

3. Narzędzia klasyfikacyjne

W ostatnich latach silnie rozwijają się algorytmy uczenia głębokiego (ang. deep learning), czyli takie, które są zdolne do samodzielnego wykrywania wysokopoziomowych abstrakcji w danych wejściowych [6]. Dzięki temu, algorytmy o stosunkowo prostej strukturze są w stanie nauczyć się skomplikowanych pojęć.

Stosowe sieci autoenkodujące to jedna z podstawowych struktur uczenia głębokiego. W autoenkoderze liczba neuronów wejściowych równa jest liczbie neuronów wyjściowych [6, 7]. W tej strukturze algorytm uczenia jest nienadzorowany, to znaczy sieć uczy się odtwarzania sygnału, który podawany jest na wejściu.

Rysunek 2 przedstawia strukturę sieci autoenkodującej. W sytuacji, gdy liczba neuronów w warstwie ukrytej jest mniejsza niż liczba neuronów w warstwach zewnętrznych, sieć wykrywa cechy umożliwiające efektywne kodowanie. Możliwe jest dołączenie kolejnych autoenkoderów do nauczonej sieci tak, że warstwa ukryta poprzedniego staje się warstwą wejściową kolejnego autoenkodera[8, 9].

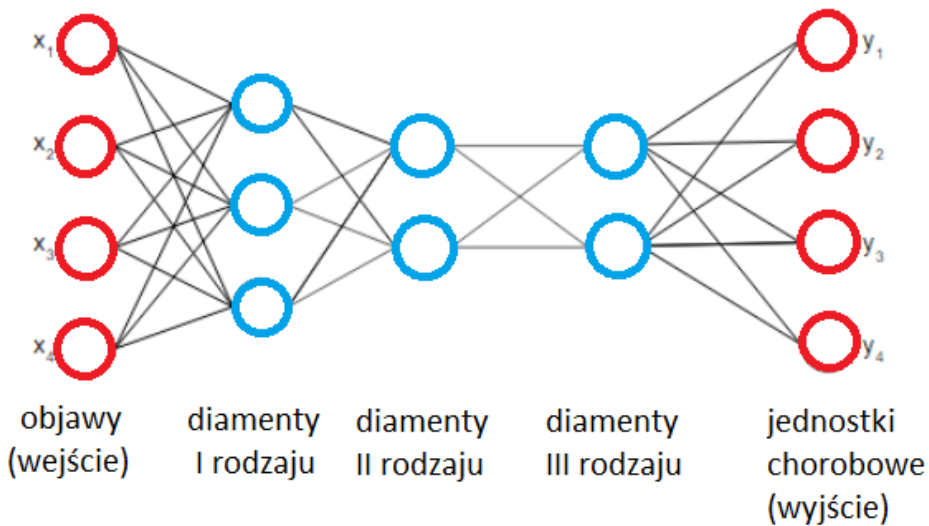


Rys. 2. Struktura sieci autoenkodującej

Zdolność do hierarchicznej ekstrakcji cech determinuje stosowanie uczenia głębokiego w medycynie, a dokładniej diagnostyce medycznej. Przetworzenie

danych medycznych w odpowiedni sposób pozwala na wyodrębnienie informacji o ważności jednego lub kilku symptomów, tak zwanych diamentów diagnostycznych. Diamentem pierwszego rodzaju jest objaw (patognomoniczny) jednoznacznie wskazujący na jedną i tylko jedną jednostkę chorobową. Objawem charakterystycznym dla pewnej jednostki chorobowej, lecz występującym również w innych chorobach jest diament drugiego rodzaju [10].

Z kolei diament trzeciego rodzaju stanowi grupa objawów występująca zawsze w grupie objawów, które są charakterystyczne dla danej jednostki chorobowej.



Rys. 3. Struktura sieci głębokiej na przykładzie diamentów diagnostycznych

Diamenty diagnostyczne to cechy o naturze hierarchicznej, jak widać na rysunku 3. Pierwsza warstwa ukryta jest w stanie wykryć diamenty pierwszego rodzaju, na ich podstawie kolejna warstwa może wykryć diamenty drugiego rodzaju, natomiast ostatnia warstwa grupuje objawy w diamenty III rodzaju [10].

Jednym z podstawowych zadań analizy danych są problemy klasyfikacyjne, których głównym celem jest znalezienie zbioru reguł, czyli pewnego modelu, na podstawie którego możliwe jest przyporządkowanie obiektu do jednej z kilku klas. W diagnostyce medycznej podstawowym problemem jest przynależność do dwóch klas (np. pacjent jest zdrowy lub chory). Decyzja diagnostyczna może być podjęta na podstawie jednej zmiennej, czyli wskaźnika diagnostycznego. W takim przypadku badana jest zależność między jedną zmienną a tzw. zmienną dwustanową [10, 11]. Najczęściej badana zależność jest monotoniczna, to znaczy wraz ze wzrostem wartości zmiennej diagnostycznej rosną (lub maleją) szanse na wystąpienie badanego zjawiska.

W praktyce diagnostycznej pojawiają się również bardziej złożone problemy. Wówczas lekarz zmuszony jest wnioskować na podstawie kilku zmiennych diagnostycznych. Gdy pojawia się wiele zmiennych, istnieje wiele metod służących do budowania reguł, w wyniku których możliwe jest otrzymanie prawdopodobieństwa przynależności do wybranej klasy (tzw. scoring). Do metod tych należą między innymi: drzewa klasyfikacyjne, metoda k -najbliższych sąsiadów, regresja logistyczna czy sieci neuronowe.

Nieodłącznym elementem podejmowania decyzji są złe zaklasyfikowania. Błędne decyzje modelu klasyfikującego są często nieuniknione, gdy klasy nie są całkowicie separowane. Wynika to z niepełnej wiedzy lub niekompletnych danych.

Najlepsza reguła decyzyjna ma za zadanie zapewnienie jak najmniejszej liczby błędów. W celu precyzyjnego zdefiniowania odpowiedniego kryterium, wprowadza się tak zwane miary jakości reguł decyzyjnych. Najczęściej wykorzystywanymi miarami są specyficzność i czułość, będących podstawą konstrukcji krzywej ROC [9].

Narzędziem służącym do oceny poprawności działania klasyfikatora jest krzywa ROC (ang. receiver operating characteristic). Krzywa ta ilustruje związek pomiędzy specyficznością i czułością danego modelu oraz jest idealnym narzędziem do wyboru progu decyzyjnego czy też wizualizacji sytuacji decyzyjnej [9, 12].

4. Metody klasyfikacji zmian dermatologicznych

Doświadczenie wynikające z wielu lat badań pozwoliło lekarzom na opracowanie kilku metod (skal), kluczowych w procesie klasyfikacji badanych znamion dermatologicznych. Do najpopularniejszych należą:

- klasyczna analiza wzorca,
- skala ABCD (czasem rozszerzana do postaci ABCDE),
- algorytm CASH,
- skala Clarka i Breslowa,
- skala TNM,
- lista 3 punktów,
- lista 7 punktów,
- metoda Menziesa [13].

Metody te stanowią istotną pomoc diagnostyczną dla lekarzy w zakresie badania charakteru znamion. Różnią się między sobą sposobem oceny, jednak ich wspólnym mianownikiem jest zbliżone wyodrębnienie pewnych cech znamienia [13].

Metoda analizy wzorca

Metoda analizy wzorca służy przede wszystkim do oceny barwnikowych wykwitów skórnych. W metodzie tej, do opisu wykwitów w celach diagnostycznych wystarczy pięć podstawowych elementów: linie, koła, pseudopodia, grudki i kropki. Każdy z tych elementów może stanowić odrębną część wzorca. W celu utworzenia wzorca, niezbędne jest wielokrotne powtórzenie tej samej struktury.

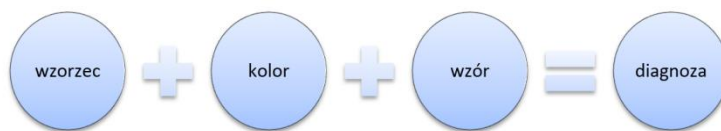


Rys. 4. Możliwe kombinacje kolorów w dermatoskopii [5]

Ogromne znaczenie w dermatoskopii ma występowanie specyficznych barw oraz liczba kolorów. Naturalny kolor skóry (różny dla każdego człowieka) często stanowi punkt odniesienia w procesie analizy kolorów znamienia [1]. Wykwit barwnikowy zwykle składa się z więcej niż jednego koloru, co może stanowić trudność w rozróżnieniu barw przez ludzkie oko. Przedstawiona na rysunku 4 kombinacja kolorów w połączeniu z opisem wzorca stanowi dla lekarza odpowiedź przy stawianiu diagnozy.

Wzór to dodatkowa cecha sprawiająca, że dane rozpoznanie jest bardziej prawdopodobne niż inne. Wyróżnia się wzory dla specyficznej diagnozy, np. wzory złośliwości. Często są one cechami zbyt ograniczonymi, by móc na ich podstawie stworzyć odrębny wzorzec, ale mimo to czynią jedną diagnozę bardziej prawdopodobną od drugiej. Zakłada się, że im więcej jest wzorów potwierdzających daną diagnozę, tym istnieje większe prawdopodobieństwo, że diagnoza ta jest poprawna. Wzorzec w połączeniu z kolorem ogranicza możliwe diagnozy różnicowe, natomiast wzór potwierdza lub wyklucza daną diagnozę [5].

Przykładem wzorca jest wzorzec naczyń krwionośnych. Podobnie jak w przypadku struktur barwnikowych, naczynia mogą przyjmować kształt kropek, grudek lub linii. Zbiór naczyń tego samego rodzaju może określić ich wzorzec, analogicznie do wzorców barwnika. Z kolei w przypadku wykwitów bezbarwnikowych naczynia stanowią jedyne wzory dające się ocenić.



Rys. 5. Schemat przedstawiający elementy diagnozy [5]

Przyjęto, że najlepszym sposobem postawienia poprawnej diagnozy jest stopniowy opis wzorca, następnie koloru oraz wzoru [5]. Schemat takiego podejścia przedstawia diagram (Rys.5.).

Skala ABCD

Skala ABCD (z ang. A asymmetry, B borders, C color, D diameter) stosowana jest przez lekarzy w przypadku diagnozowania czerniaka. Na jej podstawie możliwe jest obliczenie wskaźnika TDS (ang. Total Dermatoscopy Score) określającego, czy badane znamię posiada cechy czerniaka [14, 15].

$$TDS = 1,3 \cdot A + 0,1 \cdot B + 0,5 \cdot C + 0,5 \cdot D$$

gdzie:

A – asymetria znamienia; czerniak jest asymetryczny względem każdej osi (w odróżnieniu do zmian łagodnych, zwykle okrągłych lub owalnych, prezentuje nieregularny, złożony z wyniosłości obraz),

B – nierówne i postrzępione brzegi,

C – różnorodny kolor z nierównomiernym rozkładem barwnika,

D – struktury różnicujące czerniaka [14].

W szczególnych przypadkach skala ABCD rozszerzana jest o dodatkową zmienną „E”, określającą uwypuklenie powierzchni znamienia ponad poziom naskórka otaczającego zmianę [14].

Asymetria znamienia może dotyczyć jego konturu, koloru i struktury, dla każdej symetrii przyznaje się od jednego do dwóch punktów.

Wartość zmiennej B obliczana jest na podstawie podziału znamienia liniami: pionową, poziomą oraz dwiema pod kątem 45° tak, by środek znamienia stanowił punkt przecięcia tych linii. W ten sposób powstaje 8 linii dzielących znamię na 8 segmentów; gdy brzeg znamienia w segmencie jest postrzępiony, przyznaje się 1 punkt [13].

W przypadku punktowania zmiennej odpowiadającej za kolor znamienia (C), należy przyznać punkt, gdy zauważony zostanie jeden z następujących kolorów: cielisty (kolor skóry), jasnobrązowy, ciemnobrązowy, czarny, czerwony, niebieski [13].

Tabela 1. Typowy zakres wartości zmiennych przyjmowanych w skali ABCD

Cecha	Wartość	Mnożnik	Wynik
Asymetria	0 – 2	1,3	0,0 – 2,6
Brzeg	0 – 8	0,1	0,0 – 0,8
Kolor	1 – 6	0,5	0,5 – 3,0
Wzorec	1 – 5	0,5	0,5 – 2,5

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu [13]

Zmienna D określa wzorce (lub cechy) charakteryzujące czerniaka, które są związane z teksturą widoczną na obrazie. Skala ABCD wyróżnia następujące punktowane cechy:

- niestrukuralna przestrzeń,
- siatka barwnikowa,
- smugi,
- kropki,
- globulki [13].

Dodatkowa zmienna E nie pozwala na przypisanie jej konkretnej wartości, ponieważ zmienność w czasie wymaga od dermatologa porównania zdjęcia znamienia z innym, wykonanym w pewnym odstępie czasowym (co nie jest możliwe w przypadku, gdy pacjent zgłasza się na badanie po raz pierwszy).

W tabeli 1 przedstawione zostały cechy skali ABCD z możliwymi do przyjęcia wartościami oraz wynikami, które obliczane są na podstawie wzoru.

Tabela 2. Wartości współczynnika TDS przyporządkowane klasom zmian

Wartość TDS	Sugerowane rozpoznanie
< 4,76	Znamie łagodne
4,76 – 5,45	Znamie podejrzan
>5,45	Znamie o charakterze złośliwym

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu. [13]

Zakresy liczbowe sugerujące możliwe rozpoznanie diagnostyczne przedstawia tabela 2. Zakłada się, że gdy wartość współczynnika TDS jest

mniejsza od 4,76, to znamień ma charakter łagodny. Wartość współczynnika powyżej 5,45 charakteryzuje znamiona o charakterze złośliwym. Znamień, którego wartość współczynnika TDS znajduje się w przedziale pomiędzy 4,76 a 5,45, uznawane jest za podejrzan [13].

System Glasgow

Kliniczne objawy sugerujące podejrzenie wystąpienia czerniaka grupowane są często w dwóch systemach: opisanej wcześniej skali ABCD oraz siedmiopunktowej skali Glasgow, przedstawionej w tabeli 3. Skala ta uznawana jest za zestawienie większości objawów klinicznych czerniaka rozwiniętego miejscowo [16].

Tabela 3. System Glasgow [16]

1	Powiększenie
2	Zmiana kształtu
3	Zmiana koloru
4	Obecność stanu zapalnego
5	Obecność sączenia, krwawienia ze zmiany, widoczny strup
6	Zaburzenia czucia (np. świąd)
7	Wymiar > 7 mm

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu. [16]

Algorytm CASH

Do wskaźników skuteczności lekarzy dermatologów zalicza się swoistość i czułość. Pierwszy z nich określa trafnie zdiagnozowane znamień mające charakter łagodny w stosunku do wszystkich znamion łagodnych (czyli wszystkich poprawnie zdiagnozowanych i niepoprawnie zdiagnozowanych znamion jako znamiona złośliwe).

Z kolei czułość dotyczy skuteczności wykrywania znamion złośliwych. Jest to stosunek poprawnie zdiagnozowanych znamion złośliwych do liczby wszystkich znamion złośliwych (czyli tych zdiagnozowanych poprawnie oraz błędnie jako znamiona łagodne) [14].

Algorytm CASH (ang. Color, Architecture, Symmetry, Homogeneity) charakteryzuje więc porównywalną czułość przy nieco większej swoistości.

Skala Clarka i Breslowa

Skuteczna analiza znamion barwnikowych nie byłaby możliwa bez skali Clarka oraz skali Breslowa.

Tabela 4. Zestawienie wartości w skali Clarka [5]

Stopień	Głębokość naciekania
I	Czerniak ograniczony do naskórka
II	Czerniak naciekający na warstwę brodawkowatą skóry
III	Czerniak dochodzący do warstwy siateczkowej skóry, bez naciekania
IV	Czerniak naciekający na warstwę siateczkową
V	Czerniak naciekający na tkankę podskórną

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu. [16]

Bardziej wiarygodną klasyfikację stanowi skala Breslowa, ponieważ wyraża głębokość naciekania w milimetrach (**Błąd! Nieprawidłowy odsyłacz do zakładki: wskazuje na nią samą.**). W skali tej występują 4 stopnie; im wyższy stopień, tym niestety gorsze rokowania dla pacjenta. Stopnie te określają stadium naciekania zmiany w głąb tkanki.

W skali Clarka występuje 5 stopni głębokości, które zestawione zostały w tabeli 4 [5]. Im wyższy stopień w skali Clarka, tym bardziej zaawansowane stadium czerniaka.

Tabela 5. Tablica stopni w skali Breslowa

Stopień	Głębokość naciekania [mm]
I	$\leq 0,75$
II	0,76 – 1,5
III	1,51 – 3,99
IV	$\geq 4,0$

Źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu. [16]

5. Wnioski

Zastosowanie uczenia głębokiego w diagnostyce medycznej umożliwia sterowanie różnymi parametrami klasyfikacji. Parametry te są ze sobą silnie powiązane, co stanowi nie lada wyzwanie dla osób zajmujących się klasyfikacją. Połączenie niezależnych od siebie wyników klasyfikacji w jeden system w postaci zintegrowanego zespołu klasyfikatorów to wyzwanie, które stawia przed naukowcami dzisiejsza medycyna. Takie rozwiązania pozwalają na znaczną redukcję błędów klasyfikacji oraz poprawę jakości działania klasyfikatora.

Poszczególne klasyfikatory oraz zespoły klasyfikatorów podlegają uczeniu na bazie danych uczących. Omówione w pracy sposoby klasyfikacji zmian dermatologicznych pomagają lekarzowi w zakwalifikowaniu znamienia do odpowiedniej grupy, co w konsekwencji prowadzi do postawienia ostatecznej diagnozy lub skierowania pacjenta na dalsze badania. W środowisku lekarskim panuje przyzwolenie, że zadowalająca jest rozbieżność wyników (błąd) sięgający nawet 20%. Jest to spowodowane ogromnym zróżnicowaniem badanego materiału. Metody klasyfikacji bazują na ogólnie przyjętych wzorcach, a każda nowopowstała skala prowadzi do osiągnięcia większej skuteczności w porównaniu do poprzedniej.

W przypadku obrazów medycznych jednym z ważniejszych zbiorów cech diagnostycznych są parametry geometryczne obiektu zainteresowania. Kolejny zbiór stanowi tekstura obiektu. Wektorem wejściowym dla klasyfikatora jest wyselekcjonowany zbiór najważniejszych cech diagnostycznych. Wektor ten dokonuje rozpoznania obiektów i dopasowania ich do odpowiedniej klasy.

Implementacja metod stosowanych przy rozpoznawaniu obiektów występujących w obrazach medycznych do konkretnego zastosowania ciągle stanowi poważne wyzwanie dla badaczy i naukowców. Aby dany klasyfikator był w stanie spełnić swoją rolę w diagnostyce medycznej, niezbędne jest wprowadzenie bardzo dużej ilości danych, umożliwiających ciągłe uczenie się.

W pracy opisane zostały narzędzia klasyfikacyjne stosowane obecnie w diagnostyce medycznej. Przedstawiono także przegląd metod klasyfikacji zmian dermatologicznych, w szczególności czerniaka.

Literatura

- [1] Błaszczyk H., Zalewska-Janowska A., *Choroby skóry*, Warszawa, 2009.
- [2] Placek W., *Wykwity skórne i stany narzucone*, Wybrane pojęcia z dermatologii-Encyklopedia Badań Medycznych, Gdańsk, 1996.
- [3] Miedziński F., *Melanodermie i inne choroby barwnikowe*, Dermatologia t. II, Warszawa, PZWL, 1982.

- [4] Urbańska A., *Zaburzenia barwnikowe hiperpigmentacyjne jako problem kosmetyczny*, Borgis. Nowa Medycyna 1, 2003.
- [5] Bulińska A., *Wprowadzenie do dermatoskopii według zmodyfikowanej analizy wzorca*, Czasopismo lekarzy dermatologów 1, 2014.
- [6] Antczak K., *Uczenie głębokie w diagnostyce medycznej*, Symulacja w Badaniach I Rozwoju 7, 2016.
- [7] Vincent P. i in., *Stacked Denoising Autoencoders: Learning Useful Representations in a Deep Network with a Local Denoising Criterion*, Journal of Machine Learning Research 11, 3371–3408, 2010.
- [8] Walczak A., Paczkowski M., *Medical data preprocessing for increased selectivity of diagnosis*, BioAlgorithms and MedSystems 16(1), 2016.
- [9] Bradley A.P., *The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms*, Pattern Recognition 30, 1145–59, 1997.
- [10] Harańczyk G., Stępień M., *Ilustrowana sztuka podejmowania decyzji*, Matematyka Społeczeństwo Nauczanie 41, str. 12–15, 2008.
- [11] Swets J.A., Dawes R.M., Monahan J., *Better decision through science*, Scientific American, 82–87, 2000.
- [12] Duda, R., Hart, P., Stork, P., *Pattern classification and scene analysis*, Wiley, New York, 2003.
- [13] Kittler H., Rosendahl C., Cameron A., Tschandl P., *Dermatoskopia. Algorytmiczna metoda oparta na analizie wzorca*, ViaMedica, Gdańsk, 2012.
- [14] Przystalski K., *Detekcja i klasyfikacja barwnikowych zmian skóry na zdjęciach wielowarstwowych* [rozprawa doktorska], Warszawa, 2014.
- [15] Baish J.W., Jain R.K., *Fractal and Cancer*, Perspectives in Cancer Research 60, Boston, 2000.
- [16] Damilola A., i in., *Automating Skin Disease Diagnosis Using Image Classifications*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013 II, San Francisco, 2013.

Przegląd sposobów segmentacji zmian skórnych

Streszczenie: Celem rozdziału jest przegląd wybranych dostępnych sposobów segmentacji zmian skórnych człowieka z obrazów dermatoskopowych. Przedstawiono wykorzystanie algorytmu aktywnych konturów, k -średnich, Otsu. Wykorzystana została segmentacja przez wykrywanie krawędzi, użyto masek Canny, Prewitt, Roberts, Sobel i różnych parametrów tych masek.

Słowa kluczowe: dermatoskopia, detekcja krawędzi, aktywny kontur, k -średnie, Otsu

Overview of skin lesions segmentation ways

Abstract: The aim of the article is to review selected segmentation methods of human skin lesions from dermatoscopic images. The use of active contours algorithm, k -medium and Otsu is presented. Used segmentation methods was edge detection with Canny, Prewitt, Roberts, Sobel masks and various parameters of these masks.

Keywords: dermatoscopy, edge detection, active contour, k -means, Otsu

1. Wstęp

W ostatniej dekadzie wielu badaczy zajmowało się zmianami na skórze. Jeśli złośliwa odmiana zmiany skórnej jest zdiagnozowana we wczesnych stadiach na wyleczenie może liczyć większa liczba pacjentów. Zostało opracowanych wiele technik do wykrywania granic zmian na obrazach dermatoskopowych skóry. Dermoskopia jest nieinwazyjną techniką obrazowania zapewniająca ukazanie wielu cech zmian skórnych. Obrazy skóry są poddawane analizie dermatologa, jednak gdy jest on niedoświadczony nowotwór może nie zostać zdiagnozowany. W związku z tym, rozwój skomputeryzowanych procesów diagnostyki jest korzystny do diagnozowania nowotworów skóry [1]. Analiza obrazów na podstawie komputerowych systemów ma monitorować granicę zmian skórnych [2].

Do procesu segmentacji obrazy dermatoskopowe należy dobrze przygotować. Istotna jest technika wstępnego przetwarzania obrazów. Obrazy dermatoskopowe często zawierają niektóre artefakty, takie jak naczynia krwionośne, włosy i linie skóry. Stają się one przeszkodą w identyfikacji zmian skórnych ze zdrowej tkanki. Obecnie wykorzystuje się szereg automatycznych algorytmów segmentacji krawędziowej lub tradycyjnych masek krawędziowych. Korzysta się także z metody JSEG, która składa się z dwóch kroków, kwantyzacji

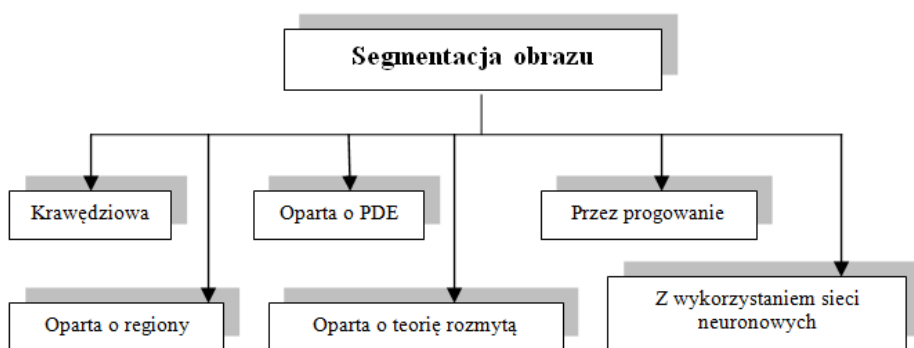
*magdalena.michalska@pollub.edu.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

i segmentacji. Na początku kolory obrazu są dzielone na wiele klas, które można wykorzystać do rozróżnienia regionów. Metoda podziału regionu jest stosowana do segmentowania obrazu w ostatnim kroku. Algorytm segmentacji rozmyte c-średnie (FCM) wykorzystuje średnią zmianę, aby znaleźć rzeczywiste centrum klastra, aby zawęzić początkową wartość [3].

2. Podział metod segmentacji obrazów

Segmentacja obrazu polega na rozdzieleniu obrazu na regiony lub kategorie, które odpowiadają obiektom lub częściom obiektów. Każdy piksel z obrazu jest przypisany do jednego z regionu lub jednej z kategorii. Oczywiście zarówno regionów jak i kategorii można przyjąć wiele. Należy pamiętać, by piksele w tej samej kategorii miały różną wartość np. w skali szarości lub tworzyły region powiązany. Istotne jest by piksele w różnych regionach nie posiadały związku wartości.

Podstawowa metoda segmentacji obejmuje dzielenie obrazu na regiony. Dalszy rozwój technik opartych o progowanie spowodował powstanie metod progowania kanału jednokolorowego [4], progowania opartego na logice rozmytej [5], fuzji progów [6], entropii lokalnej, progowania histogramu koloru [7]. Wśród znanych metod segmentacji wymieniane są również metoda aktywnego konturu, zbiorów poziomicowych, lokalnej i globalnej Otsu, adaptacyjnej, Bradley'a. Na rysunku 1 przedstawiony został podział dostępnych metod segmentacji [8]. Uwzględnia on segmentację przez wykrywanie krawędzi, opartą o regiony, progowanie, elementy rozmyte, PDE (ang. partial differential equations (PDE)–based method) i segmentację wykorzystującą sieci neuronowe.



Rys. 1. Podział metod segmentacji obrazów

Źródło: Arulmozhi V., Divya S. C, Image segmentation and morphological process of skin dermis for diagnosis in anthropoid, International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering 3(10), 242–247, 2017.

3. Segmentacja przez wykrywanie krawędzi

Wykrywanie krawędzi jest zwykle używane w segmentacji obrazu, gdy obrazy są rozdzielone na obszary odpowiadające różnym obiektom. Jest ono znaczącym krokiem w zmianie funkcji obrazu. Zmniejsza się wówczas drastycznie rozmiar obrazu i odfiltrowane informacje stają się mniej istotne, ważniejsze i porządane stają się właściwości strukturalne obrazu.

Proponowany algorytm segmentacji obrazów dermatoskopowych w Matlabie pozwala na znalezienie krawędzi zmian skórnych na obrazie. Technika może być bardziej niezawodna i w przyszłości wizualnie dokładnie śledzić granice zmian. Z bazy obrazów dermatoskopowych DERMIS [9] wybrane zostały 2 kolorowe obrazy wysokiej rozdzielczości zmian skórnych kobiet o pochodzeniu kaukaskim. Zostały one zdiagnowane jako złośliwe odmiany czerniaka skóry po wykonaniu badań histopatologicznych. To obrazy jasnej skóry bez artefaktów w okolicy zmian, dzięki czemu artefakty nie miały być usuwane z oryginalnych obrazów dermatoskopowych. Obrazy kolorowe bardzo często zamieniane są na obrazy w skali szarości, wyznacza się ich znormalizowane histogramy.

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono wyniki segmentacji krawędziowej dla masek Canny, Prewitt, Roberts, Sobel przy parametrze maski 0,115 dla 2 pacjentek. Maski Roberta przy podanym parametrze maski ukazuje krawędzie o największej zmianie wartości intensywności na granicy obszarów, wykrywając tym samym mniejszą liczbę krawędzi.

Obraz binarny może zawierać niezliczone defekty. Morfologia jest operacją przetwarzania obrazu, która modyfikuje obrazy i kształty. Ma na celu wyeliminowanie wszystkich wad i utrzymanie struktury obrazu. Operacje morfologiczne (otwiercie, domknięcie, dylatacja, erozja, pogrubienie) koncentrują się bardziej na obrazie binarnym, ale mogą również być stosowane do obrazów w skali szarości. W [8] zaimplementowano operacje morfologiczne dla segmentowanego obrazu. Pierwszy plan jest usuwany w początkowej fazie za pomocą operacji erozji, podczas gdy w drugiej fazie operacja dylatacji usuwa tło. Operacja morfologiczna dała obraz, który pomógł w dalszym przetwarzaniu. Krawędzie na obrazie zostały wykryte przy użyciu maski Prewitta i Sobela. Udowodniono, że operacja morfologiczna daje lepsze wartości PSNR i MSE, wykrywanie krawędzi za pomocą maski Prewitta jest skuteczniejsze niż wykrywanie ich maską Sobela w oparciu o wartość PSNR. Na rysunku 4 przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych na oryginalnym obrazie operacji.



a



b



c



d



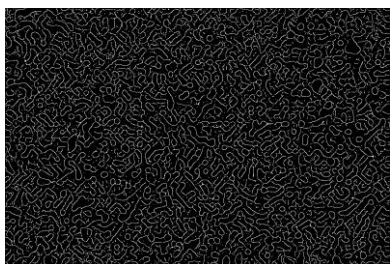
e

Rys. 2. a) Oryginalny kolorowy obraz dermatoskopowy pacjent 1; obrazy po segmentacji kwawędzowej z parametrem masek równym 0,115: b) maska Canny; c) maska Prewitt; d) maska Roberts; e) maska Sobel

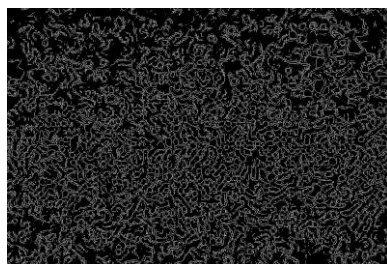
Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu
<http://www.dermis.net/dermisroot/en/18195/diagnose.htm>



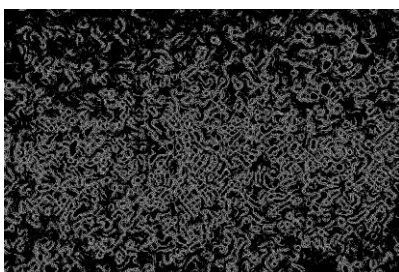
a



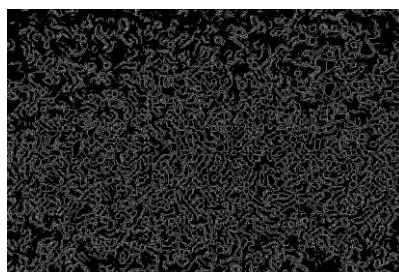
b



c



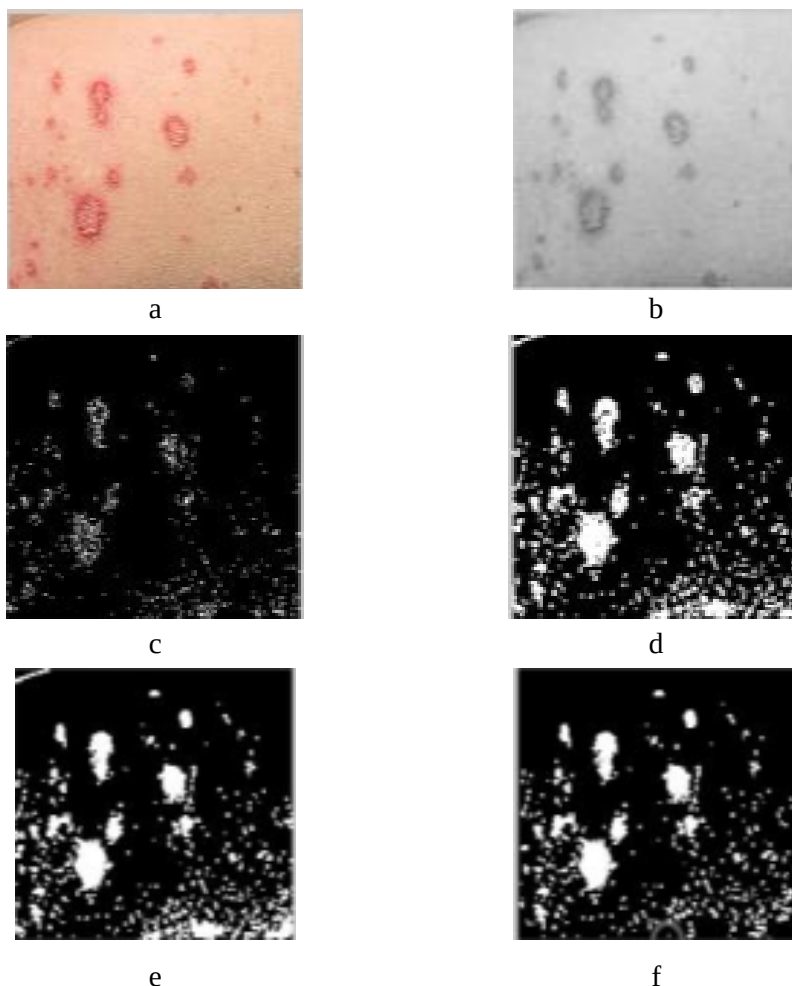
d



e

Rys. 3. a) Oryginalny kolorowy obraz dermatoskopowy pacjent 2; obrazy po segmentacji kwawędzowej z parametrem masek równym 0,115: b) maska Canny; c) maska Prewitt; d) maska Roberts; e) maska Sobel

Źródło: Opracowanie własne przy wykorzystaniu zasobów Internetu
<http://www.dermis.net/dermisroot/en/18195/diagnose.htm>



Rys. 4. a) Oryginalny kolorowy obraz dermatoskopowy przewlekłego zapalenia skóry b) oryginalny obraz dermatoskopowy przewlekłego zapalenia skóry ukazany w skali szarości; obrazy po wykonanych operacjach: c) maska gradientu binarnego; d) rozszerzona maska gradientu; e) obraz binarny z wypełnionymi otworami; f) obraz wypełnionych krawędzi

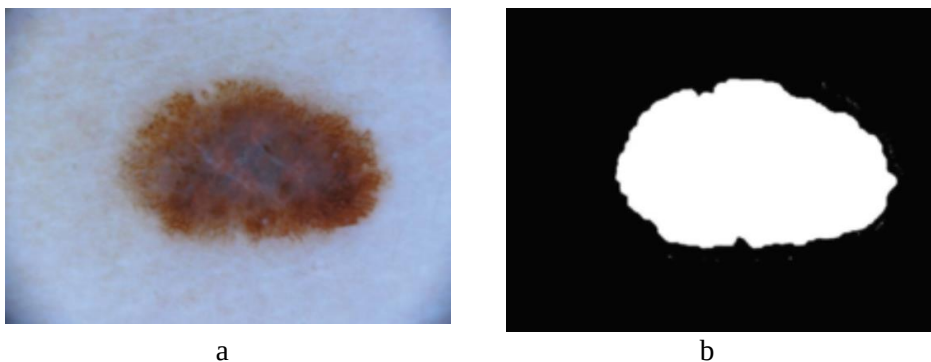
Źródło: Arulmozhi V., Divya S. C, Image segmentation and morphological process of skin dermis for diagnosis in anthropoid, International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering 3(10), 242–247, 2017.

4. Algorytm k -średnich

Algorytm k -średnich to jeden z najprostszych nienadzorowanych algorytmów uczenia się. Główną ideą jest początkowe rozdzielenie zestawu danych na

k klastrów i znalezienie punktu centralnego każdego klastra, znanego środkiem ciężkości klastra. W kolejnym kroku algorytm przypisuje każdy punkt danych do najbliższego centroidu, aby utworzyć nowe klastry. Powtarza się to, d momentu aż klastry staną się stabilne.

W przypadku segmentacji zmian skórnych algorytm *k*-średnich skupia się na dwóch klastrach: pierwszym planie i tle. W [10] algorytm wybierał dwa punkty: reprezentujący środek ciężkości pierwszego planu i środek ciężkości tła zmiany skórnej. Każdy piksel w obrazie został przypisany do najbliższego klastra, a po przypisaniu wszystkich pikseli ponownie obliczano położenie centroidów pierwszego planu i tła. Opisane kroki powtarzano do momentu, gdy centroidy przestały się poruszać. Wyniki opisanego algorytmu widoczne są na rysunku 4.



Rys. 4. a) Oryginalny kolorowy obraz; b) obraz po wykonanym algorytmie segmentacji

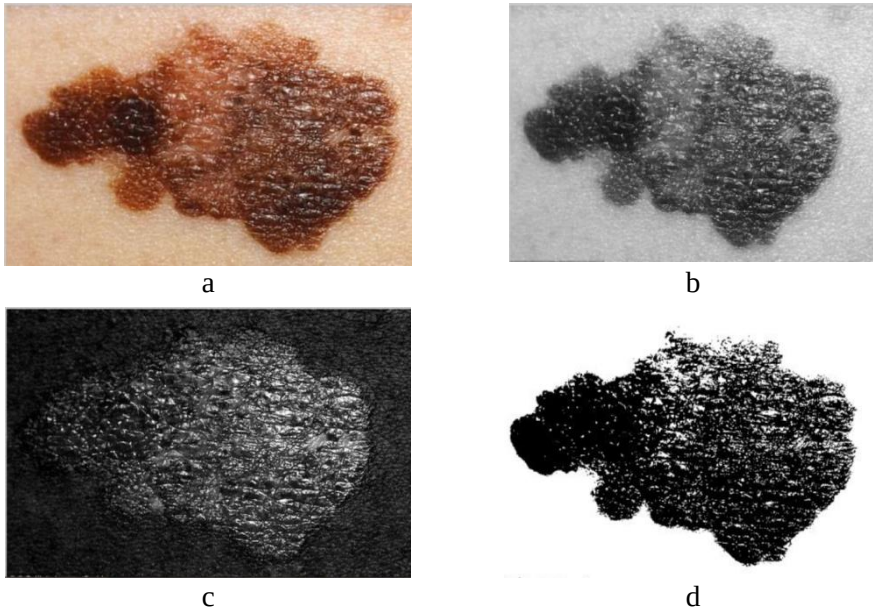
Źródło: Ho L., Fully automated GrowCut-based segmentation of melanoma in Dermoscopic Images, Journal of Young Investigators 36 (2), 11–17, 2019.

5. Metoda Otsu

Metoda Otsu [11] wykorzystuje prosty próg intensywności pikseli obrazu w skali szarości. Obraz jest konwertowany na skalę szarości i znajdowana jest optymalna wartość progowa, by oddzielić najczęściej występujące skupiska intensywności pikseli. Wszystkie piksele o intensywnościach poniżej progu są oznaczone jako pierwszy plan, a wszystkie piksele o intensywnościach powyżej progu są oznaczone jako tło. Do obliczenia progu Otsu wykorzystywany jest wzór zawarty poniżej:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_0(t)\sigma_0^2 + \omega_1(t)\sigma_1^2 \quad (1)$$

gdzie $\sigma^2_{\omega}(t)$ reprezentuje ważoną sumę wariancji dwóch klas (pierwszy plan i tło), wagi (ω_0 i ω_1) reprezentują prawdopodobieństwa, że dwie klasy zostaną rozdzielone progiem (t), podczas gdy σ^2_0 i σ^2_1 reprezentują wariancję klas. Metoda Otsu znajduje wartość progową, która minimalizuje $\sigma^2_{\omega}(t)$.



Rys. 5. a) Oryginalny kolorowy obraz czerniaka skóry; b) obraz czerniaka skóry w skali szarości; obrazy po wykonanych operacjach: c) obraz po wykonanej segmentacji; d) obraz binarny zmiany skórnej z czerniakiem

Źródło Banjan N., Dalvi P., Athavale N., Melanoma skin cancer detection by segmentation and feature extraction using combination of OTSU and STOLZ algorithm technique, SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG – IJECE) 4(4), 21–25, 2017.

W [12] łączy się technikę segmentacji i ekstrakcji cech, wykorzystując algorytm Otsu i STOLZ. Dzięki czemu uzyskano znacznie lepsze wyniki obliczeń TDS. Do segmentacji obrazu stosuje się progowanie Otsu i algorytm śledzenia granic. Algorytm STOLZ jest wykorzystywany do etapu klasyfikacji wyodrębnionych cech. Połączenie tych dwóch metod zapewnia właściwą dokładność w wykrywaniu raka skóry czerniaka.

Rysunek 5 przedstawia wyniki zaimplementowanego w środowisku Matlab algorytmu. Proponowana metoda wykrywa raka skóry czerniaka z odpowiednią dokładnością. Końcowy wynik podany przez system pomoże dermatologowi wykryć zmianę chorobową i dokonać diagnozy.

6. Metoda aktywnych konturów

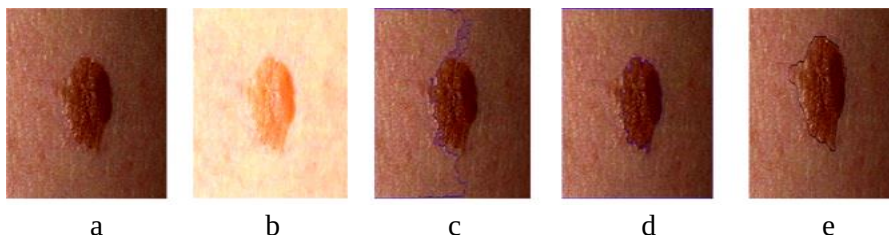
Aktywne kontury wykorzystują odkształcalną krzywą (zwaną „węzem”), aby nakreślić zarys obiektu z obrazu poprzez minimalizację energii. Krzywa lub kontur aktywnie porusza się wokół obrazu pod wpływem wewnętrznych sił, które popychają go w kierunku krawędzi. Zewnętrzne siły więzłów utrzymują węźa w pobliżu pożądanego lokalnego minimum. Minimalizując funkcję energii siły działają, aby rozróżnić granice obiektów na obrazie. Wszystkie piksele wewnątrz granicy są oznaczone jako uszkodzenie.

Funkcję energetyczną dla konturu można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$\int (v(s))ds + \int (E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)))ds \quad (2)$$

gdzie $v(s)$ reprezentuje pozycję konturu, E_{int} energię wewnętrzną, E_{image} siły obrazu, a E_{con} zewnętrzne siły ograniczające.

Klasyczna metoda aktywnych konturów z czasem została modyfikowana w [13] i zaproponowana została metoda aktywnego konturu Chan i Vese [14]. Użyto jej do ostatecznego wykrycia granicy zmian skóry. Metoda była testowana na 145 zdjęciach dermoskopowych: 79 przypadkach z łagodną zmianą i 75 przypadkach z czerniakiem. Średnią dokładność wynosiła 94%, czułość 78,5%, wartość swoistość wyniosła 99%.



Rys. 5. a) oryginalny obraz; b) usuwanie cieni z obrazu; wyniki po zastosowaniu segmentacji; c) użyciu Chan-Vese bez tłumienia cieniowania; d) Chan-Vese z usuwaniem cieni; e) obraz finalny

Źródło: E. Meskini, Helfroush M. S., Kazemi K., Sepaskhah M., A new algorithm for skin lesion border detection in dermoscopy images, J Biomed Phys Eng. 8(1), 117–126, 2018.

W zależności od kąta zawartego między dermoskopem a skórą oświetlenie pomiędzy środkiem obrazu a krawędziami może się różnić. Powierzchnia skóry nie jest płaska podczas wykonywania obrazowania dermatoskopem. A powstający obraz jest jaśniejszy w pobliżu środka i ciemniejszym przy krawędzi. Konieczne

staje się wtedy tzw. tłumienie cieniowania. Tworzy ono strukturę przypominającą zmianę w zdrowej skórze, która jest mylona z uszkodzeniem podczas procesu segmentacji. Algorytm klasyfikuje piksele cienia i pik uszkodzenia w tej samej klasie. Na rysunku 6 przedstawiono przykłady działania wspomnianego algorytmu.

7. Prace porównujące metody

Segmentacje były testowane na różnych zestawach danych i porównanie ich nie jest łatwym zadaniem. Powstało wiele prac, które porównują algorytmy na tym samym zestawie danych. Badania porównawcze umożliwiają ocenę tych algorytmów w bardziej jednolitych ramach, jasno określają ich mocne i słabe strony.

Na bazie zestawu danych obrazowych zmian skórnych z International Skin Imaging Collaboration (ISIC Archive 2016) testowane były w [10] segmentację metodą Otsu, *k*-średnich i aktywnych konturów. Tabela 1 przedstawia wskaźniki wydajności dla podstawowych metody segmentacji na zestawie danych testowych.

Tabela 6. Wskaźniki wydajności dla podstawowych metody segmentacji obrazów dermatoskopowych pochodzących z bazy ISIC Archive 2016

Metoda segmentacji	Dokładność	Wrażliwość (TP)	Współczynnik Dice	Indeks Jaccarda
Aktywne kontury	0,85	0,96	0,75	0,59
<i>k</i>-średnie	0,87	0,47	0,54	0,37
Otsu	0,87	0,71	0,70	0,54

Źródło: Ho L., Fully automated GrowCut-based segmentation of melanoma in dermoscopic images, Journal of Young Investigators 36(2), 11–17, 2019.

W [15] opublikowano porównanie metod segmentacji: rozmytych *c*-średnich, „center split”, „split and merge” i progowania adaptacyjnego. Natomiast w [16] porównywana była wydajność technik grupowania kolorów, algorytm „mean-shift” uzyskał najlepszy wynik. W innym porównaniu metod segmentacji [17], adaptacyjny algorytm węża okazał się lepszy niż gradientowy przepływ wektorowy (GVF), progowanie adaptacyjne, zestaw poziomów optymalizacji oczekiwanej, algorytmu „split and merge”. Na znacznie większym zbiorze danych około 2300 obrazach dermatoskopowych testowane były metody SRM, JSEG i metoda oparta na klastrach [18]. Według porównania [19] algorytm „snakes GVF” przewyższał automatyczne progowanie, *k*-średnie, „mean-shift”, rozrost regionów i metodę wododziałową.

Jednak badania te nadal nie zapewniają ujednoliconych wyników dla wszystkich testowanych algorytmów. Wynika to z powodu różnic w zastosowanych zestawach danych i różnych wskaźnikach oceny.

8. Podsumowanie

Prawie wszystkie standardowe metryki do oceny algorytmów segmentacji opierają się na czułości, specyficzności, błędzie granicznym, true positives (TP), true negatives (TN), false positives (FP), false negatives (FN). Ostatnio w [20] zaproponowany został ważony wskaźnik wyników, który wykorzystuje konkretne wagi dla tych wskaźników i łączy je w jedną wartość dla łatwiejszego porównania z innymi metodami. Alternatywnie używanymi metrykami są prawdopodobieństwo błędnej klasyfikacji pikseli [21], odległości Hamoude'a i Hausdorffa [22] i znormalizowany probabilistyczny wskaźnik rand [23]. Analiza obrazu, może być narzędziem korzystnym dla diagnozowania raka skóry – czerniaka w oparciu o klasyfikatory. Algorytmy są testowane na wielu zestawach danych, co pozwala na większą skuteczności w ocenie nowotworu. W procesie oceny wybranych metod segmentacji istotny jest odpowiedni dobór danych wejściowych, taki sam proces obróbki wstępnej zdjęć i ujednolicone metryki.

Literatura

- [1] Maglogiannis I., Doukas C. N., *Overview of Advanced Computer Vision Systems for Skin Lesions Characterization*, IEEE Trans. on Info. Tech. in Biomedicine 13 (5), 721–733, 2009.
- [2] Celebi M. E., Aslandogan Y. A., Stoecker W. V., Iyatomi H., Oka H., Chen X., *Unsupervised Border Detection in Dermoscopy Images*, Skin Research and Technology 13, 1–9, 2007.
- [3] Zhou H., Schaefer G., Sadka A. H., Celebi M. E., *Anisotropic Mean Shift Based Fuzzy C-Means Segmentation of Dermoscopy Images*, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 3 (1), 2009.
- [4] Fleming M. G., Steger C., Zhang J., Gao J., Cognetta A. B., Pollak L., Dyer C. R., *Techniques for a structural analysis of dermatoscopic imagery*, Comput. Med. Imaging Graph. 22 (5), 375–389, 1998.
- [5] Y˘uksel M. E., Borlu M., *Accurate segmentation of dermoscopic images by image thresholding based on type-2 fuzzy logic*, IEEE T. Fuzzy. Syst. 17, 976–982, 2009.
- [6] Celebi E. M., Wen Q., Hwang S., Iyatomi H., Schaefer G., *Lesion border detection in dermoscopy images using ensembles of thresholding methods*, Skin Res. Tech. 19 (1), e252–e258, 2013.

- [7] Peruch F., Bogo F., Bonazza M., Cappelleri V. M., Peserico E., *Simpler, faster, more accurate melanocytic lesion segmentation through meds*, IEEE T. Biomed. Eng. 61 (2), 557–565, 2014.
- [8] Arulmozhi V., Divya S. C., *Image segmentation and morphological process of skin dermis for diagnosis in anthropoid*, International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering 3 (10), 242–247, 2017.
- [9] <http://www.dermis.net/dermisroot/en/18195/diagnose.htm>
- [10] Ho L., *Fully automated GrowCut-based segmentation of melanoma in Dermoscopic Images*, Journal of Young Investigators 36 (2), 11–17, 2019.
- [11] Otsu N., *A threshold selection method from gray-level histograms*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 9 (1), 62–66, 1979.
- [12] Banjan N., Dalvi P., Athavale N., *Melanoma skin cancer detection by segmentation and feature extraction using combination of OTSU and STOLZ algorithm technique*, SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG – IJECE) 4 (4) , 21–25, 2017.
- [13] E. Meskini, Helfroush M. S., Kazemi K., Sepaskhah M., *A New Algorithm for Skin Lesion Border Detection in Dermoscopy Images*, J Biomed Phys Eng. 8 (1), 117–126, 2018.
- [14] Chan T. F., Vese L. A., *Active contours without edges*, IEEE Trans Image Process. 10, 266–277, 2001.
- [15] Hance G., Umbaugh S., Moss R., Stoecker W., *Unsupervised color image segmentation: with application to skin tumor borders*, IEEE Eng. Med. Biol. 15 (1), 104–111, 1996.
- [16] Melli R., Grana C., Cucchiara R., *Comparison of color clustering algorithms for segmentation of dermatological images*, Proc. SPIE 6144, 1–9, 2006.
- [17] Silveira M., Nascimento J., Marques J., Marcal A., Mendonca T., Yamauchi S., *Comparison of segmentation methods for melanoma diagnosis in dermoscopy images*, IEEE J. Sel. Topics in Signal Proc. 3 (1), 35–45, 2009.
- [18] Zhou H., Chen M., Gass R., Ferris L., Drogowski L., Rehg J., *Spatially constrained segmentation of dermoscopy images*, Proc. IEEE Int. Symp. Biomed. Imag.: From Nano to Macro. Piscataway, IEEE Press, 800–803, 2008.
- [19] Ferreira P. M., Mendonca T., Rocha P., *A wide spread of algorithms for automatic segmentation of dermoscopic images*, Pattern Recognition and Image Analysis, ser. Lecture Notes in Computer Science, Springer 7887, 592–599, 2013.
- [20] Garnavi R., Aldeen M., Celebi M., *Weighted performance index for objective evaluation of border detection methods in dermoscopy images*, Skin Res. Tech. 17 (1), 35–44, 2011.
- [21] Guillod J., Schmid-Saugeon P., Guggisberg D., Cerottini J., Braun R., Krischer J., *Validation of segmentation techniques for digital dermoscopy*, Skin Res. Tech. 8 (4), 240–249, 2002.

[22] Silveira M., Nascimento J., Marques J., Marcal A., Mendonca T., Yamauchi S., *Comparison of segmentation methods for melanoma diagnosis in dermoscopy images*, IEEE J. Sel. Topics in Signal Proc. 3 (1), 35–45, 2009.

[23] Celebi M., Schaefer G., Iyatomi H., Stoecker W., Malters J., Grichnik J., *An improved objective evaluation measure for border detection in dermoscopy images*, Skin Res. Tech. 15 (4), 444–450, 2009.

*Dawid Zarzeczny

Urządzenie typu Lab on a Chip do analizy wpływu danego materiału na organizmy żywe

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono innowacyjne urządzenie do pomiaru impedancji komórek w czasie rzeczywistym *in vitro*. Urządzenie w postaci płytki pomiarowej z elektrodami wykonanymi w cienkiej warstwie metalizacji jest kompatybilne z systemem ECIS. Przedstawiono metodykę prowadzenia badań z użyciem hodowli komórek. Opisane zostały etapy opracowywania technologii ich produkcji, związane z projektowaniem i wytworzeniem. Ponadto przedstawiono wyniki charakteryzujące ich właściwości elektryczne.

Słowa kluczowe: technologia, elektronika, MEMS, ECIS, sygnały

Device of the type lab on a chip to analyze the impact of the material on living organisms

Abstract: This paper presents an innovative device for measuring cell impedance in real time *in vitro*. The device in the form of a measuring plate with electrodes made in a thin metallization layer is compatible with the ECIS system. The methodology of conducting research using cell culture was presented. The stages of developing their production technologies related to design and manufacture have been described. In addition, the results characterizing their electrical properties were presented.

Keywords: technology, electronics, MEMS, ECIS, signals

1. Wstęp

Ostatnie lata przyniosły ogromny wzrost popularności aplikacji biomedycznych opartych na urządzeniach mikroelektronicznych do taniej klinicznej opieki zdrowotnej w miejscu opieki oraz diagnostycznych czujników do powszechnego zastosowania. Przyczynia się to do wzrostu poziomu życia osób cierpiących na różnego rodzaju choroby i rozmaitych dolegliwości. Pomaga również we wczesnym diagnozowaniu bardzo niebezpiecznych chorób we wczesnych stadiach ich rozwoju. Niestety obecnie stosowane przyrządy charakteryzują się wysokim kosztem ich nabycia i stosowania. Istnieje więc potrzeba redukcji kosztów związanych z ich produkcją, co za tym idzie i dostępnością. Dlatego wartym zainteresowania jest zastosowanie tańszych w obróbce materiałów od powszechnie stosowanej platyny czy złota. Zadanie wyboru alternatywnych materiałów do zastosowań w aplikacjach

*dawid.adrian.zarzeczny@gmail.com, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

biomedycznych wymaga poznania ich wpływu na organizmy żywe. Powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką biokompatybilnością, bardzo dobrymi parametrami elektrycznymi, optymalnymi właściwościami mechanicznymi, powszechną dostępnością, łatwością obróbki podczas przeprowadzania procesów technologicznych oraz jak najniższą ceną.

W niniejszej pracy przedstawiono innowacyjne urządzenie osadzone na biokompatybilnym podłożu wykorzystujące bardzo interesującą metodę badania hodowli komórek za pomocą pomiaru ich impedancji w czasie rzeczywistym *in vitro*. Może zostać ono wykorzystane do rozszerzenia możliwości systemu opartego na tej nieinwazyjnej metodyce prowadzenia eksperymentów medycznych ECIS.

2. Metodyka badań

Rozważając zagadnienia związane z problemem doboru odpowiednich materiałów do zastosowań w urządzeniach typu BioMEMS, analizowano możliwość określenia wpływu danego materiału na badane komórki. Ważne jest aby nie wpływał negatywnie na prowadzone badania oraz rozwój komórek hodowlanych. Przeglądając aktualnie wykorzystywane metody prowadzenia badań na komórkach żywych, wartym zainteresowania jest metoda prowadzenia eksperymentów za pomocą systemu ECIS (ang. Electric Cell-substrate Impedance) do pomiaru impedancji komórek w czasie rzeczywistym *in vitro*. Dzięki jej zastosowaniu możliwe jest analizowanie aktywności badanych komórek, odnosząc się do takich ich cech i parametrów jak morfologia, zdolność na namnażania, podziału czy przemieszczania się. Jej twórcami są dr I. Giaever oraz dr C.R. Keese, założyciele firmy Applied BioPhysics Inc, wytwarzającej aparaturę pomiarową opierającą się na danej metodzie, specjalizującej się w monitorowaniu hodowli komórek poddanych działaniu energii elektrycznej. Jest ona znakomitą alternatywą dla eksperymentów medycznych prowadzonych przy użyciu mikroskopów, polegających jedynie na obserwowaniu zachodzących zmian komórkowych wywoływanych wpływem czasu lub bodźcami zewnętrznymi, takimi jak substancje toksyczne. Badanie takie polega na mierzeniu impedancji komórek, przez które przepuszczany jest prąd o natężeniu poniżej 1 mA. Wartość częstotliwości, przy której prowadzone są pomiary, mieści się w zakresie częstotliwości od kilkudziesięciu do nawet 100 kHz. Przy częstotliwości poniżej 2 kHz, znacząca ilość prądu płynie pomiędzy przestrzeniami międzykomórkowymi, dostarczając informacji o adherencji komórek. Użycie częstotliwości o wartości większej niż 40 kHz powoduje przepływ prądu bezpośrednio przez błonę komórkową, dostarczając informacji o stopniu pokrycia elektrod przez komórki. Poszczególne wartości wykreślane są jako punkty w omach [Ω] lub nanofaradach [nF] w określonym przedziale czasu. Dla ideowego uproszczenia przeprowadzanego eksperymentu, stosując

odpowiednie przekształcające modele matematyczne, komórkę przedstawić można jako układ równoległe połączonego rezystora i kondensatora. Otrzymana wartość rezystancji opisuje opór przepływającego przez badaną komórkę prądu, pojemność natomiast powodujące polaryzację rozdzielenia się elektronów w izolowanej warstwie błony komórkowej. Do przeprowadzenia pomiaru wykorzystywane są specjalne płytki pomiarowe, zawierające odpowiedni zestaw elektrod. Standardowe płytki, wykorzystywane podczas przeprowadzanego eksperymentów, wykonane są z biokompatybilnego tworzywa sztucznego Lexan bądź PET, lub tworzywa na powierzchni którego znajduje się bardzo cienka warstwa biokompatybilnego metalu, spełniającego rygorystyczne kryteria prowadzenia badań. Elektrody definiowane są jako bardzo małe otwory w warstwie tej metalizacji. Najpowszechniejszymi są płytki ośmiodłukowe, które posiadać mogą elektrody okrągłe bądź elektrody o strukturze grzebieniowej. Nad każdą z par elektrod znajduje się specjalny pojemnik, przymocowany za pomocą biokompatybilnego silikonu. Do wewnątrz pojemnika umieszczane są badane komórki, zanurzone w specjalnie przygotowanym medium, zapewniającym niezbędne składniki do ich wzrostu i hodowli. Tak skompletowany zestaw umieszczany jest w zapewniającym komórkom odpowiednie warunki środowiskowe inkubatorze. Całość aparatury jest kompatybilna z instrumentami systemu ECIS [1–5].

3. Opracowana technologia płytek pomiarowych

W ramach prowadzonych prac badawczych, zaprojektowano i wykonano specjalne płytki testowe na biokompatybilnym podłożu z poliwęglanu, służące do przeprowadzenia pomiaru bioimpedancji hodowli komórek. W tym celu, po przeprowadzeniu szeregu eksperymentów, opracowano technologię wytwarzania cienkowarstwowych struktur pomiarowych. Pierwszy etap prac polegał na zaprojektowaniu masek technologicznych, niezbędnych przy przeprowadzaniu procesu osadzania cienkich warstw metalizacji oraz fotolitografii i trawienia. Wzorując się na komercyjnie wykorzystywanych matrycach systemu ECIS zdecydowano, że najlepsze efekty zostaną osiągnięte przy zastosowaniu elementów o strukturze grzebieniowej. Zaprojektowano maski technologiczne zawierające osiem par elektrod w postaci kondensatorów grzebieniowych, znajdującymi się na pojedynczym podłożu. Każdy z kondensatorów posiadał wymiar $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$. Następnie, za pomocą napyłarki NANO 36TM firmy Kurt J. Lesker® będącej na wyposażeniu laboratorium Instytutu Elektroniki i Techniki Informacyjnych Politechniki Lubelskiej, w procesie rozpylania magnetronowego, osadzone zostały cztery materiały. Wykorzystano następujące materiały: tytan, chromonikielinę, nikiel oraz miedź. Na powierzchni ich warstw, stosując proces fotolitografii pozytywowej, wykonane zostały elektrody pomiarowe w postaci kondensatorów grzebieniowych. Tytan wybrano ze

względu na jego bardzo wysoką biokompatybilność oraz szerokie zastosowanie w szeroko pojętej implantologii. Chromonikielina charakteryzując się wysoką biogodnością, służy do wykonywania z niej niektórych narzędzi chirurgicznych oraz innych narzędzi przeznaczonych do kontaktu z tkankami organizmów żywych, takich jak narzędzia przeznaczone do piercingu. Powodujący u co piątej osoby alergię nikiel, wykorzystano ze względu na występowanie jego znacznych ilości w stali nierdzewnej, używanej do produkcji urządzeń biomedycznych. Ostatni, materiałem, którym jest miedź, wytypowano ponieważ posiada znakomite parametry elektryczne, ułatwiając tym przeprowadzenie pomiarów wartości elektrycznych. Dzięki temu jest jednym z najczęściej wykorzystywanych surowców do produkcji podzespołów urządzeń elektronicznych i mikroelektronicznych. Mimo jej ogólnej toksyczności, może znaleźć ona zastosowanie w różnego rodzaju aplikacjach czujnikowych, niewymagających długiego czasu detekcji. Aby płytki używane podczas przeprowadzania eksperymentu były sterylne, i co za tym idzie bezpieczne dla badanych komórek, w obecności których znajdują się, całość zestawu z umieszczonymi na ich powierzchni studzienkami poddawana jest bakteriobójczemu działaniu promieniowania ultrafioletowego [3–9].

4. Wyniki

Podczas eksperymenty zostały zmierzone parametry elektryczne wykonanych płytek pomiarowych, w celu sprawdzenia możliwości wykorzystania ich do pomiaru impedancji hodowli komórek *in vitro*. Pomiary przeprowadzono w zakresie częstotliwości od wartości 62,5 Hz do 64 kHz. Badano zarówno rezystancję, jak i pojemność oraz impedancję. Różnice w otrzymanych wartościach poszczególnych wyników wynikają z różnej długości doprowadzeń elektrycznych do elektrod.

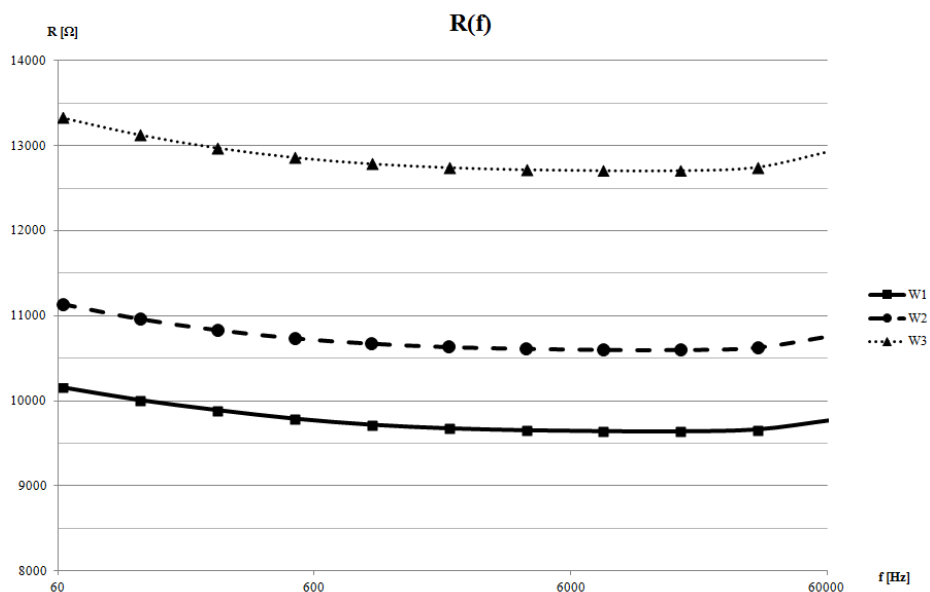
Największą wartością rezystancji i impedancji charakteryzują się płytki z elektrodami wykonanymi w warstwie tytanu. Wartość uzyskanych wyników jest kilkakrotnie wyższa od wartości wyników otrzymanych z pomiarów pozostałych płytek pomiarowych z elektrodami wykonanymi w metalizacji innych metali. Wartość rezystancji wahała się w przedziale od około 10100 Ω do niecałych 13500 Ω , delikatnie malejąc wraz ze wzrostem wartości częstotliwości. Wartość zmierzonej pojemności mieściła się w przedziale od około 3,75 E-6F do 4,25 E-6F przy niskich częstotliwościach i spadała do zera wraz ze wzrostem wartości częstotliwości już przy wielkości rzędu 8000 Hz. Wartość zmierzonej impedancji oscylowała w przedziale od około 10500 Ω do około 13250 Ω . Możliwe jest jednak prowadzenie badań nad komórkami z użyciem tych struktur, chociaż czas trwania podobnego eksperymentu może zostać mocno wydłużony.

Rezystancja elektrod wykonanych z chromonikieliny wahała się w przedziale od około 1400 Ω do prawie 2000 Ω , przy wartości częstotliwości 62,5 Hz. Rezystancja przy wartości częstotliwości 64 kHz mieściła się w przedziale od ponad 1200 Ω do około 1800 Ω . Wartość zmierzonej pojemności oscylowała w przedziale od około 3,25 E-6F do prawie 4,5 E-6F, malejąc do zera wraz ze wzrostem wartości częstotliwości. Wartość zmierzonej impedancji wahała się w przedziale od ponad 1500 Ω do prawie 2100 Ω , przy niskiej wartości częstotliwości. Wartość impedancji przy wysokiej wartości częstotliwości mieściła się w przedziale od około 1250 Ω do prawie 1800 Ω .

Elektrody z niklu posiadały rezystancję oscylującą w granicach od ponad 650 Ω do ponad 1250 Ω przy częstotliwości 62,5 Hz. Wartość rezystancji przy częstotliwości 64 kHz wahała się w przedziale od około 600 Ω do około 1200 Ω . Wartość pojemności mieściła się w przedziale od około 5,1 E-6F do ponad 9,5 E-6F, spadając dynamicznie do zera wraz ze wzrostem częstotliwości. Wartość impedancji oscylowała w granicach się od lekko ponad 700 Ω , aż do około 1300 Ω przy niskiej wartości częstotliwości, zaś przy wysokiej wartości częstotliwości wahała się w przedziale od ok 600 Ω do około 1200 Ω .

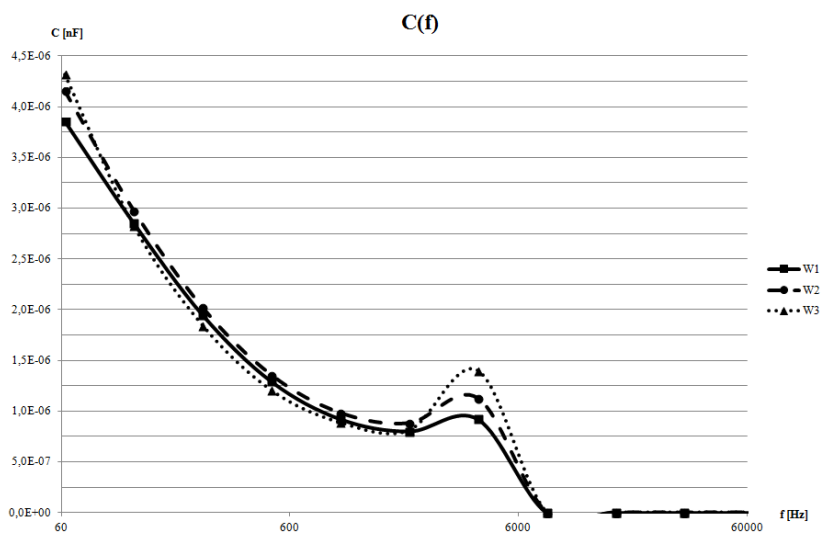
Elektrody wykonane z miedzi posiadają największe rozbieżności w uzyskanych wynikach. Przy częstotliwości o wartości 62,5 kHz wartość rezystancji oscylowała w przedziale od około 2100 Ω do około 3100 Ω . Przy częstotliwości o wartości około 64 kHz, wartość rezystancji maleje do wartości około 250 Ω . Następuje wtedy stabilizacja jej wartości rezystancji. Wartość pojemności przy niskich częstotliwościach mieściła się w przedziale między ponad 7,5 E-7F a prawie 1,1 E-6F, i spadała wraz ze wzrostem wartości częstotliwości. Jednak w tym przypadku, wartość pojemności nie spadała do zera. Wartość impedancji przy niskich wartościach częstotliwości oscylowała w granicach między 3500 Ω , a około 4400 Ω . Wraz ze wzrostem wartości częstotliwości następuje dynamiczny spadek wartości impedancji do wartości około 300 Ω , po czym następuje stabilizacja jej wartości.

Uzyskane wyniki wskazują, że możliwe jest prowadzenie eksperymentów z użyciem próbek biologicznych, które posiadają opór właściwy sięgający kilku kilo omów. Badania z użyciem płytek testowych mogą pomóc w ocenie wpływu poszczególnych metali na organizm żywy. Na poniższych wykresach przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów poszczególnych elektrod.



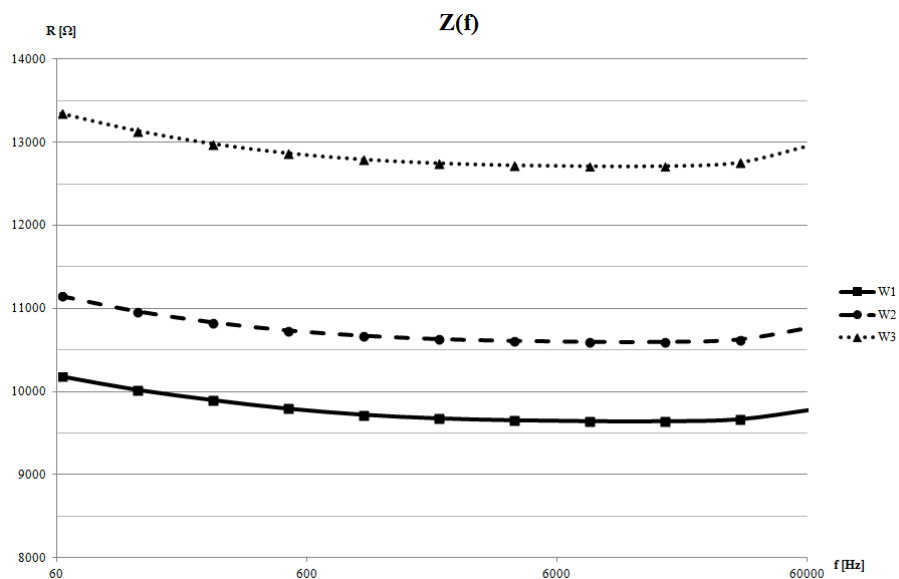
Rys. 1. Charakterystyka rezystancji w funkcji częstotliwości płytek z tytanowymi elektrodami

Źródło: Opracowanie własne



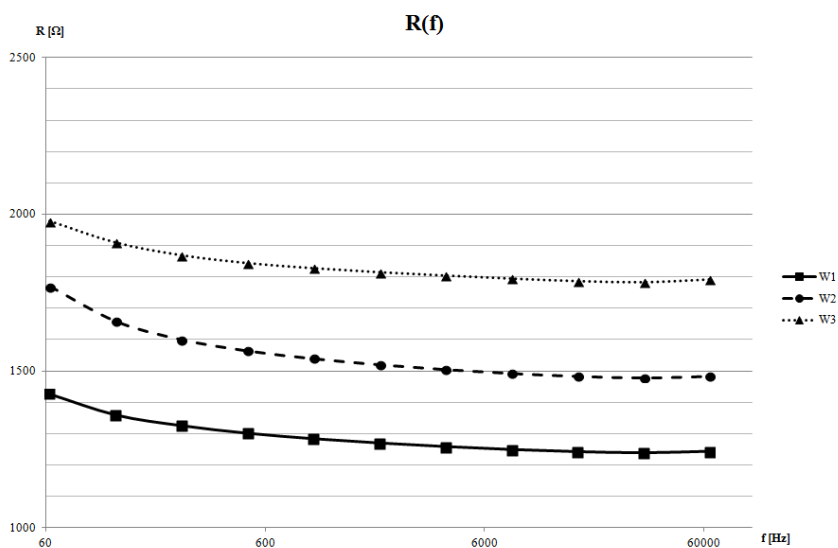
Rys. 2. Charakterystyka pojemności w funkcji częstotliwości płytek z tytanowymi elektrodami

Źródło: Opracowanie własne



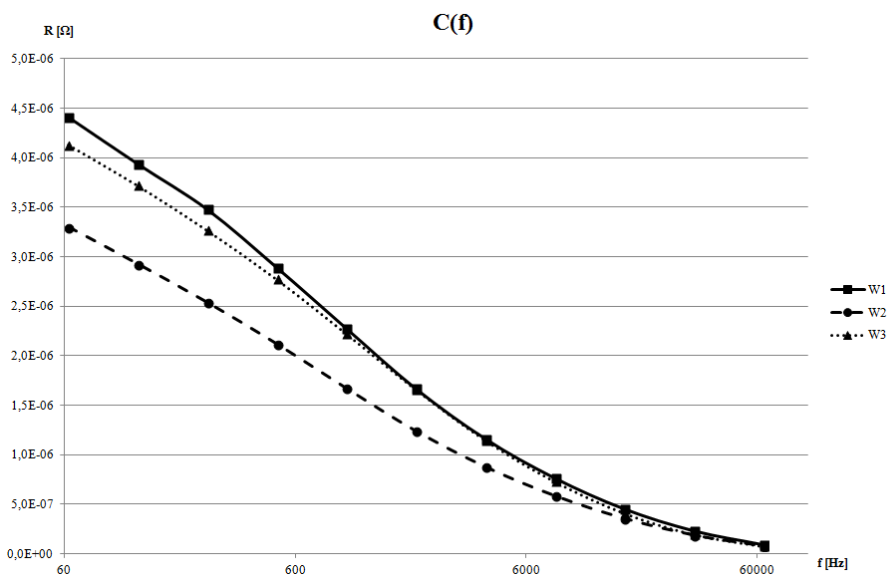
Rys. 3 Charakterystyka impedancji w funkcji częstotliwości płytek z tytanowymi elektrodami

Źródło: Opracowanie własne

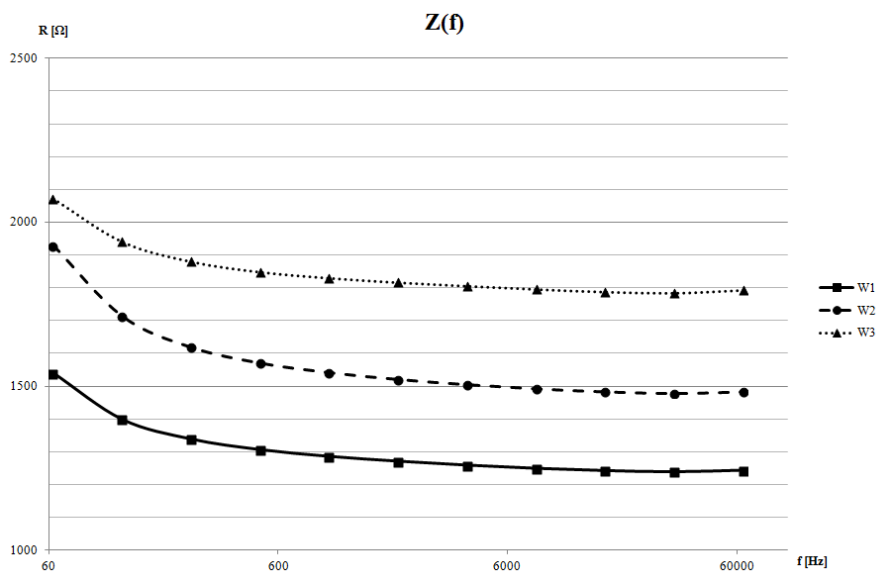


Rys. 4. Charakterystyka rezystancji w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z chromonikieliny

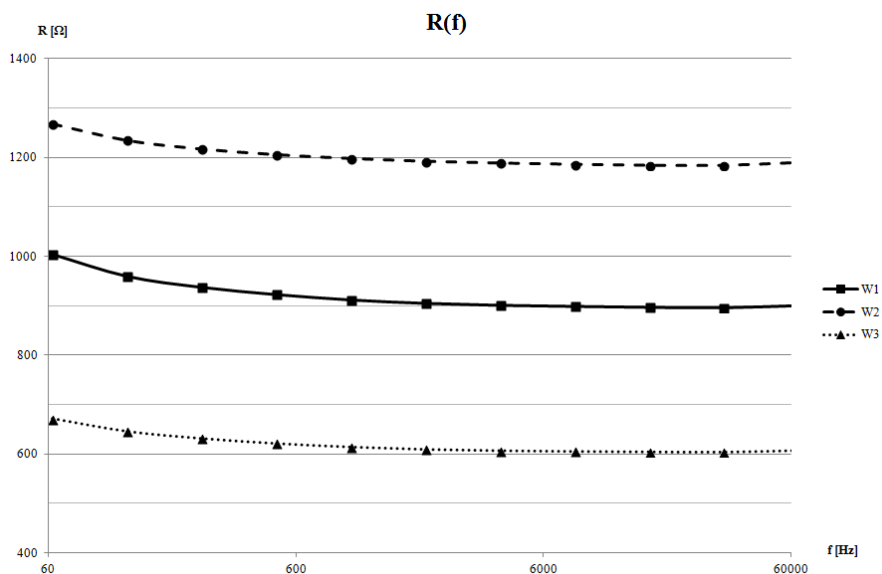
Źródło: Opracowanie własne



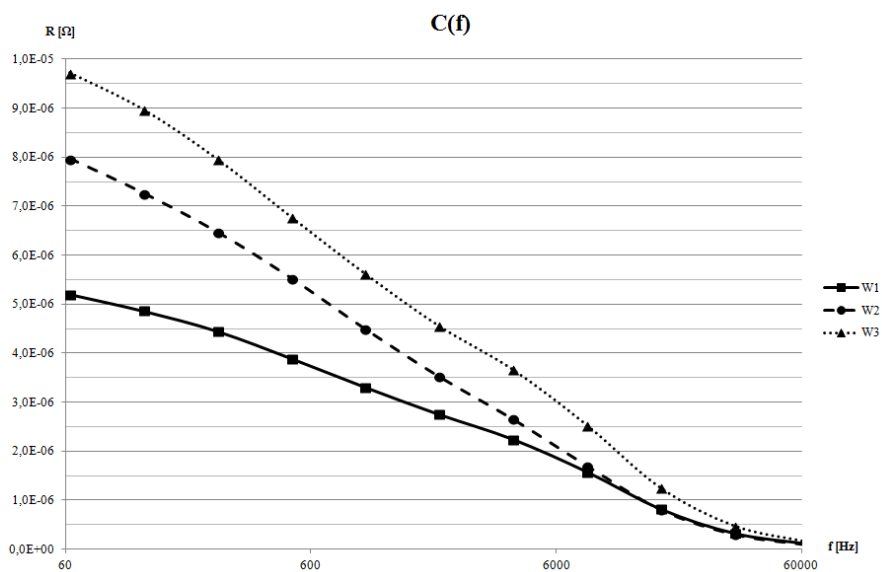
Rys. 5. Charakterystyka pojemności w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z chromonikieliny
Źródło: Opracowanie własne



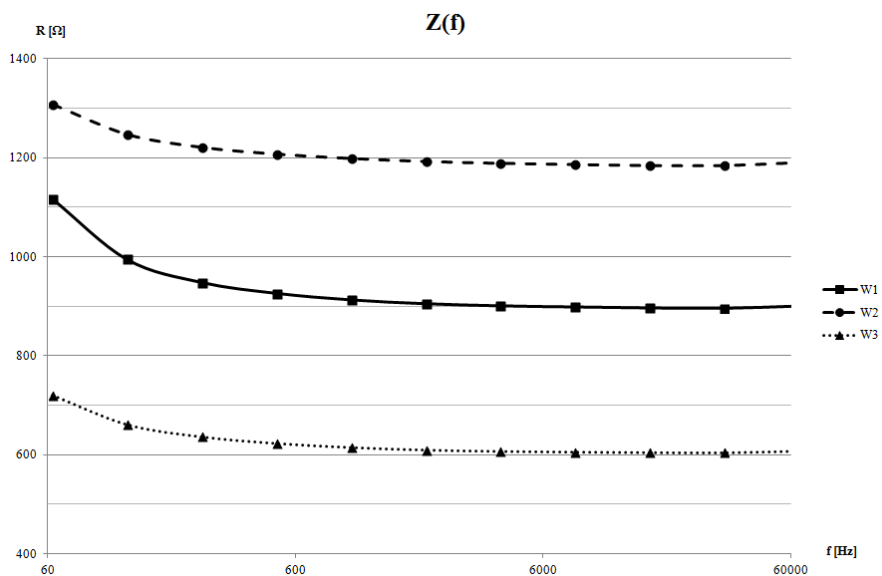
Rys. 6. Charakterystyka impedancji w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z chromonikieliny
Źródło: Opracowanie własne



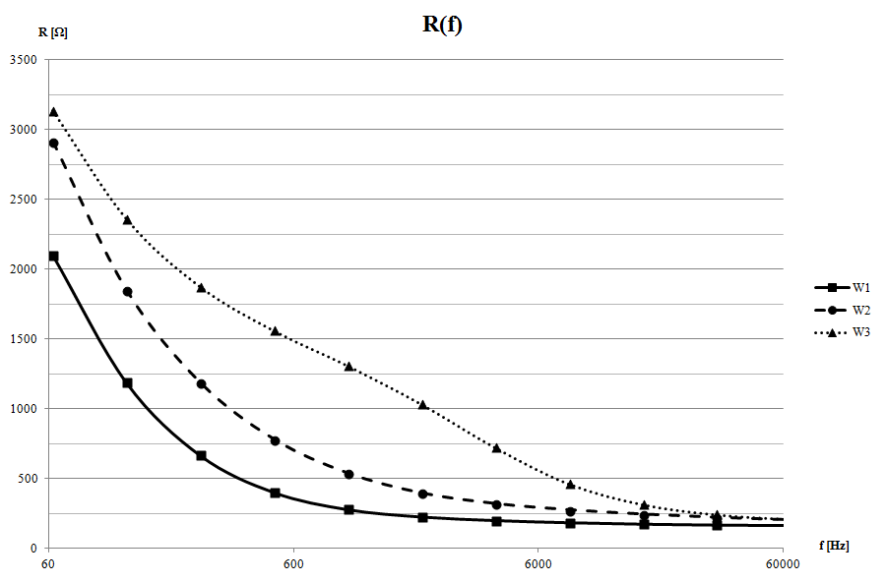
Rys. 7. Charakterystyka rezystancji w funkcji częstotliwości płytek z nikłowymi elektrodami
 Źródło: Opracowanie własne



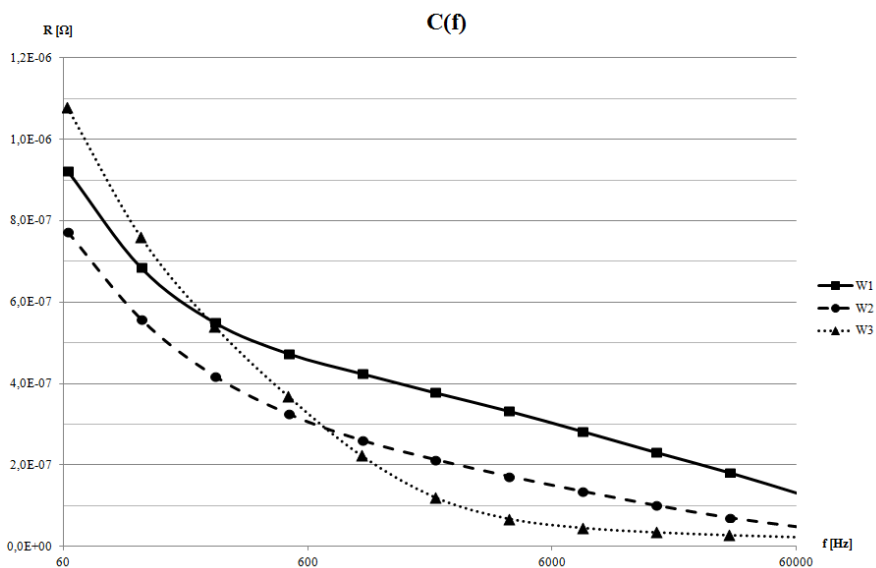
Rys. 8. Charakterystyka pojemności w funkcji częstotliwości płytek z nikłowymi elektrodami
 Źródło: Opracowanie własne



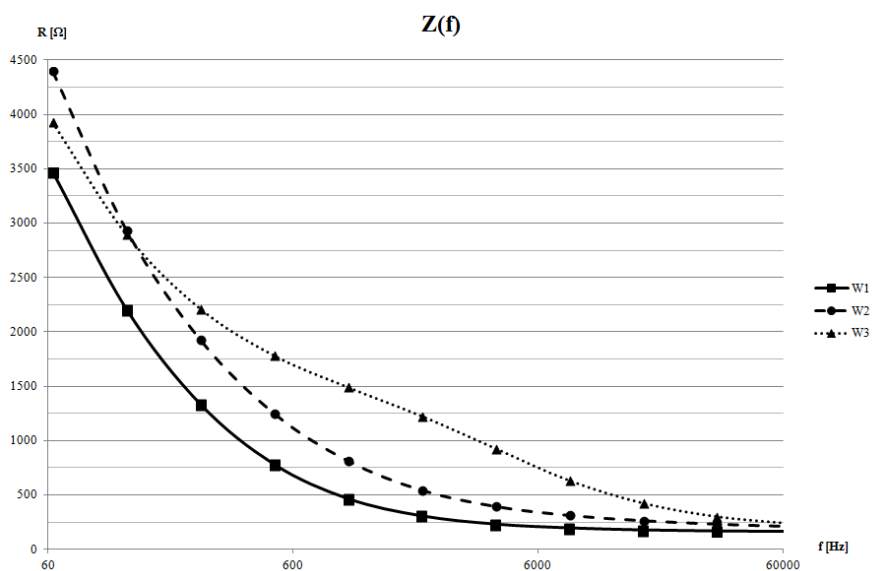
Rys. 9. Charakterystyka impedancji w funkcji częstotliwości płytek z nikłowymi elektrodami
 Źródło: Opracowanie własne



Rys. 10. Charakterystyka rezystancji w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z miedzi
 Źródło: Opracowanie własne



Rys. 11. Charakterystyka pojemności w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z miedzi
 Źródło: Opracowanie własne



Rys. 12. Charakterystyka impedancji w funkcji częstotliwości płytek z elektrodami z miedzi
 Źródło: Opracowanie własne

Następnym etapem prac było przeprowadzenie hodowli komórek i wykonanie pomiaru impedancji z użyciem opisanych matryc pomiarowych. Sprawdzone w ten sposób, czy płytki testowe nie wpłyną negatywnie na badane komórki i pozwolą na przeprowadzenie eksperymentu. W doświadczeniu użyto komórki mysiej linii komórkowej fibroblastów, - klon NCTC 929 [komórka L, L-929, pochodna szczepu L] (ATCC® CCL-1™) pochodzące z ATCC hodowano zgodnie z instrukcją w kompletnym Eagle MEM pożywka (Sigma Aldrich) uzupełniona 10% FBS Good HI, w inkubatorze Galaxy 170R, w kontrolowanych warunkach wzrostu, stała wilgotność i nasycenie powietrzem 5% CO₂. Po (ok. 7–14 dniach) hodowla osiągnęła co najmniej 75% konfluencji. Następnie komórki hodowano na testowanych płytkach pomiarowych z elektrodami wykonanymi w metalizacji tytanu, chromonikieliny, niklu i miedzi. Inokulację macierzy przeprowadzono przez 300 mikrolitrów na studzienkę zawiesiny komórek (L929) przy $\sim 1,2 \times 10^5$ komórek / ml. Każdy typ komórki ma charakterystyczną krzywą adhezji i wzrostu, którą można manipulować np. zmienna gęstość wysiewu lub inne bodźce, takie jak stężenie substancji w podłożu [10].

Na wszystkich użytych płytkach pomiarowych doszło do namnożenia się badanych komórek. Użyte warstwy metalizacji nie uśmierciły badanej linii komórkowej, co pozwoli na przeprowadzenie w przyszłości szczegółowych badań nad wpływem danego materiału na organizmy żywe. Podczas pomiaru impedancji zauważono, że wzrost wartości częstotliwości płynącego prądu powoduje spadek wartości mierzonej rezystancji.

Największą wartością rezystancji charakteryzują się elektrody wykonane w metalizacji tytanu. Struktury wykonane z niklu posiadają natomiast najniższą wartość rezystancji. Najbardziej widoczny wpływ częstotliwości na zmianę wartości rezystancji zauważyć można przy zastosowaniu płytek z elektrodami wykonanymi z miedzi. Zastosowanie chromonikieliny do wytworzenia z niej struktur grzebieniowych spowodowało otrzymanie charakterystyk najbardziej zbliżonych do tych otrzymanych za pomocą komercyjnych matryc systemu ECIS. Otrzymane wyniki dobrze rokują co do prowadzenia dalszych badań z użyciem wytworzonych struktur pomiarowych do analizy wpływu poszczególnych metali na organizmy żywe.

5. Wnioski

W niniejszej pracy opisane zostało urządzenie służące do pomiaru impedancji komórek hodowlanych w czasie rzeczywistym. Za jego pomocą można przeprowadzić badania określające czy możliwym jest wykorzystanie danego materiału do wykonywania z niego urządzeń typu Lab on a Chip. Na zakres prac składało się wybranie najlepszej metody do monitorowania zachowań komórkowych. Następnie opracowano technologię wytwarzania narzędzi do

przeprowadzania badań. W tym celu zaprojektowano maski technologiczne płytek testowych, które zostały wykonane w kolejnym etapie. Do ich stworzenia wykorzystano procesy rozpylania magnetronowego, fotolitografii oraz trawienia. Po wykonaniu, gotowe płytki scharakteryzowano w celu sprawdzenia wartości ich rezystancji. Dało to odpowiedź czy możliwe jest ich użycie podczas eksperymentu z komórkami, posiadającymi pewną wartość swojego oporu właściwego. Tak przygotowane i sprawdzone płytki posłużyły do przeprowadzenia wstępnej hodowli komórek, dzięki kompatybilności z instrumentami systemu ECIS. Pierwsze próby pokazały, że możliwe jest ich użycie i otrzymanie powtarzalnych wyników. Analizując otrzymane dane można stwierdzić, że możliwe jest prowadzenie badań oceniających wpływ poszczególnych metalizacji na materiał biologiczny z użyciem wykonanych płytek pomiarowych. Wykonane przyrządy posłużyć mogą do prowadzenia szczegółowych badań nad zachowaniem się komórek w środowisku, w którym występuje dany metal. Wytworzone płytki posłużą do rozszerzenia możliwości prowadzenia badań z wykorzystaniem systemu ECIS, o analizę wpływu poszczególnych metali na badane komórki.

Literatura

- [1] Applied BioPhysics, Product Guide, Corporate Headquarters: 185 Jordan Road Troy, NY 12180 1–866–301–ECIS (3247).
- [2] Napieralska M., Jabłoński G., *Research and Training Action for System on Chip Design*, Podstawy Mikroelektroniki, Łódź, 2002.
- [3] Kociubiński A., Zarzeczny D., Szypulski M., *Kondensatory grzebieniowe z miedzi do monitorowania funkcji życiowych komórek hodowlanych*, Przegląd Elektrotechniczny 9, 59–61, 2018.
- [4] Zarzeczny D., Szypulski M., Lizak T., Muzyka K., Kociubiński A., Prendecka M., Małecka-Massalska T., *Design and technology of titanium comb capacitor*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments 10808, 2018.
- [5] Kociubiński A., Szypulski M., Zarzeczny D., Lizak T., Muzyka K., Prendecka M., Małecka-Massalska T., *Design and technology of copper comb capacitors*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 10808, 2018.
- [6] Geddes L. A., Roeder R., *Criteria for the Selection of Materials for Implanted Electrodes*, Annals of Biomedical Engineering 31, 879–890, 2003.
- [7] Stensaas S.S., Stensaas L. J., *Histopathological Evaluation of Materials Implanted in the Cerebral Cortex*, Acta neuropathologica. 41, 145–155, 1978.
- [8] Ullman D.G., *The Mechanical Design Process*, McGraw–Hill Education, 1992.

[9] Scholten K., Meng E., *Materials for Microfabricated Implantable Devices: A Review*, Lab on a Chip 15, University of Nebraska, 2015.

[10] Predecka M. R., Małecka-Massalska T., *Effect of exopolysaccharide from Ganoderma applanatum on the electrical properties of mouse fibroblast cells line L929 culture using an electric cel-substrate impedance sensing (ECIS)*, Annals of Agricultural and Environmental Medicine 23, 293–297, 2016.

*Magdalena Michalska

SIAscopy w badaniach skóry

Streszczenie: Celem rozdziału jest przedstawienie podstaw powstawania obrazu, diagnostyki łagodnych i złośliwych zmian skórnych za pomocą narzędzia SIAscopy. Jest to nieinwazyjna metoda do analizy pigmentacji skóry melaninę, ukrwienia skóry i jej struktury kolagenowej.

Słowa kluczowe: SIAscopy, spektrofotometr, zmiany skórne, nowotwory skóry

SIAscopy in skin tests

Abstract: The purpose of this chapter is to present the basics of image formation, diagnosis of benign and malignant skin lesions using the SIAscopy tool. It is a non-invasive method for analyzing skin pigmentation with melanin, blood circulation and skin collagen structure.

Keywords: SIAscopy, spectrophotometer, skin lesions, skin cancers

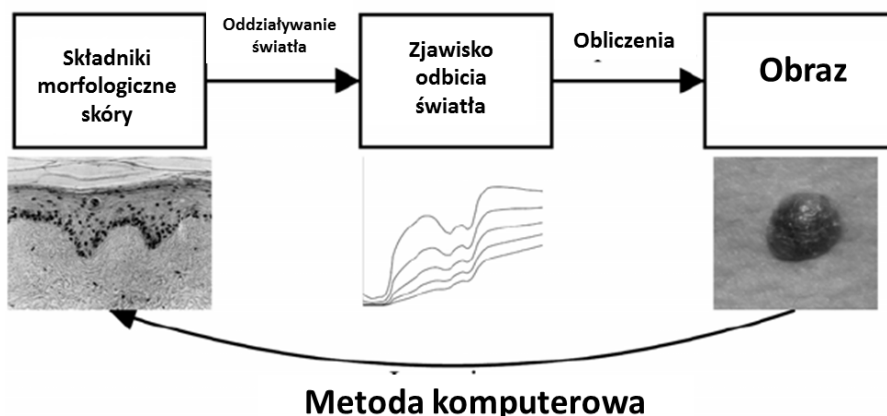
1. Wstęp

SIAscopy (ang. Spectrophotometric Intracutaneous Analysis) jest nową metodą optycznego obrazowania skóry stworzoną przez firmę Aston Clinica w Wielkiej Brytanii. W narzędziu zrekonstruowane komputerowo obrazy ujawniają szereg informacji o badanej skórze. Należy do nich stężenie melaniny w naskórku, stężenie krwi, grubość skóry właściwej czy obecność skórnej melaniny. Ze względu na jego zdolność do unikalnego wglądu w strukturę skóry SIAscopy staje się preferowanym narzędziem do diagnozowania pigmentowanych zmian skórnych i wykrywania wczesnego stadium czerniaka skóry [1–2]. SIAscopy mierzy warstwy skóry i ilość hemoglobiny, melaniny i kolagenu w warstwie rogowej naskórka i skóry właściwej do głębokości 2 mm. Określa, czy melanina jest obecna w naskórku czy w skórze właściwej. Skany pokazują, jak te składniki zmieniają się na skórze i zapewniają wczesny system ostrzegania o wykryciu zmian w ilości melaniny skórnej. Obrazy skóry SIAscope mają wysoką rozdzielczość. Technika wykonywania wspomnianych obrazów jest nieinwazyjna. Bez użycia skalpela możliwa staje się biopsja skóry do głębokości 2,00 mm i analiza pigmentu melaniny, ukrwienia i struktury kolagenowej skóry.

*magdalena.michalska@pollub.edu.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

2. Podstawy obrazowania

Kluczową podstawą SIAscropy jest model zabarwienia skóry, zestaw relacji między parametrami charakteryzującymi skórę a jej kolorami. Model jest konstruowany na podstawie obliczeń widm i parametrów określających strukturę i właściwości optyczne skóry [3]. Rysunek 1 pokazuje schemat procesu tworzenia obrazu. Składniki obecne w skórze powodują różnice w widmie światła odbitego w wyniku oddziaływania promieni świetlnych z tkanką. Widmo jest specyficzne dla konkretnego składu skóry. Promienie świetlne są rejestrowane przez kamerę i zapisywane jako obraz cyfrowy. Obraz cyfrowy składa się zwykle z trzech (czerwonych, zielonych i niebieskich) lub większej ilości barw pasm widmowych. SIAGraphs są uzyskiwane za pomocą metody obliczeniowej, która pobiera obraz cyfrowy jako dane wejściowe i z nich oblicza ilości składników obecnych w tkance skórnej. Obrazy końcowe w skali szarości pokazują wielkość parametrów na każdym pikselu oryginalnego obrazu skóry.



Rys. 1 Proces tworzenia obrazu urządzenia SiAscropy

Źródło: Claridge E., Cotton S., Moncrieff M., Hall P., Spectrophotometric Intracutaneous Imaging (SIAscropy): Method and clinical applications, Handbook of Non-Invasive Methods and the Skin (2nd ed), CRC Press, 315–325, 2006

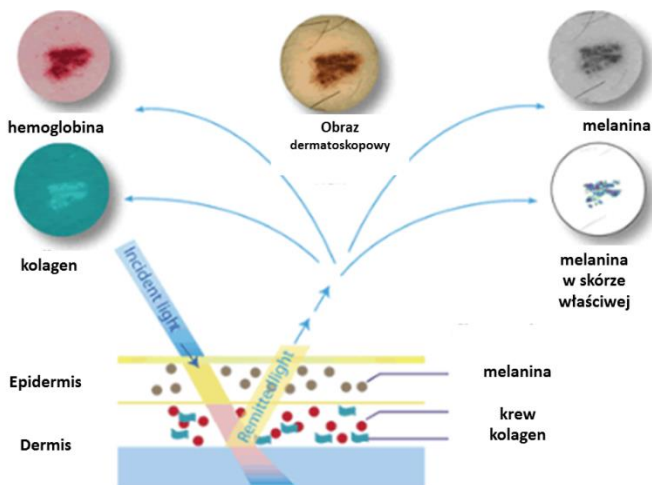
Skóra jest uważana za fizyczny układ zawierający składniki o określonych właściwościach optycznych, a jej kolor można analizować za pomocą zasad fizyki. Zależności pomiędzy charakterystycznymi parametrami wiązki światła padającego a wychodzącego ze skóry są badane przez wielu naukowców. Powstają również modele właściwości optycznych ludzkiej skóry. Wyznaczane są charakterystyki spektralne światła [4–6], będące wynikiem interakcji światła

ze strukturami w skórze, zależą one od właściwości optycznych składników skóry i widma światła padającego na powierzchnię skóry. Biorąc pod uwagę informacje o właściwościach optycznych skóry, barwę światła można przewidzieć na podstawie równań barwę skóry odpowiadającą jej konkretnej strukturze. Podejście to zastosowano w [7,8].

Następnie obliczenia są konwertowane na skalę RGB. Powstały model jest używany do wnioskowania o parametrach, które prowadzą do otrzymania określonej barwy. Kolory zmiany skórnej jest ważnym wskaźnikiem diagnostycznym. Widoczne są one na powierzchni skóry, odzwierciedlają wiele jej aspektów wewnętrznej struktury i kompozycji. Zaczerwienienie skóry, rumień, wskazuje na zwiększoną ilość krwi skórnej.

W SIAscopy ze skalibrowanych obrazów zarejestrowanych w barwach światła widzialnego (czerwonej, zielonej, niebieskiej) i bliskiej podczerwieni oprogramowanie komputera rekonstruuje części widma. Powstają wówczas obrazy przedstawiające odpowiednio stężenie naskórkowej melaniny, stężenie krwi w skórze brodawkowej, grubość kolagenu w skórze brodawkowej i obecność skórnej melaniny. Te wielkości są reprezentowane jako mapy parametryczne (SIAGraphs).

Metoda jest całkowicie nieinwazyjna, ponieważ wykorzystuje tylko światło widzialne i bliską podczerwień. Na rysunku 2 przedstawiony został sposób penetracji warstw skóry przez promienie świetlne i przykłady obrazów powstające dzięki oprogramowaniu. Interpretacja tych powstałych 6 obrazów składa się na proces diagnostyki zmian skórnych.



Rys. 2. Propagacja promienia świetlnego przez skórę i powstające charakterystyczne dla badania narzędziem SIAscope obrazy wynikowe

Źródło: <https://www.advancedmoleclinic.com.au/siascope-skin-scan>

Wśród głównych elementów anatomicznych ludzkiej skóry najczęściej wyróżnia się trzy warstwy: naskórek (epidermis), skórę właściwą (dermis) i tkankę podskórną. Warstwy te z powodu różnic budowie anatomicznej różnią się znacznie przebiegiem procesów optycznych w każdej z nich.

Do oddziaływań promieniowania z obiektem należy zliczyć zjawisko absorpcji, odbicia, rozproszenia, załamania i transmisji promieniowania. Każda z wymienionych głównych trzech warstw jest zbudowana z jej własnych warstw, w których to wyróżnić należy zjawiska absorpcji, rozpraszania, załamania i rozpraszania światła. Liczne badania wykazały, iż skóra zawiera różne chromofory, które absorbują światło od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni. Krew jest głównym absorbentem promieniowania ze względu na obecność hemoglobiny. Wśród hemoglobin należy rozróżnić hemoglobinę, oksyhemoglobinę, deoksyhemoglobinę i methemoglobinę. W skórze właściwej znajdują się włókna kolagenowe, elastyna, fibroblasty i komórki krwi [9]. Ostatnią z warstw jest tkanka podskórna, zawierająca warstwę tłuszczową i tkankę mięśniową. Te głębsze warstwy skóry nie biorą znaczącego udziału w procesie odbicia światła w skórze. Jest to spowodowane silnym tłumieniem przez wyższe z warstwy znajdujące się nad nimi [10].

Zainteresowanie opisaniem procesów optycznych zachodzących w skórze pochłonęło wielu naukowców. Jako jeden z głównych elementów budujących tkankę podskórną wyróżnia się komórki tłuszczowe, które z racji jasnej barwy w znacznej mierze odbijają światło. Naskórek również odbija światło. Światło w żywym naskórku jest wchłaniane głównie przez pigment melaniny i rozpraszane dalej [11].

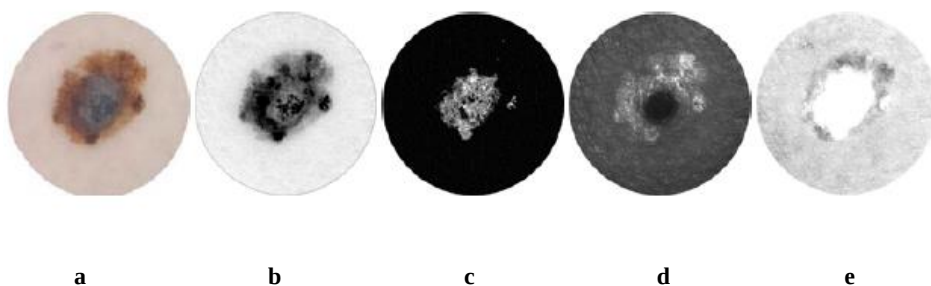
3. Diagnostowanie za pomocą SIAscopy

Diagnostowanie pigmentowanych zmian skórnych w ogólnej praktyce jest trudne. Do rozpoznania jest wiele stadiów i rodzajów zmian skórnych. SIAGraphs sugerują, że badana zmiana skórna ma charakter złośliwy. Występuje wiele istotnych cech np. obecność melaniny skórnej, przemieszczenie krwi z rumieniem, odmienna struktura kolagenu.

Wynikiem przeprowadzonego badania urządzeniem SIAScope jest sześć obrazów, widoczne są one na rysunku 3. Na obrazach obserwuje się cechy, które pozwalają stwierdzić czy dana zmiana jest niebezpieczna. Na rysunku 3A przedstawiony jest kolorowy obraz dermatoskopowej zmiany skórnej, dzięki któremu można zobaczyć prawdziwy kolor skóry i jej zewnętrzną strukturę. Rysunek 3B informuje o ilości melaniny – ciemniejsze regiony pokazują obszary, w których stężenie pigmentu jest wyższe, podczas gdy jaśniejsze regiony wykazują niższe stężenie pigmentu. Niezwykle istotna jest melanina w skórze właściwej, której obecność sugeruje nieprawidłowość, jaśniejsza jej barwa na obrazie sugeruje zwiększenie jej ilości (Rys.3C). Białe obszary

wskazują,

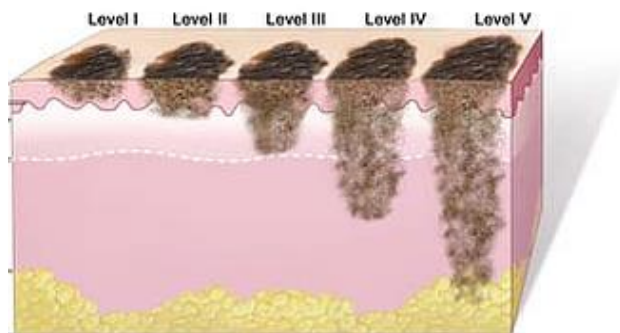
że w warstwie brodawkowatej nie ma melaniny. Zielone, niebieskie, czerwone i czarne obszary wykazują zwiększone stężenie melaniny w warstwie brodawkowatej skóry właściwej. Na rysunku 3D skóra brodawkowata ukazuje, że kolagen był wyparty przez melanocyty i wytwarzaną melaninę. Także obwodowy wzrost wskazuje na zwłóknienie w regionie, gdzie rak rozwija się aktywnie. Zwiększone odkładanie kolagenu ma jasny kolor, podczas gdy zmniejszone obszary kolagenu ukazane są w ciemniejszych kolorach. Nieobecność w środku na obrazie z SIAScopy krwi skórnej sugeruje martwicę, również wzrost na peryferiach sugeruje zapalenie i rozszerzenie naczyń w obszarze aktywnego wzrostu raka (Rys. 3.e).



Rys. 3. a) Kolorowy obraz czerniaka wraz z mapami parametrycznymi pokazującymi: b) całkowitą melaninę; c) melanina skórna w warstwie dermis; d) kolagen; e) krew skórna.

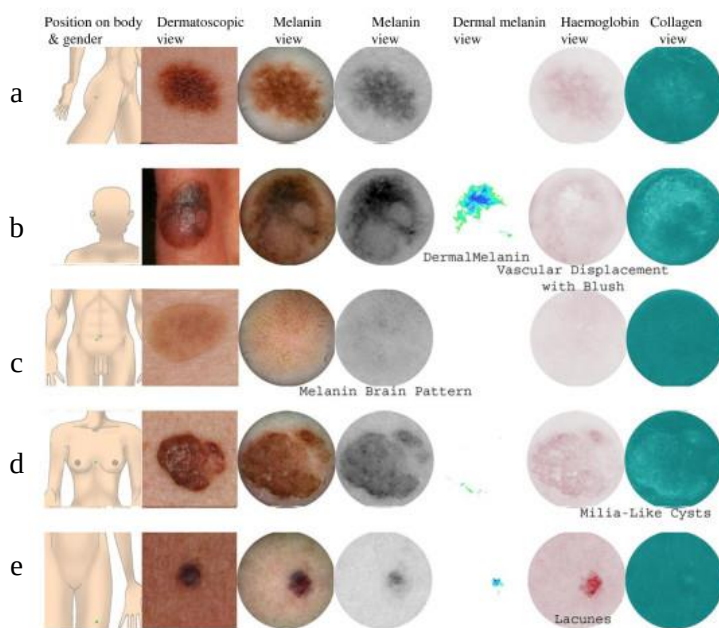
Źródło: Claridge E., Cotton S., Moncrieff M., Hall P., Spectrophotometric Intracutaneous Imaging (SIAScopy): Method and clinical applications, Handbook of non-invasive methods and the skin (2nd ed), CRC Press, 315–325, 2006

Na rysunku 4 przedstawione zostały etapy rozwoju czerniaka skóry i skóra właściwa penetrowana włąb przez komórki melaniny. Im bardziej złośliwe jest znamię skórne tym głębiej melanina wnika włąb skóry właściwej. Za pomocą narzędzia SIAScope diagnozowane są łagodne zmiany, czerniak złośliwy, rogowacenie czy naczylniki. Na rysunku 5 zestawione są obrazy wymieniowych zmian skórnych. Uwzględniają one miejsce na ciele pacjenta i 6 charakterystycznych obrazów wynikowych. Do obrazów wynikowych należy zaliczyć obraz dermatoskopowy, obraz stężenia melaniny w warstwie naskórka i skóry właściwej, obraz stężenia hemoglobiny i obraz stężenia kolagenu w tkance. Im barwa na obrazie całkowitej melaniny jest ciemniejsza tym więcej jej występuje w skórze. Ciemniejsze obszary wykazują wyższe stężenie hemoglobiny w warstwie brodawkowatej skóry właściwej, natomiast jaśniejsze obszary – niższe stężenie.



Rys. 4. Etapy czerniaka skóry i penetracja komórek melaniny w głąd skóry właściwej (dermisu)

Źródło: <https://www.advancedmoleclinic.com.au/siascope-skin-scan>



Rys. 5. Przykłady obrazów otrzymanych z SIAscope z oznakowanymi cechami: a) łagodna zmiana; b) czerniak złośliwy; c) i d) rogowacenie łojotokowe; e) naczyniak

Źródło: Emery J. D., Hunter J., Hall P. N., Watson A. J., Moncrieff M., Walter F. M., Accuracy of siascopy for pigmented skin lesions encountered in primary care: development and validation of a new diagnostic algorithm, BMC Dermatology 10, 1–9, 2010.

3.1. Badania kliniczne z użyciem SIAscope

W [12] wykazano, że SIAscopy zwiększa dokładność diagnostyczną czerniaka w określonych populacjach. Chciano również opracować i zatwierdzić użycie do diagnostyki zmian pigmentowych w podstawowej opiece zdrowotnej narzędzia SIAscopy. Badania przeprowadzono w dwóch kolejnych lokalizacjach w Wielkiej Brytanii i Australii. Opracowano algorytm punktacji podstawowej opieki zdrowotnej i zwalidowano punktację na nowym zestawie danych z australijskiej populacji. Pacjenci, u których wystąpiła zmiana barwnikowa, zostali rekrutowani z 6 placówek w Wielkiej Brytanii i 2 klinik leczenia raka skóry w Australii. Obrazy otrzymane z SIAscopy zostały zinterpretowane przez eksperta i potwierdzone w oparciu o histopatologię. Tabela 1 pokazuje wybrane rodzaje zmian reprezentowanych w zestawach danych w oparciu o histopatologię, jeśli jest znana lub ekspercką diagnozę kliniczną.

Tabela 7. Wybrane zmiany skórne w zestawach danych dotyczących rozwoju i walidacji alogorytmu

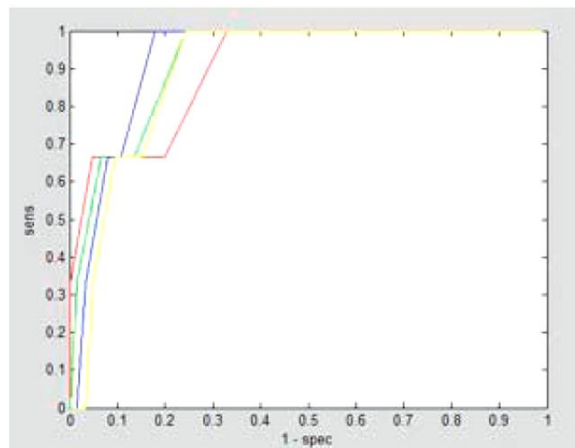
Diagnoza	Stworzona baza	%	baza UK	%	baza Australia	%
Naevus	293	69. 4	159	76. 4%	333	57. 3
Seborrhoeic keratosis	101	23. 9	39	18. 7%	128	22. 0
Solar lentigo	0	0	0	0	67	11. 5
Basal cell carcinoma	0	0	0	0	22	3. 8
Melanoma	3	0.7	2	1. 0%	7	1. 2
Dermatofibro ma	14	3. 3	6	2. 9%	5	0.9
Haemangiom a	11	2. 6%	2	1. 0%	0	0.0
Łącznie	422		208		581	

Źródło:] Emery J. D., Hunter J., Hall P. N., Watson A. J., Moncrieff M., Walter F. M., Accuracy of SIAscopy for pigmented skin lesions encountered in primary care: development and validation of a new diagnostic algorithm, BMC Dermatology 10, 1–9, 2010

Podczas trwania badania zrekrutowano ponad 800 pacjentów z ponad 1200 zmianami chorobowymi. Większość zmian dotyczyła łagodnych zmian lub rogowacenia łojotokowego, ponad 1% stanowiły czerniaki. Oryginalny algorytm diagnostyczny SIAscope nie działał dobrze ze względu na częstsze występowanie rogowacenia łojotokowego. Opracowano algorytm oceny podstawowej opieki zdrowotnej (PCSA), aby to uwzględnić. Dla bazy brytyjskiej otrzymano następujące wyniki: czułość 0.50, specyficzność 0.84, PPV 0.09, NPV 0.98. W próbie australijskiej: czułość 0.44 specyficzność 0.95, PPV 0.52, NPV 0.95. W analizie zmian chorobowych, dla których dostępna była diagnoza histologiczna PCSA miał znacznie większy obszar pod krzywą niż 7-punktowa lista kontrolna do diagnozowania czerniaka. Na rysunku 6 przedstawione zostały krzywe ROC diagnozy czerniaka po usunięciu sklasyfikowanych zmian przez SIAscope jako naczynek krwionośny lub rogowacenie łojotokowe. Stworzone systemy diagnostyki zostały oznaczone różnymi kolorami:

- czerwony = System punktacji Moncrieffa (MSS);
- zielony = MSS + 1 punkt dla naczyń krwionośnych;
- niebieski = MSS + 2 punkty dla naczyń krwionośnych;
- żółty = MSS + 3 punkty dla naczyń krwionośnych.

Określony obszar pod krzywą wynosił kolejno dla każdego z kolorów: czerwony = 0,892; zielony = 0,912; niebieski = 0,916; żółty = 0,887.



Rys. 6. Krzywe ROC przedstawiające rozwój punktacji podstawowej opieki zdrowotnej

Źródło: Emery J. D., Hunter J., Hall P. N., Watson A. J., Moncrieff M., Walter F. M., Accuracy of SIAscopy for pigmented skin lesions encountered in primary care: development and validation of a new diagnostic algorithm, BMC Dermatology 10, 1–9, 2010.

Badania nad wykorzystaniem algorytmu oparego na SIAscopy zostały również opisane w [13–15]. Częstość występowania czerniaka złośliwego w Wielkiej Brytanii rośnie. Zwiększona świadomość o czerniaku doprowadziła do wzrostu liczby pacjentów z przebarwieniami przychodzących do lekarza pierwszego kontaktu i dermatologów. Czułość i specyficzność lekarza rodzinnego w diagnozowaniu czerniaka pozostaje niska [14]. Przeprowadzono badanie mające na celu ustalenie skuteczności SIAscopy u pacjentów poddawanych selekcji, skierowanych przez lekarzy ogólnych z podejrzeniem czerniaka. Po zatwierdzeniu przez komisję etyczną wszyscy pacjenci uczęszczający do kliniki zmian pigmentowych zostali przebadani za pomocą SIAscopy. Następnie wszystkie podejrzane zmiany zostały wycięte i zbadane. W badaniu wzięło udział ponad 800 pacjentów. SIAscope miał czułość 94,4%, a współczynnik FN 3,7% w przypadku czerniaka złośliwego. SIAscope może być przydatny w zmniejszaniu liczby łagodnych zmian przy jednoczesnym wykrywaniu większości czerniaków.

System MoleMate to ręczny skaner SIAscopy zintegrowany z algorytmem diagnostycznym podstawowej opieki zdrowotnej, mającym na celu poprawę diagnozowania zmian pigmentacyjnych skóry w podstawowej opiece zdrowotnej. W [15] przedstawiona została ocena ekonomiczna oparta na modelu decyzyjnym na badaniach systemu MoleMate w celu oszacowania długoterminowych kosztów i korzyści zdrowotnych diagnozy w systemie MoleMate w porównaniu z najlepszymi praktykami w podstawowej opiece zdrowotnej. Model łączy wyniki badań z literatury, aby zapewnić długoterminowe prognozy, użyteczność stanu zdrowia i koszty.

System MoleMate może być opłacalny w porównaniu z samą diagnozą najlepszych praktyk w podstawowej opiece zdrowotnej. Istnieje jednak znaczna niepewność decyzji, wynikająca w szczególności z wrażliwości i swoistości MoleMate w porównaniu z najlepszymi praktykami oraz ryzyka postępu choroby w nierozpoznanym nowotworze skóry. Przyszłe badania powinny koncentrować się na zmniejszaniu niepewności tych parametrów.

4. Wnioski

Metoda obrazowania w obecnej formie jest zasadniczo dwuwymiarowa, ale obrazy pokazują rozkład powierzchni i wielkości poszczególnych składników tkanki skórnej. To różni SIAscopy od metod tomograficznych (np. OCT i mikroskopia konfokalna), które są w stanie pokazać trójwymiarową strukturę skóry. Rozdzielczość SIAscopy jest ograniczona zarówno przez absorpcję, jak i rozproszenie promieniowania w tkance skóry.

Jednak obrazy dostarczają wiele informacji o rozkładzie parametrów i właściwości tkanek. Wykrywanie obecności melaniny skórnej *in vivo* jest jedną z unikalnych cech SIAscopy, która może wykrywać penetrację melaniny

na głębokościach mniejszych niż 30 μm od połączenia skóry właściwej z naskórkiem. Jednak dokładność pomiaru zmniejsza się wraz ze wzrostem głębokości i wzrostem stężenia melaniny. Chociaż jest to ograniczenie nie wpływa to negatywnie na zdolność metody do wykrywania bardzo cienkich, wczesnych czerniaków skóry.

Literatura

[1] Govindan K, Smith J, Knowles L, Harvey A, Townsend P, Kenealy J., *Assessment of nurse-led screening of pigmented lesions using SIAscope*, J Plast Reconstr Aesthet Surg. 60(6), 639–645, 2007.

[2] Hunter J. E., *Triaging suspicious pigmented skin lesions in primary care using the SIAscope*, MD Thesis, University of Cambridge, 2008.

[3] Claridge E., Cotton S., Moncrieff M., Hall P., *Spectrophotometric Intracutaneous Imaging (SIAscopy): Method and clinical applications, Handbook of Non-Invasive Methods and the Skin (2nd ed)*, CRC Press, 315–325, 2006.

[4] Reif R., Amoroso M. S., Calabro K.W., A’Amar O., Singh S.K., Irving J. Bigio, *Analysis of changes in reflectance measurements on biological tissues subjected to different probe pressures*, J. of Biomedical Optics 13(1), 010502, 2008.

[5] Gajinovic Z., Mati M., Prčić S., Đuran V., *Optical properties of the human skin*, Serbian Journal of Dermatology and Venereology 2 (4), 131–136, 2010.

[6] Prince S., Malarvizhi S., *Spectroscopic diffuse reflectance plots for different skin conditions*, Spectroscopy 24, 467–481, 2010.

[7] Angelopoulou E., Molana R., Danilidis K., *Multispectral skin colour modelling*, IEEE Conference On Computer Vision and Pattern Recognition, 635–642, 2001.

[8] Shimada M., Masuda Y., Yamada M. Y., *Explanation of human skin color by multiple linear regression analysis based on the Modified Lambert-Beer law*, Opt. Rev. 7, 348–352, 2000.

[9] Lisenko S.A., Kugeiko M.M., Firago V.A., Sobchuk A.N., *Analytical model of diffuse reflectance spectrum of skin tissue*, Quantum Electronics 44 (1), 69–75, 2014.

[10] Harrison D.K., *The clinical Application of optical spectroscopy in monitoring tissue oxygen supply following cancer treatment, The Primo Vascular System: Its role in cancer and regeneration*, Springer Science and Business Media, LLC, 291–296, 2012.

[11] Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V.I., Tuchin V. V., *Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm*, Journal of Physics D: Applied Physics 38(15), 2543, 2005.

[12] Emery J. D., Hunter J., Hall P. N., Watson A. J., Moncrieff M., Walter F. M., *Accuracy of siascopy for pigmented skin lesions encountered in primary care: development and validation of a new diagnostic algorithm*, BMC Dermatology 10, 1–9, 2010.

[13] Cotton S., Morse R., Chellingworth M., *Method and apparatus for measuring collagen thickness*, Patent US2007/0161910 A1, 2009.

[14] Govindan K., Smith J., Knowles L., Harvey A., Townsend P., Kenealy J., *Assessment of nurse-led screening of pigmented lesions using SIAscope*, Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery 60 (6), 639–645, 2007.

[15] Wilson E. C. F., Emery J. D., Kinmonth A. L., Prevost A. T., Morris H. C., Humphrys E., Hall P. N., Burrows N., Bradshaw L., Walls J., Norris P., Johnson M., Walter F. M., *The Cost-Effectiveness of a Novel SIAscopic Diagnostic Aid for the Management of Pigmented Skin Lesions in Primary Care: A Decision-Analytic Model*, Value in Health 16 (2), 356–366, 2013.

Pomiar kąta obrotu przy użyciu światłowodowych struktur TFBG

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę pomiaru kąta obrotu przy użyciu pochylonej światłowodowej struktury periodycznej. Zmiany charakterystyk widmowych wywołane różnymi kątami obrotu zauważalne są tylko dla modów płaszczowych. Zbadano zmiany współczynnika transmisji dla trzech wybranych modów płaszczowych oraz wykazano, że każdy z nich reaguje z różną czułością. Wykazano, że przy użyciu takiego czujnika możliwa jest detekcja zmiany kąta obrotu w zakresie od 0° do 90° .

Słowa kluczowe: pomiar kąta obrotu, czujniki światłowodowe, siatki Bragga, czujniki TFBG

Rotation measurement using TFBG structures

Abstract: The paper presents a method of measuring the rotation angle using an tilted periodic structure. Changes in spectral characteristics caused by different rotation angles are only noticeable for cladding modes. Changes in the transmission coefficient for three selected cladding modes were measured and it was shown that each of them reacts with different sensitivity. It has been shown that using such a sensor it is possible to detect a change in the angle of rotation in the range of 0° to 90° .

Keywords: rotation measurement, optical fiber sensors, fiber Bragg gratings, TFBG sensors

1. Wstęp

Właściwości światłowodowych czujników oraz światłowodowych systemów pomiarowych w dużej części wynikają z właściwości włókna światłowodowego. Światłowód jest to medium transmisyjne wykorzystywane nie tylko w teleinformatyce, ale również w metrologii do przesyłania sygnałów pochodzących z czujników optycznych. Jedynym nośnikiem informacji na temat mierzonej wielkości jest światło propagujące w kablu światłowodowym, zatem są one nieczułe na wpływ pola elektromagnetycznego. Ponadto nie występują przeciwwskazania do zastosowania takich czujników w środowiskach łatwopalnych [1]. Dlatego też czujniki takie można zastosować w warunkach przemysłowych, w których zastosowanie tradycyjnych czujników dostarczających informacji za pomocą jednej z wielkości elektrycznych jest niemożliwe.

Światłowodowy czujnik skrętu z powodzeniem mógłby znaleźć zastosowanie przy monitorowaniu różnorodnych konstrukcji inżynierskich. Dodatkową zaletą

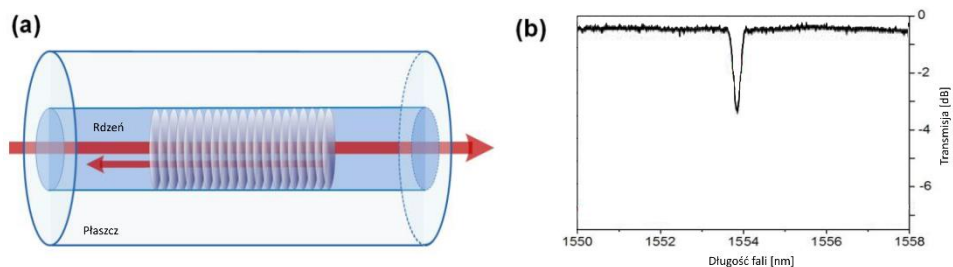
*p.panas@pollub.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

takiego czujnika jest z pewnością jego niewielki rozmiar, stosunkowo łatwe możliwości umieszczenia czujników na konstrukcji oraz możliwość jednoczesnego pomiaru w wielu punktach.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę pomiaru kąta obrotu przy wykorzystaniu pojedynczego włókna światłowodowego z zapisaną w rdzeniu pochyloną strukturą Bragga.

2. Porównanie klasycznych struktur FBG ze strukturami pochylonymi TFBG

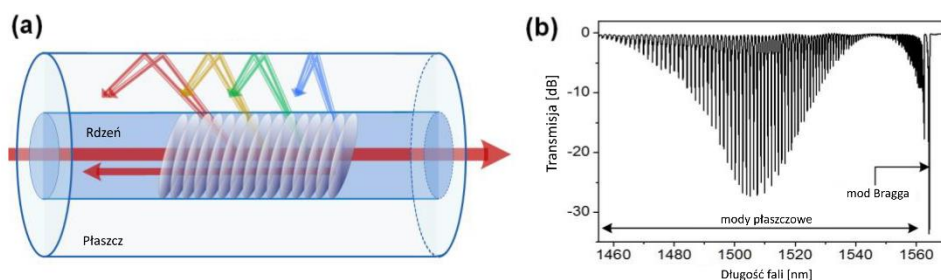
Najczęściej spotykanymi czujnikami światłowodowymi są konwencjonalne siatki Bragga (FBG – ang. *Fiber Bragg Gratings*). Struktura ta jest to najczęściej pewien krótki odcinek włókna światłowodowego, w którego rdzeniu zapisana została periodyczna zmiana współczynnika załamania światła (Rys. 1). Najczęściej stosowaną metodą wytwarzania siatek Bragga jest tzw. metoda maski fazowej. Wykorzystuje ona laser emitujący wiązkę światła ultrafioletowego oraz maskę dyfrakcyjną wykonaną z płytki kwarcowej złożonej ze szczelin o precyzyjnie określonym okresie i głębokości. Rozwój struktur periodycznych rozpoczął się w latach 90. Od tamtego czasu z powodzeniem wykorzystywane są do pomiarów wielu wielkości fizycznych jak np. temperatura [2], ciśnienie [3], naprężenie [4]. Czułość na zmiany tych wielkości jest zależna od rozszerzalności cieplnej materiału i współczynnika termo-optycznego, który opisuje zmiany współczynnika załamania szkła w zmiennej temperaturze, a także od zmian geometrycznych takiej struktury (np. przy rozciąganiu). Siatki Bragga mają zdolność odbijania światła o konkretnie określonych długościach fal przy równoległym przepuszczaniu prawie całego światła o innych długościach fal. Długość fali Bragga można określić na podstawie efektywnego współczynnika załamania światła oraz okresu struktury [5, 6].



Rys. 1. Schemat światłowodowej siatki Bragga (a), przykładowa charakterystyka widmowa prezentowanej struktury (b)

Źródło: Guo T., González-Vila Á., Loyez M., Caucheteur C., Plasmonic optical fiber-grating Immunosensing: A review, *Sensors*, 17(12), 2732, 2017.

W ostatnich latach większym zainteresowaniem cieszą się bardziej zmodyfikowane siatki Bragga. Przykładem są światłowodowe struktury periodyczne o pochylonej modulacji współczynnika załamania światła. Ukośne struktury posiadają wszystkie zalety technologii klasycznych FBG takie jak np. łatwość wytwarzania i niewielkie rozmiary. TFBG (ang. *Tilted Fiber Bragg Gratings*) to charakterystyczny rodzaj struktur, w którym w odróżnieniu od klasycznych siatek Bragga, płaszczyzny o wyższym współczynniku załamania światła nie są skierowane prostopadłe do osi włókna światłowodowego, lecz są nachylone do osi pod pewnym kątem, oznaczanym najczęściej symbolem θ [7]. Rysunek 2 przedstawia schemat światłowodowej siatki TFBG.



Rys. 2. Schemat światłowodowej struktury periodycznej o pochylonej modulacji współczynnika załamania światła (a), przykładowa charakterystyka widmowa struktury TFBG (b)

Źródło: Guo T., González-Vila Á., Loyez M., Caucheteur C., Plasmonic optical fiber-grating Immunosensing: A review, *Sensors*, 17(12), 2732, 2017.

Charakterystyka widmowa takiej struktury znacznie różni się od charakterystyki klasycznej siatki FBG. Oprócz modu głównego (Bragga) obserwowalny jest również szereg modów płaszczowych widocznych w stosunkowo wąskim zakresie spektralnym. Intensywność modu Bragga oraz pozostałych modów w dużym stopniu zależne jest od kąta nachylenia θ [8].

Mody płaszczowe propagują na granicy płaszcza i środowiska otaczającego światłowód przez co są wrażliwe na zmiany współczynnika załamania otoczenia. Dzięki temu mogą być wykorzystywane jako przetworniki do mierzenia takich wielkości jak np. współczynnik załamania światła [9] lub poziom cieczy [10]. Skośne siatki Bragga mogą być również z łatwością wykorzystywane jako czujniki w układach interrogacyjnych, w których filtrem przesłuchującym może być np. klasyczna siatka FBG [11]. Ponadto, mody płaszczowe są tłumione i szybko zanikają, można je obserwować jedynie w widmie transmisyjnym [12]. Siatki TFBG mogą być również pokrywane dodatkowymi warstwami materiałów co wywołuje powierzchniowy rezonans plazmonowy (SPR – ang. *Surface Plasmon Resonance*). Efekt ten dodatkowo

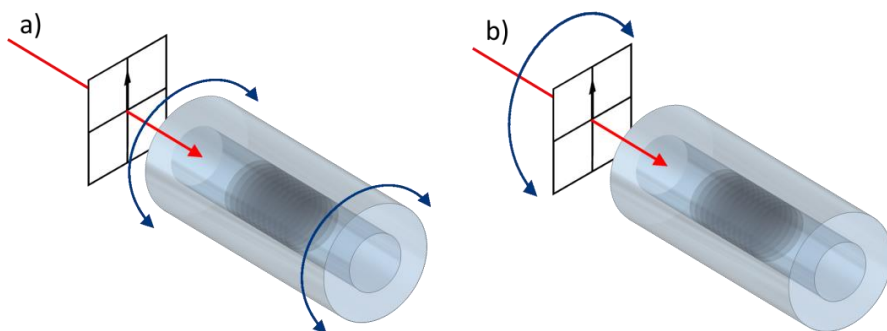
modyfikuje widmo tych siatek pozwalając osiągnąć nieco inne właściwości czujnika [7,13].

Metoda pomiaru kąta obrotu opiera się na właściwościach wpływu polaryzacji wprowadzanego światła SOP (ang. *State Of Polarization*) na charakterystykę widmową modów płaszczowych. Jest to związane z tym, że siatka ukośna pozbawia światłowodów symetrii cylindrycznej [14–15]. W strukturach TFBG zmiany polaryzacji wywołują rozszczepianie niektórych modów płaszczowych widocznych na transmisyjnych charakterystykach widmowych. Rozszczepianie modu jest efektem pochylenia płaszczyzny zmian współczynnika załamania światła w rdzeniu włókna światłowodowego. Spolaryzowane światło wprowadzone do światłowodu w zależności od jego orientacji w stosunku do pochylonych płaszczyzn modulacji powoduje zmiany amplitud rozszczepionych modów [16–17]. Właściwość ta została wykorzystana do pomiarów obrotu.

3. Idea pomiarów kąta obrotu przy użyciu pochylonych struktur TFBG

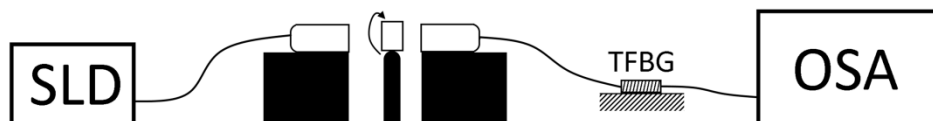
Do przeprowadzenia badań niezbędne było wykonanie przetwornika pomiarowego. Strukturę TFBG wytworzono laserem ekscymerowym emitującym promieniowanie ultrafioletowe o długości fali równej 248 nm na jednomodowym włóknie światłowodowym metodą maski fazowej [8]. Podczas procesu wytwarzania dobrano parametry i ustawiono układ w taki sposób, aby wykonana struktura Bragga była pochylona w stosunku do osi światłowodu pod kątem θ równym 6° .

Zmiana kąta obrotu rozumiana jest jako zmiana parametrów położenia włókna światłowodowego z wytworzoną w jego rdzeniu pochyloną strukturą TFBG lub jako zmiana stanu polaryzacji światła wejściowego. Metodę pomiaru kąta obrotu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat pomiaru kąta obrotu przy użyciu światłowodowej struktury TFBG

Zgodnie z powyższym rysunkiem włókno światłowodowe z siatką TFBG może zostać użyte jako przetwornik kąta obrotu na dwa sposoby. W przypadku a) należy obracać włóknem z zapisanym w rdzeniu przetwornikiem o odpowiedni kąt, przy znanej polaryzacji światła wejściowego. W kolejnym przypadku włókno światłowodowe z wytworzoną strukturą TFBG jest nieruchome, zmienia się jedynie polaryzacja światła wejściowego wywołana obrotem płytki półfalowej umieszczonej w uchwycie obrotowym. Zmiany charakterystyk widmowych wywołane zmianami kąta obrotu w obydwu przypadkach miały ten sam charakter. Przebiegi charakterystyk były bardzo zbliżone dlatego też w niniejszej pracy zaprezentowano wyniki pomiarów kąta obrotu dla przypadku drugiego. Przeprowadzenie badań według tego schematu (zmieniając jedynie kąt obrotu płytki półfalowej) jest znacznie dokładniejsze. Układu pomiarowy został zaprezentowany na rysunku 4.



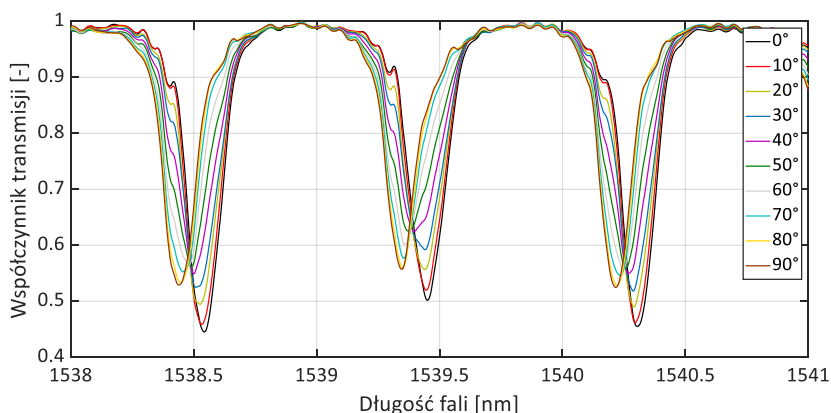
Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

Pierwszym elementem układu jest szerokopasmowe źródło światła SLD (ang. *SuperLuminescent Diode*), czyli dioda superluminescencyjna, której producentem jest firma Thorlabs. Pomiary były wykonywane przy stabilizowanej temperaturze równej 20°C oraz prądzie przepływającym przez SLD wynoszącym 200 mA. Do źródła podłączono światłowód, którego koniec przymocowano do 3-osowego stolika optycznego. Światło wychodzące ze światłowodu było skierowane na obiektyw następnie na płytkę półfalową i za pomocą drugiego obiektywu zostało wprowadzane do kolejnego odcinka światłowodu, w którego rdzeniu na długości 10 mm była zapisana pochyłona siatka Bragga (na tym odcinku światłowód został unieruchomiony). Końcową część włókna połączono z analizatorem widma optycznego (OSA – ang. *Optical Spectrum Analyzer*).

4. Wyniki pomiarów kąta obrotu

W tym rozdziale przedstawiono charakterystyki widmowe włókna światłowodowego z zapisaną w nim strukturą TFBG użytego w charakterze czujnika kąta obrotu. Zmiany kąta obrotu wywoływane były zmianą położenia płytki półfalowej będącej elementem układu pomiarowego. Należy zaznaczyć, że odcinek światłowodu na którym znajdowała się pochyłona siatka Bragga był unieruchomiony.

Badania polegały na obrocie polaryzacji liniowo spolaryzowanego światła na wejściu do badanego światłowodu w stosunku do płaszczyzny pochylenia struktury Bragga. Obrót płytką półfalową następował w zakresie od 0° do 90° co 10 stopni w pierwszym przypadku w prawą stronę, natomiast w drugim w stronę lewą. W obydwu przypadkach przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów ustawiono położenie początkowe w taki sposób, aby współczynnik transmisji osiągał wartość minimalną dla prawych części rozszczepionych modów płaszczowych. Zmiana polaryzacji wejściowej powodowała zmiany widoczne na transmisyjnych charakterystykach widmowych w obrębie modów płaszczowych pochyłonej siatki Bragga. Największe zmiany współczynnika transmisji sygnału optycznego dla zmiennego kąta obrotu widoczne były w zakresie spektralnym od 1535 nm do 1543 nm. Dalszej analizie poddano trzy mody płaszczowe, znajdujące się pośrodku wymienionego zakresu, których charakter zmian widoczny jest na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Charakterystyki transmisyjne struktury TFBG dla zmiennych wartości kąta obrotu, przy obrocie w prawą stronę

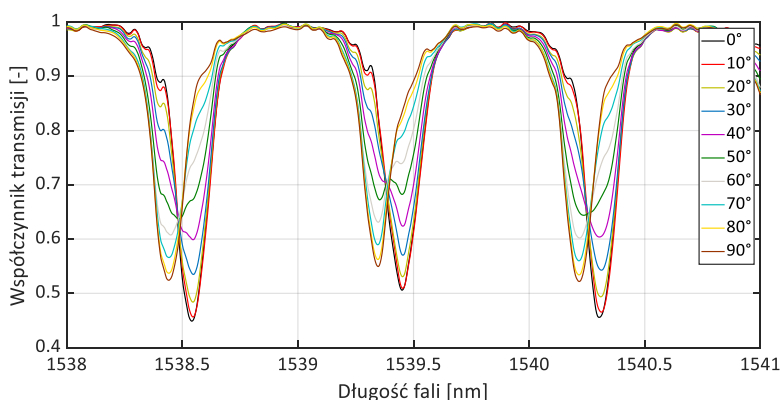
Jak można zaobserwować zmiana kąta obrotu powoduje zmiany wartości współczynnika transmisji modów płaszczowych struktury TFBG. Zasadne jest zatem wykorzystanie pochyłonych siatek Bragga jako pośredniego przetwornika kąta obrotu. W tym celu wybrano trzy długości fal dla których wyznaczono wartości współczynnika transmisji. Dla wszystkich trzech modów wybrano długość fali, dla których współczynnik transmisji osiąga wartość minimalną. Pierwszy mod dla długości fali równej 1538,55 nm dla kąta obrotu równego 0° osiąga wartość minimalną równą 0,45, obrót o 90° w prawą stronę skutkuje wzrostem wartości tego współczynnika do wartości równej 0,84. Pozostałe wartości dla wybranych kątów zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wartości współczynnika transmisji przy zmianie kąta obrotu w trzech wybranych długościach fal (obrót w prawą stronę)

	1538,55 nm	1539,45 nm	1540,3 nm
0°	0,4458	0,5054	0,4558
10°	0,4621	0,5200	0,4632
20°	0,5056	0,5575	0,4982
30°	0,5440	0,5927	0,5318
40°	0,6113	0,6492	0,5888
50°	0,6743	0,7038	0,6455
60°	0,7381	0,7580	0,7022
70°	0,7900	0,7997	0,7494
80°	0,8213	0,8249	0,7826
90°	0,8359	0,8351	0,7994

W tabeli 1 widoczne są niewielkie różnice wartości parametru określającego transmisję sygnału przechodzącego przez strukturę TFBG. Przy kącie obrotu równym 0° transmisja osiągnęła wartość minimalną równą 0,45 dla pierwszego badanego modu o długości fali z zakresu od ok. 1538 nm do 1539 nm. Ponadto dla kąta 90° osiągnięto wartość maksymalną równą 0,84 również dla tego modu. Zatem zgodnie z przedstawionymi wynikami w tabeli dla tego modu płaszczonego zakres zmian współczynnika transmisji jest największy.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi charakterystyk widmowych pochylonej siatki Bragga w zakresie spektralnym od 1538 nm do 1541 nm przy obrocie w lewą stronę.



Rys. 6. Charakterystyki transmisyjne struktury TFBR dla zmiennych wartości kąta obrotu, przy obrocie w lewą stronę

Obserwując przedstawione wyniki można dostrzec, że obrót w lewą stronę w zakresie od 0° do 90° powoduje zmiany charakterystyk widmowych. Zmiany te mają charakter zbliżony do otrzymanych przy obrocie w stronę prawą. Analogicznie jak w poprzednim przypadku wybrano trzy długości fal, dla których wyznaczono wartości współczynnika transmisji sygnału optycznego. Wyniki umieszczono w tabeli 2. Dla pierwszego modu dla kąta równego 0° współczynnik transmisji osiąga wartość równą 0,83 oraz 0,45 przy kącie równym 90° (dla fali o długości równej 1538,55 nm).

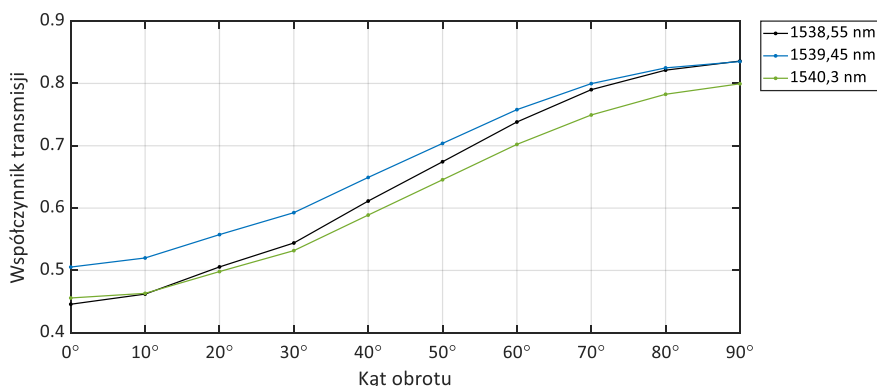
Tabela 2. Porównanie wartości współczynnika transmisji przy zmianie kąta obrotu w trzech wybranych długościach fal (obróć w stronę lewą)

	1538,55 nm	1539,45 nm	1540,3 nm
0°	0,4487	0,5090	0,4558
10°	0,4589	0,5158	0,4717
20°	0,4857	0,5359	0,4970
30°	0,5377	0,5772	0,5473
40°	0,6004	0,6291	0,6040
50°	0,6713	0,6842	0,6675
60°	0,7364	0,7390	0,7221
70°	0,7886	0,7872	0,7682
80°	0,8214	0,8137	0,7906
90°	0,8323	0,8250	0,7969

Analogicznie do poprzedniego przypadku wykonano analizę strat wartości współczynnika transmisji. Również w tym przypadku mod płaszczyowy o długości fali należącej do przedziału 1538–1539 nm, posiada największy zakres zmian transmisji sygnału przechodzącego przez przetwornik.

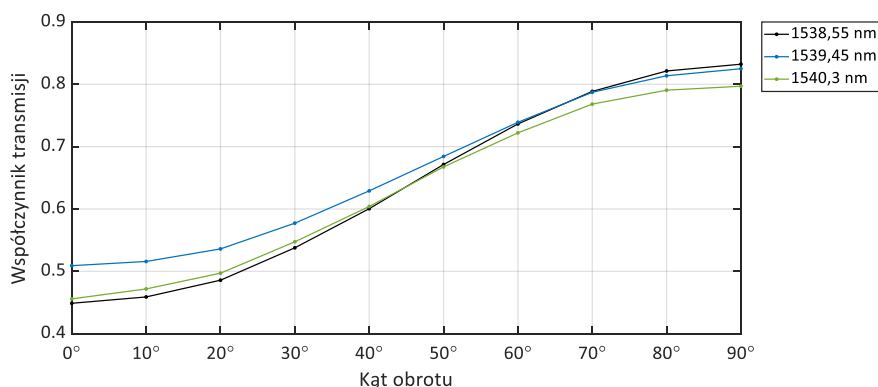
Niewielkie rozbieżności wartości współczynnika transmisji dla kąta równego 0° dostrzegalne przy obrocie w lewą i prawą stronę mogą wynikać z niewielkich rozbieżności ustawienia początkowego.

Po przeanalizowaniu charakterystyk widmowych oraz wartości współczynnika transmisji dla poszczególnych kątów obrotu zmierzonych dla trzech wybranych długości fal zawartych w tabeli 1 wyznaczono charakterystyki przetwarzania struktury TFBG (Rys.7–8).



Rys. 7. Charakterystyka zmian transmisji sygnału optycznego struktury TFBG dla trzech długości fal przy zmiennych wartościach kąta obrotu (obrót w stronę prawą)

Zmiana kąta obrotu płytki półfalowej powoduje zmianę współczynnika transmisji TFBG. Obrót w prawą stronę w zakresie od 0° do 90° wywołuje wzrost transmisji sygnału optycznego dla wybranych długości fal. Największe czułości zostały uzyskane w środkowych częściach charakterystyk, dla kątów od 30° do 70° . Największy zakres zmian transmisji sygnału zanotowano dla fali o długości 1538,55.



Rys. 8. Charakterystyka zmian transmisji sygnału optycznego struktury TFBG dla trzech długości fal przy zmiennych wartościach kąta obrotu (obróć w stronę lewą)

Podobnie jak na poprzedniej charakterystyce (rys. 7) zmiana kąta obrotu wywołuje zmianę współczynnika transmisji pochyłonej siatki Bragga. Obrót w lewą stronę również powoduje wzrost transmisji sygnału dla fal o długościach 1538,55 nm, 1539,45 nm, oraz 1540,3 nm. Największa czułość została uzyskana dla kątów z przedziału od 30° do 70°. Mod płaszczyzny o długości fali z zakresu od 1538 nm do 1539 nm, posiada największy zakres zmian transmisji sygnału, a także największą czułość.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazują możliwość zastosowania struktury periodycznej o pochyłonej modulacji współczynnika załamania światła jako pośredniego przetwornika kąta obrotu. Zarówno obrót w prawą jak i w lewą stronę powodują analogiczne zmiany charakterystyki widmowej struktury.

Przedstawione charakterystyki przetwarzania mają zbliżony charakter. Widoczne są jednak różnice w zakresach zmian współczynnika transmisji dla wybranych kątów obrotu. Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że mod płaszczyzny o długości fali należącej do przedziału od ok. 1538 nm do 1539 nm, posiada najlepsze właściwości pomiarowe (tj. największy zakres zmian współczynnika transmisji oraz kształt charakterystyki przetwarzania zbliżony do liniowego w zakresie od 30° do 70°). Na podstawie przedstawionych wyników wykazano, że największą czułość można uzyskać w środkowej części charakterystyki przetwarzania, tj. dla kątów od 30° do 70°.

Mierząc wartość współczynnika transmisji lub wartość mocy optycznej dla wybranej długości fali, można wyznaczyć kąt obrotu włókna światłowodowego z zapisaną w nim strukturą TFBG w zakresie od 0° do 90°. Ponadto przetwornik

kąta obrotu w postaci struktury TFBG można wykorzystać w układzie interrogacyjnym. Główną zaletą takiego układu byłoby bez wątpienia zastąpienie laboratoryjnego analizatora widma układem przesłuchowym, który bez przeciwwskazań można zaimplementować w warunkach przemysłowych. Kolejną zaletą takiego układu jest fakt obniżenia kosztów całego systemu pomiarowego. Przedstawione badania warto powtarzać przed wykonywaniem wspomnianych układów interrogacyjnych, które przy użyciu filtra przesłuchującego badają zmiany strat transmisji sygnału optycznego najczęściej w obrębie jednego modu. Przeprowadzone badania pozwalają wybrać mod, który charakteryzuje się najlepszymi parametrami pomiarowymi.

Literatura

- [1] Kisała P., *Periodyczne struktury światłowodowe w optoelektronicznych czujnikach do pomiaru wybranych wielkości nielektrycznych*, Lublin, Politechnika Lubelska, 2012.
- [2] Jung J., Nam H., Lee B., Byun J. O., Kim N. S., *Fiber Bragg grating sensor with controllable sensitivity*, App. Opt. 13, 2752–2754, 1993.
- [3] Liu L. H., Zhang H., Zhao Q. D., Liu Y. H., Li F., *Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity*, Opt. Fiber Technol. 13(1), 78–80, 2007.
- [4] Panas P., *Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor system*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108081D, 2018.
- [5] Hill K.O., Meltz G., *Fiber Bragg grating technology fundamentals and overviews*, J. Lightwave Technol. 15, 1263–1276, 1997.
- [6] Malo B., Johnson D. C., Bilodeau F., Albert J., Hill, K. O., *Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations*, Optics Letters 18(15), 1277–1279 1993.
- [7] Guo T., González-Vila Á., Loyez M., Caucheteur C., *Plasmonic optical fiber-grating Immunosensing: A review*, Sensors 17(12), 2732, 2017.
- [8] Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C., *Tilted fiber Bragg grating sensors*, Laser & Photonics Review 7(1), 83–108, 2012.
- [9] Ciężczyk S., Harasim D., Kisała P., *A novel simple TFBG spectrum demodulation method for RI quantification*, IEEE Photonic Tech. L. 29(24), 2264–2267, 2017.
- [10] Mou C., Zhou K., Yan Z., Fu H., Zhang L., *Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating*, Opt. Commun. 305, 271–275, 2013.
- [11] Ciężczyk S., Harasim D., Kisała P., *Novel twist measurement method based on TFBG and fully optical ratiometric interrogation*, Sensor Actuat. A-Phys. 272, 18–22, 2018.

[12] Caucheteur Ch., Paladino D., Pilla P., Cutolo A., Campopiano S., Giordano M., Cusano A., Mégret P., *External Refractive Index Sensitivity of Weakly Tilted Fiber Bragg Gratings With Different Coating Thicknesses*, IEEE Sensors Journal 8(7), 1330–1336, 2008.

[13] Shen C., Zhou W., Albert J., *Polarization-resolved evanescent wave scattering from goldcoated tilted fiber gratings*, Opt. Express 22(5), 5277–5282, 2014.

[14] Caucheteur C., Shevchenko Y., Shao L.Y., Wuilpart M., Albert J., *High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement*, Opt. Express 19(2), 1656–1664, 2011.

[15] Caucheteur C., Guo T., Albert J., *Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: Tutorial and review*, J. Lightwave Technol. 35(16), 3311–3322, 2017.

[16] Bialiyeu A., Ianoul A., Albert J., *Polarization-resolved sensing with tilted fiber Bragg gratings: theory and limits of detection*, J. Opt. 17(8), 085601, 2015.

[17] Caucheteur C., Voisin V., Mégret P., *Light Polarization-Assisted Sensing with Tilted Fiber Bragg Gratings*. Open Optic. J. 7(1), 95–103, 2013.

*mgr inż. Piotr Stępnia

Obliczenia numeryczne światłowodowych siatek Bragga w zastosowaniach

Streszczenie: Rozdział zawiera prezentację, wykorzystującą obliczenia numeryczne, metody wyznaczania zależności pomiędzy fizycznymi, a spektralnymi właściwościami światłowodowych struktur periodycznych. Zawarto w nim także opis, bazujący na tych zależnościach, techniki znajdowania nieznanych parametrów takich struktur, co stanowi problem odwrotny w kontekście wyznaczania charakterystyk widmowych siatek Bragga na drodze obliczeń numerycznych.

Słowa kluczowe: światłowód, siatka, Bragg, obliczenia numeryczne

Numerical calculations of fiber Bragg gratings in applications

Abstract: The chapter contains a presentation of method that determine the relationship between the physical and spectral properties of fiber optic periodic structures, using numerical calculations. It also includes a description of the technique of finding unknown parameters of such structures based on these relationships, which is the reverse problem in the context of determining the spectral characteristics of Bragg gratings by numerical calculations.

Keywords: fiber, grating, Bragg, numerical calculations

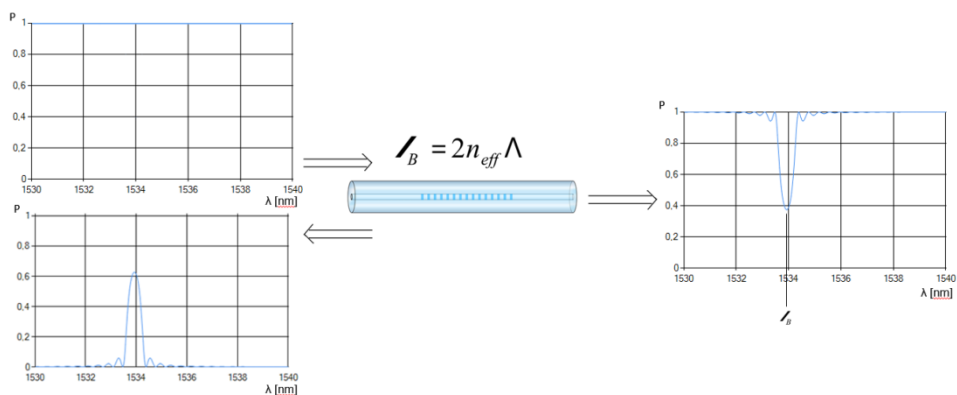
1. Wstęp

Światłowodowe siatki Bragga (ang. Fiber Bragg Gratings – FBG) są periodycznymi strukturami utworzonymi w rdzeniu światłowodu poprzez modyfikację jego współczynnika załamania światła. Charakteryzują się cykliczną zmianą tego parametru o określoną wartość, w poprzecznej płaszczyźnie rdzenia, na pewnej jego długości. Zmiany wartości współczynnika załamania światła na długości struktury następują co stałą odległość zwaną okresem siatki. Podstawowymi, fizycznymi właściwościami FBG są zatem okres, długość, głębokość modulacji współczynnika załamania światła w rdzeniu (czyli wartość, o jaką ten współczynnik zmienia się w pojedynczym okresie siatki) oraz bezwzględna wartość współczynnika załamania światła w rdzeniu (w literaturze określana mianem efektywnego współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu), będąca de facto właściwością samego światłowodu, na którym utworzona została struktura periodyczna. Powyższe cztery właściwości

*stepniak.piotr@pollub.edu.pl, afiliacja: Instytut Elektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

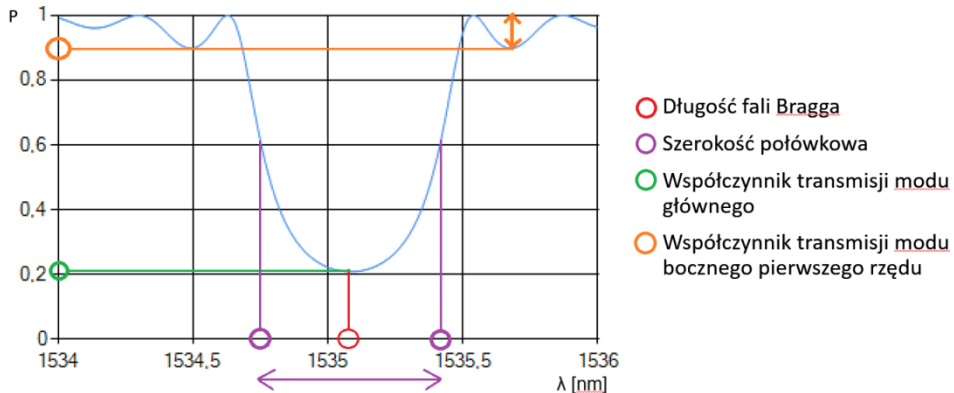
stanowią podstawę do przeprowadzania obliczeń numerycznych oraz umożliwiają porównywanie różnych siatek ze sobą pod względem fizycznym [1].

Siatki Bragga są jednym z rodzajów struktur periodycznych. Obecnie trwają badania także nad innymi ich typami, które także znajdują szerokie zastosowania. Przykładem mogą być struktury z nierównoległą do poprzecznego ich przekroju, płaszczyzną zmian współczynnika załamania światła – tzw. siatki skośne, czy siatki długookresowe, różniące się zasadami propagacji światła [2]. Siatki Bragga natomiast mogą nie mieć równego okresu na ich całej długości i nazywane są wówczas siatkami Bragga o zmiennym okresie lub siatkami z chirpem. Wartość głębokości modulacji współczynnika załamania światła w rdzeniu również może się zmieniać na długości struktury, co ma miejsce w siatkach apodyzowanych, w których funkcję tych zmian na długości FBG nazywa się profilem apodyzacyjnym [3]. Światłowodowe siatki Bragga bez profilu apodyzacyjnego (funkcja stała) i bez zmian okresu na ich długości określa się mianem siatek jednorodnych (ang. uniform). W rzeczywistości większość wytwarzanych siatek, to struktury apodyzowane, co wynika z metodyki ich wytwarzania i charakterystyk źródeł światła ultrafioletowego, używanego w tym procesie [4]. Nie mniej jednak w celu omówienia tematyki obliczeń numerycznych związanych z siatkami Bragga i demonstracji ich zastosowań posłużono się modelami siatek jednorodnych, gdyż ułatwi to czytelnikom zrozumienie zaprezentowanych metod. Metody te mogą być z powodzeniem stosowane także do siatek innych typów, co stanie się oczywiste po zrozumieniu zaprezentowanych w tym rozdziale treści.



Rys. 1. Schemat przedstawiający działanie światłowodowej siatki Bragga – fale zgodne z równaniem Bragga (o długości będącej dwukrotnością iloczynu efektywnego współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu i okresu siatki) są przez strukturę odbijane, pozostałe są przepuszczane

Światłowodowe siatki Bragga posiadają zdolność do odbijania światła o danej długości fali (długości fali Bragga), określonej zgodnie z prawem Bragga. Wszystkie inne długości fali są przepuszczane przez strukturę, co objawia się na charakterystyce transmisyjnej występowaniem pojedynczego pik. W praktyce pik ten nie jest impulsem jednostkowym, gdyż obniżenie energii światła na wyjściu struktury, w stosunku do energii na jej wejściu, następuje dla fal o różnej długości zawartych w pewnym otoczeniu długości fali Bragga, przy czym jest ono tym większe, im bliżej długości fali Bragga znajduje się długość rozpatrywanej fali (Rys. 1). Charakterystyka transmisyjna FBG, a ściślej mówiąc pik odpowiadający przejściu światła przez strukturę ma więc kilka specyficznych właściwości (Rys. 2). Najważniejszymi z nich są: długość fali, dla której występuje minimum na charakterystyce transmisyjnej oraz współczynnik transmisji, liczony dla światła o tej długości fali, jako iloraz mocy wyjściowej (otrzymanej na wyjściu światłowodu) do mocy wejściowej (wprowadzonej do struktury). Istotnym parametrem jest też szerokość połówkowa pik (ang. full width at half maximum – FWHM), liczona jako różnica między długościami fali, dla których spadek współczynnika transmisji, względem maksymalnej wartości współczynnika transmisji, wynosi dokładnie połowę swojej największej wartości. Często pod uwagę brany jest również współczynnik transmisji tzw. wstęg bocznych, które na charakterystyce widmowej są zazwyczaj niepożądane, i w związku z czym istnienie których, może opisywać niechciane jej zaszumienie. Powyższe właściwości nazywane są właściwościami spektralnymi (lub widmowymi) siatek Bragga i są istotne pod względem oceny możliwości ich użycia w konkretnych zastosowaniach.



Rys. 2. Rysunek przedstawiający przykładową charakterystykę transmisyjną, z zaznaczonymi jej właściwościami, będącymi parametrami spektralnymi siatki Bragga

Znajomość właściwości widmowych FBG o znanych parametrach fizycznych jest cenna z uwagi na to, że pozwala ona określić, czy struktura taka będzie spełniała swoje funkcje (np. czy czujnik oparty o siatkę Bragga będzie miał

oczekiwaną rozdzielczość lub zakres pomiaru). Tymczasem zależności takie, za wyjątkiem możliwej do obliczenia długości fali Bragga, są nieznane. Nie można np. określić, jaką wartość współczynnika transmisji będzie miała siatka o określonych właściwościach, dopóki nie zostanie wykonany pomiar na wytworzonej strukturze. Tym większy problem stanowi znalezienie odpowiedniej struktury (np. o jak najmniejszej szerokości połówkowej piksu na charakterystyce transmisyjnej), gdy istnieją ograniczenia co do części parametrów fizycznych siatki (np. do dyspozycji jest światłowód o określonym współczynniku załamania światła w rdzeniu, kilka masek fazowych [5] i źródło promieniowania UV o ograniczonej mocy, co ma wpływ na ograniczone możliwości sterowania okresem i głębokością modulacji współczynnika załamania światła wytwarzanej struktury). Każda właściwość widmowa FBG jest funkcją tylu zmiennych, ile cech fizycznych poddawanych jest rozpatrywaniu, a szukanie jej wartości, często przy ograniczonej dziedzinie jest problemem, z którym borykają się naukowcy i inżynierowie.

Kolejnym wyzwaniem współczesnej nauki jest wyznaczanie nieznanymi właściwościami fizycznymi, wytworzonych już siatek, na podstawie ich charakterystyk transmisyjnych i innych, znanych ich właściwości fizycznych. Potrzeba taka może mieć miejsce nie tylko w przypadku chęci poznania właściwości nieznanymi FBG, lecz także siatek wytworzonych. Niektóre właściwości mogą nie być bowiem zdefiniowane wprost, na etapie wytwarzania struktury, czego efektem jest ich późniejsza nieznajomość. Przykład może stanowić głębokość modulacji współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu, której zmierzenie jest bardzo trudne. W opisywanym przypadku można mówić o funkcji, której dziedziną są parametry spektralne i część właściwości fizycznych siatki, a wartością wielkość innej właściwości fizycznej (lub para, trójka, itd. takich wielkości). Tak sformułowany problem stanowi problem odwrotny do zagadnienia opisywanego w poprzednim akapicie.

2. Metodyka przeprowadzania obliczeń numerycznych

Problemy opisane we wstępie można rozwiązać poprzez wykorzystanie obliczeń numerycznych. Pozwalają one na uzyskanie charakterystyk widmowych na drodze symulacji wykonanej na matematycznym modelu FBG, bez konieczności posiadania fizycznej struktury. Wprowadzenie do modelu długości i okresu siatki oraz jej głębokości modulacji współczynnika załamania światła w rdzeniu wraz z wartością tego współczynnika dla światłowodu, na którym zapisano strukturę, pozwala uzyskać charakterystykę transmisyjną zamodelowanej siatki. Ta zaś może być zinterpretowana przy pomocy kolejnych obliczeń, co prowadzi do wyodrębnienia jej kluczowych cech.

Dowodzono, że najlepsze rezultaty pod względem dokładności wyników uzyskiwane są w obliczeniach numerycznych wykorzystujących metodę

macierzy przejścia [6]. Metoda ta opiera się o teorię modów sprzężonych, pozwalającą zdefiniować równania, których rozwiązanie, z uwzględnieniem zdefiniowanych warunków brzegowych, prowadzi do uzyskania charakterystyki transmisyjnej siatki Bragga. Analiza dokładności działania tej metody, wykonywana poprzez porównanie charakterystyk obliczonych z charakterystykami rzeczywistymi dla struktur o takich samych parametrach, wykazała dużą jej dokładność (badania własne autora). Średnie błędy względne, w zależności od wielkości parametrów fizycznych FBG, jak również zależnie od badanego parametru optycznego, wyniosły od 14% (współczynnik transmisji modu głównego) do 34% (współczynnik transmisji wstęp bocznych). Są to wartości akceptowalne z punktu widzenia opisywanych w dalszej części rozdziału zastosowań.

Celem umożliwienia przeprowadzania obliczeń numerycznych pozwalających na uzyskiwanie charakterystyk transmisyjnych FBG, wykorzystano autorski program komputerowy napisany w języku programowania C#, posiadający interfejs graficzny oparty o technologię Windows Forms. Program wykorzystuje do obliczeń wzmiankowaną metodę macierzy przejścia. Posiada również moduł wyznaczający właściwości spektralne siatki, na podstawie wektorowej postaci jej charakterystyki transmisyjnej. Widma te mogą być zapisywane i wczytywane z wykorzystaniem systemu plików. Wspomniany moduł może zatem wyznaczać właściwości spektralne FBG nie tylko na podstawie charakterystyk obliczonych, lecz również zapisanych z analizatora widma (po dokonaniu wcześniejszej ich normalizacji), co umożliwia szybkie i precyzyjne porównywanie wyników obliczeń numerycznych z widmami wytworzonych siatek. W przeprowadzonych badaniach czynności tej dokonywano poprzez porównanie właściwości spektralnych siatek.

Wykorzystanie autorskiego programu pozwoliło również na automatyzację obliczeń z wykorzystaniem pętli. W kolejnych jej iteracjach możliwe było ich przeprowadzanie dla modeli siatek, różniących się pojedynczą właściwością fizyczną. Zmiana jej wartości o stałą w kolejnych cyklach pozwoliła badać jej wpływ na właściwości widmowe struktur. Dzięki takiemu podejściu bowiem, otrzymano zbiór charakterystyk transmisyjnych, który mógł być analizowany pod różnymi kątami (w kontekście właściwości spektralnych). Automatyczne wykonywanie zestawów symulacji otworzyło drogę do ich wykorzystania w nieznanych dotychczas celach.

3. Zastosowania obliczeń numerycznych

3.1. Szukanie struktury o określonych parametrach spektralnych

Jednostkowa symulacja światłowodowej siatki Bragga pozwala na wyznaczenie, z pewnym przybliżeniem, jej charakterystyki transmisyjnej,

pozwalającej na określenie jej właściwości spektralnych. Hipotetycznie, dysponując nieograniczoną liczbą symulacji, przeprowadzonych w oparciu o nieskończoną liczbę modeli matematycznych, zawierających wszystkie kombinacje właściwości fizycznych FBG, wystarczy wybrać te z nich, które dają w wynikach oczekiwany rezultat. W praktyce jednak niemożliwe jest wyznaczenie, a tym bardziej porównanie ze sobą wszystkich możliwych do zdefiniowania, modeli siatek Bragga. Wynika stąd konieczność opracowania praktycznego podejścia do tego zagadnienia.

Jak opisano powyżej, zautomatyzowanie wykonywania obliczeń numerycznych pozwala przeprowadzić je dla zestawu modeli matematycznych, różniących się np. jedną właściwością fizyczną, i otrzymać w wyniku zestaw charakterystyk transmisyjnych. Skupiając uwagę na pojedynczej właściwości takiego widma, można określić wpływ zmiennego w zestawie symulacji, parametru fizycznego FBG na tę właściwość. Taka zależność określana jest mianem charakterystyki przejściowej siatki Bragga. Należy zauważyć, że w zestawie modeli matematycznych wykorzystanych w obliczeniach, zmieniana jest tylko jedna wartość, a pozostałe są ustalone i niezmiennie. Charakterystyka przejściowa FBG jest więc funkcją opisującą zależność jednego z jej parametrów optycznych, od wybranej właściwości fizycznej, przy stałych wartościach pozostałych parametrów fizycznych struktury. Liczba rodzajów takich zależności jest iloczynem liczb: uwzględnionych właściwości fizycznych oraz rozpatrywanych parametrów optycznych FBG. Jest tak dlatego, że możliwe jest wykreślenie zależności dowolnego parametru optycznego od dowolnej właściwości fizycznej. Ponadto, dla każdego typu istnieje nieskończenie wiele charakterystyk przejściowych, gdyż wykreślane są one dla ustalonych wartości parametrów fizycznych siatki, które przyjmują wartości ze zbioru liczb rzeczywistych. Udowodniono, że ich przebieg zależy od wartości, stałych właściwości fizycznych badanych struktur [7]. Charakterystyki przejściowe są podstawą, na której opierają się opisane poniżej metody, będące zastosowaniami wyników obliczeń numerycznych.

Chcąc wyszukać, dla jakiej właściwości fizycznej, parametr spektralny przyjmie określoną wartość, należy odczytać ją z odpowiedniej charakterystyki przejściowej. Dla przykładu, w celu poznania, dla jakiej długości siatki o znanym okresie i głębokości modulacji współczynnika załamania światła, szerokość połówkowa piku wyniesie $0,2\mu\text{m}$, należy sprawdzić, dla jakiej wartości długości siatki szerokość połówkowa przyjmie taką wartość na charakterystyce przejściowej opisującej zależność szerokości połówkowej piku od długości struktury. Tak postawiony problem może mieć jedno, lub więcej rozwiązań, gdyż funkcja definiująca charakterystykę przejściową może nie być monotoniczna. Może on też nie mieć rozwiązania, gdy okaże się, że niezależnie od ustalonej właściwości siatki (w powyższym przykładzie: długości) niemożliwe będzie otrzymanie określonego parametru optycznego (w przykładzie: ustalonej wartości szerokości połówkowej piku). W związku

z powyższym, częściej definiowanym problemem, jest znalezienie właściwości fizycznej struktury, dla której parametr optyczny przyjmie największą lub najmniejszą możliwą wartość (np. dla jakiej wartości okresu siatki współczynnik transmisji dla fali Bragga będzie najniższy). Rozwiązaniem jest zwykle ekstremum funkcji opisanej przez charakterystykę przejściową, występujące wewnątrz przedziału określającego dziedzinę funkcji (dla funkcji niemonotonicznej), lub na jego skrajach (w przypadku funkcji monotonicznej, np. liniowej). Tak zdefiniowany problem może nie mieć rozwiązania tylko wtedy, gdy właściwość optyczna siatki w ogóle nie zależy od jej właściwości fizycznej, co na charakterystyce przejściowej prezentowane jest jako funkcja stała.

Bardziej skomplikowanym zagadnieniem jest szukanie pożądanej wartości parametru optycznego, dla struktury, która może być wytworzona z wybranymi dwoma parametrami fizycznymi, lub ich większą liczbą (np. jaki okres i długość powinna mieć wytwarzana siatka o ustalonych pozostałych parametrach, żeby szerokość połówkowa piku była jak największa). Funkcja przejścia jest w takim przypadku funkcją wielu zmiennych. W celu wykreślenia charakterystyki przejściowej należy wówczas przyjąć stałe wartości dla części zmiennych. Wartość ustalonych zmiennych ma jednakże wpływ na wygląd charakterystyki, przy czym nie jest on znany na etapie nadawania zmiennym stałych wartości. Problem ten można rozwiązać, wykorzystując kolejny raz obliczenia numeryczne. Znalezienie zadanej wartości lub ekstremum funkcji wielu zmiennych sprowadza się do wyszukania wartości w zbiorze, przy czym jeśli dokładne dopasowanie nie istnieje, należy znaleźć element o wartości najbliższej zadanej. Przeszukiwany zbiór tworzą właściwości optyczne, obliczone na podstawie charakterystyk transmisyjnych, uzyskanych w wyniku symulacji pojedynczej siatki. W związku z powyższym zbiór ten zawiera tyle elementów, ile modeli matematycznych FBG poddanych zostało obliczeniom numerycznym.

Uwzględniając złożoność obliczeń dla pojedynczego modelu, wynikającą z konieczności rozwiązywania dlań setki razy (dla każdej długości fali) skomplikowanych równań, można mieć wątpliwości co do czasu napełniania wyżej zdefiniowanego zbioru. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie popularnej w teorii obliczeń metody „dziel i zwyciężaj” (ang. divide and conquer). Polega ona na zmniejszeniu rozdzielczości dokonywania wstępnych obliczeń, a następnie jej zagęszczaniu poprzez rekurencyjne ich wykonywanie na przedziale, dla którego wstępne wyniki wskazują na znalezienie w nim pożądanych wartości (np. ekstremów funkcji). Liczba powtórzeń serii obliczeń w ramach rekurencji może być dobrana na podstawie zadanej dokładności obliczeń, tj. precyzji, z jaką szukana wartość parametru spektralnego FBG ma zostać odnaleziona. Przedział o którym mowa wyżej, mogący być reprezentowanym przez wektor, w przypadku rozpatrywania funkcji przejścia wielu zmiennych jest reprezentowany przez wielowskaźnikową macierz, przy czym liczba jej wskaźników zależy od liczby zmiennych tej funkcji. Oznacza to,

że metoda ta jest bardzo prosta do implementacji algorytmicznej, także dla wyliczania charakterystyk przejściowych wielowymiarowych, gdyż może być zapisana w programie w postaci zagnieżdżonych pętli dając wielomianową złożoność obliczeniową.

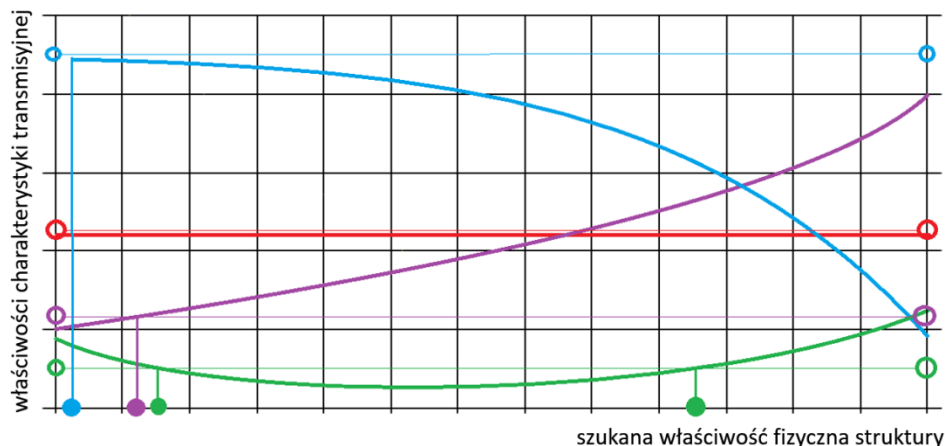
3.2. Identyfikacja nieznanych struktur

Opisane we wstępie rozdziału, zagadnienie identyfikacji nieznanych siatek Bragga, sprowadzające się do określenia ich nieznanych właściwości, stanowi problem, którego uniwersalnego rozwiązania dotychczas nie znaleziono. Jego istotą jest określenie właściwości fizycznych FBG na podstawie widma transmisyjnego. Poniżej przedstawiono opracowaną metodę wyznaczania pojedynczych właściwości takich struktur, przy dodatkowym założeniu, znajomości pozostałych właściwości. Metoda ta może być rozszerzona o przypadki szukania wieloelementowego zbioru nieznanych parametrów fizycznych struktury, gdyż bezwzględny warunkiem jej zastosowania jest istnienie przynajmniej jednej znanej właściwości. Dla takich przypadków będzie ona miała jednakże znacznie mniejszą dokładność.

Opisywana metoda wykorzystuje nie tylko analizę charakterystyki transmisyjnej FBG, lecz także przedstawione wyżej charakterystyki przejściowe. Oznacza to, że w celu jej zastosowania, konieczne jest wykonanie obliczeń numerycznych, prowadzących do wyznaczenia tych charakterystyk. Oznacza to także, że dokładność tej metody zależy od błędów pomiaru właściwości widmowych, zmierzonych z wejściowej charakterystyki transmisyjnej, jak również błędów obliczeń numerycznych. Sama metoda wprowadza także pewną niedokładność, gdyż jej wynikiem nie jest wartość, lecz przedział z pewnym rozkładem prawdopodobieństwa, w którym występuje szukana wielkość (ściślej mówiąc szukana wartość może występować także, z niewielkim prawdopodobieństwem, poza krańcami przedziału, co zostanie szerzej opisane dalej).

W celu znalezienia nieznannej właściwości fizycznej FBG, należy dla każdego jej parametru optycznego, wyznaczyć charakterystyki przejściowe reprezentujące jego zależność od nieznannej właściwości struktury. Następnie, dla każdej z funkcji opisujących te charakterystyki znaleźć trzeba wszystkie jej argumenty w przeszukiwanym przedziale, dla których przyjmuje ona wartości odczytane z danej charakterystyki transmisyjnej. Każda z otrzymanych w ten sposób liczb stanowi szukany, cząstkowy wynik. Ich obliczenie dla każdej z funkcji osobno, pozwala zestawić je ze sobą uzyskując bardziej dokładne przedziały, w których może znajdować się szukana wartość. Należy przy tym pamiętać, że wynik cząstkowy może nie istnieć lub być zbiorem wartości, w zależności od przebiegu odpowiednich funkcji charakterystyk przejściowych, jak zostało to opisane w poprzednim podrozdziale. W pierwszym przypadku powinien on zostać pominięty w końcowych obliczeniach. W drugim zaś należy

się liczyć z tym, że szukana wielkość może znajdować się w okolicy każdej, ze znalezionych wartości, w takim wypadku należy odrzucić mało prawdopodobne wyniki cząstkowe, posilując się rezultatami uzyskanymi na podstawie funkcji opisujących inne parametry spektralne.



Rys. 3. Schemat przedstawiający przykład użycia metody wyszukiwania właściwości fizycznej światłowodowej siatki Bragga, w oparciu o jej charakterystykę transmisyjną i obliczenia numeryczne

Rysunek 3 przedstawia graficzną reprezentację metody przykładowego wyszukiwania wartości fizycznej FBG. Odczytać z niego można, że rozpatrywane są cztery parametry spektralne, gdyż wykreślono nań cztery charakterystyki przejściowe. Oznaczono je pogrubionymi liniami w różnych kolorach. Charakterystyki te opisują zależność znanego parametru optycznego od szukanej właściwości fizycznej FBG. Okręgami na osi rzędnych zaznaczono wartości spektralne, odczytane z charakterystyki transmisyjnej posiadanej siatki. Wrysowano też linie poziome, uwidaczniające stałe, szukane na charakterystykach przejściowych wartości, w kolorach odpowiadających charakterystykom przejściowym opisującym zmienność tych wartości. W reprezentacji graficznej metody, algorytm sprowadza się do znalezienia punktów przecięcia linii charakterystyk, z liniami wyznaczającymi stałe, a następnie odczytania na osi odciętych wartości, dla których przecięcia te będą miały miejsce. Punkty te wskazują, że w ich sąsiedztwie znajduje się szukana wartość właściwości fizycznej siatki.

Powyższy przykład został dobrany w sposób umożliwiający przedstawienie różnych wariantów zależności między charakterystykami przejściowymi, a szukanymi parametrami spektralnymi, odzwierciedlający szukanie argumentu, dla których funkcja przejścia zwróci określoną wartość. Dla przypadku

opisanego przez linie niebieskie, rozwiązanie nie istnieje w rozpatrywanym przedziale. W tym wypadku należy przyjąć argument, dla którego funkcja zwraca wartość najbliższą szukanej (w tym wypadku, znajdującą się na końcu przedziału). Przypadek oznaczony kolorem czerwonym także nie ma rozwiązania, lecz pozioma charakterystyka przejściowa oznacza brak zależności między szukaną właściwością a rozpatrywanym parametrem optycznym. Należy go więc pominąć. Kolorem fioletowym oznaczono zaś przypadek najbardziej pożądanym, gdzie istnieje dokładnie jedno rozwiązanie powyższego podzadania. W razie istnienia większej liczby rozwiązań (w omawianym przykładzie kolor zielony), należy przyjąć to, które jest najbliższe pozostałym. Tak wyznaczone punkty wskazują otoczenie szukanej wartości właściwości siatki.

W przypadku idealnym znalezienie rozwiązań dla wszystkich funkcji jest pewne, a każde z nich wskaże tę samą wartość (lub nieskończony zbiór wartości dla braku zależności). Z uwagi jednakże na występowanie błędów i niepewności pomiarowych oraz uproszczeń modelowych, rozwiązaniem jest przedział. W celu znalezienia szukanej wartości należy znaleźć w nim miejsce, w którym najprawdopodobniej się ona znajduje. W tym celu należy oszacować rozkład prawdopodobieństwa jej występowania w znalezionym przedziale, co warto rozpocząć od zastanowienia się, jak bardzo prawdopodobne jest występowanie tej wartości w każdym ze znalezionych punktów oraz ich otoczeniu. Niepewność wynikająca z odczytu parametrów optycznych, graficznie reprezentowana jest jako możliwość przesunięcia wartości stałej wzdłuż osi rzędnych. Błąd wyznaczenia charakterystyk przejściowych, wynikający przede wszystkim z faktu, że model matematyczny użyty do przeprowadzenia obliczeń numerycznych jest uproszczony, również jest reprezentowany graficznie jako przesunięcie wzdłuż osi rzędnych charakterystyki przejściowej. Oznacza to, że rozkład prawdopodobieństwa występowania szukanej wartości, obliczonej na podstawie poszczególnych parametrów spektralnych zależy nie tylko od wymienionych wyżej czynników, lecz także, w dużej mierze, od modułu współczynnika kierunkowego prostej stycznej do charakterystyki transmisyjnej, w miejscu odpowiadającym znalezionej wartości. Wracając do powyższego przykładu (Rys. 3), oznacza to, że taki sam błąd wynikający z pomiarów i obliczeń, dla przypadków wyznaczonych wartości oznaczonych kolorami niebieskim i zielonym, spowoduje wystąpienie mniejszego błędu w obliczonej wartości fizycznej FBG oznaczonej na zielono (gdyż przesunięcie charakterystyki wzdłuż osi rzędnych spowoduje mniejsze zmiany obliczonej wartości, niż miałyby to miejsce dla przypadku oznaczonego na niebiesko). W związku z powyższymi rozważaniami, najmniejszym błędem cechuje się zatem wartość oznaczona kolorem fioletowym (gdyż charakterystyka przejściowa w jej otoczeniu, aproksymowana odcinkiem prostym, posiada najwyższy moduł współczynnika kierunkowego) i to w jej najbliższym otoczeniu, z największym prawdopodobieństwem spodziewać się można wartości, którą należy przyjąć za rozwiązanie problemu.

4. Wnioski

Obliczenia numeryczne światłowodowych siatek Bragga pozwalają na wyznaczenie ich charakterystyk transmisyjnych w oparciu o ich matematyczny model. Charakterystyki te następnie mogą być poddawane automatycznej analizie numerycznej, prowadzącej do znalezienia właściwości spektralnych symulowanych struktur. Obliczenia takie mogą być grupowane w zestawy pozwalające na wyznaczanie zależności parametrów spektralnych od właściwości fizycznych FBG, tworząc charakterystyki przejściowe. Te z kolei stanowią narzędzie umożliwiające wyszukiwanie struktur o właściwościach najbardziej odpowiednich dla wyspecyfikowanych zastosowań, bez konieczności ich wcześniejszego wytwarzania.

Połączenie metod analizy spektralnej siatek, z ich symulacjami na drodze obliczeń numerycznych prowadzącymi do wyznaczenia charakterystyk przejściowych pozwoliło na opracowanie nowatorskiej metody rozwiązywania tzw. problemu odwrotnego. Problem ten dotyczy precyzyjnego wyznaczania właściwości FBG o znanym widmie. Opracowana metoda daje najlepsze rezultaty w przypadku wyszukiwania pojedynczych, nieznanymi właściwościami fizycznymi struktur, przy znajomości pozostałych z nich. Jej dokładność zaś zależy nie tylko od czynników związanych z pomiarami i obliczeniami, lecz także od wyglądu charakterystyk przejściowych. Metoda ta może być skutecznie wykorzystywana do wyznaczenia trudnych do zmierzenia, właściwości wytwarzanych siatek, takich jak np. głębokość modulacji współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu, umożliwiając dalsze badania nad wpływem tych właściwości na parametry spektralne struktur.

Literatura

- [1] Othonos A., Kalli K., *Fibre Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*, Artech House, 1999.
- [2] Erdogan T., Sipe J. E., *Tilted fiber phase gratings*, J. Opt. Soc. Am. 13(2), 1996.
- [3] Komukai T., Tamura K., Nakazawa M., *An efficient 0.04-nm apodized fiber Bragg grating and its application to narrow-band spectral filtering*, IEEE Photonics Technology Letters 9(7), 1997.
- [4] Kaim S., Mokhov S., Divliansky I., Zeldovich, L.B. Glebov B.Y., Smirnov V., Lumeau J., *Saturation of multiplexed volume Bragg grating recording*, Journal of the Optical Society of America 32(1), 22–27, 2015.
- [5] Mahakud R., Prakash O., Kumar J., Nakhe S. K., Dixit S. V., *Analysis on the effect of UV beam intensity profile on the refractive index modulation in phase mask based fiber Bragg grating writing*, Optics Communications 285(24), 5351–5358, 2012.

[6] Yamada, K. Sakuda M., *Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach*, Applied Optics 26(16), 3474–3478, 1987.

[7] Stępniać P., Kisała P., *Analysis of impact long period Bragg gratings parameters on their spectral transmission characteristics* Proceedings of SPIE 10445, 2017.

*Karol Fatyga⁽¹⁾, Łukasz Kwaśny⁽¹⁾

Poprawa sprawności izolowanej przetwornicy DC/DC poprzez zastosowanie prostowania synchronicznego

Streszczenie: W artykule zaprezentowana jest analiza sprawności prostowania diodowego oraz synchronicznego w izolowanej przetwornicy DC/DC pracującej z częstotliwością 100 kHz. Pokazane są metody prostowania synchronicznego oraz przeprowadzona jest fizyczna implementacja wybranej metody prostowania w układzie rzeczywistym. Zaprezentowane są wyniki badań dla przetwornicy z prostowaniem diodowym oraz z prostowaniem synchronicznym. Określony jest wpływ prostowania synchronicznego na poprawę sprawności przetwornicy DC/DC.

Słowa kluczowe: prostowanie synchroniczne, izolowana przetwornica DC/DC, podwójny mostek H

Increasing efficiency of isolated DC/DC converter through means of synchronous rectifying

Abstract: This paper presents analysis of efficiency of 100 kHz, isolated DC/DC converter with diode-based rectification and with synchronous rectification. Synchronous rectification methods are presented. Selected method is implemented in laboratory bench. Test results are presented for DC/Dc converter with diode-based and synchronous rectification. Influence of synchronous rectification on DC/DC converter efficiency is discussed.

Keywords: synchronous rectification, isolated DC/DC converter, dual active bridge

1. Wstęp

Przetwornice DC/DC są bardzo popularne w aplikacjach ładowarek pojazdów elektrycznych. Stanowią one stopień końcowy, regulujący prąd ładowania pojazdu. Dodatkowo, wzrasta ich popularność w zastosowaniach elektroenergetycznych jako interfejsy pomiędzy siecią a zasobnikami energii elektrycznej, czy panelami fotowoltaicznymi. Bardzo często w takich wypadkach wymagana jest możliwość dwukierunkowego przesyłania energii – doładowywania i rozładowywania magazynu energii. Z tego względu popularne są algorytmy sterowania fazowego [1], które pozwalając na szybką zmianę kierunku przepływu energii są rozwijane i powstają kolejne, coraz bardziej skomplikowane metody modulacji [2–4]. Alternatywnym rozwiązaniem są

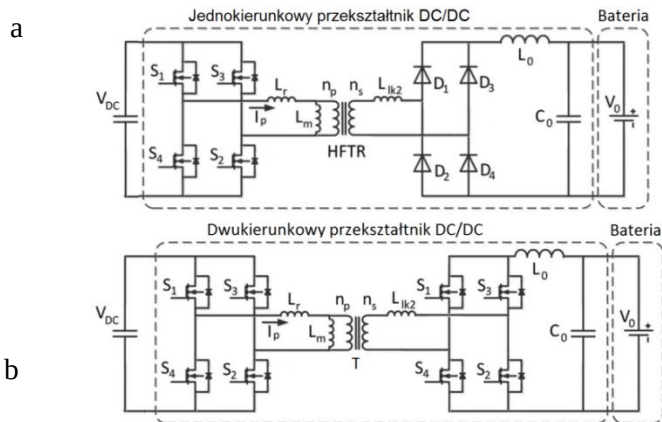
* k.fatyga@pollub.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

l.kwasny@pollub.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

przetwornice sterowane w obrębie pojedynczego mostka [5] posiadające układ prostowniczy po stronie wtórnej transformatora. Dla układów omawianych we wstępie, będących układami dużej mocy rozwiązania oparte na prostowaniu diodowym mogą okazać się niekorzystne, ze względu na brak dwukierunkowości, czy same straty powodowane przez diody. Celem niniejszego artykułu jest przeprowadzenie analizy strat dla izolowanej przetwornicy DC/DC o prostowaniu diodowym oraz synchronicznym oraz praktyczna implementacja algorytmu prostowania synchronicznego w układzie rzeczywistym. Przeprowadzone są obliczenia strat dla skrajnych przypadków obciążenia przetwornicy DC/DC oraz przeprowadzone badania eksperymentalne.

2. Przetwornica DC/DC w układzie mostka sterowanego fazowo

Izolowana przetwornica DC/DC w układzie mostka sterowanego fazowo (Phase-Shifted Full Bridge – PSFB) zrealizowana jest jako mostek H zasilający transformator średniej częstotliwości, którego uzwojenie wtórne podłączone jest do układu prostownikowego. Dla układu jednokierunkowego wystarczające jest zastosowanie transformatora z wyprowadzonym zerem oraz układu podwajania prądu lub transformatora o dwóch wyprowadzeniach współpracującego z mostkiem Graetza [6]. Ze względu na konieczność zapewnienia dwukierunkowego przepływu energii stosuje się symetryczne układy przetwornicy DC/DC z mostkiem H po obu stronach transformatora (Rys. 1).



Rys. 1. Układy izolowanych przetwornic DC/DC a) układ z prostownikiem diodowym, b) układ dwukierunkowy z prostownikiem synchronicznym

Odwroćenie kierunku przepływu mocy w układzie z rysunku 1 b) odbywa się poprzez wymianę ról mostków H: tranzystory strony pierwotnej zostają wygaszone, tranzystory strony wtórnej zaczynają kluczować. Rozwiązanie to

jest korzystne, ponieważ wiele tranzystorowych modułów mocy posiada wbudowane diody rozładowcze, które można wykorzystać do prostowania.

3. Straty mocy przy prostowaniu diodowym oraz przy prostowaniu synchronicznym

Poniższa analiza przeprowadzona została dla układu z rysunku 1 b), zbudowanego na modułach tranzystorowych w technologii węgla krzemu Infineon CoolSiC FF11MR12W1MLB11. Parametry tego modułu przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modułu półmostka tranzystorowego z diodami zwrotnymi Infineon CoolSiC

Częstotliwość kluczowania f_s	100 kHz
Współczynnik wypełnienia D	0,5
Strata energii wyłączenia diody E_{rr}	66 mJ
Współczynnik korekcji prądu diody K_{id}	0,6
Współczynnik korekcji napięcia diody K_{vd}	0,6
Prąd odniesienia diody I_{ref}	100 A
Napięcie odniesienia diody V_{ref}	600 V
Napięcie przewodzenia diody V_{fd}	5,6 V
Rezystancja kanału tranzystora R_{dsON}	11 mΩ
Energia załączenia i wyłączenia tranzystora E_{on+off}	2,33 mJ
Współczynnik korekcji napięcia tranzystora K_{vt}	1.3

Straty mocy w elementach półprzewodnikowych obliczone zostały na podstawie równań 1–4. Straty przewodzenia diody wynoszą

$$P_{cond} = \frac{1}{2} V_{fd}(T_j) I_d \tag{1}$$

Gdzie, P_{cond} – straty przewodzenia, D – współczynnik wypełnienia, $V_{fd}(T_j)$ – napięcie przewodzenia diody, I_d – prąd diody, $R_d I_d^2$ – straty mocy w diodzie
Straty wynikające z wyłączania diody są określone równaniem (2)

$$P_{rr} = \frac{1}{2} E_{rr} f_s \tag{2}$$

Gdzie: P_{sw} – straty przełączania diody, f_s – częstotliwość wyłączania, E_{rr} – strata energii podczas wyłączania diody, I_i – prąd diody, I_{ref} – prąd odniesienia, K_i – współczynnik korekcji dla prądu, V_{cc} – napięcie pracy, V_{ref} – napięcie odniesienia, K_v – współczynnik korekcji dla napięcia, TC_{Err} – współczynnik korekcji temperaturowej, T_j – temperatura złącza, T_{ref} – temperatura odniesienia

Straty przewodzenia tranzystora MOSFET wyrażone są następującym równaniem

$$P_{cond} = DR_{dson}(T_j)I_{ds}^2 \quad (3)$$

Gdzie: P_{cond} – straty przewodzenia, D – współczynnik wypełnienia, $R_{dson}(T_j)$ – rezystancja kanału z uwzględnieniem temperatury, I_{ds} – prąd dren–źródło

Straty przełączania tranzystora wynoszą

$$P_{sw} = f_s E_{on+off} \frac{I_{out}}{I_{ref}} \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} (1 + TC_{Err}(T_j - T_{ref})) \quad (4)$$

Gdzie: P_{sw} – straty przełączania tranzystora, f_s – częstotliwość kluczowania, E_{on+off} – energia załączenia i wyłączenia tranzystora, I_{out} – prąd roboczy tranzystora, I_{ref} – prąd odniesienia tranzystora, V_{cc} – napięcie pracy, V_{ref} – napięcie odniesienia, K_v – współczynnik korekcji dla napięcia, TC_{Err} – współczynnik korekcji temperaturowej, T_j – temperatura złącza, T_{ref} – temperatura odniesienia.

Dla parametrów modułu tranzystorowego z diodami z węgla krzemu, straty przy napięciach pracy 100 V i 750 V oraz prądzie wyjściowym 60 A zaprezentowano w Tabeli 2. Do obliczeń przyjęto temperatury 25°C.

Tabela 8 Straty przewodzenia i przełączania w module tranzystorowym Infineon CoolSiC

	$V_{cc} = 750 \text{ V}$	$V_{cc} = 100 \text{ V}$
Straty przewodzenia w diodzie P_{condD}	170 W	170 W
Straty przełączania w diodzie P_{swD}	55 W	17 W
Straty przewodzenia w tranzystorze P_{condT}	19,8 W	19.8 W
Straty przełączania w tranzystorze P_{swT}	13,6 W	186 W

Należy zauważyć, że dla napięcia 750 V straty wynikające z przełączania tranzystora przy wysokim napięciu powodują, że sumaryczne straty mocy

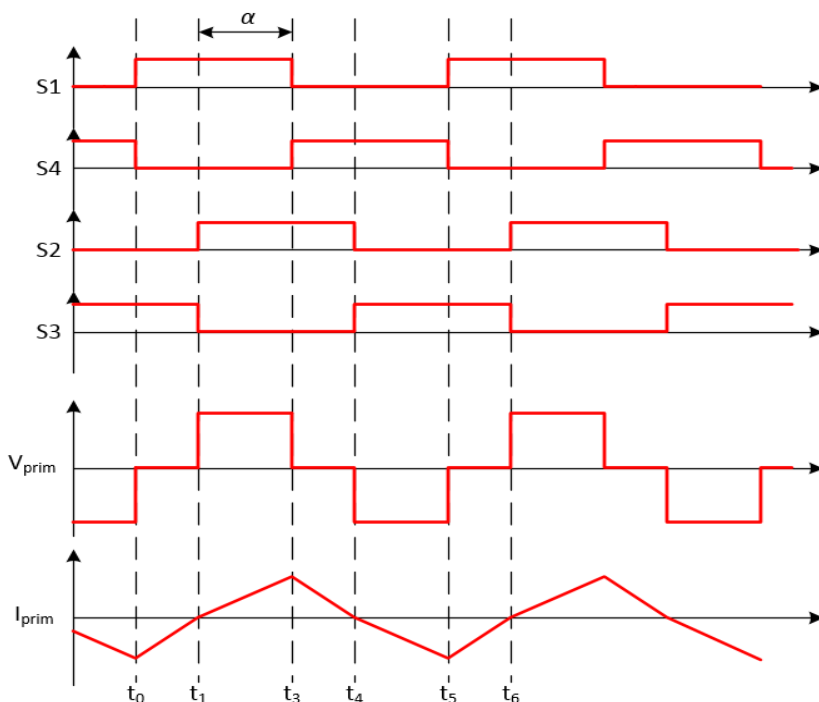
w tranzystorze i diodzie są zbliżone. Ponieważ prostownik synchroniczny znajduje się po stronie wtórnej transformatora przetwornicy DC/DC, zazwyczaj operuje przy niższych napięciach – wynikających z typów baterii stosowanych w pojazdach elektrycznych. Ładowarki w standardzie 3 mają zakres napięć typowo od 200 do 500 V, co spowoduje, że prostowanie tranzystorowe będzie miało przewagę nad prostowaniem diodowym pod kątem sprawności.

4. Sposoby realizacji prostowania synchronicznego

Założeniem prostowania synchronicznego dla modułów mocy posiadających tranzystor z diodą zwrotną jest przejęcie przez tranzystor prądu, który w normalnych warunkach płynąłby przez diodę. Ponieważ tranzystor w stanie nasycenia traktowany jest jako rezystancja nieposiadająca złącza p–n, nie jest w stanie blokować przepływu energii w przeciwną stronę. Stąd konieczność opracowania algorytmu, który sterował będzie załączeniem i wyłączeniem tranzystorów, aby problem ten wyeliminować.

4.1. Przetwornica DC/DC w układzie pojedynczego mostka sterowanego fazowo

Aby przeprowadzić analizę możliwości implementacji prostowania synchronicznego, należy wyjaśnić sposób sterowania napięciem strony pierwotnej transformatora. Układ z rysunku 1 sterowany jest w następujący sposób: tranzystory strony wtórnej są na stałe wyłączone, pracują jedynie diody zwrotne. Mostek strony pierwotnej można podzielić na dwa półmostki: półmostek wyprzedzający S1–S4 (leading leg) oraz mostek opóźniony S2–S3 (lagging leg). W literaturze spotyka się również określenia półmostek załączający S2–S3 (passive-to-active leg) oraz półmostek wyłączający S1–S4 (active-to-passive leg)[7]. Określenia te wynikają z roli jakie pełnią półmostki w transferze energii, gdzie noga opóźniona zawsze rozpoczyna okno transferu energii, a noga wyprzedzająca to okno zamyka. W obrębie pojedynczego półmostka sygnały są sygnałami o współczynniku wypełnienia 50%, przesuniętymi względem siebie o 180° oraz posiadającymi czas martwy (deadband), aby nie dopuścić do skrośnego załączenia tranzystorów i zwarcia szyny DC. Przebiegi sterujące wraz z napięciem i prądem transformatora zaprezentowane są na rysunku 2.

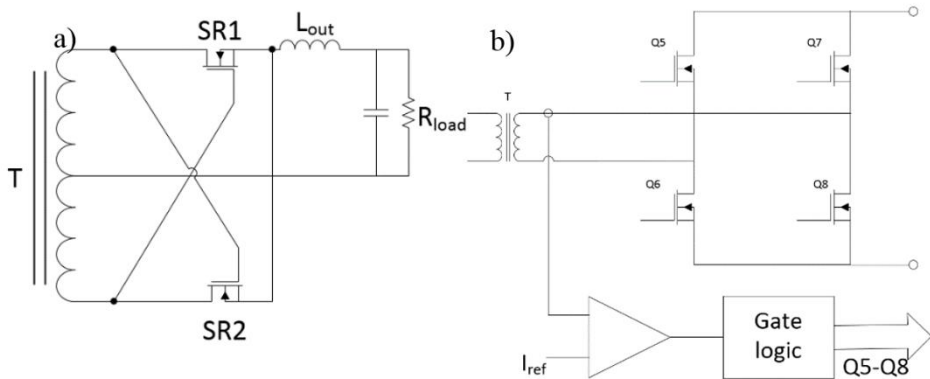


Rys. 2 Przebiegi sterujące S1–S4, przebieg napięcia strony pierwotnej transformatora V_{prim} oraz przebieg prądu transformatora I_{prim}

Wielkością sterującą przepływem mocy w układzie jest kąt przesunięcia fazowego α między mostkami. Dla $\alpha = 0$ tranzystory S1 i S3 przez połowę okresu taktowania są załączone jednocześnie, zwierając transformator do bieguna dodatniego źródła. Podobnie tranzystory S2 i S4, których jednoczesne załączenie powoduje zwarcie obu końców uzwojenia transformatora do bieguna ujemnego źródła. Ponieważ oba końce uzwojenia są podłączane do tego samego potencjału, siła elektromotoryczna przyłożona do niego równa się zero. Gdy $\alpha > 0$, następuje nałożenie na siebie sygnałów sterujących tranzystorów S1 i S2 oraz S3 i S4. Tranzystory te, rozmieszczone po przekątnych mostka, przy jednoczesnym ich załączeniu powodują przepływ energii przez transformator (przedziały $t_1 - t_3$ oraz $t_4 - t_5$). Należy zwrócić uwagę, że w przedziałach $t_0 - t_1$, $t_3 - t_4$, $t_5 - t_6$ ponownie następuje jednoczesne otwarcie tranzystorów S1 i S3 lub S2 i S4, zwierające uzwojenia transformatora do tego samego potencjału. Tworzona jest w ten sposób droga dla prądu cyrkulującego (freewheeling current) [8].

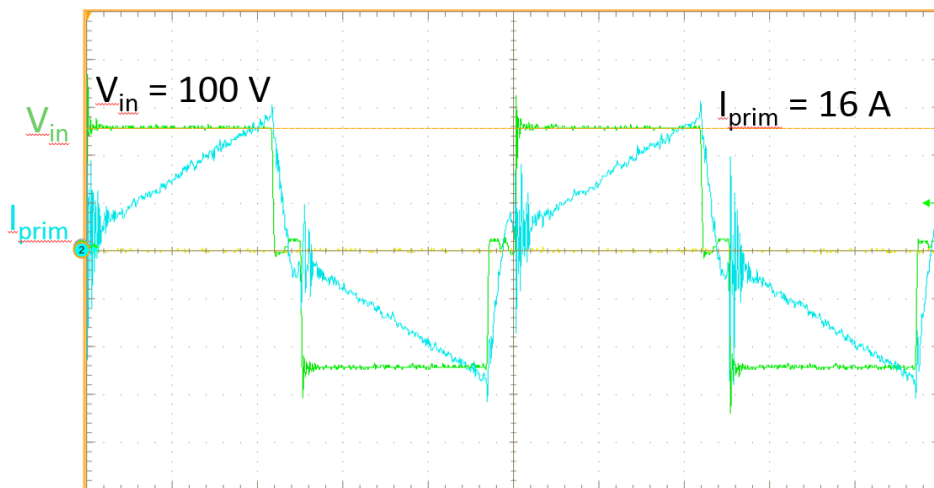
4.2. Układy prostowania synchronicznego z samosterowaniem

Prostowanie tranzystorowe w układzie mostka H można zrealizować poprzez układy samosterowania lub metody obliczeniowe. W przypadku układów samosterowania, impuls sterujący generowany jest poprzez obwód analogowy podłączony do elementów po stronie wtórnej transformatora. Układ taki zaprezentowany jest na rysunku 3.



Rys. 3 Układy prostowania synchronicznego z samosterowaniem a) układ podwajacza prądu z samosterowaniem na podstawie napięcia, b) układ z samosterowaniem z komparatorem

W takim układzie napięcie pojawiające się po stronie wtórnej transformatora stanowi jednocześnie sygnał sterujący tranzystory. Konieczne jest, aby napięcie strony wtórnej było bezpieczne dla bramki tranzystora i jednocześnie, aby tranzystor zawsze wchodził w saturację. Rozwiązania alternatywne opierają się przykładowo o dodatkowe obwody z transformatorem do sterowania tranzystorów, czy układy kondycjonowania sygnałów. Kolejnym sposobem realizacji samosterowania jest wykorzystanie komparatora oraz sygnału prądu transformatora. Wzrost prądu powyżej wartości progowej spowoduje załączenie tranzystorów w odpowiednich gałęziach.

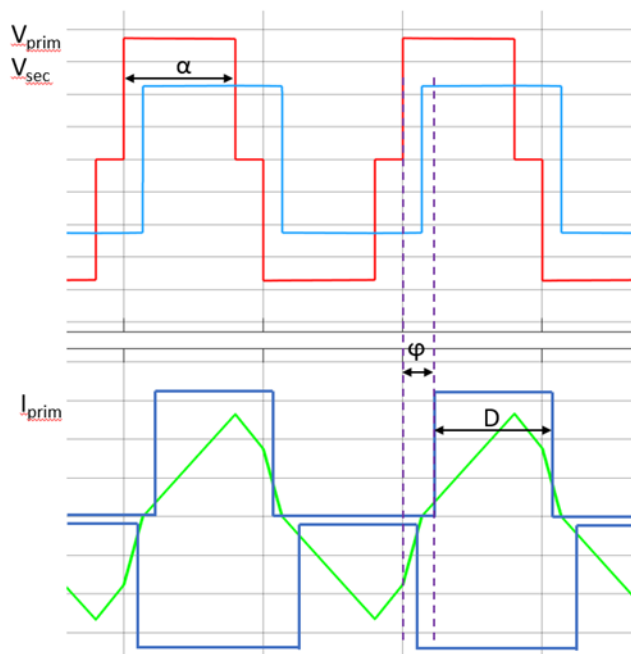


Rys. 4 Przebieg zmierzonego prądu wraz z zakłóceniami od przełączeń tranzystorów

Wadą rozwiązań prostowania synchronicznego z samosterowaniem jest odporność na zakłócenia. Podczas przełączania tranzystorów powstają przepięcia, generowane są zakłócenia elektromagnetyczne. Zniekształcają one sygnał pomiarowy i mogą doprowadzić do niepoprawnego działania układu prostowania synchronicznego czy losowych załączeń lub wyłączeń tranzystorów (Rys. 4). Z kolei stosowanie filtrów dolnoprzepustowych, ograniczających te zakłócenia wprowadzać będzie przesunięcie fazowe do sygnału sterującego a co za tym idzie – opóźnić załączenie i wyłączenie tranzystora. Zaletą tego rozwiązania jest jego niezależność od sterowania – będzie pracować prawidłowo mimo zmian w algorytmie, częstotliwości czy obciążeniu.

4.3. Mikroprocesorowa realizacja prostowania synchronicznego

Możliwe jest powiązanie sygnałów sterujących prostownik synchroniczny z sygnałami sterującymi stroną pierwotną. Jeżeli strona pierwotna sterowana jest poprzez zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy półmostkami, strona wtórna musi być sterowana poprzez zmianę współczynnika D sterującego pary tranzystorów oraz przesunięcie fazowe całego mostka względem mostka strony pierwotnej ϕ (Rys 5). Wprowadzenie tych dwóch wielkości wynika z charakteru pracy przetwornicy DC/DC – ciągłości lub nieciągłości prądu płynącego przez indukcyjność (współczynnik wypełnienia D) oraz z przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem występującego przy przesunięciach fazowych α zbliżonych do maksimum (ze względu na zbyt mało czasu na rozładowanie indukcyjności rozproszenia) lub przy dużych obciążeniach (ze względu na przesunięcie wynikające z indukcyjnego charakteru transformatora).



Rys. 5 Napięcia strony pierwotnej i wtórnej, prąd transformatora oraz sygnały sterujące tranzystorami strony wtórnej α – przesunięcie fazowe w obrębie mostka pierwotnego, ϕ – przesunięcie fazowe mostka wtórnego względem pierwotnego, D – współczynnik wypełnienia sygnałów sterujących tranzystorami

Przetwornica DC/DC w zależności od obciążenia, będzie pracować w trybie prądu ciągłego (CCM – continuous current mode) lub trybie prądu przerywanego (DCM – discontinuous current mode). Przetwornica przejdzie w tryb prądu nieciągłego, gdy wartość prądu wyjściowego przetwornicy będzie niższa niż wartość prądu krytycznego. Dla izolowanej przetwornicy DC/DC można w przyjąć, że prąd krytyczny będzie w przybliżeniu równy prądowi krytycznemu przetwornicy DC/DC w układzie przetwornicy obniżającej (buck) [9]. Prąd krytyczny takiej przetwornicy określony jest wzorem:

$$I_{crit} = \frac{\alpha}{2f_s L_{lk}} (V_{in} - V_{out}) \quad (5)$$

Gdzie: I_{crit} – prąd krytyczny, α – przesunięcie fazowe, f_s – częstotliwość kluczowania tranzystorów, V_{in} – napięcie zasilania, V_{out} – napięcie wyjściowe przetwornicy.

O ile przetwornica nie jest z góry projektowana na pracę w trybie prądu nieciągłego, przejście w ten tryb pracy jest bardzo niepożądane – pojawiają się w nim przedziały czasowe, w których ze względu na niski poziom energii

zgromadzony w indukcyjności, dochodzi do rezonowania indukcyjności rozproszenia transformatora z pasożytniczymi pojemnościami elementów półprzewodnikowych. Powoduje to generowanie dużych zakłóceń elektromagnetycznych, a w przypadku układów z prostowaniem samosterującym – powodowałoby załączenia tranzystorów strony wtórnej i dodatkowe wzmocnienie tego efektu. W trybie pracy z prądem ciągłym, prostowanie synchroniczne można ograniczyć do kompensacji przesunięcia fazowego ϕ . W trybie prądu nieciągłego – konieczna jest dodatkowa kontrola współczynnika wypełnienia D .

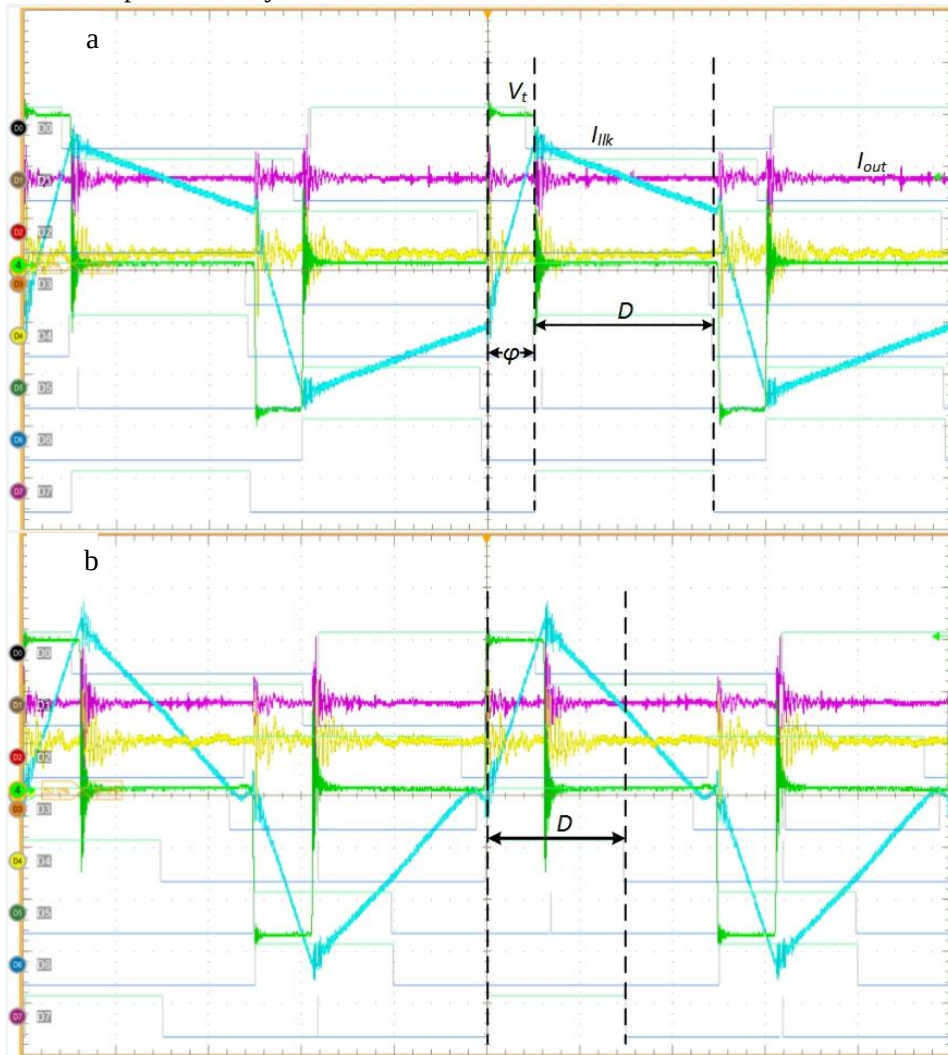
5. Implementacja prostowania synchronicznego w układzie rzeczywistym

Do implementacji prostowania synchronicznego wybrany został mikrokontroler firmy Texas Instruments TMS320F28035. Ze względu na rozbudowane układy peryferyjne jest on w stanie sterować całością przetwornicy: zarówno zadawaniem mocy po stronie pierwotnej transformatora, jak i prostowaniem synchronicznym. Ze względu na dużą częstotliwość przełączania tranzystorów $f_s = 100$ kHz, część algorytmu krytyczna czasowo zrealizowana jest w języku assembler (zamknięta pętla sterowania prądem, obliczenia algorytmu prostowania synchronicznego) i wykonywana z częstotliwością f_s , zaś część wolniejsza zrealizowana jest w języku C i podzielona według priorytetów na zadania o częstotliwości $f_{s1} = 60$ kHz, $f_{s2} = 15$ kHz, $f_{s3} = 1$ kHz. Przetwornica została oparta o moduły tranzystorowe MOSFET Infineon CoolSiC z diodami zwrotnymi (Tabela 1). Została zaprojektowana tak, aby maksymalne przesunięcie fazowe α wynosiło 0,85. Przesunięcie fazowe między mostkami ustawione zostało na stałe $\phi = 0,1$, przy czym w momencie wykrycia prądu nieciągłego jest ustawiane na $\phi = 0$. Współczynnik wypełnienia D zależny jest od prądu krytycznego i bieżącego prądu wyjściowego. Dodatkowo, prostowanie synchroniczne wyłączane jest przy niskich obciążeniach – ponieważ w takiej sytuacji straty wynikające z przełączania tranzystorów przerastają straty generowane przez prostowanie diodowe.

Jako element testowy wybrano superkondensator o pojemności 91 F i napięciu maksymalnym 86 V. Wybór ten podyktowany jest podobieństwem charakterystyki ładowania baterii i superkondensatora. Jednocześnie superkondensator pozwala obserwować zmiany pracy układu w krótszym czasie niż bateria. Dodatkowo, superkondensator obciążony jest rezystorem 3 Ω , aby pozwolić na jego rozładowanie.

Układ został przetestowany w zakresie napięć wejściowych $U_{in} = 100\text{--}200$ V, ładując superkondensator w zamkniętej pętli napięciowej i limitem prądomowy do wartości $U_c = 70$ V.

Na rysunku 6 zaprezentowane są przebiegi prądu oraz napięć podczas pracy przetwornicy.

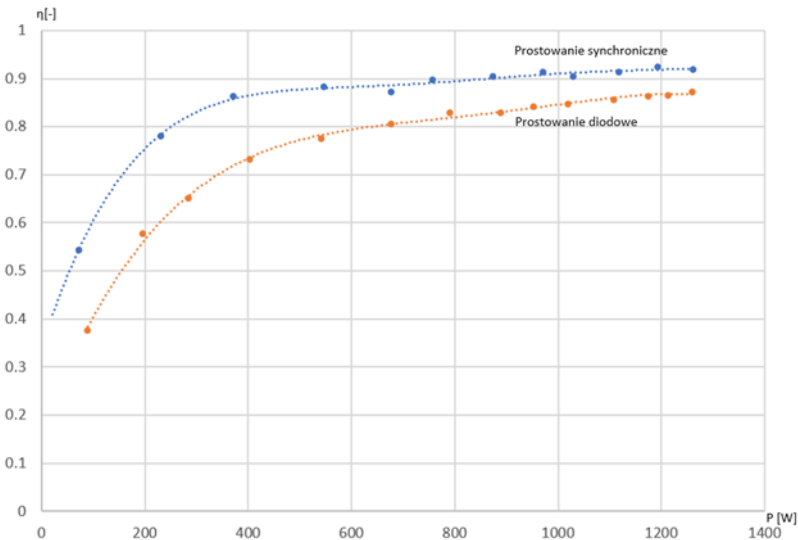


Rys. 6. Przebiegi sterujące, napięcia oraz prąd przetwornicy DC/DC: V_t – napięcie na transformatorze, I_{ltk} – prąd transformatora, I_{out} – prąd wyjściowy, D – współczynnik wypełnienia sygnałów prostowania synchronicznego, φ – przesunięcie fazowe między mostkami, D0–D3– sygnały sterujące mostkiem strony pierwotnej, D4–D7 – sygnały sterujące mostkiem strony wtórnej.

Wraz ze wzrostem napięcia na wyjściu przetwornicy, zmienia się krzywa opadania prądu. Pomimo utrzymywania stałego prądu na wyjściu przetwornicy, przechodzi ona w tryb prądu nieciągłego. Dzieje się tak dlatego, że wzrasta

napięcie na pojemności będącej obciążeniem przetwornicy i jednocześnie, aby utrzymać stały prąd wyjściowy, przetwornica zwiększa współczynnik wypełnienia D . Zgodnie z równaniem (5), te dwie wielkości będą powodowały zmiany wartości prądu krytycznego. Widać, że na rysunku 6. b) następuje przejście do pracy z prądem nieciągłym: współczynnik wypełnienia D zostaje drastycznie zredukowany, i jednocześnie $\varphi = 0$. Przy przejściu prądu przez zero widać oscylację, wynikającą z rezonansu pomiędzy indukcyjnością rozproszenia, a pojemnościami pasożytniczymi tranzystorów.

Na podstawie pomiarów została wyznaczona sprawność η układu, podczas pracy z prostowaniem diodowym oraz z prostowaniem synchronicznym (Rys. 7).



Rys. 7. Wykres sprawności dla prostowania synchronicznego oraz diodowego

Wykorzystując równania 1–4 obliczono straty dla warunków podczas ładowania kondensatora ($I_{out} = 18 \text{ A}$, $V_{out} = 60 \text{ V}$). Wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Obliczenia strat w mostku strony wtórnej podczas ładowania kondensatora

	Prostowanie diodowe	Prostowanie tranzystorowe
Straty przewodzenia [W]	100,8	3,56
Straty przełączania [W]	5,92	2,10
Suma	106,72	5.66

Obliczone straty są zgodne z uzyskanymi wynikami: dla podanych warunków przetwornica DC/DC pobierała około 100 W więcej podczas pracy z prostowaniem diodowym. Rozbieżności wynikają z niepełnego przewodzenia przez tranzystor: tylko część prądu przejmowana jest przez tranzystor, jak widać na rysunku 6.

6. Podsumowanie

W artykule przeprowadzono analizę strat wynikających z zastosowanego sposobu prostowania w izolowanej przetwornicy DC/DC sterowanej przesunięciem fazowym. Dokonano wyboru sposobu prostowania synchronicznego oraz przeprowadzono jego implementację w układzie rzeczywistym. Przeprowadzono badania sprawności oraz poprawności działania w zależności od trybu pracy przetwornicy podczas procesu ładowania zasobnika energii. Ze względu na pracę przy obniżonym napięciu, straty w diodach znacząco przewyższają straty generowane przez prostowanie synchroniczne. Należy zwrócić jednak uwagę, że dla diod dominującymi stratami są straty przewodzenia, podczas gdy w przypadku tranzystorów, zwłaszcza przy wysokim napięciu to straty przełączania stanowią największy element i mogą przewyższać straty generowane przez diody. Stąd, bardzo częstą praktyką jest prostowanie diodowe przy niewielkich obciążeniach i załączanie prostowania synchronicznego podczas pracy z dużymi obciążeniami. Problemem z implementacją prostowania synchronicznego jest załączanie i wyłączanie tranzystorów prostownika. Rozwiązania samosterowania lub oparte o komparatory dają dobre wyniki i pozwalają na przejęcie praktycznie całości prądu z diód, ale są mało odporne na zakłócenia. Z kolei rozwiązania programowe wymagają złożonych obliczeń i rozbudowanego układu generacji sygnałów PWM. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie prostowania synchronicznego pozwala na poprawę sprawności przetwornicy DC/DC. Jednocześnie, mikroprocesowa realizacja prostowania synchronicznego wymaga szybkich obliczeń wykonywanych z taką samą częstotliwością jak obliczenia regulatora prądu, co wymusza zastosowanie bardzo szybkiego procesora sygnałowego.

Literatura

[1] Inoue S., Akagi H., *A Bidirectional DC–DC Converter for an Energy Storage System with Galvanic Isolation*, IEEE Transactions on Power Electronics 6(22), 2007.

[2] Hua B., Mi C., *Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC–DC converters using novel dual-phase-shift control*, IEEE Transactions on Power Electronics 23.6, 2008.

- [3] Zhao B., Yu Q. Sun W., *Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Power Distribution in Microgrid*, IEEE Transactions on Power Electronics 11(27), 2012.
- [4] Barlik, R., Nowak M., Grzejszczak P., *Power transfer analysis in a single phase dual active bridge*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences 61(4), 809—828, 2013.
- [5] Fatyga K., Zieliński D. *Comparison of main control strategies for DC/DC stage of bidirectional vehicle charger*, International Symposium on Electrical Machines (SME 2017). IEEE, 2017.
- [6] Lee W., Kim C., Moon G., Han S., *A New Phase-Shifted Full-Bridge Converter With Voltage-Doubler-Type Rectifier for High-Efficiency PDP Sustaining Power Module*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 6(55), 2008.
- [7] Kim J., Kim D., Kim C., Moon G., *A Simple Switching Control Technique for Improving Light Load Efficiency in a Phase-Shifted Full-Bridge Converter with a Server Power System*, IEEE Transactions on Power Electronics 4(29), 2014.
- [8] Jain A. K., Ayyanar R., *PWM control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification*, IEEE Transactions on Power Electronics 4(26), 2011.
- [9] Wang J. B., Chuang S., *A study of the interleaved buck derived converters*, 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, 2006.

Podziękowania

Badania laboratoryjne wspierane były ze środków projektu "Układ ładowania pojazdów elektrycznych zintegrowany z infrastrukturą oświetleniową - PLUGinEV", finansowanego z funduszy Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój Narodowego centrum Badań i Rozwoju Nr POIR.04.01.02-00-0052/16.

Symetryzacja sieci prosumenckich z wykorzystaniem czteroprzewodowego, hybrydowego przekształtnika z magazynem energii

Streszczenie: Artykuł przedstawia pracę przekształtnika do zastosowań prosumenckich z multi-rezonansowym algorytmem sterowania. Rozwiązanie to umożliwia niezależną kontrolę mocy czynnej i biernej dla każdej z faz, co dotychczas nie było spotykane w rozwiązaniach dostępnych na rynku. Realizacja takiego algorytmu została oparta o przekształtnik trójfazowy-czteroprzewodowy AC/DC 3f-4p do którego szyny DC dołączono źródło energii odnawialnej wraz z magazynem energii. W artykule przedstawiono cyfrową implementację algorytmu multi-rezonansowego oraz wyniki badań symulacyjnych, wykonane w programie MATLAB & Simulink.

Słowa kluczowe: przekształtnik czteroprzewodowy, symetryzacja sieci dystrybucyjnej, hybrydowy przekształtnik PV, magazynowanie energii

Symmetrization of prosumer networks using a four-wire hybrid converter with energy storage

Abstract: This article presents the operation of the prosumer converter applied with multi-resonant control algorithm. This solution allows independent control of active and reactive power for each of the phases, which was not previously found in solutions available on the market. The implementation of such an algorithm was based on a three-phase converter - four-wire AC / DC 3f-4p to which a DC bus was connected to a renewable energy source with energy storage. The article presents the digital implementation of the multi-resonance algorithm and the results of simulation tests made in MATLAB & Simulink.

Keywords: four-wire converter, utility grid symmetrization, hybrid PV converter, energy storage

1. Wstęp

Ze względu na rosnącą ilość urządzeń odbiorczych wyposażanych w zasilacze impulsowe, które stosowane są w gospodarstwach domowych, coraz częściej odbiorca energii elektrycznej widziany jest przez system elektroenergetyczny jako odbiór o charakterze nieliniowym. Z drugiej strony, ten sam odbiorca staje się wytwórcą energii elektrycznej, jeżeli posiada np. swoje fotowoltaiczne źródło energii. Tym samym przestaje być pasywnym

*l.kwasny@pollub.pl, Politechnika Lubelska, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

odbiorcą energii i staje się aktywnym prosumentem [1,2], który może wpływać na jakość energii przepływającej pomiędzy gospodarstwem domowym a systemem elektroenergetycznym. W przypadku pracy prosumenta na sieć sztywną, wymagane jest, aby algorytm sterowania przekształtnikiem utrzymywał THD prądu poniżej określonego normą progu. Spełnienie tego kryterium może być problematyczne w przypadku nasycenia sieci nieliniowymi odbiorami energii oraz rozproszonymi źródłami energii o małej mocy. Ponadto duża liczba niesterowanych źródeł może również przyczynić się do znaczących zmian amplitud napięć w poszczególnych fazach systemu elektroenergetycznego. Zatem powstaje potrzeba opracowania algorytmu sterowania przekształtnikiem tak, aby nieliniowy charakter odbiorów oraz zakłócenia pochodzące z sieci miały ograniczony wpływ na THD prądu generowanego na wyjściu przekształtnika, a także miał możliwość wpływania na amplitudy napięć poszczególnych faz. Celem niniejszego artykułu jest opracowanie algorytmu sterowania przekształtnikiem, który będzie w stanie warunki te spełnić. Rozpatrywanym rozwiązaniem jest algorytm oparty o regulatory proporcjonalno-rezonansowe oraz filtry pasmowo-przepustowe, których zadaniem jest selektywna eliminacja wyższych harmonicznych oraz niezależne sterowanie mocą faz. Przeprowadzono analizę układu sterowania oraz wyprowadzono opis matematyczny regulatora. Przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem środowiska Matlab/SIMULINK, dzięki którym odwzorowano układ pracy przekształtnika z siecią o silnej asymetrii obciążenia poszczególnych faz.

2. Problem postępującej desymetryzacji sieci dystrybucyjnej nN

Postępujący rozwój instalacji prosumenckich przyczynia się w niektórych przypadkach do znacznego pogorszenia jakości energii elektrycznej w sieci dystrybucyjnej poprzez pogłębianie asymetrii pomiędzy poszczególnymi fazami. Przyczyną takiej sytuacji jest fakt, że większość montowanych obecnie instalacji prosumenckich nie przekracza mocy 3 kWp, przez co w znaczącej większości przypadków są to instalacje jednofazowe. Przykładowe rozwiązania falowników do współpracy z siecią elektroenergetyczną prezentuje Tabela 1.

Tabela 1 Jednofazowe przekształtniki do współpracy z siecią elektroenergetyczną

	Moc[kW]	Prąd wyjściowy [A]	Napięcie PV [V]	η [-]	$\cos\phi$ [-]
Fronius	3	13	165–550	0.954	0,85–1
SMA	3	16	110–500	0,97	0,8
Zeversolar	3	15	70–520	0,975	0,8

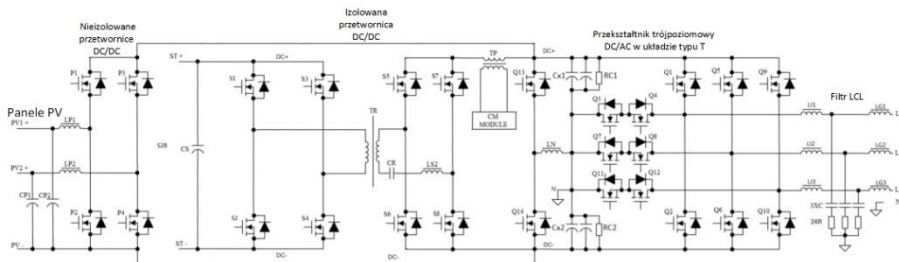
Obecnie na terenie sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia nie prowadzi się audytów obciążenia poszczególnych faz systemu. Brakuje przez to informacji, pozwalających zainstalować przekształtnik w sposób optymalny dla systemu dystrybucyjnego. W skrajnych przypadkach przekształtnik, będąc zainstalowanym w najmniej obciążonej fazie, dodatkowo podnosi jej napięcie, pogłębiając asymetrię pomiędzy swoją a najbardziej obciążoną fazą. Dodatkowym problemem jest niskie obciążenie sieci w momencie największej generacji – w południe, w czasie, kiedy w gospodarstwach domowych nie pracują odbiorniki. W niekorzystnych warunkach może dojść do sytuacji, że transformator SN/nN pracuje w kierunku przeciwnym, a podwyższone napięcie powoduje degenerację odbiorników elektrycznych i podwyższone straty w transformatorze.

Obecnie stosowane przekształtniki jednofazowe nie posiadają możliwości zarządzania generacją mocy. Podstawowo realizują algorytm MPPT – śledzenia maksymalnego punktu mocy panelu fotowoltaicznego (maximum power point tracking). Taka strategia jest korzystna z punktu widzenia ekonomicznego prosumenta, ponieważ pozwala w maksymalny sposób wykorzystać jego instalację fotowoltaiczną, natomiast z punktu widzenia operatora sieci elektroenergetycznej jest w pewnych przypadkach szkodliwa – ze względu na brak kontroli nad parametrami generowanej energii. Dodatkowo, takie przekształtniki mogą powodować zagrożenie dla innych użytkowników sieci. Aby umożliwić wpływanie przekształtnika na ilość energii wprowadzanej do sieci konieczne jest wprowadzenie układu z zasobnikiem energii, który pełni rolę bufora, magazynującego nadmiarową ilość energii. Pozwala to przesuwając pobieranie oraz oddawanie energii do sieci na bardziej korzystne dla systemu elektroenergetycznego pory dnia. Rozwinięciem układu jednofazowego z buforowym magazynem energii jest rozbudowa do układu trójfazowego czteroprzewodowego. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest nie tylko magazynowanie energii, ale też przekierowywanie generacji na fazę o najniższym napięciu, co prowadzi do zmniejszenia niesymetrii między poszczególnymi fazami. Zastosowanie przekształtnika czteroprzewodowego daje techniczną możliwość jednoczesnego dociążania fazy o najwyższym napięciu oraz generacji do fazy o najniższym napięciu. W takiej sytuacji można mówić o jednoczesnej pracy falownikowej i prostownikowej układu przekształtnikowego (Rys. 6). Powyższe rozwiązanie zostanie omówione w kolejnym rozdziale.

3. Układ czteroprzewodowego hybrydowego przekształtnika multirezonansowego

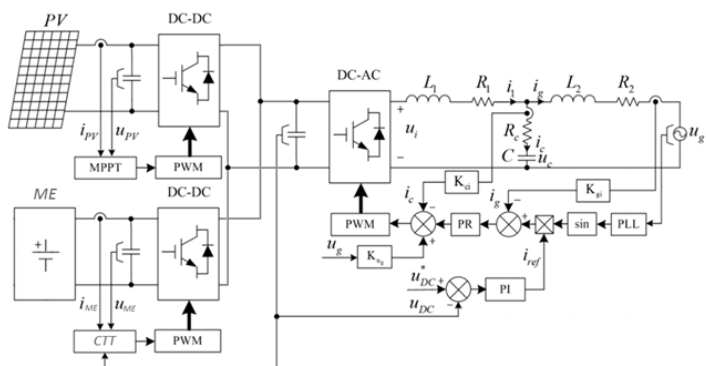
Schemat ideowy hybrydowego przekształtnika multirezonansowego (Rys. 1) zbudowany jest z przetwornic DC/DC podwyższających napięcie, stanowiących interfejs pomiędzy panelami fotowoltaicznymi a główną szyną DC

przekształtnika DC/AC. Równolegle do wyjścia tych przetwornic dołączona jest izolowana przetwornica DC/DC w postaci dwóch mostków jednofazowych połączonych poprzez transformator średniej częstotliwości. Układ ten stanowi interfejs pomiędzy główną szyną DC przekształtnika a zasobnikiem elektrochemicznym, dołączonym do zacisków ST+ i ST-. Przekształtnik DC/AC zrealizowany jest w postaci trójpoziomowego przekształtnika w układzie typu T [3]. Dodatkowo wprowadzony jest czwarty przewód, pełniący rolę przewodu neutralnego. Zrealizowany jest przez podzielenie napięcia szyny DC przekształtnika na pół poprzez połączenie szeregowo kondensatorów Cx1, Cx2. Jednocześnie, środek szyny DC połączony jest poprzez indukcyjność LN do tranzystorów Q13, Q14. Dzięki temu możliwe jest utrzymywanie stałego napięcia na środku szyny DC, poprzez rozładowywanie pojemności Cx1 lub Cx2 z wykorzystaniem indukcyjności LN. W przypadku wzrostu napięcia na pojemności Cx2 tranzystor Q14 zacznie kluczkować, powodując zwieranie tej pojemności przez indukcyjność LN do bieguna ujemnego szyny DC, powodując jej rozładowanie. Jednocześnie, ze względu na zjawisko samoindukcji, wzrośnie napięcie na pojemności Cx1. Dzięki rozładowaniu jednej z pojemności i podbiciu napięcia drugiej z nich nastąpi szybki powrót do stanu równowagi – utrzymywania napięcia $V_{DC}/2$ w czwartej gałęzi przekształtnika. Na wyjściu przekształtnika znajduje się filtr, którego zadaniem jest uformowanie z napięcia trójpoziomowego napięcia jak najbardziej zbliżonego do przebiegu sinusoidalnego 50 Hz.



Rys. 1. Układ hybrydowego przekształtnika DC/AC w układzie trójfazowym czteroprzewodowym

Ze względu na fakt, że każda z faz przekształtnika ma być sterowana niezależnie do celów dalszej analizy i opracowania sposobu sterowania układ uproszczono do układu jednofazowego, który następnie został trzykrotnie powielony podczas badań symulacyjnych.



Rys. 2 Uproszczony algorytm multirezonansowego sterowania przekształtnikiem – 1faza

Układ hybrydowego przekształtnika AC/DC wraz z magazynem energii oraz panelem fotowoltaicznym przedstawiony jest na rysunku 2. W układzie tym zaprezentowane jest sterowanie multirezonansowe dla napięcia jednofazowego. Aby zbudować układ sterowania trójfazowego, należy powielić algorytm sterowania jednofazowego, aby trzy napięcia sterowane były niezależnie oraz wprowadzić czwartą gałąź przekształtnika pełniącą rolę przewodu neutralnego. Do głównej szyny przekształtnika AC/DC dołączone są równolegle poprzez niezależne przetwornice DC/DC łańcuch paneli fotowoltaicznych oraz elektrochemiczny magazyn energii niskiego napięcia. Izolowana przetwornica DC/DC połączona do paneli PV sterowana jest poprzez algorytm MPPT [4], którego zadaniem jest maksymalizacja uzysku energetycznego. Ilość energii generowanej przez panele fotowoltaiczne jest zależna od warunków nasłonecznienia i jest zjawiskiem stochastycznym. Aby zapewnić stałość parametrów napięcia głównej szyny przekształtnika DC–AC zastosowano dodatkową dwukierunkową izolowaną przetwornicę DC/DC, zapewniającą separację galwaniczną pomiędzy niskonapięciowym magazynem energii a siecią elektroenergetyczną [5]. Podstawowe parametry układu przedstawiono w tabeli 2.

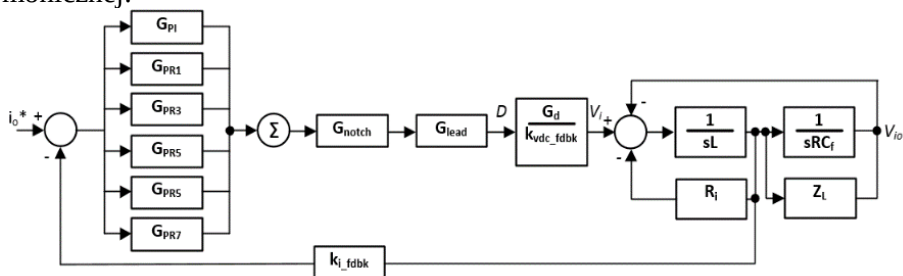
Tabela 2. Parametry układu hybrydowego przekształtnika AC/DC

Moc wyjściowa układu [kW]	10
Częstotliwość kluczkowania modułów AC/DC [kHz]	10
Częstotliwość kluczkowania modułów DC/DC [kHz]	50
Napięcie szyny DC przekształtnika [V]	650
Napięcie paneli fotowoltaicznych w stanie jałowym [V]	400
Znamionowe napięcie magazynu energii [V]	48
Pojemność szyny DC [mF]	100
Częstotliwość odcięcia filtra wyjściowego LCL [kHz]	4
THD _i (przy obciążeniu powyżej 50%) [%]	<2

Przetwornica DC/DC sprzężona z magazynem energii sterowana jest jako podwójny mostek aktywny (dual active bridge – DAB) [6]. Zadaniem tej przetwornicy jest utrzymanie stałego napięcia głównej szyny przekształtnika poprzez odbiór nadmiaru energii generowanej przez panel i nie przetwarzanej przez przekształtnik DC/AC lub dostarczenie energii, gdy energia generowana przez panel fotowoltaiczny jest niewystarczająca do pokrycia bieżących potrzeb energetycznych.

Zadaniem przekształtnika DC/AC jest dostarczanie energii o jak najlepszych parametrach do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia. Z tego względu zastosowany jest filtr LCL na wyjściu przekształtnika, dostrojony tak, aby eliminować zakłócenia pochodzące min. od przełączania kluczy tranzystorowych. Aby możliwa była kontrola mocy czynnej i biernej na wyjściu przekształtnika wymagana jest poprawna i pewna synchronizacja z siecią dystrybucyjną [7]. Celem synchronizacji zaproponowano zastosowanie algorytmu SRF–PLL [8,9,10], który działa w oparciu o sprzężenie zwrotne, dzięki czemu jest w stanie dostarczyć sygnał synchronizacji o wysokich parametrach jakościowych nawet w przypadku silnych zaburzeń występujących w sieci elektroenergetycznej [11].

Piłokształtny sygnał synchronizacji przyjmujący wartości w zakresie $<0, 2\pi>$ jest przeliczany na referencyjny sygnał sinusoidalny o amplitudzie 1. Wartość referencyjną prądu przekształtnika wyliczana jest na podstawie aktualnego napięcia szyny DC przekształtnika i przemnażana jest przez uprzednio wygenerowany sygnał sinusoidalny. Błąd prądu przekształtnika eliminowany jest do zera poprzez zastosowanie regulatora proporcjonalno-rezonansowego [12], którego częstotliwość rezonansowa równa jest częstotliwości sieci elektroenergetycznej. W ten sposób wzmacniany jest tylko sygnał podstawowej harmonicznej.



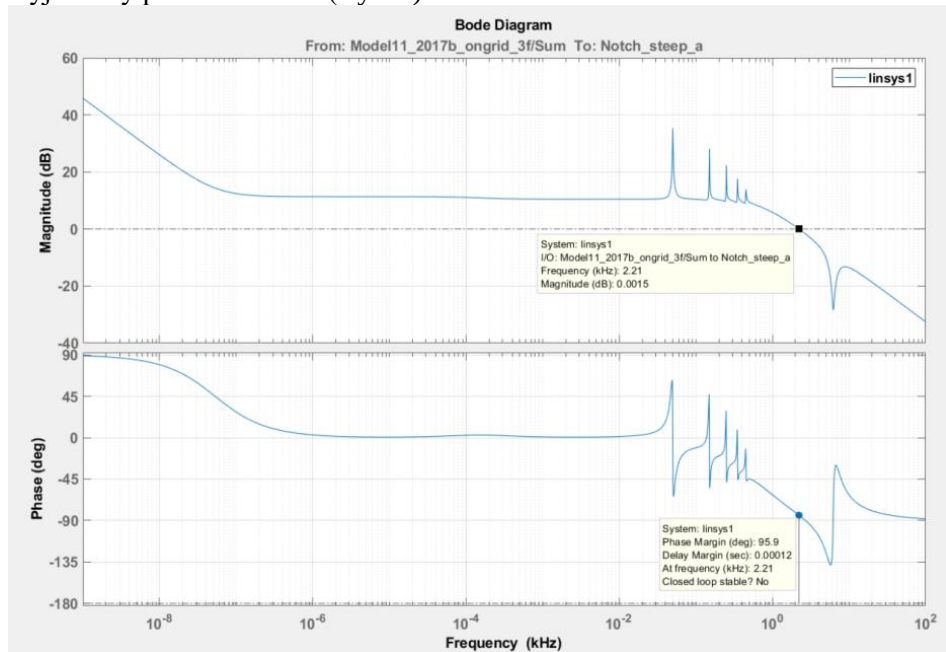
Rys.3 Model matematyczny multirezonansowego sterowania przekształtnikiem. G_{PI} – regulator PI, G_{PRI-7} – regulatory proporcjonalno rezonansowe poszczególnych harmonicznych, G_{notch} – filtr karbu, G_{lead} – kompensator lead-lag, $\frac{G_d}{k_{vdc_fdbk}}$ – wzmacnienie przekształtnika, $\frac{1}{sL}, \frac{1}{sRC_f}$, R_i, Z_L – poszczególne elementy filtru LCL, k_{i_fdbk} – pętla sprzężenia zwrotnego

Ze względu na obecność wyższych harmonicznych w sieci elektroenergetycznej zaproponowano rozwiązanie regulatora multirezonansowego, który składa się z wielu regulatorów proporcjonalno rezonansowych połączonych równolegle. Takie podejście przedstawione jest na rysunku 3.

Transmitancja operatorowa regulatora w układzie z rysunku 3 opisana jest następującym równaniem (od wejścia uchybu prądu do wyjścia do przekształtnika:

$$G \left(K \frac{(s \ 0)}{\Sigma \text{ —————}} \right) G \quad (1)$$

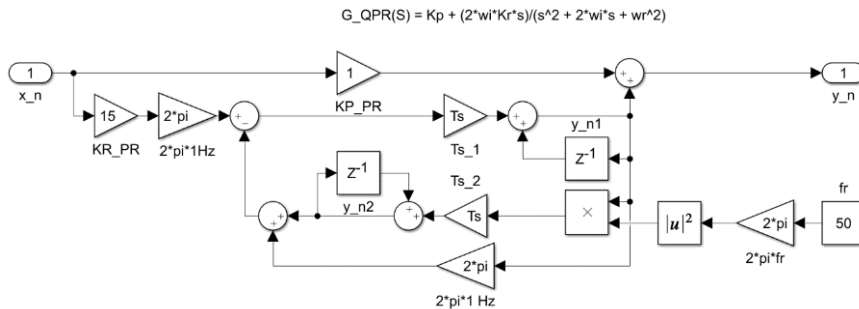
Na podstawie równania transmitancji operatorowej (1) wyznaczono charakterystykę amplitudowo-fazową układu sterowania uwzględniającą filtr wyjściowy przekształtnika (Rys. 4).



Rys.4 Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe obiektu ze sterowaniem multirezonansowym

Dla sygnałów wolnozmiennych układ ma charakter proporcjonalno-całkujący, natomiast charakterystycznym dla tego układu jest grzebień wzmocnień o określonych częstotliwościach. Grzebień ten odpowiada częstotliwościom charakterystycznych dla systemu elektroenergetycznego harmonicznych: pierwszą, trzecią, piątą, siódmą i dziewiątą. Powyżej tych częstotliwości, układ ma charakter

dolnoprzepustowy z dodatkowym filtrem karbowym [13], który nastrojony jest na eliminowanie częstotliwości rezonansowej filtru wyjściowego LCL. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych powyższy model został zdyskretyzowany i zaimplementowany w środowisku Matlab-Simulink. Na rysunku H przedstawiono jeden z regulatorów proporcjonalno rezonansowych zaimplementowanych w wymienionym oprogramowaniu. Parametry poszczególnych regulatorów przyjęto tak, aby uzyskać maksymalne wzmocnienie harmonicznnej dla określonej częstotliwości, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniego zapasu fazy. Jednocześnie filtry dostrojone są tak, aby dopuszczać niewielkie dewiacje częstotliwości w przedziale 3 Hz, zachowując w tym zakresie wzmocnienie. Jest to swoisty kompromis pomiędzy maksymalnym wzmocnieniem a marginesem błędu wynikającym z niewielkich odchyłek częstotliwości sieci elektroenergetycznej.



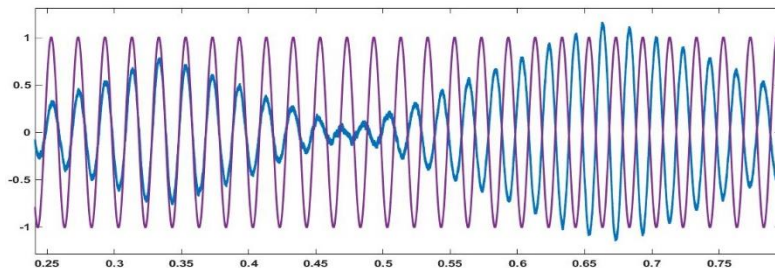
Rys.5 Implementacja cyfrowa algorytmu transmitancji rezonansowej G_{PR1}

Zaproponowane rozwiązanie sterowania pozwala, w zależności od znaku uchybu regulacji napięcia na głównej szynie przekształtnika, oddawać energię do sieci elektroenergetycznej lub ją z niej pobierać. Zastosowanie sterowania multirezonansowego wraz z filtrem wyjściowym LCL zapewnia uzyskanie bardzo dobrej dynamiki układu, bardzo małego błędu ustalonego oraz THD_i na poziomie poniżej 1% przy obciążeniu powyżej 50% obciążenia znamionowego przekształtnika.

4. Wyniki badań symulacyjnych

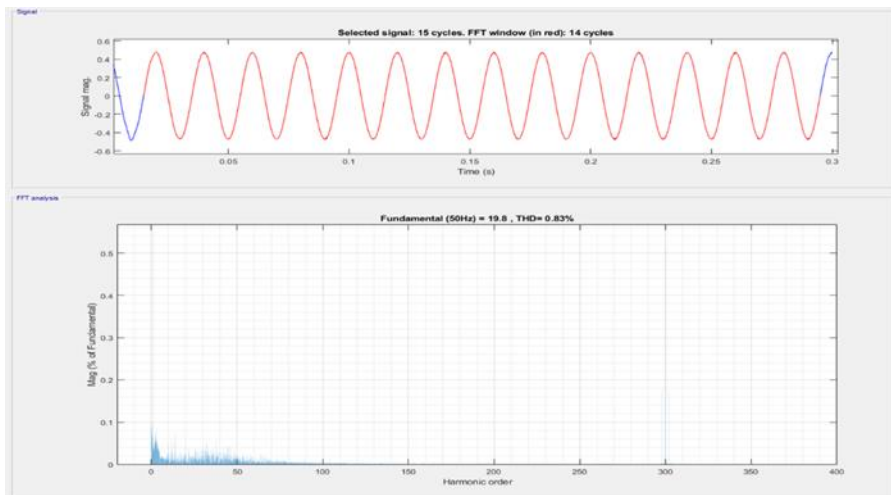
Zaproponowane rozwiązanie w postaci przekształtnika czteroprzewodowego wraz z regulatorem multirezonansowym zostało zaimplementowane w środowisku symulacyjnym Matlab/Simulink. Przeprowadzono badanie określające możliwość transferu mocy czynnej w obydwu kierunkach oraz płynnego przejścia między pracą falownikową a prostownikową. Następnie zbadano poprawność pracy układu przy niezależnym sterowaniu mocą czynną oraz bierną każdej z faz.

Rysunek 6 przedstawia przebiegi napięcia oraz prądu dla fazy A przekształtnika czteroprzewodowego. Dla tego przypadku w fazach B oraz C nie było żadnej generacji.



Rys. 6 Przejęcie z pracy prostownikowej do falownikowej przekształtnika 3f–4p (tryb pracy sieciowej).

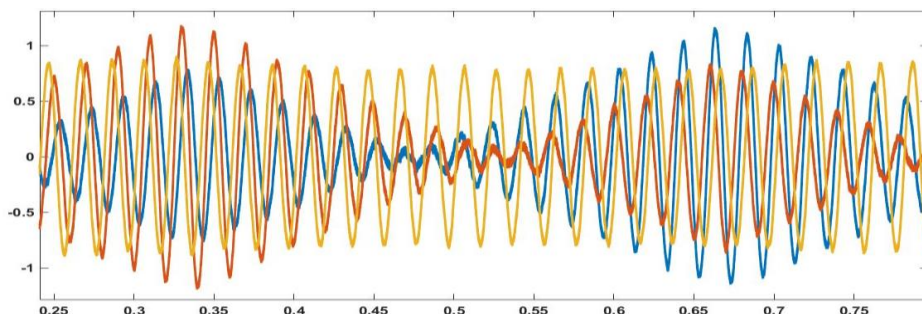
Podczas badania moc zadawana do falownika zmieniała się w sposób płynny, przechodząc od pracy falownikowej do pracy prostownikowej. Z powodu zastosowania sterowania multirezonansowego uzyskano selektywną eliminację składowych przeciwnych (trzecią, piątą, siódmą i dziewiątą), co w konsekwencji ma przełożenie na bardzo wysoką dynamikę układu oraz wysoką jakość prądu, którą potwierdza niski współczynnik THDi (Rys. 7).



Rys 7. Analiza THD prądu w jednej fazie

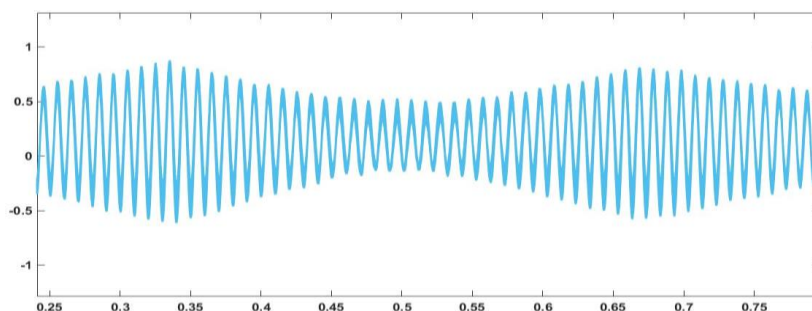
Kolejnym badaniem było niezależne sterowanie mocą czynną i bierną każdej z faz przekształtnika. Podczas badań doprowadzono do takiej sytuacji, że jedna z faz pracowała w trybie prostownikowym, a pozostałe dwie pracowały w trybie

falownikowym. Również w tym przypadku, dwie z faz zmieniały swój tryb pracy, przechodząc z pracy falownikowej na prostownikową.



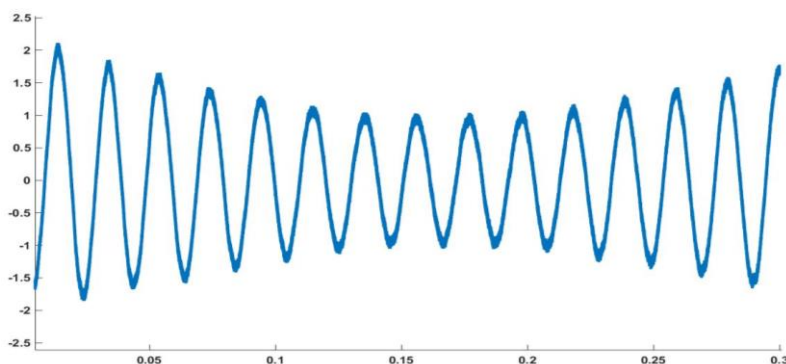
Rys. 8 Niezależne sterowanie mocą we wszystkich fazach przekształtnika 3f-4p(tryb pracy sieciowej)

Konsekwencją takiego sterowania są pulsacje prądu szyny DC przekształtnika DC/AC (Rys. 9). Pulsacje te mają częstotliwość 100 Hz, przyjmują amplitudy od $-0,7$ do $1,0$ [pu] prądu znamionowego falownika. Taka pulsacja prądu w przypadku szyny DC o małej pojemności lub braku magazynu energii powodowałaby pulsacje napięcia i w konsekwencji zwiększoną liczbę harmonicznych na wyjściu i niestabilną pracę całego przekształtnika. Kolejnym problemem jest fakt, że w omawianym modelu pulsacja prądu przejmowana jest przez magazyn energii. Dla źródeł elektrochemicznych ciągle cykle ładowania i rozładowania z częstotliwością 100 Hz jest niedopuszczalne, ze względu na drastyczne skrócenie cyklu życia takiego zasobnika.



Rys. 9 Prąd szyny DC ma charakter przemienny, pulsuje z częstotliwością 100 Hz.

Omawiany na rysunek 8 przypadek nie jest przypadkiem symetrycznym – suma prądów poszczególnych faz nie jest równa zero. Powoduje to przepływ prądu przewodem neutralnym czwartej gałęzi przekształtnika sięgającym wartości $2,0$ [pu] prądu znamionowego przekształtnika (Rys 10).



Rys. 10 Prąd przewodu N przekształtnika podczas niezależnego sterowania mocą faz (tryb pracy sieciowej).

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę symetryzacji sieci dystrybucyjnych nN z wykorzystaniem źródeł generacji rozproszonej. Analiza rynku wykazała, że większość instalacji prosumenckich jest jednofazowa. Ponadto stwierdzono, że brak ewidencjonowania obciążeń poszczególnych faz sieci niskich napięć powoduje pogarszanie warunków zasilania w sieciach dystrybucyjnych przesycanych instalacjami odnawialnymi. W artykule zaprezentowano rozwiązanie problemu w postaci przekształtnika czteroprzewodowego wyposażonego w magazyn energii. Jako sterowanie zaproponowano implementację cyfrową multirezonansowego algorytmu. Słuszność zastosowanego algorytmu potwierdzono wynikami symulacyjnymi. Dzięki algorytmowi eliminującemu poszczególne, charakterystyczne dla sieci niskiego napięcia harmoniczne uzyskano układ o bardzo niskim współczynniku THDi wynoszącym mniej niż 0,83% dla obciążeń powyżej 50% obciążenia znamionowego. Podczas prowadzonych badań sformułowano wniosek, że istnieje możliwość niezależnego sterowania mocą bierną i czynną w każdej z faz przekształtnika dzięki zastosowanemu multirezonansowego algorytmu sterowania. Niestety, taka strategia sterowania pociąga za sobą konsekwencje, które nie występują w przypadku układów jednofazowych, lub trójfazowych symetrycznych. Pierwszym mankamentem zaproponowanego układu jest przepływ energii poprzez przewód neutralny w sytuacji, gdy suma prądów poszczególnych faz nie jest równa zero.

W artykule zaprezentowany został skrajny przypadek generowania różnoimiennej mocy czynnej w dwóch fazach. Dla tego przypadku uzyskano maksymalny prąd przewodu neutralnego równy dwukrotności prądu znamionowego przekształtnika. Omawiany przypadek nie stanowi problemu, dla podzespołów energoelektronicznych, ponieważ zastosowanie tranzystorów

w przewodzie neutralnym o podwyższonej wydajności prądowej nie jest barierą. Poważniejszym problemem dla tych warunków pracy jest pojawienie się pulsacji prądu na szynie DC przekształtnika. Taka sytuacja jest groźna ze względu na współpracujące z linią DC magazyny energii. Stwierdzono, że przedłużająca się praca takiego magazynu energii z prądem pulsującym prowadzi do przyspieszonej degradacji źródła elektrochemicznego. Sprawność takiego magazynu również może ulec obniżeniu, ponieważ procesy elektrochemiczne zachodzące w celi litowo-jonowej są obciążone dużą inercją, stąd wykazane szybkie zmiany prądu powodują wydzielanie się dużej ilości ciepła w wyniku dodatkowych strat w bateriach. Potencjalnym rozwiązaniem, wymagającym dalszych badań jest zastosowanie dodatkowej, równoległej przetwornicy DC/DC z buforem w postaci superkondensatora. Niestety, takie rozwiązanie znacząco komplikuje układ oraz zwiększa całkowity koszt instalacji prosumenckiej. Niemniej jednak prezentowane rozwiązanie stanowi alternatywę dla obecnych, niesterowanych układów prosumenckich i w przyszłości z powodu dużej liczby źródeł generacji rozproszonej może się stać niezbędne do zachowania symetrii w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia.

Literatura

[1] Grijalva S., Costley M., Ainsworth N., *Prosumer-based control architecture for the future electricity grid*, 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Denver, USA, 2011.

[2] Zielińska K., Zieliński D. *Influence of power converters on increasing the share of renewable energy sources*, Acta Energetica 1, 125–131, 2016.

[3] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Wu B., Rodriguez J., Perez M. A., Leon J. I., *Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 8(57), 2010.

[4] de Brito M. A. G., Galotto L., Sampaio L. P., e Melo G. d. A., Canesin C. A., *Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 3(60), 2013.

[5] Innoue S., Akagi H., *A Bidirectional DC–DC Converter for an Energy Storage System with Galvanic Isolation*, IEEE Transactions on Power Electronics 6(22), 2007.

[6] Barlik, R., Nowak M., Grzeszczak P., *Power transfer analysis in a single phase dual active bridge*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences 61(4), 809–828, 2013.

[7] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A.V. *Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems*, IEEE Transactions on industrial electronics 53(5), 2006.

[8] Rodriguez P., Pou J., Bergas J., Candela J. I., Burgos R. P., Boroyevich D., *Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control*, IEEE Transactions on Power Electronics 22(2), 2007.

[9] Silva S. M., Lopes B. M., Filho B. J. C., Campana R. P. Bosventura W. C., *Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems*, Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. t. 4 Seattle, USA, IEEE, 2004.

[10] Nicastrì A., Nagliero A., *Comparison and evaluation of the PLL techniques for the design of the grid-connected inverter systems*, 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, IEEE, 2010.

[11] Jarzyna W., Zieliński D., Zielińska K., Fatyga K., *Reduction of voltage and power oscillation in the two-phase shorting of a grid inverter*, 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, IEEE, 2017.

[12] Teodorescu, R., Blaabjerg F., Liserre M. Loh P.C. *Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters*, IEEE Proceedings-Electric Power Applications 153(5), 2006.

[13] Zieliński D., Lipnicki P., Jarzyna W., *Synchronization of voltage frequency converters with the grid in the presence of notching*, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering 34(3), 657–673, 2015.

Podziękowania

Badania laboratoryjne wspierane były ze środków projektu "Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli Prosument - Aktywny Prosument", finansowanego z funduszy Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój Narodowego centrum Badań i Rozwoju Nr POIR.04.01.02-00-0007/17.

Barwnikowe ogniwa słoneczne – przyszłość energetyki odnawialnej XXI wieku?

Streszczenie: Zapewnienie przyszłym pokoleniom wystarczającej ilości energii pochodzącej ze spalania paliw kopalnych stanie się wkrótce niemożliwe. Dlatego zwiększenie udziału odnawialnych źródeł w globalnej konsumpcji energii elektrycznej jest obowiązkiem krajów członkowskich Unii Europejskiej. Obiecującym rozwiązaniem jest fotowoltaika, umożliwiającą produkcję darmowej i czystej energii. Ogniwa barwnikowe stanowiące III generację ogniw słonecznych są technologią przyszłości charakteryzującą się stosunkowo wysoką sprawnością przy niskich kosztach produkcji.

Słowa kluczowe: ogniwa barwnikowe, DSSC, ogniwa słoneczne, fotowoltaika, PV

Dye Sensitized Solar Cells – the future of renewable energy in 21st century?

Abstract: It will become impossible to ensure a sufficient amount of energy received from fossil fuels combustion to meet the needs of future generations in a short-term perspective. Therefore, increasing the share of renewable sources in global electricity consumption is the responsibility of the European Union Member States. A promising solution is photovoltaics, which enables the production of free and clean energy. Dye sensitized solar cells (DSSC), representing the 3rd generation of solar cells, are the technology of the future which are characterized by relatively high efficiency value at low production costs.

Keywords: dye sensitized solar cells, DSSC, solar cells, photovoltaics, PV

1. Wstęp

Jakość życia ludzkiego zależy w dużej mierze od dostępności energii elektrycznej. Obecnie eksploatowane źródła energii oparte są przede wszystkim na nieodnawialnych źródłach energii – paliwach kopalnych [1], przede wszystkim węgla [2], które w niedługim czasie mogą ulec wyczerpaniu. Dlatego też, w ostatnich latach zauważono intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE; ŹŹE), zarówno w Polsce, jak i na świecie. Nie bez znaczenia są też klimatyczne konsekwencje spalania czyli emisja gazów cieplarnianych z paliw kopalnych, która doprowadziła do pogłębienia efektu cieplarnianego oraz globalnego ocieplenia [3]. Z uwagi na to, świat potrzebuje długofalowej strategii rozwoju energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł energii oraz

*e.krawczak@polub.pl, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

zrównoważonej polityki energetycznej, aby zaspokoić wciąż rosnące potrzeby konsumentów [4].

1.1. Dokumenty legislacyjne dotyczące odnawialnych źródeł energii

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych na obszarze Unii Europejskiej (UE) stanowi jeden z najważniejszych dokumentów legislacyjnych regulujących wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (OZE) [5]. Zgodnie z Dyrektywą każde państwo członkowskie zobowiązane jest do przyjęcia krajowego planu działania dotyczącego wykorzystania energii OZE, a co za tym idzie określenia jaki udział energii ze źródeł odnawialnych będzie wykorzystany w następujących sektorach: transportowym, energii elektrycznej oraz ogrzewania i chłodzenia. Nadrzędnym celem Dyrektywy jest wzrost udziału odnawialnych źródeł energii do 20% w całkowitym zużyciu energii w UE do 2020 roku, w tym wzrost udziału biopaliw w ogólnym zużyciu benzyny i oleju napędowego w transporcie do poziomu wynoszącego 10%. Jednakże, założone cele dla każdego kraju członkowskiego Unii Europejskiej są inne i zależą one od progu wyjściowego odnoszącego się do produkcji energii odnawialnej i możliwości jej rozwinięcia. Cel ogólny dla Polski wynosi 15%, Niemiec 18%, Portugalii 32%, natomiast dla Szwecji udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto do roku 2020 został ustalony na poziomie 49%. Dyrektywa wraz z innymi środkami prawnymi określana jest jako tzw. pakiet energetyczno-klimatyczny, którego głównymi założeniami jest 20% ograniczenie emisji szkodliwych gazów cieplarnianych do atmosfery, w porównaniu do poziomu z roku 1990, 20% wzrost efektywności energetycznej oraz 20% udział energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii państw członkowskich. Działania w zakresie energetyki wiatrowej, słonecznej, produkcji biogazu, biomasy oraz w sektorze biopaliw transportowych wydają się mieć kluczowy wpływ na dotrzymanie założonych w pakiecie energetyczno-klimatycznym celów. 9 stycznia 2019 r. Polska przedłożyła projekt zintegrowanego krajowego planu w dziedzinie energii i klimatu, który ma za zadanie zintegrowanie krajowych planów państw członkowskich, jak również ich wdrożenie. 18 czerwca 2019 r. ukazał się dokument noszący nazwę „Zalecenie Komisji z dnia 18.6.2019 r. w sprawie projektu zintegrowanego krajowego planu w dziedzinie energii i klimatu w Polsce obejmującego lata 2021–2030”. Zalecenia Komisji Europejskiej wymuszają na Polsce jako kraju członkowskim UE podjęcie zintensyfikowanych działań celem osiągnięcia wspólnego przedmiotowego celu. W dokumencie tym można znaleźć dziesięć głównych zaleceń, które Polska powinna niezwłocznie podjąć. Na podstawie „Zaleceń Komisji” Polska jest zobligowana do zapewnienia pełnej realizacji postanowień z pakietu energetyczno-klimatycznego. Wśród nich na uwagę zasługuje zalecenie w zakresie energii ze źródeł odnawialnych, które wymusza

ustanowienie docelowego poziomu udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitym zużyciu energii w UE dla roku 2020, jako poziomu bazowego od 2021 roku, czy też zalecenia w sprawie rozwiązania problemu dotyczącego emisji gazów cieplarnianych w odniesieniu do sektorów nieobjętych unijnym systemem handlu uprawnieniami do emisji. W 2014 roku został opracowany pakiet energetyczno-klimatyczny na lata 2021–2030. Określa on ograniczenie emisji szkodliwych gazów do atmosfery o 40% w porównaniu do roku 1990, poprawę efektywności energetycznej oraz przynajmniej 27% udziału źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii. Polska zadeklarowała udział odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii brutto rozumiane jako zużycie łączne dla elektroenergetyki, ciepłownictwa i chłodnictwa, oraz na cele transportowe na poziomie 21%. Pozwoli to na zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego. W roku 2016 udział ten był na poziomie 11,3% [6].

1.2. Paliwa kopalne oraz negatywne skutki ich spalania

Kolejnym aspektem, który zmusza społeczeństwo do wzrostu zainteresowania alternatywnymi źródłami energii jest wyczerpywanie się zasobów paliw kopalnych, takich jak węgiel, olej czy też gaz, które stanowią obecnie główne źródła energii na Świecie. Datuje się, iż przy uwzględnieniu obecnego zapotrzebowania na energię elektryczną wykorzystanie oleju napędowego nastąpi w ciągu 40 lat, gazu naturalnego w ciągu 60 lat, natomiast węgla w 200 lat [7]. Dynamiczny rozwój przemysłu, a także rosnące zapotrzebowanie energetyczne prowadzi do uwalniania do atmosfery coraz to większej ilości gazów cieplarnianych, takich jak ditlenek węgla (CO_2), tlenek węgla (CO), ditlenek siarki (SO_2) czy też tlenki azotu (NO_x) w wyniku spalania paliw kopalnych. Rozwój gospodarczy nierozdzielnie łączy się ze wzrostem zużycia surowców, co przedkłada się na negatywne skutki środowiskowe. Nawet przy uwzględnieniu, iż procesy produkcyjne cały czas ulegają usprawnieniu, to i tak zużycie zasobów wzrasta. Wzrastające zużycie złóż nieodnawialnych prowadzi do ich wyczerpania. Wzrastająca konsumpcja powinna zostać zastąpiona przez konsumpcję zrównoważoną.

W 2017 roku odnotowano wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną o 2,1% w stosunku do roku poprzedniego i wynosiło ono 14 050 Mtoe. W roku 2016 nastąpił wzrost tylko o 0,9%, przy czym wzrost zapotrzebowania w ciągu ostatnich pięciu lat wynosił średnio 0,9%. Największy wzrost odnotowano dla Chin oraz dla Indii. 70% z całkowitego światowego zapotrzebowania energetycznego zostało pokryte energią wyprodukowaną z paliw kopalnych, 15% stanowiły odnawialne źródła energii, pozostałe potrzeby zostały pokryte energią z elektrowni nuklearnych. Przewiduje się, że do roku 2040 wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną wzrośnie o 90% [8]. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, odnotowano również wzrost o 1,4% emisji CO_2 , w stosunku do roku 2016, co stanowiło 460 Mt. Ilość uwalnianego do atmosfery ditlenku węgla wynosiła 32,5 Gt i jest to najwyższa zarejestrowana

wartość. Wzrost emisji CO₂ jest silnie powiązany ze wzrostem gospodarczym na świecie (+3,7%) oraz zmniejszeniem efektywności energetycznej. Jednakże w niektórych rejonach świata doszło do obniżenia emisji CO₂, głównie z uwagi na inwestycje związane z odnawialnymi źródłami energii. Największy spadek emisji odnotowano dla Stanów Zjednoczonych (–4810 Mt CO₂) oraz Wielkiej Brytanii (–350 Mt CO₂).

2. Programy wsparcia czystej energii

W ciągu ostatniej dekady Polska odnotowała znaczny wzrost w zakresie pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Na podstawie danych Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (*ang. International Renewable Energy Agency; IRENA*) ocenić można, iż przyrost zainstalowanej mocy z OZE w Polsce był kilkukrotnie szybszy niż w pozostałych krajach Unii Europejskiej. W 2009 roku udział Polski w europejskim miksie energetycznym wynosił 0,59 %, podczas gdy w roku 2016 wynosił on już 1,61%. Do 2015 roku rynek energii odnawialnej w Polsce zdominowany był przez biomasę. Jednakże dynamiczny rozwój OZE oparty był również na energetyce wiatrowej, a od 2016 roku prym wiedzie energetyka słoneczna. Polska jako jeden z największych konsumentów energii elektrycznej w Unii Europejskiej odgrywa kluczową rolę w zakresie pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Energia zielona, zwłaszcza w Polsce, powinna być uznawana za konkurencyjną w stosunku do energii pozyskiwanej ze źródeł kopalnych z uwagi na koszty jej pozyskiwania, korzystny wpływ na środowisko naturalne, zwiększanie bezpieczeństwa energetycznego oraz odgrywanie wiodącej roli w walce ze zmianami klimatu. Na podstawie programu IRENA REmap, który stanowi zestaw map drogowych dotyczących energetyki odnawialnych dla poszczególnych krajów, w tym dla Polski, pokazujący możliwości zwiększenia wykorzystania OZE zakłada się, iż całkowita produkcja energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych wyniesie 31,2 TWh, 41,6 TWh, 44,9 TWh oraz 83,5 TWh odpowiednio dla scenariusza referencyjnego dla roku 2020 oraz 2030, REmap 2020 oraz 2030 w stosunku do roku bazowego 2010, w którym to całkowita produkcja wynosiła 11,00 TWh [9]. Zakładając dotychczasowe tempo wzrostu, Polska może zwiększyć udział energii odnawialnej w wytwarzaniu energii elektrycznej z 7% w roku 2010 do ~38% do 2030 roku. Wśród sektorów odnawialnych źródeł energii, sektor fotowoltaiki jest jednym z najprężniej rozwijających się gałęzi OZE. Fotowoltaika, pomimo iż posiada ogromny potencjał, a energia elektryczna pozyskiwana z energii słonecznej mogłaby zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne obecnych i przyszłych pokoleń, jest wciąż stosunkowo mało wykorzystywana, zwłaszcza w Polsce. Łączna moc zainstalowanych instalacji fotowoltaicznych w Polsce na koniec roku 2018 wynosiła 500 MW, podczas gdy w maju 2019 roku przekroczyła 700 MW. W 2018 roku Polska znalazła się na

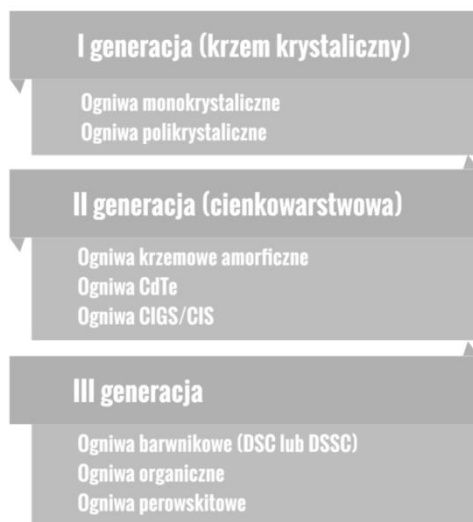
9 miejscu wśród krajów członkowskich Unii Europejskiej pod względem rocznych przyrostów nowych mocy fotowoltaicznych, z realną szansą osiągnięcia 4 miejsca na koniec 2019 r. (przyrost 1 GW nowych instalacji) [10]. Tak intensywny rozwój fotowoltaiki w Polsce związany jest z rządowymi programami wsparcia, zarówno dla indywidualnych producentów energii elektrycznej, jaki i dla przedsiębiorców oraz spółdzielni energetycznych. System opustów zapewnia wsparcie dla mikroinstalacji fotowoltaicznych. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478) definiuje mikroinstalację jako instalację o łącznej zainstalowanej mocy nie większej niż 50 kW, która jest przyłączona do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 150 kW. System opustów polega na możliwości rocznego, bezgotówkowego rozliczenia energii wprowadzonej i odebranej z sieci energetycznej. Zakłada to wprowadzanie nadwyżek energetycznych do sieci przesyłowej przez gospodarstwa, a następnie jej odebrania w czasie dogodnym dla prosumenta. Za prosumenta uznaje się jednoczesnego producenta i konsumenta energii elektrycznej, który wytwarza energię elektryczną na własne potrzeby. W zależności od wielkości instalacji można odebrać 80% energii wprowadzonej do sieci (instalacje do 10 kW) lub 70% (instalacje powyżej 10 kW). W czerwcu 2019 roku nastąpiło rozszerzenie systemu opustów o przedsiębiorców poprzez przyjęcie tzw. pakietu prosumenckiego, zawartego w projekcie nowelizacji ustawy o OZE. Pozwala to na rozszerzenie definicji prosumenta o małe i średnie przedsiębiorstwa, przy czym wytwarzanie energii nie może stanowić podstawy ich działalności gospodarczej. Jednakże w dalszym ciągu instalacja prosumencka nie może przekroczyć 50 kW mocy (mikroinstalacja). Kolejnym programem mającym na celu promowanie zielonej energii, a w szczególności pozyskiwanie energii elektrycznej z energii słonecznej jest rządowy program dofinansowania mikroinstalacji fotowoltaicznych „Mój Prąd”. Wsparcie to ma zachęcić do instalacji mikroźródeł fotowoltaicznych poprzez bezzwrotne dofinansowanie w wysokości do 50% kosztów instalacji, nieprzekraczające 5 000 zł. „Mój prąd” obejmuje instalacje PV o mocy zainstalowanej od 2 kW do 10 kW, których właścicielami są osoby fizyczne. Wszystkie te działania mają na celu zachęcenie odbiorców końcowych do inwestycji związanych z zieloną energią. Drugim trendem stymulującym postęp odnawialnych źródeł energii jest rozwój technologii fotowoltaicznych.

3. Technologie fotowoltaiczne

Wymienione powyżej czynniki można uznać za jedno z najważniejszych przyczyn intensywnego rozwoju odnawialnych źródeł energii w ostatnim czasie. Wiele prac naukowców poświęconych jest pozyskiwaniu energii elektrycznej

z energii słonecznej. Biorąc pod uwagę rosnące zapotrzebowanie energetyczne, jak również ilość energii docierającej do powierzchni planety ze Słońca, w energetyce słonecznej kryje się gigantyczny potencjał. Przy odpowiednio wydajnych oraz zaawansowanych technologiach źródło to jest w stanie zaspokoić potrzeby energetyczne zarówno obecnych, jak i przyszłych pokoleń. Generowanie energii elektrycznej z promieniowania słonecznego jest metodą nie wywierającą negatywnego wpływu na środowisko naturalne, która pozwala na pozyskiwanie czystej, zielonej, darmowej energii [11–12].

Konwersja fotowoltaiczna jest jedynym znanym sposobem bezpośredniej przemiany energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. W wyniku tej przemiany powstaje uniwersalny nośnik energii – prąd elektryczny. Technologie fotowoltaiczne podzielone są na trzy główne kategorie, które noszą nazwę „generacji” (Rys. 1). Odnoszą się one do materiałów, z których wykonane są generatory energii elektrycznej. Większość modułów fotowoltaicznych obecnych na dzisiejszym rynku komercyjnym składa się z ogniw zbudowanych w oparciu o materiały półprzewodnikowe o przewodnictwie elektronowym (typ n; ang. *negative*) i dziurowym (typ p; ang. *positive*). Cechą charakterystyczną tego rodzaju ogniw jest występowanie w ich strukturze złącza p-n umożliwiającego separację generowanych pod wpływem światła nośników ładunku i tym samym powstanie siły elektromotorycznej (napięcia) na kontaktach ogniwa.



Rys. 1. Podział ogniw fotowoltaicznych ze względu na technologie

Źródło: opracowanie własne.

3.1. I generacja ogniw słonecznych

Pierwsza generacja, tzw. technologia grubowarstwowa, opiera się na ogniwach słonecznych wykonanych z krzemu krystalicznego mono- i polikrystalicznego, których wytwarzanie jest stosunkowo drogie, niemniej jednak cechują się one wysoką sprawnością konwersji. Ogniwa słoneczne I generacji swoją budowę opierają na waflach krzemowych. Każde ogniwo może dostarczyć 2–3 waty mocy. Aby zwiększyć moc, stosuje się moduły słoneczne, które składają się z wielu połączonych ze sobą ogniw. Moduły wykonane z krzemu monokrystalicznego posiadają wyższą sprawność niż polikrystaliczne, jednak ich produkcja jest tańsza i mniej skomplikowana.

Krzem jest materiałem powszechnie występującym oraz przyjaznym środowisku naturalnemu. Jednakże jest on materiałem twardym i konieczne jest użycie drogich narzędzi w procesie produkcyjnym, podczas którego dochodzi do utraty cennego, bo już oczyszczonego materiału. Z tego powodu zaistniała konieczność rozwoju innych technologii [13]. Yoshikawa et al. [14] otrzymali ogniwa z krzemu krystalicznego przetwarzające energię słoneczną na elektryczną ze sprawnością 26,7%.

3.2. II generacja ogniw słonecznych

Druga generacja ogniw słonecznych nazywana ogniwami cienkowarstwowymi (ang. *thin films*) charakteryzuje się niższym zużyciem materiałów, przez co ich produkcja jest mniej kosztowna. Wśród ogniw drugiej generacji wyróżnić można ogniwa z krzemu amorficznego (a-Si), tellurku kadmu (CdTe) oraz ogniwa zbudowane z miedzi, indu, galu i selenu (CIGS) lub miedzi, indu i selenu (CIS). Istnieje wiele metod wytwarzania ogniw cienkowarstwowch, wśród których można wyróżnić elektrodopozycję [15], rozpylanie magnetronowe (sputtering magnetronowy) [16], naparowywanie termiczne [17] czy też kąpiel chemiczna CBD [18]. Początkowo ogniwa te charakteryzowały się dosyć niską sprawnością, jednak rozwój technologiczny pozwolił na ich doskonalenie. Zwiększenie sprawności konwersji fotowoltaicznej oraz zastosowanie większych powierzchni cienkich warstw, mogą prowadzić do znacznego obniżenia ceny modułów, i tym samym mogą zwiększyć konkurencyjność tego sposobu wśród tradycyjnych form pozyskiwania energii. Nakamura et al. [19] stworzyli ogniwo CIGS pracujące z najwyższą sprawnością. Otrzymali oni sprawność wynoszącą 23,35%, która zbliżona jest do wartości odnotowywanych dla ogniw krystalicznych, co świadczy o tym, iż ogniwa II generacji mogą stanowić alternatywę dla technologii grubowarstwowej. Niewątpliwą zaletą ogniw cienkowarstwowch jest fakt, iż mogą być produkowane na elastycznych podłożach [20–21].

Zasada działania modułów I i II generacji, mimo zastosowania różnych materiałów, jest identyczna. Opiera się na występowaniu wewnątrz struktury ogniwa złącza dwóch półprzewodników o różnym typie przewodnictwa.

3.3. Ogniwa III generacji

Ogniwa fotowoltaiczne III generacji stanowią obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych ogniw opartych na złączu $p-n$. Istnieje możliwość zastąpienia klasycznego półprzewodnika przez elektrolit w postaci płynnej, żelowej lub stałej, tworząc tym samym ogniwo fotochemiczne. Wiąże się to przede wszystkim z dużą różnorodnością strukturalną półprzewodników organicznych, technologią produkcji oraz materiałami niewymagającym dużego nakładu finansowego [22]. Wśród ogniw III generacji należy wyróżnić ogniwa barwnikowe, organiczne oraz perowskitowe. Są to stosunkowo nowe technologie, które są obiecujące, jednak nie zostały jeszcze wprowadzone do masowej produkcji.

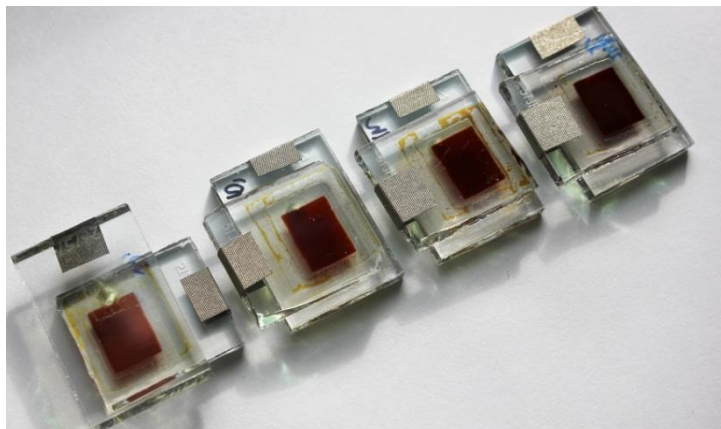
3.3.1. Ogniwa barwnikowe

Typ ogniw III generacji, który skupia w ostatnim czasie uwagę naukowców na całym świecie to sensybilizowane ogniwa barwnikowe. Niewątpliwą zaletą barwnikowych ogniw słonecznych jest niewielki współczynnik temperaturowy, mała zależność od kąta padania promieni, w warunkach zachmurzenia ogniwa barwnikowe pracują z lepszą sprawnością niż ogniwa oparte na krzemie krystalicznym. Ogniwa barwnikowe prezentują również atrakcyjne możliwości instalacji modułów jako elementów zintegrowanych z budynkiem (ang. *Building Integrated Photovoltaics*, BIPV), dzięki ich różnym kształtom, wielkości, przezroczystości i kolorom. O'Regan and Grätzel [23] jako pierwsi, w 1991, zaprezentowali prototypowe ogniwo barwnikowe, w którym zastosowali wysokoporowaty materiał półprzewodnikowy wykonany z ditlenku tytanu TiO_2 o wysoce rozwiniętej powierzchni właściwej. Ogniwo to oparte zostało na procesie optycznej absorpcji oraz separacji ładunków, poprzez zastosowanie sensybilizatora, którym był materiał półprzewodnikowy o strukturze nanokrystalicznej, wyróżniający się silnymi właściwościami absorpcji światła słonecznego. Ogniwo DSSC ma strukturę warstwową i stanowi układ fotoelektrochemiczny z elektrolitem zawierającym redoksowy mediator. W ogniwach barwnikowych, fotosyntetycznych, następuje konwersja światła w prąd przy jednoczesnym występowaniu reakcji redukcji. Pierwsze ogniwa posiadały niewielką sprawność rzędu 7% [24]. Obecnie dzięki nowoczesnym technikom i materiałom sprawność DSSC przekracza 14,3% [25].

Podstawowe ogniwo barwnikowe, przedstawione na rysunku 2, zbudowane jest z dwóch elektrod ze szkła przewodzącego (ang. *transparent conductive oxide glass*; TCO) elektrody pracującej, tzw. fotoanody i przeciwelektrody. Najczęściej pokryte są one tlenkiem cyny domieszkowanym indem (ang. *indium tin oxide*; ITO) lub domieszkowanym fluorem tlenkiem cyny (ang. *Fluorine-doped tin oxide*; FTO). Oświetlana elektroda (fotonanoda) pokryta jest dodatkowo warstwą nanocząstek półprzewodnika o szerokiej przerwie energetycznej. Powszechnie wykonana jest ona z ditlenku tytanu TiO_2 w formie nanomateriału, na której następuje adsorpcja cząsteczek barwnika

organicznego. Rolą sensybilizatora jest rozszerzenie absorpcji promieniowania słonecznego

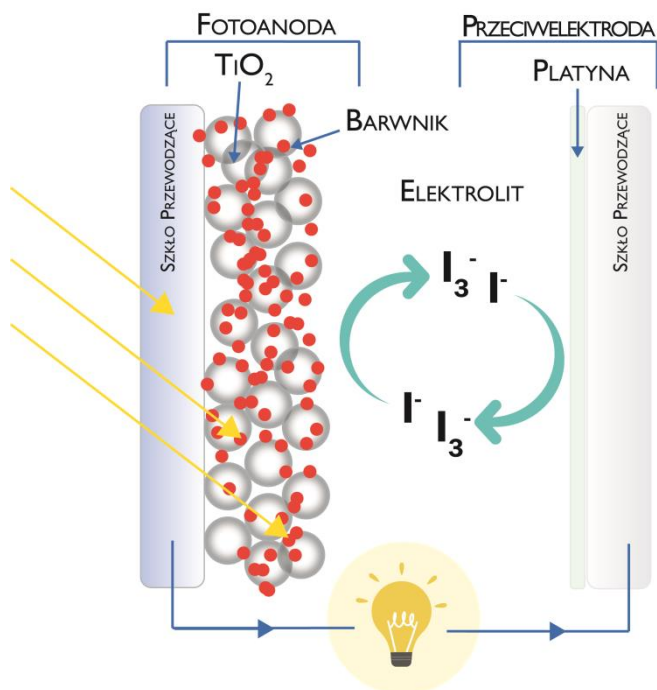
w kierunku światła widzialnego i tym samym zwiększenie wydajności procesu. Dytlenek tytanu pochłania promieniowanie słoneczne o długości fali poniżej 350 nm (promieniowanie ultrafioletowe) oraz niewielki procent promieniowania widzialnego, co pozwala na wykorzystanie jedynie 3–8% energii światła słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi [26–27].



Rys. 2. Przykładowe ogniwa barwnikowe wykonane w skali laboratoryjnej

Źródło: opracowanie własne.

Natomiast sensybilizator absorbuje światło o długości fali z zakresu 400–700 nm (promieniowanie widzialne). Cząsteczki barwnika muszą być silnie połączone z cząstkami fotoanody w przeciwnym razie otrzymane ogniwo będzie cechować się brakiem stabilności i trwałości [28]. Budowa oraz zasada działania ogniwa barwnikowego została przedstawiona na rysunku 3. Sprawność konwersji energii słonecznej w energię elektryczną zależy w dużej mierze od właściwości zastosowanego barwnika. Sensybilizator musi charakteryzować się dobrą termiczną i chemiczną stabilnością, dobrą rozpuszczalnością w bezwodnych rozpuszczalnikach, zdolnością regeneracji barwnika, odpowiednią budową strukturalną (występowanie grup $-\text{COOH}$, $-\text{H}_2\text{PO}_3$, $-\text{SO}_3\text{H}$) [29–30].



Rys. 3. Schematyczna budowa ogniwa DSSC.

Źródło: opracowanie własne.

3.3.2. Trendy w ogniwach barwnikowych

Naukowcy na całym świecie intensywnie pracują nad poprawą sprawności konwersji ogni barwnikowych. Poprawę właściwości ogniwa można uzyskać na wiele sposobów. Önen et al. [31] skupili się na poprawie stabilności ogni barwnikowych poprzez zastosowanie nowego rodzaju elektrolitu. Jedną z głównych wad ogni barwnikowych powszechnie znanych jest brak stabilności w czasie, która może wynikać z degradacji substancji sensybilizującej lub zastosowanego elektrolitu [32–33]. Opracowali oni ogniwo DSSC sensybilizowane naturalnym barwnikiem wykorzystując żelowy elektrolit. Pozwoliło to na uzyskanie stabilności ogniwa trwającej 3600 h. Ogniwo wypełnione elektrolitem żelowym AMPS–IA–F–Cl–Br–An charakteryzowało się najwyższą mocą wyjściową, najniższą rezystancją szeregową oraz wysokim współczynnikiem wypełnienia FF spośród zastosowanych elektrolitów, w tym płynnych. Nemala et al. [34] zaproponowali natomiast wykorzystanie fotoanody pokrytej podwójną warstwą ditlenku tytanu TiO_2 . Warstwę bazową stanowiły nanocząstkami TiO_2 , natomiast nanosłupki ditlenku tytanu zostały wykorzystane jako warstwa wierzchnia mająca funkcję

rozpraszającą. Zastosowanie takiej innowacji pozwoliło na uzyskanie sprawności konwersji na poziomie 7,85%. Wydajność ogniw DSSC jest w dużej mierze zależna od struktury molekularnej substancji sensybilizującej [35]. Głównym kryterium branym pod uwagę przy doborze barwnika jest jego wpływ na środowisko naturalne, sposób i koszty wytwarzania, zdolność absorpcji promieniowania słonecznego oraz jego stabilność w czasie. Dlatego też kolejnym sposobem prowadzącym do poprawy parametrów pracy ogniw barwnikowych jest wykorzystanie naturalnych lub organicznych barwników. Tsao et al. [36] wykorzystali barwnik organiczny Y123 oraz elektrolit na bazie kobaltu, co przełożyło się na otrzymanie ogniw barwnikowych pracujących z wydajnością 10,3%. Obiecujące parametry pracy uzyskują również ogniw DSSC sensybilizowane pigmentami naturalnymi ekstrahowanymi z liści, łodyg czy też kwiatów roślin. W pracy [37] wykorzystano zielony barwnik ze szpinaku pnącego malabarskiego oraz czerwony ze szpinaku czerwonego, natomiast [38] wykorzystano sok z granatu, buraków, liści cytryny oraz szpinaku. Nowatorskim podejściem do barwienia elektrod jest wykorzystanie kilku barwników naraz. Kabir et al. [39] połączyli czerwony oraz żółty barwnik, dzięki czemu uzyskali szersze spektrum absorpcji promieniowania słonecznego w porównaniu do pojedynczych substancji sensybilizujących. Pozwoliło to na uzyskanie sprawnością rzędu 0,649%, co jest wartością o 195% wyższą w porównaniu do ogniw barwionych jedynie czerwonym barwnikiem.

4. Podsumowanie

Zmiany klimatyczne, negatywne konsekwencje spalania paliw kopalnych i ich wyczerpywanie się, a także liczne zmiany legislacyjne wymuszają na społeczeństwie zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii. Stanowią one o przyszłości elektroenergetyki, zarówno w Polsce, jak i na świecie. Coraz trudniejsze staje się zapewnienie bilansu mocy w okresach letnich przez źródła konwencjonalne, podczas gdy produkcja energii elektrycznej przez generatory fotowoltaiczne jest zbieżna ze szczytem zapotrzebowania. Polska, jako kraj położony w centralnej Europie, posiada ogromny potencjał promieniowania słonecznego, który powinien zostać wykorzystany. Jest to możliwe poprzez zastosowanie odpowiedniej technologii przekształcania energii promieniowania słonecznego. Obecnie na szeroką skalę wykorzystywane są ogniw I i II generacji, jednakże to ogniw III generacji przyciągają największą uwagę naukowców na całym świecie. Ogniw barwnikowe są bowiem konkurencją dla ogniw opartych na krzemie krystalicznym czy też cienkowarstwowych z uwagi na niskie koszty produkcji oraz stosunkowo wysokie sprawności. Już teraz laboratoryjne ogniw barwnikowe osiągają sprawności rzędu 14,3%, jednakże istnieje jeszcze potencjał do dalszej optymalizacji, co skutkować będzie jeszcze wyższymi parametrami pracy ogniw DSSC.

Literatura

[1] Sharma S., Jain K. K., Sharma A., *Solar Cells: In Research and Applications — A Review*, Materials Sciences and Applications 6 (12), 1145–1155, 2015.

[2] Raport: Key world energy statistics, World Energy Council —World energy resources, International Energy Agency, 2016.

[3] Raport: BP Statistical Review of World Energy – Key CO₂ emissions trends, International Energy Agency, 1–48, 2016.

[4] Raport: Sanaeepur S., Sanaeepur H., Kargari A., Habibi M. H., Renewable energies: climate-change mitigation and international climate policy, International Journal of Sustainable Energy 33 (1), 203–212, 2014.

[5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych na obszarze Unii Europejskiej (UE).

[6] Poland's National Energy and Climate Plan for the years 2021–2030 (NECP), Ministerstwo Energii, 2019.

[7] Li B., Wang L., Kang B., Wang p., Qiu Y., *Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 90, 549–573, 2006.

[8] Raport: Executive Summary, World Energy Outlook 2018, International Energy Agency IEA, 2018.

[9] REmap 2030: Renewable Energy Prospects for Poland, International Renewable Energy Agency IRENA, 2018.

[10] Raport: Raport „Rynek fotowoltaiki w Polsce ”2019”, Instytut Energetyki Odnawialnej VII, 2019.

[11] Pandey A.K., Tyagi V.V., Selvaraj J.A.L., Rahim N.A., Tyagi S.K., *Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advances applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 859–884, 2016.

[12] Järvelä M., Valkealahti S., *Ideal Operation of a Photovoltaic Power Plant Equipped with an Energy Storage System on Electricity Market*, Applied Sciences 7(7), 749, 2017.

[13] Koch W., Endrös A. L., Franke D., Häßler C., Kalejs J. P., Möller H. J., *Bulk Crystal Growth and Wafering for PV*, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (ed. Antonio Luque, Steven Hegedus), Wiley, 2003.

[14] Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Kanematsu M. I., Uzu H., Yamamoto K., *Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%*, Nature Energy 2, 17032, 2017.

[15] Bermudez V., *An overview on electrodeposited Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin films for photovoltaic devices*, Solar Energy 175, 2–8, 2018.

- [16] Gułkowski S., Krawczak E., *Experimental studies of thin films deposition by magnetron sputtering method for CIGS solar cell fabrication*, E3S Web of Conferences 19, 03006, 2017.
- [17] Kim S. T., Kim K., Yun J. H., Ahn B. T., *A new simple route to grow Cu(In, Ga)Se₂ thin films with large grains in the co-evaporation process*, Current Applied Physics 18(8), 912–918, 2018.
- [18] Lin X., Li H., Qu F., Gu H., Wang W., *Cu(In,Ga)Se₂ solar cell with Zn(S,O) as the buffer layer fabricated by a chemical bath deposition method*, Solar Energy 171, 130–141, 2018.
- [19] Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., Yasaki Y., Kato T., Sugimoto H., *Cd free Cu (In,Ga)(Se,S)₂ thin film solar cell with a new world record efficacy of 23.35%*, 46th IEEE PVSC, Chicago, IL, June 19, 2019.
- [20] Gerthoffer A., Roux F., Emieux F., Faucherand P., Fournier H., Grenet L., Perraud S., *CIGS solar cells on flexible ultra-thin glass substrates: Characterization and bending test*, Thin Solid Films 592, 99–104, 2015.
- [21] Sim J.K., Kang S., Nandi R., Jo J. Y., Jeong K.U, Lee C.R., *Implementation of graphene as hole transport electrode in flexible CIGS solar cells fabricated on Cu foil*, Solar Energy 162, 357–363, 2018.
- [22] Kumar R., Umar A., Kumar G., Nalwa H.S., Kumar A., Akhtar M.S., *Zinc oxide nanostructure based dye-sensitized solar cells*, Journal of Materials Science 52, 4743–4795, 2017.
- [23] O'Regan B., Grätzel M., *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films*, Nature 353, 737–740, 1991.
- [24] Grätzel M., *Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells*, Inorganic Chemistry 44, 6841–6851, 2005.
- [25] Kakiage K., Aoyama Y., Yano T., Oya K., Fujisawa J.I., Hanaya M., *Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes*, Chemical Communications 51, 15894–15897, 2015.
- [26] Popa M., Macovei D., Indrea E., Mercioniu I., Popescu I.C., Danciu V., *Synthesis and structural characteristics of nitrogen doped TiO₂ aerogels*, Microporous Mesoporous Materials 132, 80–86, 2010.
- [27] Burda C., Lou Y., Chen X., Samia A.C.S., Stout J., Gole J.L., *Enhanced Nitrogen Doping in TiO₂ Nanoparticles*, Nano Letters 3, 1049–1051, 2003.
- [28] Gong J., Sumathy K., Qiao Q., Zhou Z., *Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): advanced techniques and research trends*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 234–246, 2017.
- [29] Dobrzański L. A., Szindler M. M., Szindler M., Dudek A., Krawiec K., *The influence of natural and synthetic dyes on the absorbance of nanocrystalline TiO₂ used in dye sensitized solar cells*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 69, 53–58, 2015.

[30] Zhang S., Yang X., Numata Y., Han L., *Highly efficient dye-sensitized solar cells: progress and future challenges*, Energy & Environmental Science 6, 1443–1464, 2013.

[31] Önen T., Karakuş M. Ö., Coşkun R., Çetin H., *Reaching stability at DSSCs with new type gel electrolytes*, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 385, 112082, 2019.

[32] Abodunrin T. J., Akinyemi M.L., Boyo A. O., Olugbuyiro J. A., *Photo Degradation in Dye Sensitized Solar Cells*, Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, 2015.

[33] Yang R.Y., Chen H.Y., Lai F.D., *Performance Degradation of Dye-Sensitized Solar Cells Induced by Electrolytes*, Advances in Materials Science and Engineering 2012, 902146, 2012.

[34] Nemala S. S., Mokurala K., Bhargava P., Mallick S., *Titania Nanobelts as a Scattering Layer with $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ as a Counter Electrode for DSSC with Improved Efficiency*, Materials Today: Proceedings 5 (11), 23351–23357, 2018.

[35] Tennakone K., Bandara J., *Photocatalytic activity of dye-sensitized tin(IV) oxide nanocrystalline particles attached to zinc oxide particles: long distance electron transfer via ballistic transport of electrons across nanocrystallites*, Applied Catalysis A General 208, 335–341, 2001.

[36] Tsao H.N., Burschka J., Yi C., Kessler F., Nazeeruddin M.K., Grätzel M., *Influence of the interfacial charge-transfer resistance at the counter electrode in dye-sensitized solar cells employing cobalt redox shuttles*, Energy & Environmental Science 4, 4921–4924, 2011.

[37] Kabir F., Bhuiyan M.M.H., Manir M.S., Rahaman M.S., Khan M.A., Ikegami T., *Development of dye-sensitized solar cell based on combination of natural dyes extracted from Malabar spinach and red spinach*, Results in Physics 14, 2019.

[38] Pathak C., Surana K., Shukla V. K., Singh P. K., *Fabrication and characterization of dye sensitized solar cell using natural dyes*, Materials Today: Proceedings 12(3), 665–670, 2019.

[39] Kabir F., Sakib S. N., Matin N., *Stability study of natural green dye based DSSC*, Optik 181, 458–464, 2019.

Mikrosystemy elektroenergetyczne w aspektach pracy generacji rozproszonej

Streszczenie: Artykuł opisuje kryterialną analizę pracy mikrosystemu elektroenergetycznego. W rozdziałach omówiono możliwość wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Obliczenia układowe, wykresy pracy sterowalnych generatorów i podsumowanie możliwości mikrosystemów są w tej pracy zaprezentowane. Wiele uwagi poświęcono tutaj charakterystyce odnawialnych źródeł energii używanych w mikrosystemach elektroenergetycznych oraz generacji rozproszonej. Artykuł proponuje możliwości stworzenia zintegrowanego sterowania pracą w mikrosystemie energetycznym używającym energii odnawialnej.

Słowa kluczowe: energetyka rozproszona, optymalizacja pracy, odnawialne źródła energii, skojarzone wytwarzanie energii, zarządzanie zasobami energii

Microsystems in the work aspects of distributed generation

Abstract: The article describes criterial work analysis of the power microsystem. The chapters discuss the possibilities of use renewable energy sources. System calculations, work charts of controllable generators and summarize possibilities of microsystems are presented in this work. Much attention was paid here to the characteristics of the renewable energy source used in power microsystems and distributed generation. The article proposes the possibility of creating an integrated control of the energy system based on renewable energy.

Keywords: distributed energy, work optimization, renewable energy sources, combined energy production, management of energy resources

1. Wstęp

W Europie dzięki zastosowaniu w systemach elektroenergetycznych energii odnawialnej i poprawy efektywności energetycznej jako obiecującego obszar Europejskiej energetyki forsowana jest proekologiczna idea zmniejszenia kosztów energii.

Przy wysokich kosztach używania paliw kopalnych i pogarszających się problemach środowiskowych, energia odnawialna i techniki skojarzonego wytwarzania, są uważane za efektywne metody wytwarzania energii, których używanie cieszy się zainteresowaniem w generacji rozproszonej i mikrosystemach elektroenergetycznych [1].

* zuchorakonrad@gmail.com, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Wraz ze wzrostem konsumpcji szczególnie silne zmiany zwiększonego zużycia energii obserwowane są w gospodarce i przemyśle [2]. Problemy związane z zużyciem energii są obecnie poruszane na całym świecie. Szybki wzrost zużycia energii obserwowany jest w krajach rozwijających się i rozwiniętych. Wraz z szybkim rozwojem narodowych gospodarek, produktu uboczne wynikające z wytwarzania energii z paliw kopalnych stają się coraz większy problemem.

W związku z dążeniem w Europie do ograniczenia produkcji dwutlenku węgla [3]. Aktualnie zaistniała pilna potrzeba wykorzystania energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł (OZE) oraz poprawiania efektywności energetycznej i wskaźników zużycia energii. Obecne państwa Unii Europejskiej i globalne gospodarki przywiązują dużą wagę do zmniejszenia energochłonności w przemyśle i gospodarstwach domowych a zanieczyszczenie środowiska i zmiany klimatu są w centrum uwagi całego świata [4].

Obecnie nadrzędnym zadaniem polityki energetycznej jest wprowadzeniem programowych środków oszczędzania energii. Stworzenie stabilnych i efektywnych systemów wytwarzania energii eklektycznej i ciepła jest istotnym projektem dotyczącym funkcjonowania w Europie narodowych systemów elektroenergetycznych. Tendencja wzrostu cen energii powoduje, że kwestie dotyczące kryterialnego zarządzania zasobami energii są kluczowe.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat z powodu zaufania do bezpieczeństwa wytwarzania energii, używanie odnawialnych źródeł jest coraz bardziej powszechne [5]. W związku z ogólną rosnącą tendencją wzrostową cen paliw kopalnych oraz w celu zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na energię głównie energię elektryczną. Wykorzystanie zasobów energii zgromadzonych w źródłach odnawialnych oraz czyste i efektywne techniki wytwarzania energii przyciągają coraz większą uwagę w międzynarodowych systemach elektroenergetycznych na całym świecie[6].

Jednym z głównych wyzwań dla mikrosystemów jest projektowanie własnej strategii zarządzania energią, która zapewnia zaspokojenie zapotrzebowania na moc dla odbiorów własnych, pomimo przerywanego charakteru pracy źródeł odnawialnych [7], wraz z redukcją kosztów pracy i osiąganiem zamierzonych celów.

2. Charakterystyka generacji rozproszonej

Większość systemów generacji rozproszonej dzięki możliwości użycie OZE koncentruje się na redukcji emisji i zanieczyszczeń oraz optymalizacji pracy. Optymalne zarządzanie pracą i wymiarowanie jest ważną kwestią w systemach elektroenergetycznych używających skojarzonego wytwarzania energii. Zbyt małe wymiary mikrosystemu mogą powodować problemy z niezawodnością. Zbyt duże wymiary mogą generować niepotrzebne koszty. Odpowiednia

kombinacja źródeł energii może zmniejszyć generowane koszty, a także poprawić ogólną niezawodność mikrosystemu.

Aby zminimalizować koszty pracy mikrosystemu przy zaspokojeniu potrzeb odbiorów własnych, biorąc pod uwagę czynniki środowiskowe, kluczowa jest optymalna strategia zarządzania przy akceptowalnym poziomie kosztów.

W przeciwieństwie do energii wytwarzanej z paliw kopalnych energia wytwarzana z odnawialnych źródeł głównie energia słoneczna i wiatrowa mają uwarunkowany cyklem dobowym niepewny cykl generacji [8]. Z powodu niepewności dotyczącej energii odnawialnej, która jest limitowana pogodą, mikrosystemy nie mogą w pełni wykorzystywać możliwości, które wynikają z mocy znamionowych generatorów. Używanie w mikrosystemie generatorów energii używających paliw kopalnych ma również wady, dla małych mocy generatory osiągają niską gęstość energii na jednostkę masy oraz niską sprawność i stanowią problem generujący efekt zanieczyszczenia środowiska. W rezultacie istnieją poważne wątpliwości dotyczące projektowania wymiarów systemów elektroenergetycznych używających odnawialnych źródeł i ich eksploatacji.

Mikrosystemy używające w pracy kogeneracji rozwinęły się bardzo szybko w ostatnich latach i są uważane za efektywne instalacje dla generacji rozproszonej [9]. Bardzo ważny jest obecnie aspekt poprawy wskaźnika wykorzystania energii odnawialnej i osiągnięcia maksymalnego efektu ekonomicznego. Głównie z tego powodu, że oszczędność jednego dżula zużytej energii daje średnio oszczędność trzech dżuli energii zawartej paliwie.

W celu osiągnięcia opłacalnego i niezawodnego wytwarzania energii, z którego można korzystać, używając odnawialnych źródeł. Mikrosystemy elektroenergetyczne uwzględniają w architekturze kilka rodzajów źródeł generacji rozproszonej. Na mikrosystem mogą również składać się generatory energii używające paliw kopalnych, które mogą wykorzystywać w pracy kogenerację i poligenerację. Aby uelastyczyć przeznaczenie mikrosystemu, dodawać można do mikrosystemu pompy ciepła i inne urządzenia, które są w stanie konwertować energię elektryczną do ciepła i ciepło do energii elektrycznej. Wśród komponentów mikrosystemów, które poprawiają efektywność energetyczną, użycie kogeneracji jest najważniejsze. Nadmiar energii elektrycznej wytwarzany przez mikrosystem, zamiast magazynowania w akumulatorach, może być konwertowany w pompach ciepła na ciepło. Umożliwia to wyeliminowanie bardzo często kosztownego magazynu energii elektrycznej na korzyść tańszego magazynu ciepła. Instalacje mikrosystemów zazwyczaj uwzględniają panele fotowoltaiczne, turbinę wiatrową i system magazynowania energii. Konfiguracja podstawowa pozwala osiągnąć cel zaspokajania zapotrzebowania na energię odbiorów własnych i jednocześnie dzięki zastosowaniu podstawowych źródeł OZE poprawia rachunek ekonomiczny [10]. W mikrosystemach energia słoneczna i wiatrowa może być wykorzystywana w celu zwiększenia mocy znamionowej całego systemu,

szczególnie gdy OZE są wspierane przez wydajny system magazynowania energii. Ze względu na osiągnięte relatywnie małe moce. Mikrosystemy nadają się do zaspokajania głównie lokalnych potrzeb i są wykorzystywane do produkcji tzw. zielonej energii.

Eksploatacja mikrosystemów używających w pracy różnych źródeł staje się coraz bardziej pożądana w licznych aplikacjach. Ponieważ pozostałe źródła w mikrosystemie są w stanie podtrzymać zasilanie, awaria jednego ze źródeł nie eliminuje całego mikrosystemu z pracy. Mikrosystemy mogą być używane autonomicznie lub w połączeniu z siecią. Połączenie mikrosystemu z siecią pozwala na importowanie energii z sieci i dostarczanie energii do odbiorów własnych mikrosystemu. Dzięki możliwości pracy w tzw. systemie ON–GRID technika mikrosystemów jest w zdecydowanej większości przypadków niezawodna. Zgodnie z lokalną polityką tworzenia instalacji ekonomicznie dochodowych i uniwersalnych. Nadwyżka energii wytworzona w mikrosystemie może być wyeksportowana do sieci. Używając w mikrosystemach dodatkowych urządzeń można dążyć do maksymalnego wykorzystania nadmiaru energii odnawialnej [11].

Systemy CHP to systemy energetyczny zaprojektowane do kaskadowego wykorzystania energii. Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła osiąga się jednocześnie głównie poprzez spalanie gazu ziemnego lub innego paliwa. Główną zaletą systemów skojarzonego wytwarzania jest możliwość osiągnięcia bardzo wysokich sprawności całkowitych. Z powodu użycia techniki skojarzonego wytwarzania energii połączone systemy i sieci w celu zmniejszenia całkowitych kosztów mogą jednocześnie koordynować dostawy energii elektrycznej i ciepła. W mikrosystemach elektroenergetycznych generatory energii, które spalają gaz mogą wytwarzać energię elektryczną w termodynamicznym cyklu silnika tłokowego lub przepływowego [12,13] a pozostałe w cyklu termodynamicznym ciepło odpadowe może być zużyte w instalacjach centralnego ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej. Angażując rekuperację w mikrosystemach, można osiągnąć wysoki stopień wykorzystania energii zawartej w paliwie.

Projektując mikrosystem, architekt musi łączyć źródła energii i różne dostępne środki w celu zaspokojenia dwóch podstawowych celów:

- Zapewnienia wystarczającej produkcji energii, tak aby wytworzona energia pokryła potrzeby konsumpcji.
- Gwarancji minimalnego kosztu zużycia energii przez użytkownika.

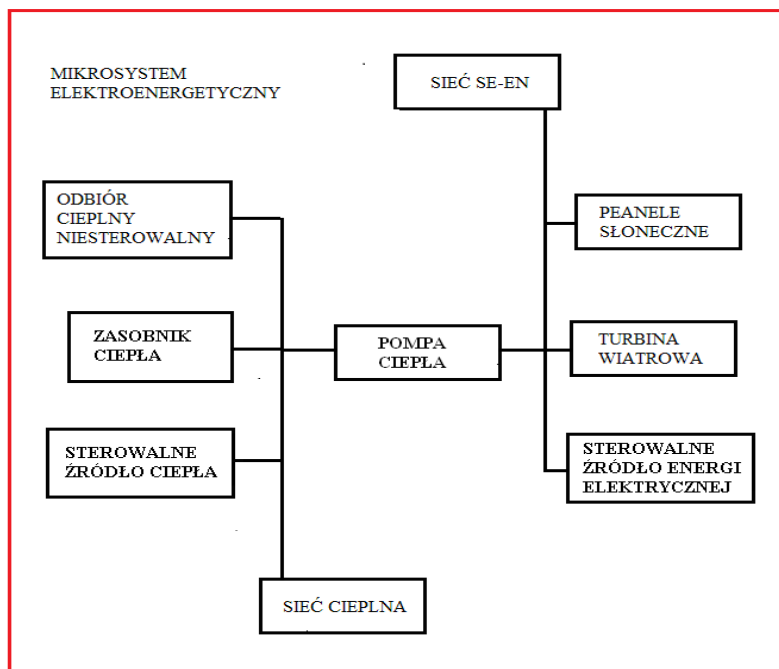
W mikrosystemach generatory wytwarzające energię dla odbiorów o różnym profilu będą obciążone niesymetrycznie, z tego powodu projektant musi odpowiednio dobrać wymiary elementów systemu. Energia wytwarzana w mikrosystemie będzie podzielona na wiele rozpyłów, w taki sposób, że każde ze źródeł będzie zasilać inny odbiór.

W generacji rozproszonej sieć elektroenergetyczna może być uważana za nieskończenie pojemny system przechowywania energii o wysokiej sprawności.

Model pracy mikrosystemów używających sieci elektroenergetycznej jako zasobnika nazywany jest „netmeteringiem” lub tzw. „opomiarowanie brutto”. Gdy odnawialna energia i generatory sterowalne nie są w stanie zasilić odbiorów własnych należących do mikrosystemu. Energia elektryczna i ciepło mogą być pobierane z sieci. Gdy źródła energii pracujące w systemie wytwarzają więcej energii elektrycznej i ciepła niż odbiory własne systemu mogą zużyć, to nadwyżka energii może być magazynowana w zasobnikach lub może być sprzedana do sieci.

3. Charakterystyka mikrosystemu

Mikrosystem elektroenergetyczny jest zbudowany z systemu fotowoltaicznego i turbiny wiatrowej, które reprezentują pierwotne źródła energii oraz zasobników energii uzupełniających w mikrosystemie bilans energii. Badanie uwzględniają wpływ fluktuacji pogody, które przekładają się na zmiany mocy turbiny wiatrowej i paneli słonecznych. Rysunek 1 odwzorowuje połączony model mikrosystemu z siecią elektroenergetyczną i cieplną.



Rys.1. Układ mikrosystemu elektroenergetycznego

Celem wykonanej pracy jest stworzenie mikrosystemu, który może zaspokoić zapotrzebowania odbiorów własnych i osiągnąć wysoki poziom niezawodności.

W tym artykule przedstawiono model optymalizacji pracy mikrosystemu elektroenergetycznego połączonego z siecią elektroenergetyczną i siecią ciepłą. Zaproponowano również zmniejszenie kosztów pracy mikrosystemu poprzez wykorzystanie niekonwencjonalnych źródeł energii. Przy uwzględnieniu środków i ograniczeń, które wynikają z parametrów pracy generatorów i sieci. W celu zarządzania przepływami energii z różnych źródeł i zminimalizowania kosztów. Optymalizacja wyznacza opłacalne ekonomicznie, wykonalne rozwiązanie z dopuszczalnym poziomem zakupu energii z sieci. Jednocześnie, aby uzyskać nie tylko mniejszy koszt pracy mikrosystemu, ale także efekt przyjazny dla środowiska. Wprowadza się do konfiguracji systemu, OZE i zarządzanie w postaci rozwiązania zadania optymalizacji.

4. Sformułowanie zadania optymalizacji

Przy kryterium minimalnych kosztów i dzięki dywersyfikacji źródeł energii zaspokojenie zapotrzebowania na energię odbiorów własnych należących do mikrosystemu oraz osiągnięcie wysokiego poziomu niezawodności podczas pracy mikrosystemu jest istotne.

Celem tej pracy jest zminimalizowanie kosztów pracy podczas zachowania prawidłowego profilu zużycia energii i zarządzania różnymi zasobami mikrosystemu. W zaproponowanym modelu, w celu weryfikacji czy mikrosystem może łączyć wytwarzanie ciepła z energią elektryczną, osiągając minimalizację całkowitych kosztów i poprawę efektywności, przeprowadzono optymalizację pracy. Aby osiągnąć cel minimalizacji kosztów, wykorzystano energię odnawialną. Optymalizacja pracy została przeprowadzona na modelu mikrosystemu elektroenergetycznego.

W artykule zaproponowany sposób wyznaczenia harmonogramów pracy mikrosystemu elektroenergetycznego wyznacza moce cząstkowe sterowalnych generatorów. Aby znormalizować i zbliżyć optymalizację do rzeczywistych warunków pracy, dane meteorologiczne uwzględniają prace i zatrzymanie wytwarzanie energii w turbinie wiatrowej. Funkcja celu uwzględnia koszt kupna energii między mikrosystemem a nadrzędnymi sieciami, koszt magazynowania energii oraz koszt paliwa zasilającego sterowalny generator. Ze względu na bardzo niski koszt energii odnawialnej, który nie uwzględnia kosztów paliwa, czyli energii wiatru i słońca oraz może uwzględniać koszty operacyjne i utrzymania, koszt OZE jest pomijany a moc OZE stanowi daną wejściową w optymalizacji.

Mikrosystem bazuje na danych pogodowych. W badaniach zmienność profilów obciążenia również jest uwzględniona i ma charakter przypadkowy oraz ma znaczący wpływ na pracę mikrosystemu. Funkcja celu minimalizuje sumę kosztów operacyjnych w mikrosystemie pracującym z energią elektryczną i ciepłem w cyklu dwudziestoczteropredziałowym. W artykule zaproponowano model optymalizacji, który reprezentowany jest funkcją celu.

Funkcja celu:

$$K_{fc}(x) = \sum_{h=1}^h (Keek_h + Keck_h + Keeza_h + Kecza_h + KgsCHP_h) \quad (1)$$

$$x = (PegsCHP_h, PcgsCHP_h, PcPC_h, Peza_h, Pcza_h)$$

gdzie:

h – liczba przedziałów objętych obliczeniami.

K_{fc} – całkowity koszt operacyjny mikrosystemu.

$KgsCHP_h$ – koszt wytworzenia energii w generatorze sterowalnym pracującym w kogeneracji.

$Keek_h$ – koszt kupna energii elektrycznej z nadrzędnej sieci elektroenergetycznej.

$Keck_h$ – koszt kupna energii cieplnej z nadrzędnej sieci cieplnej.

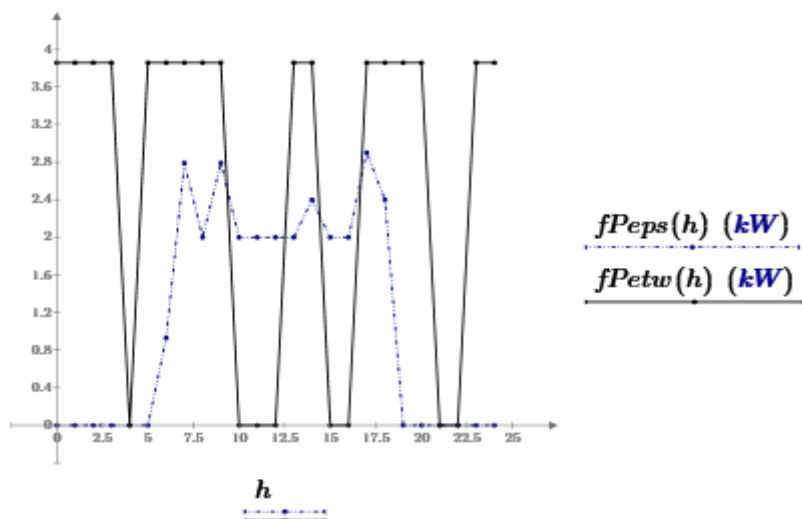
$Keeza_h$ – koszt magazynowania energii elektrycznej.

$Kecza_h$ – koszt magazynowania ciepła.

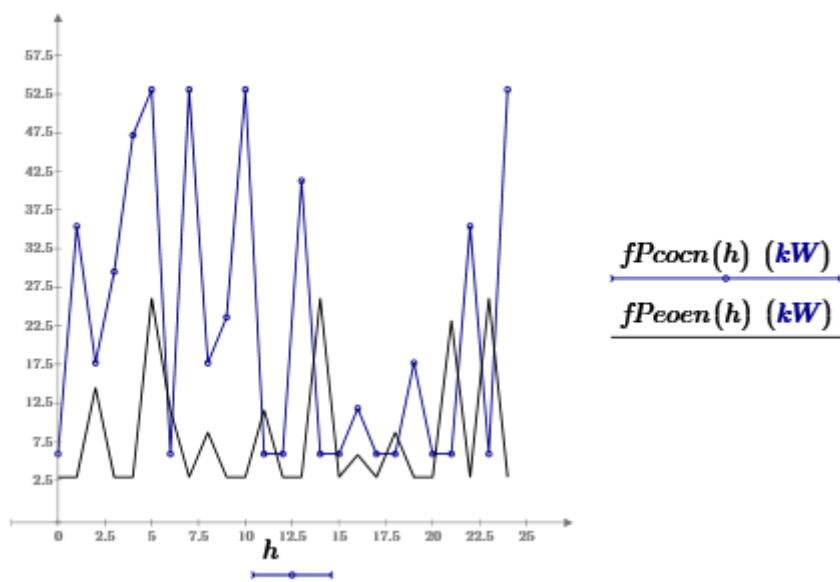
Ograniczenia:

$$\begin{aligned} PegsCHP_{min_h} &\leq PegsCHP_h \leq PegsCHP_{max_h} \\ PcgsCHP_{min_h} &\leq PcgsCHP_h \leq PcgsCHP_{max_h} \\ PcPC_{min_h} &\leq PcPC_h \leq PcPC_{max_h} \\ Pczamin_h &\leq Pcza_h \leq Pczamax_h \\ Pezamin_h &\leq Peza_h \leq Pezamax_h \end{aligned} \quad (2)$$

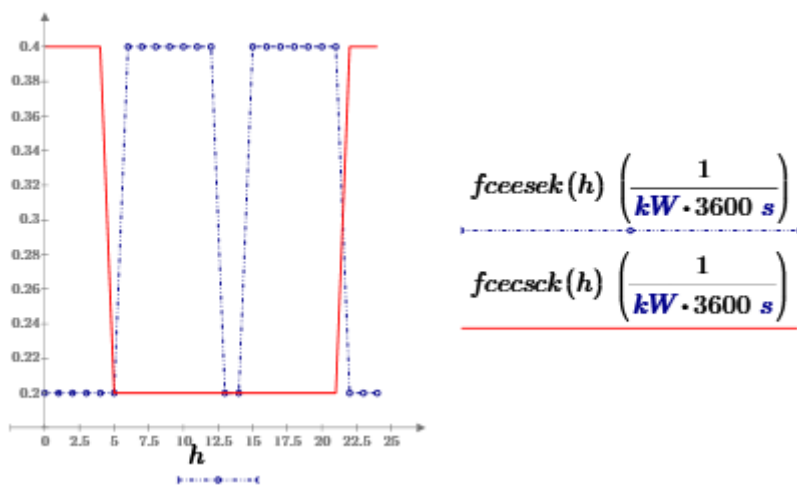
Dane wejściowe, czyli energia odnawialna, profile odbiorów własnych należących do mikrosystemu i ceny energii są zilustrowane na rysunkach 2–4. Wyniki optymalizacji dla sterowalnych generatorów elektrycznych i ciepłych pracujących w mikrosystemie odzwierciedlają rysunki 5–6.



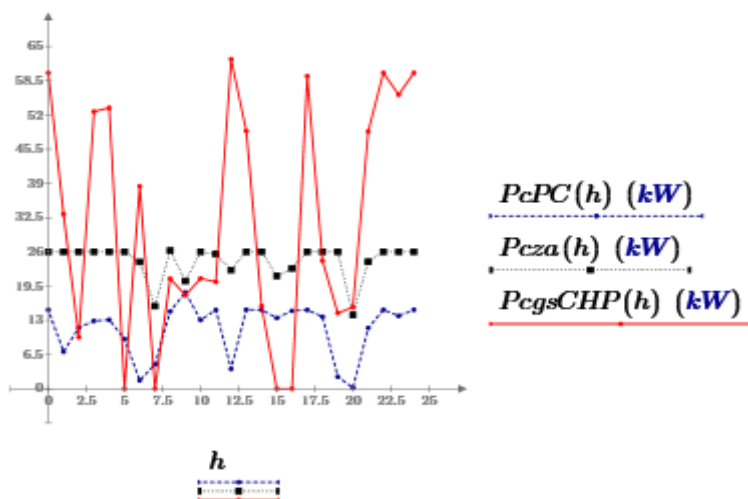
Rys. 2. Moc źródeł odnawialnych: $fP_{eps}(h)$ – moc paneli słonecznych; $fP_{etw}(h)$ – moc turbiny wiatrowej



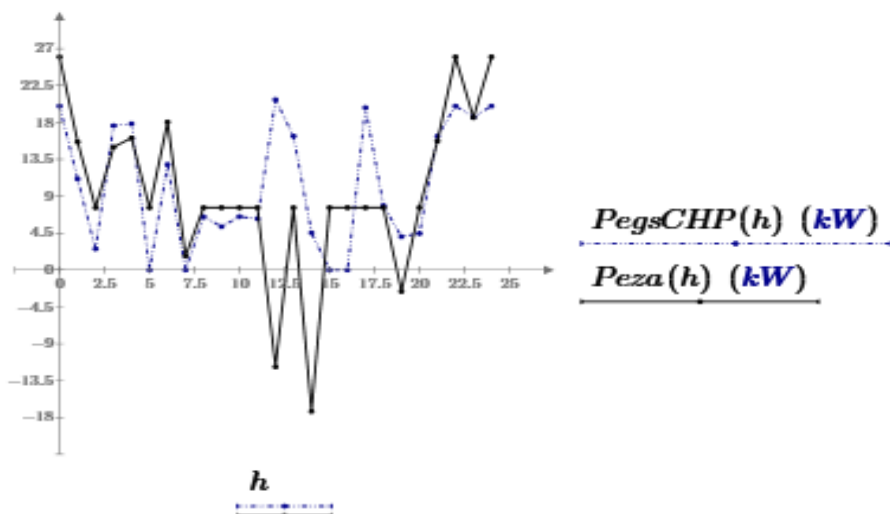
Rys. 3. Moc obciążenia: $fP_{eoen}(h)$ – moc odbiorów elektrycznych należących do mikrosystemu; $fP_{cocr}(h)$ – moc odbiorów cieplnych należących do mikrosystemu



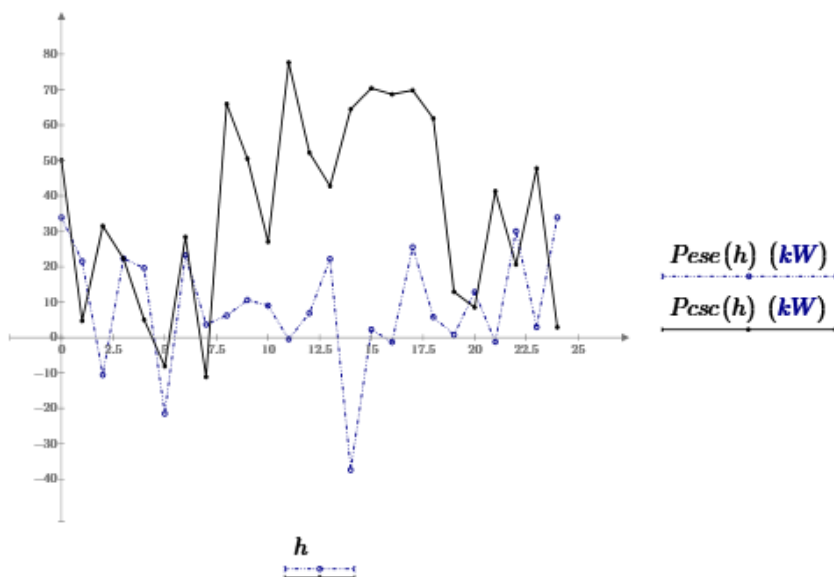
Rys. 4. Ceny jednostkowe energii: $f_{ceesek}(h)$ – cena kupowanej energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej zgodna z taryfą G12; $f_{cecsck}(h)$ – cena jednostkowa kupowanego ciepła z sieci ciepłej (zapropionowana cenę dwutaryfową)



Rys. 5. Ciężny harmonogram pracy mikrosystemu: $P_{cgsCHP}(h)$ – moc cieplna generatora sterowalnego pracującego w kogeneracji; $P_{cPC}(h)$ – moc cieplna generatora sterowalnego pracującego w poligeneracji (moc pompy ciepła); $P_{cza}(h)$ – moc cieplna zasobnika ciepła



Rys. 6. Elektryczny harmonogram pracy mikrosystemu: $P_{egsCHP}(h)$ – moc elektryczna generatora sterowalnego pracującego w kogeneracji; $P_{eza}(h)$ – moc elektryczna zasobnika energii



Rys. 7. Wymiana energii elektrycznej i ciepła z nadrzędnymi sieciami elektroenergetycznymi: $P_{csc}(h)$ – funkcja mocy wymiany ciepła; $P_{ese}(h)$ – funkcja mocy wymiany energii elektrycznej

5. Wnioski

W artykule stworzono architekturę mikrosystemu elektroenergetycznego, który jest złożony z agregatu pracującego w skojarzeniu i magazynów energii. Optymalizację przeprowadzono dla systemu połączonego z siecią ciepłą i elektroenergetyczną. Zaproponowano metodę kryterialnego zarządzania zasobami oraz przedstawiono wyniki optymalizacji pracy połączonego mikrosystemu używającego w pracy energii odnawialnej.

Efekt optymalizacji kosztów osiąga się dzięki wprowadzeniu do równania cech systemu i odnalezieniu minimum funkcji celu. Wyniki dla kryterium ekonomicznego ujawniają rozwiązanie dla sformułowanego zadania. Wyniki optymalizacji w rzeczywistości informują o decyzji, z jaką mocą i które sterowalne generatory energii w mikrosystemie dla ustalonego kryterium powinny pracować. Zbilansowane wykorzystanie zasobów mikrosystemu osiąga się dzięki optymalnej strategii zarządzania, która gwarantuje prawidłowe funkcjonowanie generatorów sterowalnych podczas korzystania ze źródeł odnawialnych.

W celu poprawy efektywności i obniżenia kosztów pracy połączenie mikrosystemu z sieciami elektroenergetycznymi, koordynacja wytwarzania ciepła oraz energii elektrycznej i skorzystanie z energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł jest systemowym rozwiązaniem dla generacji rozproszonych.

Zarządzanie zasobami w mikrosystemie umożliwia zaspokojenie systemowych obciążeń przy uwzględnieniu kryterium ekonomicznego i środków ekologicznych w postaci odnawialnych źródeł.

Wyniki ujawniły, że samowystarczalna praca mikrosystemu przy kryterium kosztów i zaproponowanych danych jest niemożliwa, ponieważ mikrosystem w czasie pracy pobiera energię z sieci elektroenergetycznych (Rys. 7).

Literatura

[1] Andea P., Mnerie A.V., Solomonesc F., Pop O., Cristian D., *Conventional vs. alternative energy sources overview. Part II. European strategies*, IEEE International Joint Conference on Computational Cybernetics and Technical Informatics, 601–606, 2010.

[2] Smil, V., *Energy in world history*, Routledge, 2019.

[3] Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzony w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r., <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20052031684>

[4] O'Brien K., Eriksen S., Schjolden A., Nygaard L., *What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research*, CICERO Center for International Climate and Environmental Research – Oslo, 2004.

- [5] Turner J.A., *A realizable renewable energy future*, Science 285(5428), 687–689, 1999.
- [6] Pelc R., Fujita R.M., *Renewable energy from the ocean*, Marine Policy 26(6), 471–479, 2002.
- [7] Aidan D., Rogers M., Ayompe L., *Renewable energy and energy efficiency: assessment of projects and policies*, John Wiley & Sons, 2015.
- [8] Ren H., Gao W., *Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan*, Energy and Buildings 42(6), 853–861, 2010.
- [9] Marnay C., Venkataramanan G., Stadler M., Siddiqui A.S., Firestone R., Chandran B., *Optimal Technology Selection and Operation of Commercial–Building Microgrids*, IEEE Transactions on Power Systems 23(3), 975–982, 2008.
- [10] Zuchora K., *Aspekty wykorzystania kogeneracji i generacji rozproszonej opartej na odnawialnych źródłach energii*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 53, 151–154, 2017.
- [11] Soares C., *Microturbines: applications for distributed energy systems*, Elsevier, 2011.
- [12] Fairchild P.D., Labinov S.D., Zaltash A., Rizy D.T., *Experimental and theoretical study of microturbine–based BCHP system*, ASME Winter Annual Meeting, 2001.
- [13] Zuchora K., *Selected aspects of cogeneration technology in distributed energy applications*, International Society for Optics and Photonics, 10445(104455J), 2017.

* Arkadiusz Urzędowski⁽¹⁾, Joanna Styczeń⁽²⁾,

BIM – nadażyć za rewolucją w budownictwie

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest innowacyjnemu podejściu do projektowania i realizacji procesu inwestycyjnego w branży budowlanej. Akronim BIM (Building Information Modeling) stał się rozpoznawalny na całym świecie dzięki zdefiniowaniu rewolucyjnego sposobu pracy architektów, projektantów, wykonawców, inwestorów i deweloperów. W pierwszej części artykułu autorzy wskazują na różnice występujące między podejściem tradycyjnym do projektowania i tworzenia dokumentacji z wykorzystaniem komputerowego wspomagania projektowania a technologią BIM. Omówiono metodologię podziału ze względu na zakres stosowania, oraz etapy wdrożenia standardów. Szczegółowo omówiono zastosowanie BIM w praktyce, wynikające z tego podejścia zalety i wady poparte przykładami realizacji w Polsce jak i za granicą, oraz badaniami przeprowadzonymi wśród przedstawicieli firm branżowych. Analiza ta pozwala optymistycznie spojrzeć na perspektywy rozwoju technologii BIM w Polsce i na świecie, wskazując obszary wymagające szczególnego zaangażowania w realizację operacji.

Słowa kluczowe: projektowanie, modelowanie informacji o budynku, BIM, CAD

BIM – keep up with the revolution in construction

Abstract: The article is devoted to an innovative approach to the design and implementation of the investment process in the construction industry. The BIM (Building Information Modeling) acronym has become internationally recognized by defining a revolutionary way of working for architects, designers, contractors, investors and developers. In the first part of the article, the authors point out the differences between the traditional approach to designing and creating documentation using computer-aided design and BIM technology. The division methodology by scope of application and stages of standards implementation were discussed. The application of BIM in practice is discussed in detail, the resulting advantages and disadvantages supported by examples of implementation in Poland and abroad, as well as research conducted among representatives of industry companies. This analysis allows an optimistic look at the prospects for the development of BIM technology in Poland and in the world, indicating areas that require special involvement in the implementation of operations.

Keywords: designing, building information modeling, BIM, CAD

1. Wstęp

Modelowanie informacji o budynku BIM (Building Information Modeling)
– nie jest wyłącznie cyfrowym modelem budynku, stanowi ono bazę danych

⁽¹⁾ a.urzedowski@pollub.pl, Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

⁽²⁾ j.styczen@pollub.pl, Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

reprezentowanych przez notację graficzną w formie m.in. rzutów, przekrojów czy widoków elewacji. W modelu trójwymiarowym zapisane są wszystkie części składowe obiektu, dzięki którym możliwym staje się generowanie wybranych widoków, zestawień i arkuszy. Każdy wymodelowany fragment budynku traktowany jest jako prototyp fizyczny stropów, dachów, przegród pionowych itp. zawierający w sobie informacje materiałowe oraz relacje przestrzenne.

Z obiektami tworzonymi w technologii BIM wiąże się możliwość analizy i interpretacji wszystkich informacji zapisanych w modelach poszczególnych elementów obiektów, reprezentowanych przez rodziny. Każda z rodzin dzieli się na typy, wśród których wyróżnić można kolejne predefiniowane modele przegród, stropów, elementów zagospodarowania terenu czy wyposażenia wnętrz. Metodologia BIM obejmuje jednak kompleksowo wszystkie branże związane z budownictwem, umożliwiając pracę na jednym modelu w czasie rzeczywistym zarówno projektantom z branży architektonicznej, konstrukcyjnej, elektrycznej czy sanitarnej. Także projektanci zagospodarowania terenu, czy architekci wnętrz mają do dyspozycji bardzo rozległe biblioteki rodzin produktów przygotowane i udostępniane przez producentów, umożliwiające opracowanie końcowej wizualizacji budynku, do komfortowej pracy z inwestorem.

Właśnie dzięki takiemu podejściu możliwym stało się przeprowadzanie w krótkim czasie analiz występujących kolizji, kontrolowanie kosztów budowy, tworzenia zestawień materiałów i szacowania kosztów eksploatacji. Ponad to przestrzeń robocza mająca zdefiniowany kierunek północy, pozwala na przeprowadzenie procesu modelowania na właściwie posadowionym obiekcie. Programy do pracy w BIM umożliwiają m.in. aktywację śledzenia promieni słonecznych i przeprowadzenie w czasie rzeczywistym analiz nasłonecznienia pomieszczeń oraz zacielenia rzucanego przez modelowany obiekt [1].

2. Charakterystyka technologii BIM

2.1. Przewaga metodologii BIM nad standardami CAD

W Polsce nadrzędną formą sporządzania dokumentacji technicznej nadal pozostaje wykorzystanie przyjętego od lat standardu komputerowego wspomagania projektowania – CAD. Wymagania stawiane przez prawo w odniesieniu do projektu budowlanego obejmują jedynie dokumentację w formie papierowej, lub ewentualnie elektronicznej – w przeważającej liczbie przypadków wyłącznie w standardzie dwuwymiarowym. Wśród najpopularniejszych programów znajdują się: Autocad, Autocad LT, ZW-CAD, 4mCAD, ARES czy Bricscad. Wszystkie z nich umożliwiają pracę z rysunkami w formatach DWG/DXF [2]. Takie podejście jest nazywane w nomenklaturze

zarządzania cyklem obiektu budowlanego: BIM Poziom 0. Jedynie nieliczne firmy z sektora architektoniczno - budowlanego sięgają po wizualizację całości, bądź części projektu z wykorzystaniem narzędzi do modelowania 3D [3]. Podejście takie prowadzi do odzwierciedlenia założonej całościowej koncepcji projektanta obiektu, umożliwiając podział na prace projektowe i otrzymania klasycznej dokumentacji. Jednak w trakcie opracowania dokumentacji pierwotna koncepcja obiektu ulega modyfikacją, co wiąże się z koniecznością nanoszenia zmian zarówno na modelu jak i w dokumentacji 2D. Często dochodzi do przeoczeń i trudności w koordynacji prac w zespole projektowym, generując błędy, niejednokrotnie okazujące się być kardynalnymi. Modele sporządzane w wyżej wymienionych programach nie są sparametryzowane a co się z tym wiąże, wymiary na rysunkach 2D nie są dostosowywane przy zmianie geometrii modelu w 3D.

Oprogramowanie do modelowania informacji o budynku charakteryzuje się automatycznym wykonywaniem pewnych operacji będących następstwem działań projektanta. Przykładem tej funkcjonalności jest dostosowywanie wymiarów na rysunkach 2D przy zmianie geometrii modelu, lub opcja zbrojenia dynamicznego, dostępna w programie typu Advance Steel dla którego użytkownik wprowadzając parametry geometryczne definiuje określone elementy rozkładu zbrojenia. W oprogramowaniu typu BIM możliwe jest także kształtowanie obiektów z wykorzystaniem sparametryzowanych funkcji opisujących ich właściwości. W parametrycznym modelu budowlanym powiązanie ścian, stropów i sufitów pozwala na sterowanie położeniem tych brył wskutek zmiany parametrów. Mogą być one określone poprzez formuły matematyczne zdefiniowane przez użytkownika i odnoszące się do innych definicji formuł. Połączone ze sobą obiekty domyślnie podążają za wprowadzanymi zmianami, aktualizują i dostosowują położenie na wszystkich wygenerowanych wcześniej rzutach, widokach czy zestawieniach. Wśród bardzo znanych konstrukcji zaprojektowanych z wykorzystaniem modelowania parametrycznego należy wymienić biurowiec 30 St Mary Axe położony w londyńskim City, czy galerię Złote Tarasy w Warszawie przy ul. Złotej 59.

2.2. Parametry procesu projektowania w standardzie BIM

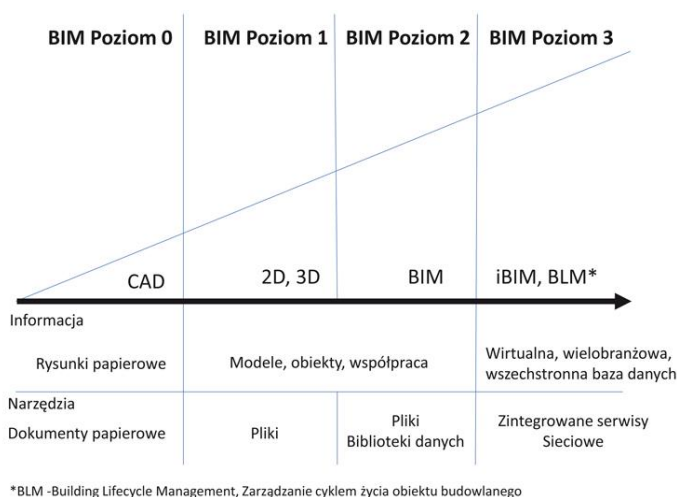
Technologia BIM umożliwia zupełnie nowe podejście do kwestii projektowania obiektów, wprowadzając narzędzia rewolucjonizujące sposób myślenia o całym procesie budowlanym. Ewolucja ta spowodowała przejście z modelowania 3D przez kolejne etapy 4D (czas), 5D (koszt), 6D (budownictwo zrównoważone), aż do 7D (zarządzanie nieruchomościami) [4].



Rys. 1. Kolejne parametry procesu projektowania w technologii BIM

Źródło: Blusiewicz J., N-BIM, <https://blubim.pl/n-bim-teoria-ewolucji/>, wrzesień 2019 [4]

Rozwój technologii BIM wymusił konieczność opracowania metodologii jej opisu i podziału na etapy, które odzwierciedlają chronologię procesu ewolucji oprogramowania. Na rysunku 2 przedstawione i scharakteryzowane są cztery poziomy zarządzania cyklem życia obiektu budowlanego. Poziom 0 zawiera proste rysunki 2D sporządzone z wykorzystaniem komputerowego wspomaganie projektowania. Kolejny poziom obejmuje złożone szkice CAD wzbogacone o modele trójwymiarowe, będące jednak wyłącznie graficzną reprezentacją projektowanych obiektów. Na poziomie drugim wprowadzone zostają odrębne modele BIM dla wszystkich branż w obrębie danego zadania, udostępniane między uczestnikami procesu. Wypracowane muszą być również systemy informatyczne wymiany danych. Przejście do ostatniego, trzeciego poziomu wymusza integrację wszystkich modeli i bieżącą wymianę informacji w trakcie całego procesu realizacji procesu budowlanego [2]. Prowadzenie płynnej współpracy między wieloma branżami na obiekcie centralnym wymaga bardzo zaawansowanych umiejętności od projektantów i ekstremalnie wydajnych stanowisk komputerowych. Wielka Brytania, jako światowy lider wdrożenia modelowania informacji o budynku, 4 kwietnia 2016 wprowadziła regulacje prawne (ERI – Employer’s Information Requirements) w zakresie obligatoryjnego zamawiania projektów na poziomie przynajmniej drugim dla inwestycji współfinansowanych z pieniędzy budżetu państwa. Program ten dotyczy obszarów technicznego i zarządzania projektem, mając na celu m.in. ograniczenie kosztów kapitałowych oraz redukcję emisji zanieczyszczeń pochodzenia budowlanego.



Rys. 2. Standardy technologii BIM (oś pionowa – dojrzałość technologii, oś pozioma – okres rozwoju)

Źródło: Piotrowski T., Prochoń P., Bim w małych firmach, Inżynier Budownictwa, 2019 [3]

3. BIM w praktyce

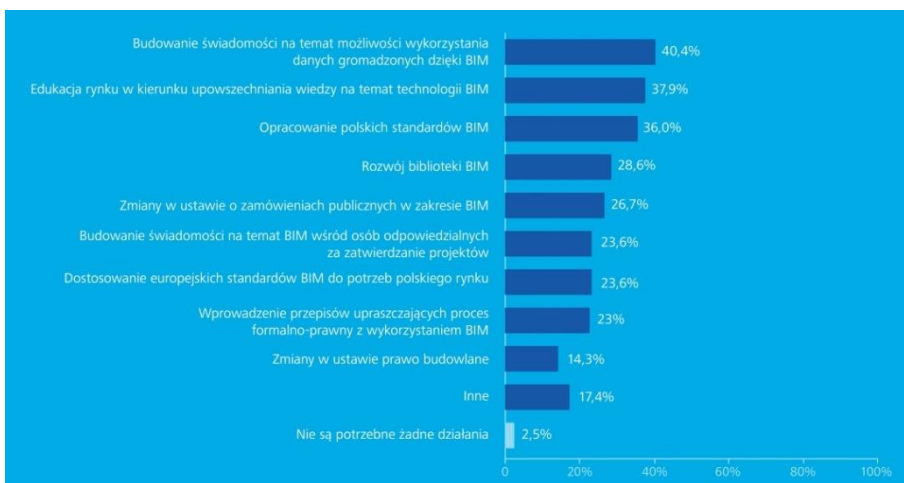
3.1. Zapotrzebowanie rynku

Pomimo tego, iż technologia BIM umożliwia spójne podejście, oraz optymalizację procesu projektowania międzybranżowego obiektów, wciąż nie zyskała ona wielu zwolenników wśród firm projektowych w Polsce. Wiąże się to z niechęcią do zainwestowania w oprogramowanie, know-how, czy opłacenie większej ilości godzin pracowników gdy standard ten nie jest wymagany. To właśnie brak jasnych regulacji prawnych w zakresie zamówień publicznych oraz niechęć inwestorów do ponoszenia większych kosztów sporządzenia projektów nie sprzyjają rozwojowi technologii BIM w Polsce.

Nie oznacza to jednak, że wielu dalekowzrocznych właścicieli biur wdraża innowacyjne podejście do projektowania, mając na względzie zmieniający się rynek. Młode zespoły projektantów opracowują swoje metodologie pracy w środowisku BIM, zrzeszając się z branżystami, we współpracy z którymi są w stanie modelować kompleksowo obiekty budowlane. Pojawia się też coraz więcej zamówień na duże projekty inwestycyjne, w których wiodącym jest modelowanie informacji o obiekcie – niestety będące jedynie w zasięgu dużych biur projektowych [5].

Propagatorami technologii BIM w Polsce są głównie firmy produkujące oprogramowanie, w tym wiodący Autodesk z programem Revit, czy Graphisoft z programem ArchiCAD. Ponad to szereg rodzimych firm z branży szkoleniowej

prowadzi zakrojone na szeroką skalę działania promocyjne wśród studentów, architektów i wykonawców, organizując m.in. takie inicjatywy jak Akademia BIM, liczne konferencje branżowe, czy darmowe warsztaty z obsługi oprogramowania. W celu rozeznania rynku, w październiku 2015 roku firma Autodesk zleciła badanie instytutowi MillwardBrown, mające na celu m.in. oszacowanie poziomu znajomości i stosowania metodyki BIM wśród kadry zarządzającej oraz decydentów z branży architektoniczno - budowlanej, zebranie informacji na temat dotychczasowych doświadczeń i opracowanie perspektyw wdrażania technologii modelowania informacji o budynku [6]. W badaniu uczestniczyli przedstawiciele reprezentujący 350 firm z branży architektoniczno - budowlanej, w tym: pracownice architektoniczne, konstrukcyjne, branżowe, wykonawcy i deweloperzy. Do przeprowadzenia badania zastosowana kwestionariusz z wykorzystaniem techniki mix mode (CATI, CAWI, CAPI), w opracowaniu którego brali czynny udział przedstawiciele instytucji z sektora architektoniczno - budowlanego.



Rys. 3. Działania potrzebne do zwiększenia zakresu technologii BIM w Polsce

Źródło: BIM: Polska perspektywa, Raport z badania MillwardBrown, wrzesień 2019 [6]

Badania te potwierdzają wcześniej postawione tezy, iż technologia BIM jest bardziej rozpowszechniona w większych biurach (56,6%), oraz wśród młodszych stażem projektantów (do 5 lat w branży). Jednak nawet w mniejszych firmach 40% pracowników zadeklarowało, iż zetknęło się z BIM. Początkowy etap wdrożeń potwierdzają również wyniki, w przypadku których ponad 20% uczestników deklaruje, iż pracują z technologią BIM, dopiero w okresie krótszym niż 1 rok. Na stopniową popularyzację się technologii wskazuje twierdząca odpowiedź około połowy respondentów na pytanie o świadomość

BIM i przypada ona na najmłodszą grupę wiekową. Nie przekłada się to jednak na efektywne wdrożenie i wykorzystanie jej w praktyce, o czym dosadnie świadczy deklaracja zaangażowania w przygotowanie projektów z wykorzystaniem modelowania informacji o budynku zaledwie 25,4% specjalistów. Są to firmy większe, zatrudniające co najmniej 10 pracowników a skala dokumentacji sporządzonej w BIM jest wysoka i wyniosła średnio 10,5 projektu w ciągu roku. Większość z nich wykorzystywała BIM wyłącznie na 1 poziomie wdrożenia, jednak wśród respondentów znalazła się też grupa (25%) firm szacująca swoje wdrożenia na L2, a nawet na L3. Niepokojącym jest fakt, iż dane te są znacznie wyższe w grupie projektantów konstrukcji i architektów, niższe natomiast wśród wykonawców, inwestorów i deweloperów.

Do najczęściej wymienianych zalet wdrożenia BIM należały: pozytywny wpływ na procesy projektowe, skrócenie czasu pracy, dobra komunikacja z klientami i pozytywny wpływ na wymianę informacji z branżystami. Ponad to wskazywano na możliwość tworzenia projektów lepszej jakości, minimalizację błędów - zarówno na etapie projektowania jak i realizacji, usprawnienie procesu projektowania oraz możliwość bardziej wydajnych projektów.

Zaledwie 3,5% badanych uznało, iż wprowadzenie BIM nie niesie żadnych pozytywnych efektów. Wśród najczęściej wymienianych barier do wdrożenia modelowania informacji o obiekcie, są: zbyt niskie stawki za projekty, braki obowiązującego standardu oraz braki w kompetencjach pracowników, niechęć do wprowadzania zmian i brak otwartości na nowe rozwiązania.

Pozytywnym sygnałem dla metodologii BIM jest niemal jednogłośnie deklaracja (poza 2,5% grupą badanych) o konieczności podjęcia działań w zakresie jej wprowadzania. Wśród działań podejmowanych w celu zwiększenia wykorzystania BIM wymieniano na pierwszych miejscach przełamanie barier kompetencyjnych poprzez działania edukacyjne wśród interesariuszy, tworzenie standardów i bibliotek BIM (Rys.3).

3.2. Wdrożenie systemu BIM

W Polsce coraz częściej pojawiają się propozycje przygotowania wzorców i wymagań w zakresie wdrożenia BIM przy przygotowywaniu postępowań o udzielenie zamówienia publicznego i podpisywanych umów. W opinii ekspertów głównym beneficjentem BIM są inwestorzy publiczni, którzy powinni odegrać wiodącą rolę w procesie wdrażania technologii w budownictwie. Powołując się na przeprowadzone badania [6], firmami które są gotowe sprostać wymaganiom stawianym BIM są duże i średnie pracownie architektoniczno - budowlane. Zatem wprowadzenie regulacji prawnych w tym zakresie może spowodować, iż małe firmy działające w sektorze zamówień publicznych będą miały trudności z dostosowaniem się do tych wymagań. W Europie jednak metodologia modelowania informacji o obiekcie zyskuje coraz większą popularność, stając się standardem wymaganym przez instytucje publiczne.

Liderami w tym zakresie są od lat Wielka Brytania i kraje skandynawskie, do których w 2018r. dołączyła Hiszpania wprowadzając obowiązek BIM w sektorze publicznym.

Decyzja o wprowadzeniu BIM poprzedzona jest szczegółową kalkulacją ekonomiczną w kontekście całego procesu budowlanego a nie tylko etapu projektowania. Analiza procesów technologicznych obiektów dotychczas projektowanych i wznoszonych z wykorzystaniem technologii BIM pokazuje, iż pierwszy etap wdrożenia i stosowania technologii - przygotowanie dokumentacji i planowanie budowy są wyższe od pracy w standardzie CAD. Jednak informacje zawarte w dokumentacji projektowej sporządzonej z wykorzystaniem metodologii BIM, pozwalają na akcelerację procesu wykonywania prac w skutek unikania błędów i kolizji międzybranżowych a także dostarczenia skutecznych narzędzi cyfrowych do zarządzania budową. Dlatego tak ważnym zagadnieniem staje się udostępnienie wykwalifikowanej kadrze zarządzającej pełnej wersji dokumentacji projektowej wraz z modelami. W niektórych krajach wprowadzono regulacje w tym zakresie, tworząc algorytm pozwalający na optymalizację kosztów dzięki właściwym proporcjom nakładów na poszczególnych etapach realizacji budowy. Tabela 1 przedstawia zmianę kosztów w projektach BIM w odniesieniu do podejścia tradycyjnego, opracowane przez Komitet Sterujący BIM w Singapurze [7].

Tabela 9. Zmiana kosztów w projektach BIM w odniesieniu do podejścia tradycyjnego

Etap projektu	Zmiana nakładów związana z przejściem od nie-BIM do BIM
Projekt wstępny	+2,5
Zatwierdzenie projektu	0
Projekt konstrukcyjny	+2,5
Postępowanie przetargowe	0
Etap projektowania	+5
Zarządzanie budową	-5
Prace wykonawcze	0
Etap realizacji budowy	-5
Całkowita zmiana procentowa	-10

Źródło: Keung J., Singapore BIM Guide Version 2, Singapur, Building and Construction Authority, 2013 [7]

W Polsce realizowane są inwestycje sektora publicznego, dla których zamawiający ogłaszają zamówienia w treści których zawierają informacje o konieczności wykorzystania technologii BIM. Przykładem takiej realizacji jest obwodnica miasta Zator w ciągu drogi krajowej nr 28. Zamawiający, którym jest Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad oddział w Krakowie, zawarła

w warunkach przetargu jako pierwsza w Polsce zapis o zaprojektowaniu i realizacji budowy z wykorzystaniem BIM. W dniu 6 września 2019r. po otwarciu kopert okazało się, że do przetargu przystąpiło aż 7 firm, a różnica między najwyższą i najniższą ofertą wyniosła ponad 100% tj. 3 075 369,00zł. Dyferencja między cenami jest bardzo duża i mieści się w zaledwie 6% zamówień, dla których różnice był tak duże na przełomie lat 2013 – 2015. Wydają się być szczególnie niepokojące, jeśli wziąć uwagę, że obejmowały one również inwestycje realizowane w technologii tradycyjnej [8]. W założeniach ceny oferentów powinny być zbliżone, a kalkulacja kosztów odbywać się z wykorzystaniem zautomatyzowanego procesu przedmiarowania dla procesu BIM.

4. Wnioski

Modelowanie informacji o budynku, ze względu na całościowe podejście do realizacji inwestycji budowlanych odgrywa coraz większą rolę w krajach wysoko rozwiniętych. Propagatorami tego rozwiązania są osoby mające dalekowzroczne spojrzenie na dynamicznie zmieniające się trendy w procesie architektoniczno - budowlanym i konieczność uwzględnienia zmian rynku. Przejście z poziomu L0 do poziomu L2 wymaga ogromnych nakładów pracy, które jednak – jak pokazują badania, w dłuższej perspektywie będą przekładać się na obniżenie kosztów prowadzenia budowy dzięki skróceniu czasu realizacji inwestycji i zminimalizowaniu prawdopodobieństwa kolizji.

Przytoczone wyniki badań w Polsce jednoznacznie wskazują, iż wprowadzenie technologii BIM jest kwestią czasu i wysokości nakładów na jej szeroką popularyzację, szczególnie wśród najmłodszego pokolenia. To właśnie oni – osoby, że stażem poniżej 5lat, są gotowi podjąć nowe wyzwania, zdobywać wiedzę i korzystając z doświadczenia europejskich krajów zachodnich, wytyczać nowe szlaki. Wśród ponad 50% uczestników procesu budowlanego istnieje świadomość, że liczba projektów powstających z wykorzystaniem BIM będzie rosnąć. Dane te są bardzo optymistyczne i poparte deklaracjami 64% firm, które dotychczas zetknęły się z BIM i zamierzają realizować tego typu projekty. Niestety w dalszym ciągu stanowi to zaledwie 25,4% całej próby – 350 firm, na której przeprowadzono badania.

Szczególnie w krajach skandynawskich, oraz Europy Zachodniej popularyzowane jest innowacyjne podejście do prowadzenia procesu projektowania i wnoszenia obiektów budowlanych. Wynika to ze szczegółowo monitorowanych przebiegu inwestycji, które pozwalają odnotowywać wysokie oszczędności i pozytywny wpływ na ochronę środowiska naturalnego. Odpowiednie regulacje prawne, jasno określone wymagania dotyczące realizacji inwestycji z wykorzystaniem BIM, oraz szeroki dostęp do bazy wiedzy są czynnikami sprzyjającymi wdrażaniu tego systemu.

Literatura

[1] Walczak Z., Szymczak-Graczyk A., Walczak N., *BIM jako narzędzie przyszłości w projektowaniu i rewitalizacji obiektów budowlanych*, Rewitalizacja obszarów zurbanizowanych, Wałcz, 2016.

[2] Tomana A., *BIM : innowacyjna technologia w budownictwie : podstawy, standardy, narzędzia*, Kraków, PWB MEDIA Zdziebłowski Spółka Jawna, 2016.

[3] Piotrowski T., Prochoń P., *Bim w małych firmach*, Inżynier Budownictwa, 2019.

[4] Blusiewicz J., N-BIM, <https://blubim.pl/n-bim-teoria-ewolucji/>, wrzesień 2019.

[5] Kasznia D., Magiera J., Wierzowiecki P., *BIM w praktyce : standardy, wdrożenie, case study*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2018.

[6] BIM: Polska perspektywa, Raport z badania MillwardBrown, <https://www.autodesk.pl>, wrzesień 2019.

[7] Keung J., *Singapore BIM Guide Version 2*, Singapur, Building and Construction Authority, 2013.

[8] Zima K., *Kalkulacja kosztów robót budowlanych z wykorzystaniem technologii BIM*, Kraków, Wydawnictwo PK, 2017.

Elektromobilność – wyzwanie i szansa

Streszczenie: Samochody elektryczne stają się coraz bardziej popularne ze względu na politykę redukcji emisji CO₂. W artykule opisano różne wady i zalety elektromobilności oraz pogląd na wybrane systemy magazynowania energii stosowane w transporcie (superkondensatory, systemy magazynowania energii z kołem zamachowym i pięć typów baterii). Dodatkowo, w pracy scharakteryzowano problemy akumulatorów litowo-jonowych. Określono możliwy wpływ integracji pojazdów elektrycznych z siecią elektroenergetyczną.

Słowa kluczowe: elektromobilność; magazynowanie energii; wpływ na sieć elektroenergetyczną

Electromobility – challenge and opportunity

Abstract: Electric vehicles are getting more and more attention due to the CO₂ emissions reduction policies. The paper describes various advantages and disadvantages of e-mobility and a view on chosen energy storage systems used in a road transportation (Compressed Air Energy Storage, Supercapacitors, Flywheel Energy Storage Systems and five types of batteries). Additionally, problems of lithium-ion batteries are characterized. Possible impact of an electric vehicle integration with an electrical grid is specified.

Keywords: electromobility; electric vehicles; energy storage; impact on an electrical grid

1. Wstęp

Elektromobilność (lub e-mobilność) zasadniczo oznacza elektryfikację indywidualnego transportu [1]. Według [2] jest ona również definiowana jako system transportu drogowego oparty na pojazdach napędzanych elektrycznie. Obecnie ciężarówki, samochody i motocykle polegają głównie na silnikach spalinowych (ang. Internal Combustion Engine, ICE), a status ten nie zmienił się od początku XX wieku. Jednak dominacja silników spalinowych powoli maleje ze względu na rosnące zainteresowanie pojazdami elektrycznymi (ang. Electric Vehicle, EV). Dzieje się tak ze względu na konieczność ograniczenia emisji CO₂, co jest bezpośrednio związane z pojazdami wyposażonymi w ICE [1,3]. Obecną klasyfikację pojazdów przedstawiono w [4]. W przeszłości podejmowano kilka prób popularyzacji pojazdów elektrycznych. W 1884 roku Parker opracował pierwszy pojazd elektryczny zasilany akumulatorami elektrochemicznymi, ale potem, na początku XX wieku, silniki spalinowe przejęły rynek, ponieważ uważano je wówczas za bardziej wydajną technologię.

*a.chudy@pollub.pl, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii,
Politechnika Lubelska

Podjęto nieudane wysiłki, aby zmienić tę sytuację. Na przykład można to zaobserwować w latach 70. XX wieku (kryzys naftowy) lub w latach 90. XX wieku, gdy tysiące czołgów wyprodukowano w Europie i Stanach Zjednoczonych [1,5–7].

Ulepszenia metod magazynowania energii, zwłaszcza spadek cen akumulatorów litowo-jonowych i wzrost ich energii właściwej, prowadzą do kolejnej, prawdopodobnie największej, możliwości wdrożenia e-mobilności [1]. Samochód elektryczny można postrzegać jako nowego konsumenta z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego, co przyczynia się do większego zapotrzebowania na energię i potrzeby zwiększenia wytwarzania energii. Proces ładowania pojazdów elektrycznych może również wpływać na zachowanie systemu elektroenergetycznego. W związku z tym wdrożenie e-mobilności jest trudnym zadaniem dla wszystkich sektorów przemysłu [8].

2. Plusy i minusy elektromobilności

Pojazdy elektryczne nieprzypadkowo cieszą się coraz większym zainteresowaniem opinii publicznej. Zalety pojazdów EV w porównaniu z pojazdami ICE są następujące [3,7,9,10]:

- są pojazdami zeroemisyjnymi (ZEV). Według Światowej Organizacji Zdrowia i Europejskiej Agencji Środowiska zanieczyszczenie powietrza stanowi poważne zagrożenie ze względu na to, że powoduje problemy zdrowotne (rak, astma, demencja itp.). Według statystyk ponad 60% zanieczyszczeń w Szanghaju lub Los Angeles pochodzi z silników spalinowych. Zastąpienie wszystkich pojazdów ICE pojazdami elektrycznymi spowodowałoby znaczny spadek zanieczyszczenia powietrza, nawet przy uwzględnieniu wkładu elektrowni dostarczających energię do pojazdów elektrycznych;
- brak zanieczyszczenia olejem [7];
- redukcja hałasu – silniki elektryczne są prawie bezgłośnie, szczególnie gdy prędkość EV jest mniejsza niż 30 km/h. Budzi jednak kontrowersje ze względów bezpieczeństwa. Piesi i rowerzyści mogą nie słyszeć EV, który może doprowadzić do wypadku. Obecnie standardy hałasu nie są ujednolicone. Wszystkie pojazdy elektryczne i pojazdy hybrydowe w Europie mają emitować hałas od lipca 2019 r. [11,12];
- znaczny potencjał przyspieszenia – moc dostarczana jest bez zauważalnego opóźnienia przez silnik elektryczny [3];
- są prawie bezobsługowe, a koszt utrzymania jest niski – mniej części ruchomych i niższy koszt ładowania pojazdów elektrycznych w porównaniu do tankowania samochodów ICE;
- mogą wykorzystywać energię ze źródeł odnawialnych, która zostałaby zmarnowana;

- prawie dwukrotnie wyższa efektywność energetyczna – w ICE znaczna część energii zamieniana jest w ciepło [3,7].

Pojazdy elektryczne mają również wady, takie jak wyższy koszt pojazdu, krótszy przebieg (średnio od 100 do 200 km na ładunek), zależność przebiegu od warunków pogodowych i inne związane z metodami magazynowania energii, które są wymienione w dalszych sekcjach artykułu [3,7].

3. Systemy magazynowania energii i elektromobilność

Można wyróżnić pięć głównych grup systemów magazynowania energii [13–15]:

- Systemy mechaniczne (np. Compressed Air Energy Storage (CAES) do magazynowania energii sprężonego powietrza, PHES do magazynowania energii wodnej z pompą ciepła, Flywheel energy storage systems (FESSs) do magazynowania energii w kole zamachowym);
- Systemy chemiczne (na przykład syntetyczny gaz ziemny – SNG, magazynowanie wodoru z ogniwem paliwowym/elektrolizerem, odwracalne reakcje chemiczne);
- Systemy elektrochemiczne, zwłaszcza różne rodzaje akumulatorów;
- Systemy elektryczne (nadprzewodzące magnetyczne magazynowanie energii – SMES, kondensatory, superkondensatory);
- Systemy termiczne.

W tym rozdziale omówiono kilka wybranych metod magazynowania energii stosowanych w globalnej branży pojazdów elektrycznych.

3.1. Magazynowanie energii poprzez sprężone powietrze

Magazynowanie energii poprzez sprężone powietrze może być wykorzystywane jako hybrydowe źródło energii dla pojazdów. Nazywa się to technologią hybrydową sprężonego powietrza i wykorzystuje kombinację jednostki napędowej (silnik spalinowy i elementy mocy płynów) oraz źródła energii (energia sprężonego powietrza). Jest to jednak technologia daleka od komercjalizacji i konieczne są dalsze badania, ponieważ ma ona wiele wad. Widoczny jest brak zainteresowania naukowców technologiami hybrydowymi wykorzystującymi sprężone powietrze. Więcej informacji na temat CAES dla samochodów elektrycznych można znaleźć w [16,17].

3.2. Superkondensatory

Superkondensatory, znane również jako Ultracapacitors, są podobne do normalnych kondensatorów, jednak ich pojemność jest zwykle 20 razy większa. Istnieją trzy rodzaje superkondensatorów: kondensatory elektryczne dwuwarstwowe (najwyższa gęstość mocy, 1000–2000 kW/kg i najniższa gęstość energii, 5–7 Wh/kg), pseudo kondensatory i kondensatory hybrydowe. Różnią

się one między sobą zastosowanymi materiałami elektrod i mechanizmami magazynowania energii. Ultrakondensatory charakteryzują się wysoką wydajnością (88%–95%), zdolnością do pracy w szerokim zakresie temperatur (od -40°C do 65°C) i długą żywotnością (nawet 40 lat) [4,18]. Superkondensatory są używane głównie z akumulatorami, a ten typ układu hybrydowego nazywa się układem magazynowania energii akumulator / superkondensator. Niemonotoniczne zużycie energii i częste zmiany podczas rozładowywania akumulatora mają niekorzystny wpływ na proces elektrochemiczny akumulatora. Superkondensator ma wyższy wskaźnik zdolności i lepszą cykliczność i może szybko zapewnić dużą ilość energii, podczas gdy akumulator zapewnia stały przepływ energii. Jest to stosunkowo nowe, ale bardzo obiecujące rozwiązanie. Oczywiście konieczne są dalsze badania, na przykład związane z użyciem baterii i superkondensatorów przygotowanych specjalnie do zastosowania w pojazdach elektrycznych [19]. Superkondensatory są również stosowane w hamowaniu odzyskowym (konwersja energii kinetycznej z hamowania pojazdu na energię elektryczną). Rozwiązanie to zostało przetestowane w podstacji trolejbusowej w Gdyni w latach 2011–2013. Wdrożenie stacjonarnego banku superkondensatorów w podstacji może pozwolić na zmniejszenie miesięcznego zapotrzebowania na energię w systemach trakcyjnych nawet o 35%. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię w dużej mierze zależy od warunków pracy – im wyższy teren, tym więcej energii jest odzyskiwane [20,21].

3.3. Systemy magazynowania energii z kołem zamachowym

Systemy magazynowania energii z kołem zamachowym są jednymi z najpopularniejszych metod magazynowania energii. Jest to szybkie urządzenie magazynujące, które jest w stanie przechowywać/utrzymywać energię kinetyczną w wyniku obrotu wirnika/koła zamachowego. Systemy magazynowania energii na kole zamachowym są przyjazne dla środowiska i okresowa konserwacja nie jest wymagana. Ogólna sprawność mechaniczna tych urządzeń może osiągnąć 97%, podczas gdy wydajność w obie strony może osiągnąć nawet 85%. FESS charakteryzują się długą żywotnością (do 20 lat), niską gęstością energii (10–150 Wh/kg) i wysoką gęstością mocy. System kontrolowany temperaturą nie jest potrzebny, ponieważ FESS mogą pracować w szerokim zakresie temperatur. Stan naładowania koła zamachowego można określić na podstawie jego prędkości. Technologia ta została już zastosowana w transporcie (np. Trakcja, pojazdy elektryczne i pojazdy hybrydowe). Na przykład prototyp układu koła zamachowego o ultrawysokiej prędkości (60 000 obr./min) dla pojazdów elektrycznych opracował Lawrence Livermore National Laboratory. Relatywnie wysoki koszt kapitału (5000 \$ / kWh), obawy związane z bezpieczeństwem i siły żyroskopowe są głównymi wadami FESS. Obecnie nie ma zbyt wielu publikacji na temat bezpieczeństwa FESS. Publikacja

Bendera D. porusza kwestię braku standardów bezpieczeństwa FESS. Zawiera zalecenia dotyczące bezpiecznego projektowania i użytkowania kół zamachowych. Popularność niezależnych lub hybrydowych systemów magazynowania energii z kołm zamachowym w elektromobilności będzie zależeć od redukcji kosztów tej technologii i dalszych zmian. Wątpliwe jest, aby FESS uzyskał już i tak niski przyrostowy koszt energii akumulatorów [4, 13, 17, 22–26].

3.4. Baterie

Jedno lub więcej ogniw elektrochemicznych przekształcających zmagazynowaną energię chemiczną w energię elektryczną nazywa się baterią [4]. W pojazdach elektrycznych stosowano różne rodzaje akumulatorów i były one jak dotąd najbardziej skuteczne w dziedzinie mobilności elektronicznej. Baterie miały różne rodzaje elektrolitów, różniące się długością życia, ceną i pojemnością [5].

Żywotność baterii można wyrazić w odniesieniu do jej cyklu życia (gdy bateria zaczyna wyraźnie zmniejszać swoją wydajność po liczbie cykli ładowania / ładowania) lub żywotności kalendarza. Po tym okresie akumulator osiąga 80% swojej pierwotnej pojemności [27].

Cena i pojemność w największym stopniu przyczyniają się do możliwego sukcesu wdrożenia e-mobilności w zakresie magazynowania energii. Obecnie zasięg działania pojazdu elektrycznego jest znacznie niższy niż pojazdów z silnikami spalinowymi, ponieważ akumulatory nie są w stanie dostarczyć i zgromadzić wystarczającej ilości energii [5]. Różne rozmiary pojazdów elektrycznych powodują różne rozmiary akumulatorów. Głównym celem jest maksymalne zmniejszenie rozmiaru baterii bez utraty jej pojemności [15,28].

Istnieje pięć grup akumulatorów, które można wykorzystać w transporcie drogowym:

1) Akumulator kwasowo-ołowiowy. Najpopularniejszy typ baterii. Jest szeroko stosowany w pojazdach ICE. Akumulatory kwasowo-ołowiowe nie są przyjazne dla środowiska podczas produkcji i utylizacji. Istnieją badania dotyczące ulepszenia tej technologii, na przykład poprzez dodanie węgla aktywnego do ujemnej płyty akumulatora, jednak akumulatory kwasowo-ołowiowe są bliskie osiągnięcia maksymalnego etapu rozwoju [4, 15, 29].

2) Bateria niklowa. Elektroda dodatnia jest wykonana z wodorotlenku niklu, podczas gdy różne elektrody są stosowane do elektrody ujemnej. Istnieje pięć rodzajów akumulatorów na bazie niklu: Ni–Fe, Ni–Cd, Ni–Zn, Ni–MH i Ni–H₂. Ni–Fe i Ni Zn nie są atrakcyjne do zastosowań EV ze względu na ich krótki cykl życia, moc właściwą i wysoki koszt. Akumulatory Ni–MH są przyjazne dla środowiska i charakteryzują się wysoką energią właściwą (do 68 Wh/kg) i prawdopodobnie najlepiej nadają się do zasilania pojazdów EV, jednak mają wysoki wskaźnik samorozładowania (do 12,5% dziennie w normalnych

warunkach temperatury pokojowej), wymaga kosztownej ładowarki, generuje ciepło podczas pracy i wymaga złożonego algorytmu [4,30,31].

3) Akumulatory o zerowej emisji akumulatorów (ZEBRA), zbudowane z chlorku niklowo-sodowego, są stosowane od lat 90. w pojazdach elektrycznych. Są w stanie pracować w szerokim zakresie temperatur (250–350°C). Koszt cyklu życia akumulatorów ZEBRA jest niższy niż akumulatorów ołowiowo-kwasowych. Inne zalety obejmują wyższą lub równą gęstość energii w porównaniu z baterią litową, najniższy koszt dowolnej nowoczesnej technologii akumulatorów EV, długi czas życia kalendarza, wytrzymałość, odporność na awarię ogniwa (przeładowanie lub nadmierne rozładowanie). Są również odporne na przeładowanie i nadmierne rozładowanie. Akumulatory ZEBRA mają jednak kilka wad: stosunkowo niską moc właściwą (150 W / kg), potrzebę zarządzania temperaturą i samorozładowania. Baterie NaNiCl_2 są przede wszystkim stosowane w pojazdach elektrycznych do dużych i średnich zastosowań do magazynowania energii [4,30].

4) Baterie elektrochemiczne metal–powietrze. Składają się z metalowych elektrod jako anody i tlenu z nieograniczonego dopływu powietrza jako katody. Li, Ca, Mg, Fe, Al i Zn są wykorzystywane jako metal anodowy. Spośród tych komponentów bateria litowo-powietrzna (Li Air) ma największe znaczenie w zastosowaniach EV ze względu na jej wysoką teoretyczną energię właściwą (11,14 kWh/kg z wyłączeniem tlenu, który nie jest przechowywany w akumulatorze), chociaż nie została jeszcze wprowadzona do obrotu, który jest wynikiem wysokiego ryzyka pożaru spowodowanego połączeniem powietrza i wilgoci. Baterie metalowo-powietrzne mają ograniczony cykl życia i niską moc właściwą [4,30,32].

5) Baterie litowo-jonowe. Obecnie zdecydowanie odgrywają one najważniejszą rolę w promowaniu rozwoju pojazdów elektrycznych, ponieważ są uważane za standard we współczesnym BEV. Jest to stosunkowo nowa technologia (dostępna na rynku od lat osiemdziesiątych). Akumulatory litowo-jonowe mają wysoką sprawność (do 95%), lekkość, wysoką moc właściwą (200–430 W/kg) i wysoką energię właściwą (118–250 Wh / kg). Nie ma też efektu pamięci. Żywotność kalendarza typowej baterii litowo-jonowej wynosi zwykle 8–10 lat. Te właściwości sprawiają, że akumulatory litowo-jonowe są doskonałe do zastosowania w pojazdach elektrycznych.

3.5. Problemy baterii litowo-jonowych

Poważne problemy z akumulatorami obejmują ich utylizację, recykling i negatywny wpływ na zdrowie. Właściwy sposób ich gromadzenia, przetwarzania i zakopywania ma kluczowe znaczenie dla środowiska. Baterie są wykonane z wielu materiałów (np. Metali, niemetali, elektrolitów), które mogą być niebezpieczne przy niewłaściwej obróbce. Egzotermiczna reakcja litu lub jonów litu z tlenem może wystąpić, gdy otwarty akumulator litowo-jonowy

zostanie wystawiony na działanie powietrza i może dojść do samozapłonu lub pożaru pojazdu elektrycznego. W ten sposób opracowano technologie i procedury recyklingu. Różne techniki chemiczne i mechaniczne pozwalają na recykling większości materiałów akumulatorowych, jednak zwykle nie jest to tani proces [7,13,33]. Tylko 3% akumulatorów litowo-jonowych jest poddawanych recyklingowi, a cały proces jest ograniczony, co stanowi alarmujący [34]. Można wyróżnić trzy metody recyklingu akumulatorów litowo-jonowych: mechaniczny, pirometalurgiczny i hydrometalurgiczny. Ich głównym celem jest odzysk materiałów z baterii. Zazwyczaj lit nie jest najbardziej pożądanym materiałem. Większą uwagę zwraca się na kobalt, nikiel i mangan. Niski poziom recyklingu litu może wynikać z niskich cen litu ze względu na to, że wydobycie litu jest tanie. Jednak przewiduje się, że popyt na lit będzie naturalnie wzrastał ze względu na rosnącą popularność pojazdów elektrycznych i może powodować niedobór tego metalu i wzrost cen baterii, biorąc pod uwagę najgorszy scenariusz. Przewiduje się, że większość zapotrzebowania na lit w połowie i dalekiej przyszłości będzie pochodzić z akumulatorów pojazdów elektrycznych. Przewiduje się, że do 2040 roku lit będzie generował roczny strumień odpadów wynoszący 340 000 ton. Konieczne są dalsze badania dotyczące recyklingu litu i wydajności tego procesu [13,33–35]. Ponadto obróbka i produkcja akumulatorów do pojazdów elektrycznych powoduje niekorzystne warunki oddechowe, płucne i neurologiczne. Z tego powodu kluczowe znaczenie mają środki bezpieczeństwa [30]. Obecnie akumulatory litowo-jonowe przewyższają inne metody magazynowania energii stosowane w pojazdach elektrycznych. Jeśli ceny akumulatorów nie można znacznie obniżyć w przyszłości, prawdopodobnie hybrydowe pojazdy elektryczne i pojazdy elektryczne z hybrydowymi systemami magazynowania energii będą najbardziej popularne wśród pojazdów przyjaznych dla środowiska. Jeśli jednak w przyszłości koszty akumulatorów ulegną dalszemu znacznemu zmniejszeniu, ekologiczne pojazdy z rozszerzonymi układami akumulatorowymi z pewnością zdominują przemysł [15]. Według [37] całkowity koszt kapitałowy różnych systemów magazynowania energii do produkcji na dużą skalę spada ze względu na rosnące zapotrzebowanie na pojazdy elektryczne i inne czynniki. Jest to rosnący trend, który z pewnością nie zniknie szybko, dlatego przyszłość mobilności e jest raczej optymistyczna. Proces produkcji pojazdów elektrycznych powinien również obejmować uwzględnienie różnych czynników w zakresie magazynowania energii oprócz kosztów, na przykład żywotności, wydajności, wskaźnika reakcji, skala, bezpieczeństwo, niezawodność i łatwa konserwacja [38].

4. Wyniki integracji e-mobilności z siecią elektryczną

Rozwój elektromobilności wiąże się z większą interakcją między transportem a systemem elektroenergetycznym. Pojazd elektryczny należy traktować jako

nowego konsumenta w systemie elektrycznym. Wpływ na system zasilania obejmuje niestabilność napięcia, zwiększone zapotrzebowanie szczytowe i różne problemy z jakością energii [8,39,40]. Wdrożenie e-mobilności wiąże się zatem z analizą poglądów kilku stron: właściciela pojazdu elektrycznego, agregatora, właściciela parkingu, operatora systemu przesyłowego (OSP) i operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) [39].

Integracja pojazdów elektrycznych z systemem zasilania może zmniejszyć wpływ mobilności elektrycznej na sieć elektryczną. Istnieją trzy główne pojęcia:

- Vehicle to Home (V2H) – pojazd elektryczny dostarcza energię elektryczną z akumulatora do domowej sieci elektrycznej i odwrotnie,
- Vehicle to Vehicle (V2V) – dotyczący wymiany energii między lokalną społecznością pojazdów elektrycznych,
- Vehicle to Grid (V2G) – najbardziej atrakcyjna koncepcja dotycząca handlu i wymiany między akumulatorem pojazdu elektrycznego a siecią poprzez zarządzanie lokalnym agregatorem. Można zidentyfikować jednokierunkowy V2G (EV jest traktowany jedynie jako obciążenie sieci) i dwukierunkowy V2G (podwójny kierunek energii elektrycznej między EV a siecią). [40,41].

Dwukierunkowy V2G to bardzo atrakcyjne rozwiązanie. Daje to pewne korzyści, na przykład wsparcie mocy czynnej i biernej, regulację mocy oraz dalszą penetrację odnawialnych źródeł energii [39]. Ponadto, zgodnie z [8], V2G inicjuje zmianę technologii z morskiej energii wiatrowej na tańszą fotowoltaikę i zmniejsza zależność od ciągłej produkcji energii. Wynika to z dostosowania obciążenia EV do czasów wysokiej produkcji energii odnawialnej i przekazywania energii do sieci, gdy wytwarzanie energii fotowoltaicznej jest niskie. Ponadto istnieją pewne badania dotyczące wdrażania ogniów fotowoltaicznych w pojazdach, chociaż potrzebne są dalsze badania w celu oceny możliwych korzyści tego rozwiązania [4,8,39,42].

Pomimo zalet V2G może on również stanowić zagrożenie dla stabilności sieci. Proces ładowania może wpływać na działanie sieci na wiele sposobów, zwłaszcza na poziomie sieci dystrybucyjnej. Istnieją różne modele ładowania pojazdów elektrycznych [39,43]. Strategie kontroli ładowania mogą pomóc złagodzić wpływ pojazdów elektrycznych na sieci elektryczne. Niektóre strategie kontroli ładowania i ich wpływ na sieć opisano na przykład w [8] i [44].

Ponadto wdrożenie V2G wiąże się z wyzwaniami związanymi z technikami optymalizacji i kontroli zarządzania przesyłem energii elektrycznej między siecią a każdym pojazdem EV. Programowanie liniowe (LP) i programowanie kwadratowe (QP) służą do optymalizacji poboru mocy. Nie są odpowiednie dla rozwiązania V2G, ponieważ są ograniczone do celów liniowych i prostych. Z tego powodu testowane są metody programowania nieliniowego (NLP), mieszane programowanie nieliniowe liczb całkowitych (MINLP), relaksacja Lagrange'a (LR), algorytm genetyczny (GA) i optymalizacja roju cząstek (PSO). Dwie ostatnio wspomniane metody optymalizacji są najbardziej obiecujące [39].

Istnieje kilka projektów i badań związanych z budową stacji ładowania i testowaniem ich wpływu na sieć, trwałości i ergonomii. Na przykład Politechnika Lubelska i PGE Dystrybucja wspólnie pracują nad budową dwukierunkowej stacji ładowania pojazdów elektrycznych, która byłaby podłączona do infrastruktury oświetleniowej. Projekt został ogłoszony na konferencji prasowej, która odbyła się 25 maja 2017 r. Korzystanie ze stacji zostanie udostępnione na zasadzie otwartej licencji. Będzie mógł być dystrybuowany i produkowany przez różne podmioty gospodarcze. Prototyp systemu ma zostać ukończony za dwa lata od ogłoszenia. Prace nad projektem zakończą się na początku 2020 r. [45].

5. Wnioski

Elektromobilność jest zdecydowanie ścieżką, którą należy obrać. Jego zalety przeważają nad wadami, jednak należy to robić ostrożnie, aby wdrożenie elektromobilności nie spowodowało poważnych problemów dla środowiska i sektora energii elektrycznej.

W nadchodzących latach zdecydowanie można oczekiwać stopniowego rozwoju całej branży elektromobilności, co jest wynikiem przyjaznej dla środowiska polityki, ulepszenia systemów magazynowania energii i odnawialnych zasobów energii.

Jednak 1 milion samochodów elektrycznych do 2020 r. I 2025 r. Odpowiednio w Niemczech i Polsce wydaje się nierealistyczny, ponieważ 1 stycznia 2018 r. W Niemczech istniało 53 861 pojazdów elektrycznych na baterie i 44 419 hybrydowych pojazdów elektrycznych. Zniesienie podatku VAT od pojazdów elektrycznych i innych zachęt dla świadomych energetycznie kierowców może zwiększyć liczbę właścicieli pojazdów elektrycznych w Polsce [46–49]. Trzeba powiedzieć, że kluczową rolę odgrywają również ulepszenia metod magazynowania energii (zwłaszcza akumulatorów). Koszt akumulatorów używanych w pojazdach elektrycznych wpływa bezpośrednio na ich ceny. Ponadto infrastruktura z szybkimi stacjami ładowania jest niezbędna, aby osiągnąć satysfakcjonującą liczbę właścicieli pojazdów elektrycznych i komfort jazdy.

Można stwierdzić, że e-mobilność może przyczynić się do poprawy energetyki przyjaznej dla środowiska, ale obecnie stanowi wyzwanie dla operatorów sieci, inwestorów i rządów. Sukces globalnego wdrożenia e-mobilności zależy od współpracy nauki, przemysłu i rządów.

Biorąc pod uwagę wszystko, przyszłość e-mobilności jest jasna, a jej udział w redukcji CO₂ jest nieunikniony. Po prostu potrzeba więcej czasu, aby zobaczyć wyniki bieżących polityk i zachęt.

Literatura

- [1] van Mierlo J., *The World Electric Vehicle Journal*, The Open Access Journal for the e-Mobility Scene World Electric Vehicle Journal 9(1), 1, 2018.
- [2] Grauers A., Sarasini S., and Karlström M., *System Perspectives on Electromobility 2017: Why electromobility and what is it?*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2017.
- [3] Adam M., *Accelerating e-mobility in Germany: A case for regulation*, Springer, Cham, op., 2016.
- [4] Tie S. F. and Tan C. W., *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20, 82–102, 2013.
- [5] Benveniste G., Rallo H., Canals Casals L. et al., *Comparison of the state of Lithium-Sulphur and lithium-ion batteries applied to electromobility*, Journal of environmental management, 226, 1–12, 2018.
- [6] Appelmans T., *ETEC optimisation by Peter Van den Bossche*, Brussels EV Experiment, <https://etecmc10.vub.ac.be/pge.php>. (15.02.2019)
- [7] Wu Y., ed., *Lithium-ion batteries: Fundamentals and applications*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2015.
- [8] Liebl J., *Netzintegration der Elektromobilität 2017: Mobilitätswandel konsequent entwickeln – 2. Internationale ATZ-Fachtagung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [9] Fishbone A., Shahan Z., and Badik P., *Electric Vehicle Charging Infrastructure: Guidelines for Cities*.
- [10] Ayalon O., Flicstein B., and Shtibelman A., *Benefits of Reducing Air Emissions: Replacing Conventional with Electric Passenger Vehicles*, Journal of Environmental Protection 04(10), 1035–1043, 2013.
- [11] Doward J., *New law to tackle electric cars' silent menace to pedestrians*, <https://www.theguardian.com/environment/2018/may/06/new-law-combats-silent-menace-electric-cars>. (15.02.2019)
- [12] Gibson R., *Are electric vehicles too quiet?* FleetCarma, <https://www.fleetcarma.com/electric-vehicles-quiet/>.
- [13] Dehghani-Sani A. R., Tharumalingam E., Dusseault M. B. et al., *Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 104, 192–208, 2019.
- [14] Guney M. S. and Tepe Y., *Classification and assessment of energy storage systems* Renewable and Sustainable Energy Reviews 75, 1187–1197, 2017.
- [15] Chudy A., *Nowoczesne Technologie Magazynowania Energii Elektrycznej*, Praca magisterska, Politechnika Lubelska, 2018.

- [16] Wasbari F., Bakar R. A., Gan L. M. et al., *A review of compressed-air hybrid technology in vehicle system*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67, 935–953, 2017.
- [17] Letcher T. M., ed., *Storing energy: With special reference to renewable energy sources*, Elsevier, 2016.
- [18] Béguin F., ed., *Supercapacitors: Materials, systems, and applications*, Wiley–VCH, Weinheim, 2013.
- [19] Kouchachvili L., W. Yaïci, and E. Entchev, *Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles*, Journal of Power Sources 374, 237–248, 2018.
- [20] Supercaps for a more efficient trolley system | CIVITAS, <https://civitas.eu/measure/supercaps-more-efficient-trolley-system>. (16.02.2019)
- [21] Bartłomiejczyk M. and Jarzębowicz L., *Energy savings by application of supercapacitor storage in trolleybus supplying station: analysis of experimental results*, Technical Transactions 113(1–E), 17–32, 2016.
- [22] Arani A. K., Karami H., Gharehpetian G. B. et al., *Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, 9–18, 2017.
- [23] Bender D., *Recommended Practices for the Safe Design and Operation of Flywheels*, Sandia National Laboratories: Albuquerque.
- [24] Pearre N. S. and Swan L. G., *Technoeconomic feasibility of grid storage: Mapping electrical services and energy storage technologies*, Applied Energy 137, 501–510, 2015.
- [25] Li Y., Li Y., Ji P. et al., *Development of energy storage industry in China: A technical and economic point of review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 49, 805–812, 2015.
- [26] Li W. and Ching, *Ultrahigh-speed flywheel energy storage for electric vehicles in Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles*, Institution of Engineering and Technology, 69–96, 2016.
- [27] Richa K., Babbitt C. W., Gaustad G. et al., *A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles Resources, Conservation and Recycling* 83, 63–76, 2014.
- [28] Pelegov D. and Pontes J., *Main Drivers of Battery Industry Changes: Electric Vehicles*, A Market Overview Batteries 4(4), 65, 2018.
- [29] Moseley P. T., Rand D. A.J., and Peters K., *Enhancing the performance of lead-acid batteries with carbon – In pursuit of an understanding*, Journal of Power Sources 295, 268–274, 2015.
- [30] M. A. Hannan, Hoque M. M., Mohamed A. et al., *Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, 771–789, 2017.
- [31] Types of Batteries Used for Electric Vehicles, 10/6/2017, <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/mok2/>. (16.02.2019)

- [32] The International Electrotechnical Commission (IEC), *Electrical Energy Storage*. White paper, Geneva, Switzerland, 2011.
- [33] Sonoc A., Jeswiet J., and Soo V. K., *Opportunities to Improve Recycling of Automotive Lithium Ion Batteries*, *Procedia CIRP* 29, 752–757, 2015.
- [34] Vikström H., Davidsson S., and Höök M., *Lithium availability and future production outlooks*, *Applied Energy* 110, 252–266, 2013.
- [35] Wang X., Gaustad G., Babbitt C. W. et al., *Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream*, *Journal of environmental management* 135, 126–134, 2014.
- [36] Pistoia G., ed., *Lithium-ion batteries: Advances and applications*, Elsevier, Amsterdam [etc.], 2014.
- [37] Zakeri B. and Syri S., *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis* *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 569–596, 2015.
- [38] Zhang C., Wei Y.–L., Cao P.–F. et al., *Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 3091–3106, 2018.
- [39] Marra D., Rizzo G., Shafie-khah M. et al., *Vehicle electrification: A further variable toward integrated intelligent energy systems in 2017*, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 1–6, 2017.
- [40] Tiano F. A., Rizzo G., and Marra D., *Design and Optimization of a Charging Station for Electric Vehicles based on Compressed Air Energy Storage*, *IFAC–PapersOnLine* 51(9), 230–235, 2018.
- [41] Yilmaz M. and Krein P. T., *Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces*, *IEEE Transactions on Power Electronics* 28(12), 5673–5689, 2013.
- [42] Chmielewski A., Szulim P., Gregorczyk M. et al., *Model of an electric vehicle powered by a PV cell, A case study in 2017* *22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 1009–1014, 2017.
- [43] Speidel S. and Bräunl T., *Driving and charging patterns of electric vehicles for energy usage*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 97–110, 2014.
- [44] Yang L., Zhang J., and Poor H. V., *Risk-Aware Day-Ahead Scheduling and Real-time Dispatch for Electric Vehicle Charging*, *IEEE Transactions on Smart Grid* 5(2), 693–702, 2014.
- [45] Ładowanie pojazdów elektrycznych będzie dostępnejsze, szybsze i tańsze | <https://www.pollub.pl/pl/news/get/id/6888> (15.02.2019)
- [46] Ministerstwo Energii, *Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce*, BIP. (24.01.2019)

[47] Analiza rozwoju elektromobilności – co nas czeka? – elektromobilność.pl, <http://elektromobilnosc.pl/2018/02/06/analiza-rozwoju-elektromobilnosci-co-nas-czeka/>. (15.02.2019)

[48] Germany installs more electric car chargers, but still unprofitable Reuters, <https://www.reuters.com/article/us-germany-power-charging/germany-installs-more-electric-car-chargers-but-still-unprofitable-idUSKBN1KF1YD>. (16.02.2019)

[49] Liebl J., ed., *Netzintegration der Elektromobilität 2018*, Springer, 2018.

Wykorzystanie analizy wielorozdzielczej w diagnostyce procesu spalania

Streszczenie: Poprawny przebieg procesu spalania jest głównym celem do którego dąży diagnostyka tego procesu. Wykorzystywany jest on w badaniach naukowych i przemyśle. Optoelektroniczne układy monitorujące gwarantują możliwość pozyskiwania danych pomiarowych w czasie rzeczywistym oraz w bezinwazyjny sposób. Złożoność procesu spalania powoduje, że do analizy danych pomiarowych wymagane jest zastosowanie wielu metod badawczych. Analiza wielorozdzielcza, której postawą jest przekształcenie falkowe, umożliwia identyfikację składowych nisko- i wysokoczęstotliwościowych badanego sygnału.

Słowa kluczowe: Analiza Wielorozdzielcza, węgiel, biomasa, Transformata Falkowa

The use of multiresolution analysis in the combustion process diagnostics

Abstract: The correct course of the combustion process is the main goal pursued by the diagnostics of this process. Optoelectronic monitoring systems used in scientific research and industry guarantee the possibility of obtaining measurement data in real time and in a non-invasive way. The complexity of the combustion process means that a variety of test methods are required to analyze measurement data. The multiresolution analysis, which is based on wavelet transformation, allows identification of the low and high frequency components of the signal under investigation.

Keywords: Multiresolution Analysis, carbon, biomass, Wavelet Transform

1. Wstęp

Produkcja energii w Polsce opiera się w głównej mierze na paliwach kopalnych. Proces przetwarzania węgla w dalszym ciągu związany jest z emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Pomimo obowiązujących norm i wielu innych aktów prawnych mających na celu ograniczyć zanieczyszczenie środowiska naturalnego, proces obróbki węgla, gazy spalinowe czy emitowane pyły są wciąż aktualnym problemem. Od przebiegu procesu spalania wymaga się by był on realizowany w optymalnych warunkach, które uznaje się jako nie mające

⁽¹⁾j.styczen@pollub.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

⁽²⁾a.urzedowski@pollub.pl, Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

negatywnego wpływu na efektywność procesu i ilość powstałych w jego wyniku zanieczyszczeń [1–3].

Stabilność procesu zależna jest od wielu czynników, do których można zaliczyć: ilość powietrza pierwotnego lub wtórnego oraz skład mieszanki paliwowej. Z tego względu bardzo istotny jest dobór odpowiedniej metody diagnostycznej. Diagnostyka procesu spalania opiera się na pozyskiwaniu i analizie danych pochodzących z płomienia. Podstawowym jej celem jest wczesne wykrywanie objawów awarii i rozróżnianie tych stanów [1–4].

Metody optyczne są wśród metod diagnostycznych płomienia bardzo często wykorzystywane zarówno w warunkach przemysłowych jak i laboratoryjnych. Optoelektroniczne układy monitorujące płomień pozwalają na nieinwazyjne i pozyskiwane w czasie rzeczywistym informacje o procesie. Podczas monitorowania procesu spalania mieszaniny paliwowej w komorze paleniskowej sonda optyczna umieszczana jest bezpośrednio przy palniku. Takie ułożenie urządzenia daje możliwość na uzyskanie dokładnych parametrów diagnostycznych. Parametrami najczęściej mierzonymi są pulsacja oraz intensywności świecenia płonienia. Zmiany w przebiegu procesu spalania są zależne od wielu czynników, ale w szczególności od składu i rodzaju mieszanki paliwowej [1–4].

Współspalanie biomasy i węgla to proces, w którym spalana jest mieszanina węgla i biopaliw stałych. Znaczenie biomasy wśród rodziny odnawialnych źródeł energii wpływa fakt, że jej przetwarzanie jest praktycznie obojętne dla środowiska naturalnego. Proces współspalania biomasy jest przeprowadzany na trzy sposoby: współspalaniem bezpośrednim, pośrednim oraz równoległym [1, 5–7]. W przypadku spalania bezpośredniego węgiel i biomasa tworzą mieszaninę i są spalane w jednej komorze paleniskowej. Spalanie bezpośrednie węgla jest podstawową i dobrze poznaną metodą przetwarzania węgla, która jest wciąż analizowana pod kątem redukcji powstających zanieczyszczeń. W przypadku tej metody pyłu węglowy podawany do komory spalania transportowany jest przy wykorzystaniu powietrza pierwotnego. Przepływ tego powietrza – zarówno pierwotnego jak i wtórnego, powinien być wyliczony w taki sposób żeby zapewnić stabilność płomienia. przy strumieniu powietrza pierwotnego i wtórnego. Złożoność procesu współspalania tego typu mieszanin wymaga zastosowania wyspecjalizowanych metod monitorowania i diagnostyki [1, 4–7].

2. Wybrane produkty wykorzystywane w procesie spalania

2.1. Węgiel

Węgiel zaliczany jest do paliw kopalnych powstałych w wyniku procesów zachodzących przed milionami lat na Ziemi. Jego zasoby są ograniczone.

Niemkov G.I w swojej pracy pt. „Bogatstvo zemnych nedr” wspomina, iż złoży tego surowca wystarczy na około 500 lat [8].

Skład chemiczny węgla jest bardzo różny, w zależności od warunków jego powstawania oraz różnorodność materiału wyjściowego. Rozpoznanie składu jest kluczowe dla jego energetycznego wykorzystania. Aby określić produkty spalania węgla należy zbadać skład elementarny – zawartość węgla, tlenu, wodoru oraz azotu [8].

Podstawowymi składnikami mineralnymi wchodzącymi w różnej ilości do minerałów występujących w węglu zaliczamy: krzem (Si), glin (Al), wapń (Ca), magnez (Mg), tytan (Ti), potas (K), sód (Na). Składniki mineralne węgla mają różne pochodzenie. Można je podzielić na cztery podstawowe grupy [8]:

I) Minerały, które wniesione zostały do torfowisk w postaci listków, odłamków oraz mułów. Do nich zaliczyć można: kwarc, skałen, mikę, kaolit, piroksen chloryty oraz krzemiany;

II) Minerały wydzielone z roztworów nasycających torfowiska, na etapach w których nastąpiło przekształcenie się osadów w substancję stałą. Najbardziej charakterystycznymi minerałami w tej grupie są: węglany wapnia, magnezu i żelaza (dolomit, kalcyt), siarkowe związki żelaza (piryt, markasyt);

III) Minerały z roztworów, które trafiły do już uformowanych pokładów węglowych : Gips , melanteryt, halit (sól kuchenna), pochodne siarczków żelaza, cynku, miedzi;

IV) Minerały które w postaci odłamków trafiły do węgla podczas jego wydobywania. Zaliczamy do nich różne gliniaste materiały (krzemiany, kaolinit, montmorillonit), kwarc, kalenie, mika.

Minerały z grupy I tworzą węgiel o dużej zawartości popiołu. Minerały grupy II są rozłożone w samej substancji organicznej węgla, są trudne do usunięcia podczas jego wzbogacania. Przy rozdrobnieniu węgla zawierającego minerały z grupy III, następuje ich odkrycie ponieważ związane są ze szczelinami występującymi w strukturze węgla. Możliwe jest ich efektywne usunięcie [8].

Minerały z grupy IV nie są związane z substancją węglową, są łatwe do usunięcia.

Na właściwości fizyczne węgla tj. wytrzymałość, kruchość, zdolność do rozdrabniania wpływ ma skład granulometryczny, podatność na szlakowanie oraz działania ścieralne na powierzchni roboczej[8].

2.2. Biomasa

Tuż obok węgla, do najbardziej rozpowszechnionych źródeł energii możemy zaliczyć biomasę. Światowa agencja energetyki podaje iż w XXI wieku będzie to jedno z ważniejszych odnawialnych źródeł energii. Jako biomasę określa się substancje organiczne wytwarzające się w roślinach w wyniku fotosyntezy. Substancje te wykorzystywane są do uzyskania energii. Bardzo dużym plusem jest fakt iż wykorzystywane tu mogą być wszystkie rodzaje roślin, odpady

roślinne z rolnictwa, z gospodarki drzewnej jak również niektóre odpady bytowe które nie są zaliczane do pochodzenia roślinnego [8].

W dzisiejszych czasach do najczęściej używanych produktów do wytwarzania biomasy należą:

- Odpady drzewne powstałe podczas obróbki drewna oraz eksploatacji lasów
- Odpady rolnicze pochodzenia roślinnego oraz zwierzęcego (słoma, łodygi kukurydzy czy słonecznika, obornik, gnojowica itp.)
- Rośliny wodne (wodorosty, makrofagi)
- Odpady przemysłowe oraz komunalne (osady pościekowe, stałe odpady komunalne)

Wykorzystywanie biomasy do wytwarzania energii jest nie tylko bardzo opłacalne ale również przyjazne środowisku. Zasoby biomasy wykorzystywanej do produkcji energii wynoszą 1mld ton umownych. Biorąc jednak pod uwagę obecne technologie wytwarzania, liczba ta może znacznie wzrosnąć [8].

Wykorzystanie biomasy można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- I) Biomasa pierwotna. Jej źródłem jest roślinność naziemna i wodna.
- II) Biomasa wtórna. Jej źródłem są odpady, powstałe w wyniku przeróbki biomasy pierwotnej na produkty towarowe oraz odpady powstałe w wyniku działalności ludzkiej czy zwierząt.

Do najbardziej efektywnych metod wykorzystania biomasy należą: bezpośrednie spalanie, gazyfikacja piroliza, fermentacja beztlenowa.

Istnieje wiele możliwości konwersji energii z biomasy w energię cieplną, elektryczną czy paliwo transportowe [8].

Metody pozyskiwania energii cieplnej z biomasy [8]:

- Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod pozyskiwania energii cieplnej z biomasy jest spalanie biomasy w powietrzu lub w tlenie. Podstawową technologią jest spalanie w kotle energetycznym a następnie generacja prądu elektrycznego w turbinach parowych.
- Piroliza biomasy - przetwarzanie wiązań organicznych pod wpływem ciepła. W tej metodzie brana jest pod uwagę: natura surowca, metody przeróbki i wytwarzane produkty. Do podstawowych produktów pirolizy możemy zaliczyć: substancje które w swoim składzie zawierają węgiel, palne ciecze oraz gazy.
- Gazyfikacja biomasy - przekształcenie odpadów biomasy w gazy palne drogą niepełnego ich utleniania w powietrzu.

3. Problematyka procesu spalania oraz współspalania mieszaniny węgla i biomasy

W kotłach węglowych energetycznych spalany jest pył węglowy powstały ze zmielenia węgla na drobne cząsteczki. Około 80% masy węgla stanowi ziarno o średnicy mniejszych od 75µm. Pył ten spala się w odpowiednio ukształtowanym strumieniu [8–9].

Spalanie węgla jest złożonym procesem fizyko–chemicznym. Początkowo pod wpływem gorących spalin cząstka węgla ulega nagrzewaniu. Proces ten postępuje w szybkim tempie. Prędkość w którym nagrzewa się cząstka jest zależny od rozmiarów cząstki, temperatury oraz jej prędkości. Wynosi około 10^4 – 10^6 K/s. Przy wzroście temperatury do 300–400°C, następuje piroliza czyli rozkład termiczny węgla. Początkowo w tym procesie uwalniane są produkty gazowe, a w dalszej kolejności następuje mięknienie i wydzielanie ciężkich węglowodorów. Gdy temperatura wzrośnie powyżej 800°C następuje wydzielanie CO i H₂ [8–9].

Przebieg spalania węgla w znacznym stopniu zależy od stopnia uwęglenia ziaren węgla. Gdy przeważają ziarna nisko uwęglone, głównymi produktami pirolizy są gazowe produkty. Przy ziarnach wysoko uwęglonych obserwuje się znaczne wydzielanie smoły.

Spalanie części lotnych może przebiegać na dwa sposoby. Zależy to od sposobu ich wydzielania [9].

- Części lotne wydzielane są przez pory równomiernie – wokół cząstki węgla formuje się płomień dyfuzyjny,
- Części lotne wydzielane są pod dużym ciśnieniem, co wprawia cząstkę w ruch obrotowy. Formuje się tu pozostałość kokosowa, która praktycznie nie uczestniczy w procesie spalania.

Kotły energetyczne zużywają od 200 do 600Mg węgla na godzinę. Niemożliwe jest zastąpienie go w całości biomasa ze względu na trudności z jej dostawą oraz magazynowaniem. Powstała więc koncepcja współspalania – czyli połączenia biomasy z węglem. Nawet niewielki udział biomasy w wytwarzaniu energii elektrycznej powoduje znaczne wykorzystanie potencjału energetycznego [8–9].

Możemy wyodrębnić dwie możliwości spalania biomasy – bezpośrednie i pośrednie. Współspalanie bezpośrednie biomasy z węglem może się odbywać poprzez [9]:

- mieszanie biomasy z węglem przed układem dozowania węgla oraz późniejsze podanie tej mieszaniny do komory paleniskowej kotła przez układ nawęglania i palniki pyłowe,
- przygotowanie biomasy niezależne – rozdrobnienie i spalanie na ruszcie pod kotłem lub jej dozowanie do palników/nad palnikami węglowymi. Możliwe jest tu użycie biomasy jako paliwa reburningowego.

W współspalaniu pośrednim do komory paleniskowej kotła wznoszone jest ciepło spalin ze spalania biomasy lub do komory paleniskowej wprowadzony jest wilgotny gaz palny.

Wykonano zostało wiele badań współspalania biomasy z węglem w kotłach energetycznych. C.R.Xu, W. B. Fu w pracy „Study on the burning rate of carbon particles under forced convection conditions” stwierdza, że najlepiej do współspalania biomasy z węglem nadają się kotły fluidalne, które mogą być nawet całkowicie opalane biomasą. W. Kordylewski, Red., Spalanie Paliwa twierdzi, iż obiecującym sposobem współspalania biomasy z węglem w kotłach pyłowych jest zgazowanie biomasy w gazogeneratorze ze złożem fluidalnym, a następnie spalanie gazu w palenisku pyłowym. Dużą zaletą tej metody jest wykorzystanie różnego typu biomasy, nawet tej zawilgoconej, bez konieczności jej rozdrabniania w stopniu niezbędnym dla paleniska pyłowego. Wadą systemu jest duży koszt gazyfikatora fluidalnego [8–9].

Przykładowym stanowiskiem badawczym jest komora spalania z pojedynczym pyłowym palnikiem. Wybrane stanowisko badawcze umożliwia wprowadzanie następującego rodzaju zmiennych[9]:

- prędkość przepływu strumienia powietrza,
- ilość obrotów podajnika węgla.

Za pomocą komory spalania z pojedynczym palnikiem pyłowym możemy zmierzyć następujące wielkości:

- prędkość przepływu z wentylatora powietrza pierwotnego,
- prędkość przepływu z wentylatora powietrza „trzeciego”,
- prędkość przepływu z wentylatora powietrza wtórnego,
- ilość pyłu węglowego w zasobniku,
- temperaturę średnią w komorze,
- ilość obrotów podajnika węgla,
- skład gazów w odległości 1m od czoła palnika,
- skład gazów na wylocie komory paleniskowej.

Korzystając ze zmierzonych wielkości wyliczyć możemy wydatek węgla oraz wydatek powietrza w warunkach normalnych dla każdego ze strumieni [9].

Uruchomienie stanowiska badawczego symuluje uruchomienie kotła energetycznego. Początkowo stanowisko wstępnie wygrzewane jest gorącym powietrzem. W pierwszej fazie temperatura jest zbyt niska do zainicjowania wydzielania części lotnych z węgla, włączany jest wtedy pomocniczy palnik olejowy, który zapalany jest od palnika gazowego. Gdy temperatura wewnątrz komory spalania osiągnie poziom powyżej 200°C (jest to poziom powyżej temperatury samozapłonu węgla) włączany jest ślimakowy podajnik węgla. Pył węglowy, który dostarczany jest do palnika ulega zapłonowi od pracującego palnika olejowego. Gdy temperatura w komorze spalania osiągnie wartość wystarczającą do stabilnego zapłonu pyłu węglowego, wtedy włączony zostaje

palnik olejowy. Obroty podajnika są cały czas zwiększane, do momentu, aż osiągną wartość założoną w eksperymencie. Wydatek paliwa stałego obliczany jest na podstawie ubytku masy paliwa z zasobnika. Wygaszenie stanowiska następuje poprzez wypalenie pozostałości paliwa znajdującego się w zasobniku przy obecności płomienia olejowego. Wyłącznie komory następuje po osiągnięciu dostatecznie niskiej temperatury – do tego czasu komora wentylowana jest za pomocą powietrza wtórnego [9].

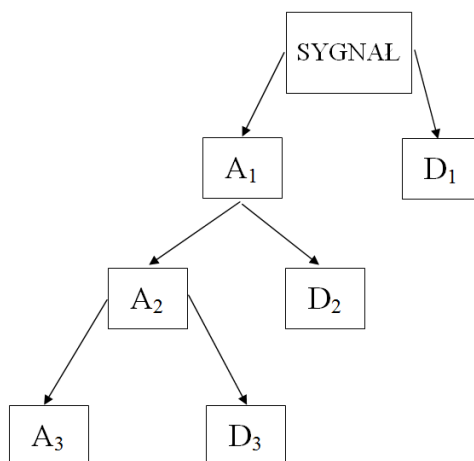
4. Analiza wielorozdzielcza

Analiza Falkowa umożliwia badanie sygnału jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. W przypadku analizy sygnału z wykorzystaniem przekształceń Falkowych dokonywana jest częstotliwościowa dekompozycja sygnału w czasie. Porównując metody transformacji falkowej z innymi technikami analizy sygnałów należy zwrócić uwagę na fakt, że dają one możliwość pozyskania informacji, które są przez inne metody pomijane. Podstawą transformaty Fouriera są elementarne funkcje trygonometryczne charakteryzujące się nieskończonymi zakresami określoności. Falki mają ograniczone zakresy określoności, których średnia wartość wynosi 0, a co z tym idzie są lepiej zlokalizowane w czasie. Dla sygnałów o niskich częstotliwościach transformata Falkowa ma dobrą rozdzielczość częstotliwościową oraz niską rozdzielczość czasową – dla wysokich częstotliwości jest odwrotnie [10–12].

Analiza wielorozdzielcza sygnału bazuje na dyskretnym przekształceniu Falkowym. Uznana jest ona za wydajne narzędzie w analizie krótkich sygnałów czasowych oraz niestacjonarnych procesów przejściowych [11]. Dzięki zastosowaniu analizy wielorodzielczej możliwe jest ustalenie, które współczynniki rozwinięcia falkowego można lub trzeba pominąć [10]. Poniższe wyrażenie definiuje dyskretną transformatę falkową [10]:

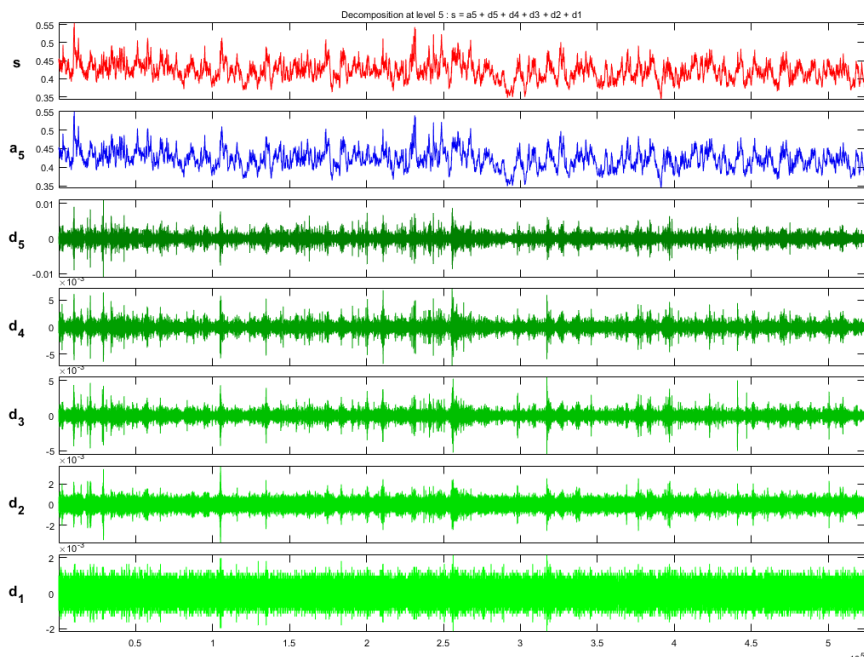
$$f(t) = \sum_{m,n} (f, \psi_{mn}) \psi_{mn} = \sum_m \sum_n d_m[n] \psi_{mn} \quad (1)$$

W dyskretnym przekształceniu falkowym sygnał, który jest poddawany analizie zostaje podzielony na detale i aproksymacje. Dekompozycje sygnału jest procesem iteracyjnym, gdzie każda następna aproksymacja podlega kolejnej dekompozycji. W związku z tym badany sygnał zostaje rozłożony na wiele składowych o mniejszych rozdzielczościach [11]. Na poniższym rysunku przedstawiona została dekompozycja sygnału.



Rys. 1. Schemat dekompozycji falkowej sygnału [10]

Aproksymacja sygnału jest składową niskoczęstotliwościową. Detale są składową wysokoczęstotliwościową, która podczas iteracji sygnału nie jest poddawana kolejnym filtracjom. Aproksymację otrzymuje się usuwając kolejne detale, a ona zachowuje kształt sygnału. W analizie falkowej sygnał podstawowy jest sumą wszystkich otrzymanych aproksymacji i detali [10–12].



Rys. 2. Dekompozycja sygnału pochodzącego z procesu spalania

Na przedstawionym powyżej rysunku widnieje podział sygnału pochodzącego z procesu spalania na aproksymację i detale z wykorzystaniem falki Harra. Oznaczenie s – jest to sygnał z płomienia, a_5 – aproksymacja oraz d_1 – d_2 – detale. Dekompozycja sygnału na poszczególne składowe pokazuje, że detale przedstawiają głównie szum wysokoczęstotliwościowy, a aproksymacje zawierają znacznie mniejszą ilość szumów niż sygnał poddawany analizie.

5. Wnioski

W ogólnym pojęciu proces spalania wymaga stosowania wielu złożonych metod pomiarowych, diagnostycznych i analizy. Za podstawowy cele stawiany diagnostyce procesu uznane jest znajdowanie zaburzeń oraz stanów, które mogą mieć negatywny wpływ na stabilności procesu. Stosowane układy monitorujące zazwyczaj wykorzystują czujniki optyczne. W związku z tym, że dane pomiarowe pozyskane w komorze paleniskowej zawierają w sobie wiele informacji, które charakteryzują proces spalania, możliwa jest jego analiza wieloma metodami.

W niniejszym rozdziale przedstawione zostały wybrane problemy procesu spalania pyłu węglowego i biomasy [13]. Zaprezentowano również przykład wykorzystania analiza wielorozdzielcza do przetworzenia sygnału pochodzącego z płomienia. Metoda ta bazuje na dyskretnym przekształceniu Falkowym. Proces dekompozycji analizowanego sygnału pozwala na wyznaczanie aproksymacji i detali. Aproksymacje sygnału, który pochodzi z płomienia są jego składowymi niskoczęstotliwościowymi, a detale wysokoczęstotliwościowymi.

Literatura

[1] Grądz Ż., Styczeń J., *Diagnostic of the combustion process using the analysis of changes in flame luminosity*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 9(3), DOI: 10.35784/iapgos.227, 70–73, 2019.

[2] Smolarz A., Kotyra A., Wójcik W., Ballester J., *Advanced diagnostics of industrial pulverized coal burner using optical methods and artificial intelligence*, Experimental Thermal And Fluid Science 43, 82 – 89 2012.

[3] Sawicki D., *Using the gpu to determining the area the flame in the vision diagnostic*, Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 4, 77–80, 2016.

[4] Kotyra A., *Optoelectronic systems in diagnostic and measurement applications*, Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 4, 77–80, 2016.

[5] Miller B.G., *Clean coal engineering technology*, Elsevier, 251–300, 2010.

- [6] Dumanli A. G., Sinem T., Yuda Y., *Co-firing of biomass with coals*, Journal of thermal analysis and calorimetry 103.3, 925–933, 2011.
- [7] Sawicki, D., *Flame image feature extraction of co-firing coal and biomass with vision diagnostic system*, Przegląd Elektrotechniczny 92(8), 133–136, 2016.
- [8] Wójcik. W., *Nowoczesne technologie Paliw i spalania*, Polska Akademia Nauk, Lublin, 2011.
- [9] Smolarz A., *Diagnostyka procesów spalania paliw gazowych, pyłu węglowego oraz mieszaniny pyłu węglowego i biomasy z wykorzystaniem metod optycznych*, Politechnika Lubelska, 2013.
- [10] Białasiewicz J. T., *Falki I aproksymacje*, WNT, Warszawa, 2000.
- [11] Piłek B., *Analiza przydatności optoelektronicznych sygnałów pomiarowych płomienia do diagnostyki procesu spalania*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2014.
- [12] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Third Edition: The Sparse Way, Academic Press, 2008.
- [13] Dong, Changqing i inni, *Numerical modeling of the gasification based biomass co-firing in a 600 MW pulverized coal boiler*, Applied Energy 87.9, 2834–2838, 2010.

*Arkadiusz Urzędowski⁽¹⁾, Monika Flis⁽²⁾, Joanna Styczeń⁽²⁾,

Analiza nierówności powierzchni na modelach bryłowych z wykorzystaniem narzędzi komputerowego wspomaganie projektowania

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest tematyce analizy nierówności powierzchni. Wszystkie przedmioty materialne, które występują w otoczeniu ludzi są ograniczone powierzchniami. Różnią się one pewnymi nierównościami, które są charakterystyczne dla danego materiału. Jest to bardzo istotne zagadnienie pozwalające na ocenę stanu powierzchni pod kątem jej jakości oraz funkcjonalności. W artykule przedstawiono metodologię pracy w środowisku 3D, na podstawie której została przedstawiona analiza ukształtowania powierzchni materiałów przy wykorzystaniu programu AutoCAD. Bazując na zaprezentowanych przykładach zostały wyciągnięte wnioski oraz podsumowanie.

Słowa kluczowe: nierówność powierzchni, AutoCAD, komputerowe wspomaganie projektowania, modele 3D, analiza

Analysis of surface unevenness on solid models using computer-aided design tools

Abstract: The article is devoted to the subject of surface unevenness analysis. All material objects that occur in people's surroundings are limited by surfaces. They differ in some inequalities that are characteristic for the material. This is a very important issue that allows assessing the surface condition in terms of its quality and functionality. The article presents the methodology of work in 3D environment, on its basis was presented an analysis of the surface formation of materials using AutoCAD. Based on the presented examples, conclusions and a summary were drawn.

Keywords: surface unevenness, AutoCAD, computer aided design, 3D models, analysis

1. Wstęp

Nierówność powierzchni definiowana jest jako całość odstępstw od powierzchni nominalnej powierzchni rzeczywistej, gdzie powierzchnia rzeczywista oddziela przedmiot od otoczenia, a powierzchnia nominalna posiada

* ⁽¹⁾ a.urzedowski@pollub.pl, Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

⁽²⁾ monika.flis@pollub.edu.pl, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

⁽³⁾ j.styczen@pollub.pl, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

idealnie geometryczny kształt jasno określony na poziomie dokumentacji technicznej. W praktyce powierzchnia rzeczywista jest niemożliwa do zmierzenia, zaś nominalna niemożliwa do osiągnięcia. Wykorzystuje się więc powierzchnię zmierzoną, czyli taką, która jest zaobserwowana za pomocą wybranej metody pomiarowej.

Analiza nierówności powierzchni wykorzystywana jest w wielu dziedzinach, w niektórych przypadkach jest ona niezbędna, w innych znacznie ułatwia i usprawnia wykorzystane procesy.

Jedną z dziedzin nauki, która wykorzystuje nierówności powierzchni jest inżynieria powierzchni betonu. Określa ona właściwości powierzchni betonu z uwzględnieniem zewnętrznej warstwy użytkowej oraz podkładu pod inne warstwy. Ma to na celu ilościową oraz jakościową analizę wpływu jakości powierzchni betonu na jego trwałość. Opisuje również wpływ obróbki powierzchni betonu na wartości charakterystyk oraz zależności pomiędzy tymi charakterystykami a wartościami miar trwałości. Dzięki przeprowadzonym badaniom dowiedziono, że korzystność wzrostu uszorstnienia powierzchni jest zależna od klasy wytrzymałości betonu. W przypadku podkładów z betonów o wyższych klasach wytrzymałości wzrost uszorstnienia powierzchni jest korzystny, o niższych negatywnie wpływa na proces obróbki w większym stopniu uszkadzając przypowierzchniową warstwę betonu [1,2].

Badanie nierówności powierzchni jest również wykorzystywane przy analizie właściwości przeciwpoślizgowych nawierzchni drogowych. Wpływa na poprawę tych własności, tak, aby zostały spełnione narzucone aktualne wymagania zarówno odbiorowe jak i przed upływem okresu gwarancyjnego. Dzięki nim wiadomo jest, że należy uwzględnić nie tylko wymagane końcowe parametry tekstury, ale również parametry dotyczące jej metody obróbki, m.in. jej agresywność czy wpływ na trwałość nawierzchni [3].

Wyróżnia się kilkanaście metod pomiaru nierówności, jednak najpopularniejszą z nich jest analiza bardzo dokładnie odwzorowanych siatek z profilometrii skaningowej. Metody profilometrii skaningowej można podzielić na profilowe oraz obrazowe. Pierwsze z nich oceniają nierówności bazując na zbiorze profili, zaś metody skaningowe obrazowe na podstawie sekwencji obrazów. Pomimo że są one bardzo dokładne, pomiary nierówności uważane są za tak bardzo skomplikowane, że nie jest możliwe dokładne odzwierciedlenie badanej powierzchni [4].

2. Modelowanie z odwzorowaniem powierzchni materiałów

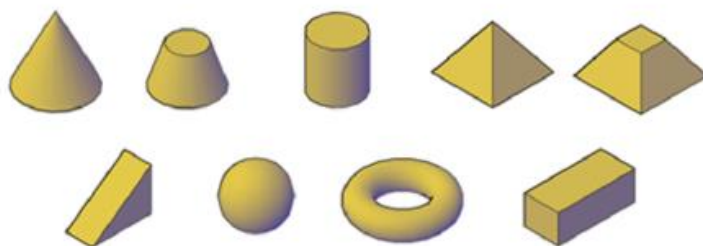
2.1. Metodologia pracy w środowisku CAD 3D

Na przestrzeni lat ręczne rysowanie rysunków technicznych zanika, dzięki czemu widocznie zwiększa się wykorzystanie coraz bardziej zaawansowanych programów do modelowania obiektów 3D. Ułatwia to szybkie naniesienie

poprawek, zwiększa dokładność rysunków oraz znacznie wpływa na zmniejszenie czasu projektowania. Obszarem działania takich programów jest przestrzeń wirtualna.

Jednym z programów wykorzystywanych do takich celów jest AutoCAD. Pozwala on na swobodne przejścia pomiędzy płaszczyzną a przestrzenią 3D, a obiekty, które są tu tworzone są obiektami dokładnymi. Wpływa to bezpośrednio na ułatwienie podczas procesu wykonywania modyfikacji obiektów bądź ich wymiarowania. Nie ma potrzeby rysowania wszystkich kształtów od podstaw, gdyż program zawiera specjalne polecenia pozwalające na szybkie uzyskanie danego profilu oraz jego późniejszą modyfikację. Tworzenie dokumentacji technologicznej oparte jest na arkuszach predefiniowanych, co oznacza, że zachowany jest jednolity wygląd całej dokumentacji, niezależnie od miejsca czy osoby edytującej. Gotowy projekt możliwy jest do zapisu również w rozszerzeniach dostępnych we wcześniejszych wersjach, jak i eksportu do pliku otwierającego się w innych programach. Standardowe rozszerzenie to *.dwg, zapisywane są w tym formacie zarówno rysunki 2D i jak 3D. Od 2005 roku program AutoCAD jest bardzo potężnym narzędziem o sporych możliwościach, które pozwalają na stworzenie naprawdę zaawansowanych modeli 3D [1,3].

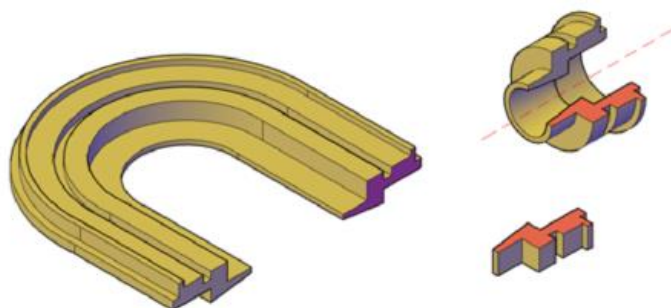
W procesie modelowania zaawansowanego wykorzystywane mogą być różne narzędzia systemowe dostępne w programie, jednak do najbardziej precyzyjnego z nich należy praca z profilem 2D. Dla poprawnego wykonania operacji tworzenia bryły, profil musi być Zamkniętą Polilinią 2D, bądź Regionem. Przekształcanie na bryłę nieodmkniętych, lub przecinających się liniami obrysu prowadzi do wygenerowania powierzchni trójwymiarowej, uniemożliwiającej dalszą swobodną edycję modeli i pracę z operacjami boolowskimi. Wyjątkiem od tej zasady jest narzędzie Naciśnij i Ciągnij, które przekształca geometrię obrysu na zamkniętą obwiednię, nie usuwając kształtów źródłowych. Obiekty bryłowe utworzyć można bazując na podstawowych prymitywach oraz profilach wyciągania prostego, obracania, przeciągania bądź wyciągania złożonego. Elementy te są możliwe do połączenia przy wykorzystaniu operacji logicznych. Istnieje również możliwość utworzenia brył elementarnych, czyli kilku podstawowych kształtów 3D. Służy do tego polecenie Walec, Ostrosłup oraz Kostka (Rys.1.).



Rys. 3. Bryły elementarne utworzone w programie AutoCAD 3D

Źródło: <http://help.autodesk.com/view/ACD/2016/>

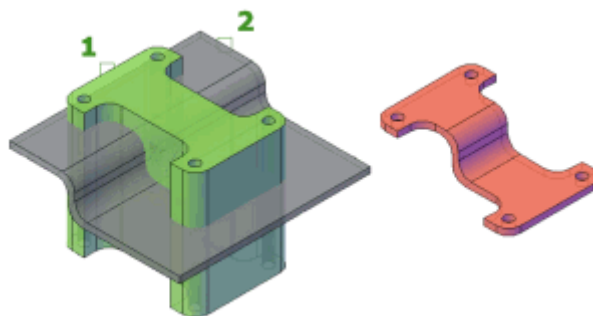
Kolejnym ze sposobów tworzenia brył 3D jest wykorzystanie polecenia Polibryła. Przy jego wykorzystaniu możliwe jest określenie domyślnej wysokości, szerokości oraz wyrównania dla wynikowej bryły 3D, a także przekształcenie obiektów 2D (m.in. linii, polilinii, okręgów) w bryły 3D. Bryły 3D można tworzyć poprzez zastosowanie takich operacji jak wyciągnięcie proste, przeciągnięcie zamkniętych obiektów 3D czy obrót. Na rysunku 2 użyto polecenia Skos, Przekrój oraz Wyciągnij na tym samym obiekcie.



Rys. 4. Zamknięta polilinia 2D przeciągana wzdłuż ścieżki, obracana wokół osi i wyciągana

Źródło: <http://help.autodesk.com/view/ACD/2016/>

Następną z metod tworzenia brył 3D jest wykorzystanie operacji logicznych, tj. sumy, różnicy czy iloczynu. Efekt został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 5. Model 3D wykonany przy wykorzystaniu operacji logicznych

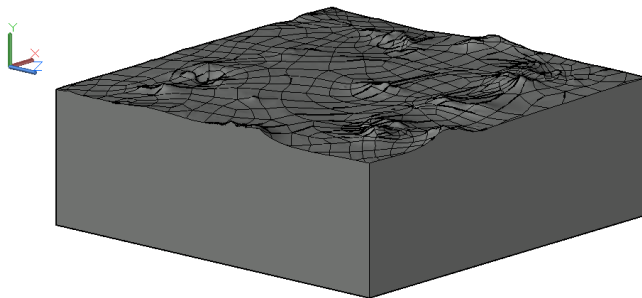
Źródło: <http://help.autodesk.com/view/ACD/2016/>

Są to dwie bryły wyciągnięte z zamkniętych polilinii, gdzie ich wyciągnięcia zostały połączone poprzez przecięcie ich objętości.

2.2. Model bryłowy odwzorowujący ukształtowanie powierzchni betonów

Beton to sztuczny kamień, który powstaje dzięki wiązaniu i stwardnieniu mieszanki betonowej (mieszanki cementu, kruszywa, wody i ewentualnych domieszek (poniżej 5% masy spoiwa) oraz dodatków (powyżej 5% masy spoiwa). Kruszywa, które są tu stosowane mogą być sztuczne (m.in. keramzyt) bądź naturalne (żwir, piasek). Dodatki oraz domieszki wpływają na poprawę właściwości betonu bądź mieszanki betonowej, np. zapewniają wodoodporność, czy zwiększają mrozoodporność. Najbardziej odpowiedni skład takiej mieszanki jest uzyskiwany poprzez przeprowadzenie odpowiednich analiz laboratoryjnych. Wyróżnia się betony lekkie (ciężar objętościowy do 1800 kg/m³), zwykłe (od 1800 do 2600kg/m³) oraz ciężkie (od 2600kg/m³). Każdy z nich posiada różne zastosowania, beton ciężki to osłony biologiczne mające na celu osłabienie promieniowania jonizującego, zwykły wykorzystywany jest do wykonywania elementów konstrukcyjnych żelbetowych i betonowych, a lekki przy wykonywaniu elementów ściennych, drobnowymiarowych czy stropowych [2,4].

Aby uzyskać odwzorowanie powierzchni betonu wykorzystuje się skaningu powierzchni umożliwiające zdalny pomiar setki tysięcy punktów na sekundę. Każdy z tych punktów posiada swoje współrzędne: X, Y oraz Z, jak i parametr intensywności odbicia sygnału bądź kolor. Pozwala to na operowanie na powstałej chmurze punktów, która realistycznie odzwierciedla rzeczywiste ukształtowanie powierzchni oraz jest podstawą do zaawansowanego modelowania przestrzennego [5].



Rys. 6. Model 3D próbki betonu uzyskany z wykorzystaniem chmury punktów

Źródło: opracowanie własne

Pierwszym etapem prac było przygotowanie form i pobranie próbek betonu towarowego w Wytwórni Betonu Alfa-Bet sp. z o.o. Beton towarowy Lublin, przy ulicy Zemborzyckiej 57 w Lublinie. Przyjęto reprezentatywny rozmiar badanej próbki: 100x100x20mm, którą po okresie dojrzewania betonu, tj. 28 dniach rozformowano. Przeprowadzono skanowanie powierzchni próbki profilometrem skanującym i uzyskano chmurę punktów reprezentującą ukształtowanie danej struktury. Uzyskano w ten sposób siatkę składającą się z 345 670 węzłów. Wyniki te poddane zostały procesowi przekształcenia w modele bryłowe trójwymiarowe z wykorzystaniem narzędzi dostępnych dla obszaru roboczego: Modelowanie 3D w programie AutoCAD. Do pracy z tak dużą ilością danych użyto stacji roboczej o następujących parametrach: procesor AMD Ryzen 7 2700 3,2GHz, karta Graficzna NVIDIA GeForce RTX 2070 8GB, pamięć ROM: 1T HDD, 500GB SSD, pamięć RAM: 16GB, system Windows 10 Pro. Dzięki przeprowadzeniu zaawansowanych operacji przekształcenia siatek w bryły uzyskano modele odwzorowujące ukształtowanie powierzchni próbek betonów.

3. Pomiar ukształtowania powierzchni materiałów

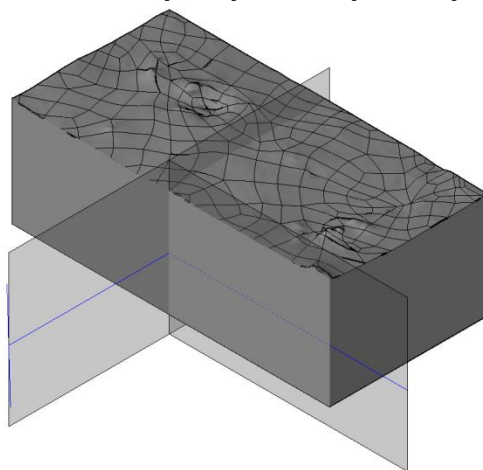
3.1. Praca z płaszczyznami tnącymi

Na podstawie normy PN-EN 1504-10 wyróżnia się dwie metody oznaczania szorstkości powierzchni. Pierwszą z nich jest profilometria. Polega ona na odwzorowaniu profilu na płaszczyźnie XY. Dzieli się ją na profilometrię mechaniczną oraz laserową. Ta pierwsza występuje wtedy, gdy rysik przesuwany jest po badanej powierzchni, a każda jego zmiana zarówno w pionie

jak i poziomie rejestrowana jest przez komputer i na tej podstawie tworzony jest profil powierzchni. Aby uzyskany został obraz powierzchni 3D konieczne jest wykonanie wielu pomiarów, które są od siebie oddalone o stałą wartość. Przy tej metodzie duże znaczenie ma średnica główki rysika – im jest mniejsza tym pomiar jest bardziej dokładny. Niestety, metoda ta jest możliwa do stosowania tylko w warunkach laboratoryjnych. Drugą z metod badania szorstkości powierzchni jest metoda profilometrii laserowej. Polega ona na pomiarze odległości pomiędzy emitерem wiązki laserowej a powierzchnią biorąc pod uwagę różnicę czasu wyjścia i przyjścia. Na tej podstawie konstruowany jest obraz powierzchni. Jej wadą może być rozpraszanie wiązki laserowej wewnątrz niektórych materiałów [6,7].

3.2. Praca z płaszczyznami tnącymi

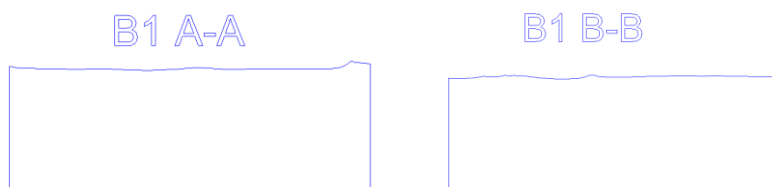
Rozbudowany interfejs programu AutoCAD 3D umożliwia pracę z modelami trójwymiarowymi udostępniając narzędzia zarówno do modyfikacji, opisu jaki i analizy kształtu. Każda z tych operacji jest reprezentowana wizualnie w sposób czytelny i zrozumiały dla zaawansowanego użytkownika oprogramowania. Do analizy kształtu powierzchni wymodelowanego fragmentu próbki betonu zastosowano dwa rozwiązania: pracę z płaszczyzną przekroju w obszarze Modelu, oraz generowanie przekroju na podstawie modelu bazowego w obszarze Układu. Każde z tych podejść umożliwia zdefiniowanie głębokości ustawienia głębokości cięcia względem płaszczyzny bazowej, czy dowolną modyfikację jej położenia. Mając na względzie jednak dostęp do pewnych funkcjonalności charakteryzujących indywidualnie każdy z tych sposób, przeanalizowano model z wykorzystanie obydwóch podejść.



Rys. 7. Ustawienie płaszczyzn tnących na modelu 3D próbki betonu

Źródło: opracowanie własne

W pierwszym z nich płaszczyzna przekroju definiowana jest za pomocą 2 bądź 3 punktów, dzięki określeniu płaszczyzny głównej układu LUW lub wybranie obiektu płaszczyzny czy powierzchni. Program umożliwia wstawianie dowolnej liczby płaszczyzn tnących, udostępniając model do podglądu w czasie rzeczywistym (Rys.5). Pracując na stworzonym wcześniej modelu próbki betonowej wstawiono dwie płaszczyzny tnące A–A, oraz B–B ustawione względem siebie pod kątem 90° i prostopadle do płaszczyzny podstawy. W kolejnym kroku wskazywano każdą z nich i korzystając z polecenia *Generuj przekrój* tworzone przekroje, które odwzorowywały nierówności powierzchni. Domyślnie jednak program AutoCAD tworzy obiekty typu blok, reprezentujące dany przekrój, linie tła, linie niewidoczne i kreskowanie w miejscu cięcia [8,9]. Na rysunkach tych nałożone było zbyt wiele elementów, uniemożliwiając ich poprawną interpretację. Dopiero szczegółowa modyfikacja ustawień pozwoliła uzyskać linię ukształtowania struktury powierzchni w stworzonych wcześniej przekrojach, której wyniki przedstawiono na rysunku 6. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest wykonanie pomiarów takich parametrów jak średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej – R_a , czy wysokości chropowatości według dziesięciu punktów profilu – R_z [10,11].

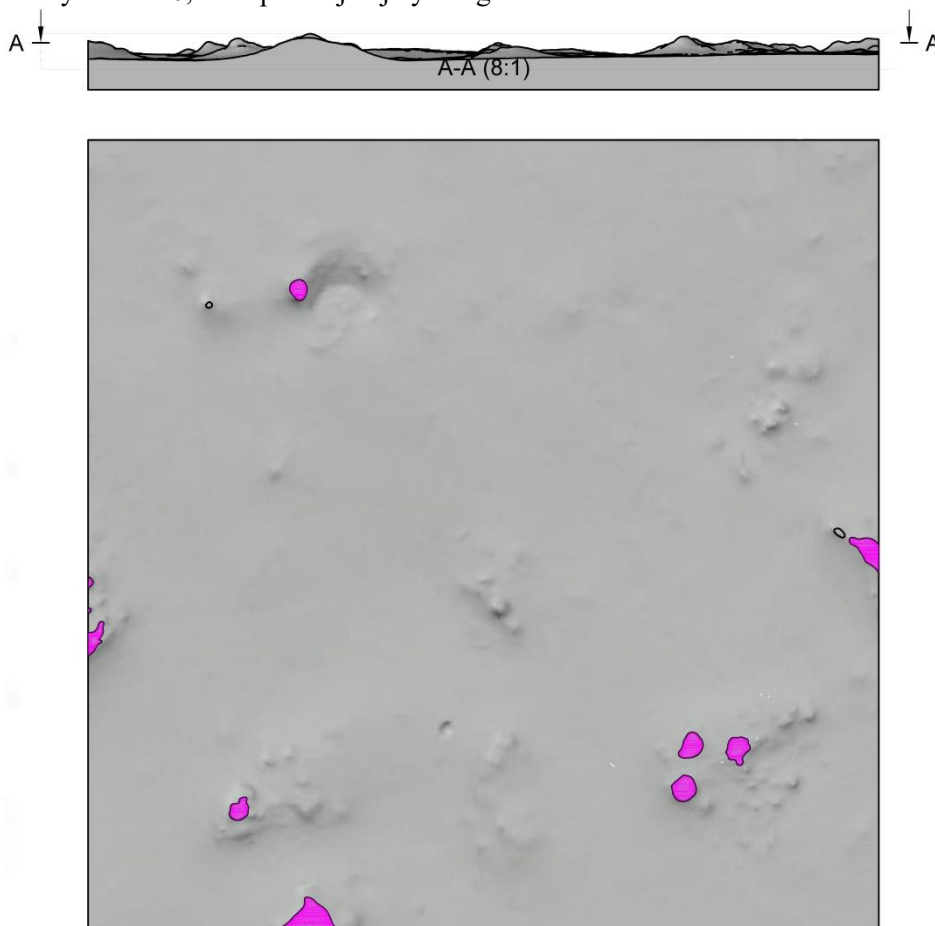


Rys. 8. Profile odzwierciedlające kształt powierzchni otrzymane poprzez wykorzystanie płaszczyzn tnących

Źródło: opracowanie własne

W drugim z opisanych podejść do analizy struktury powierzchni modeli w programie AutoCAD 3D wykorzystano narzędzia umożliwiające pracę na obiekcie bazowym w obszarze Arkusza. Przestrzeń, która kojarzona jest wyłącznie z ustawieniami rysunku do wydruków, udostępnia bardzo zaawansowane opcje pozwalające na tworzenie niemal dowolnych reprezentacji graficznych modeli. Narzędzia znajdujące się na nowopowstałej karcie Układ umożliwiły wstawienie obiektu bazowego, w jednym z wybranych widoków – z przodu, oraz cieniowanym stylu wizualnym. Wykonano pomiar maksymalnych i minimalnych odchyłek nierówności, po czym wprowadzono linię podziału ze skokiem co 0.2mm. W kolejnym kroku wybrana została opcja tworzenia przekrojów z wykorzystaniem utworzonego wcześniej widoku modelu

bazowego. Rysunek 7 przedstawia utworzony przekrój próbki płaszczyzną A–A, na wysokości 0,4mm poniżej najwyższego wierzchołka.



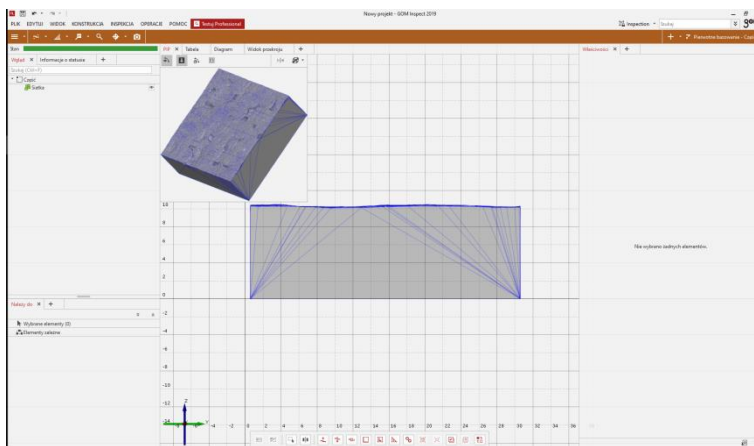
Rys. 7. Widok na model w przekroju A–A wykonany z poziomu arkusza

Źródło: opracowanie własne

3.3. Analiza powierzchni wygenerowanych modeli 3D

Podjęto próbę analizy ukształtowania powierzchni próbek betonowych w dedykowanym oprogramowaniu do pracy z modelami 3D – programem GOM Inspect. Korzystając z oprogramowania AutoCAD wyeksportowano modele do formatu z rozszerzeniem .sat. GOM Inspect to oprogramowanie wykorzystywane do kontroli danych pomiarowych 3D. Wyróżnia się wersję darmową z podstawowymi funkcjami oraz professional będącą potężnym

narzędziem do pracy dla osób pracujących w tej dziedzinie. Program pozwala na przetwarzanie siatki, począwszy od chmur punktów do siatek wielokątów, dzięki czemu idealnie nadaje się do druku 3D oraz wspomaga proces inżynierii odwrotnej [12,13]. Zastosowane w nim punkty, powierzchnie oraz krzywe są zgodne ze standardowymi wymaganiami, a baza która się tam znajduje rozszerzona jest o narzędzia do analiz specyficznych dla konkretnych branż. Na rysunku 8 przedstawiony został etap pomiaru nierówności powierzchni dla wymodelowanej próbki betonu.



Rys. 9. Zaimportowany model 3D próbki betonu do programu GEOM Inspect

Źródło: opracowanie własne

4. Wnioski

Makroskopowa analiza struktury powierzchni materiałów, w tym betonu, jest zagadnieniem poznanym, opisanym w literaturze i szeroko stosowanym w praktyce. Wypracowane zostały już metody pomiaru chropowatości, mające na celu dobór technologii zwiększającej szczepność czy poprawę właściwości przeciwpoślizgowych powierzchni betonu. Ze względu na dotychczasowy brak zapotrzebowania na szczegółową analizę mikrostruktury nie zostało jeszcze opracowane spójne podejście badawcze.

W pracy zaproponowano innowacyjne rozwiązanie, będące połączeniem dwóch niezależnych narzędzi prac inżynierskich i badawczych. Na pierwszym etapie wykorzystywana jest profilometria skaningowa, dostarczająca wyniki w postaci chmury punktów odwzorowujących strukturę powierzchni materiałów. Oprogramowanie dołączane do aparatury badawczej, nie zawsze pozwala jednak

na dowolną analizę i opracowanie wygenerowanych siatek. Z tego powodu w dalszej części prac wyniki opracowywane są w narzędziach do komputerowego wspomagania projektowania, pozwalającego na pracę koncepcyjną w przestrzeni. Do niewątpliwych zalet zaproponowanego podejścia można zaliczyć: nieograniczoną swobodę, możliwość przypisania właściwości fizycznych i użycia wykonanego modelu w innych programach symulacyjnych. Wadami mogą okazać się wymagania sprzętowe dla pracy w środowisku CAD 3D, bardzo duża ilość danych znacznie obciąża i spowalnia pracę sprzętu komputerowego. Problematiczne mogą też okazać się odchyłki przy generowaniu brył na podstawie siatek, oraz zaawansowana znajomość narzędzi CAD. W kolejnych etapach prac, autorzy podejmą próbę zastosowania opracowanych modeli w analizie transportu ciepła z wykorzystaniem narzędzi do pracy w środowisku CFD.

Literatura

- [1] Czepiel J., *AutoCAD: ćwiczenia praktyczne 2D*. Gliwice, Politechnika Śląska, 2013.
- [2] Domin T., *Materiały budowlane*, Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1990.
- [3] Jaskulski A., *AutoCAD 2017/LT2017/360+: kurs projektowania parametrycznego i nieparametrycznego 2D i 3D*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016.
- [4] Karczewski B., *Materiały budowlane z technologią betonu*. Lublin, Wydaw. WSIInż., 1976.
- [5] Wieczorowski M., Gapiński B., Grochmalski K., Miller T., Teoretyczne aspekty analizy wybranych źródeł błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni, *Mechanik* 4/2017.
- [6] Osiecka E., *Materiały budowlane: właściwości techniczne i zdrowotne*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.
- [7] Parczewski W., *Materiały budowlane*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
- [8] Lichołai L., Szalacha A., *Materiały budowlane i ich badania laboratoryjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [9] Ferdyn R., *AutoCAD : konstrukcje budowlane*. Gliwice, Helion, 2002.
- [10] Pacana J., *Podstawy projektowania inżynierskiego z wykorzystaniem systemów CAD/CAM*. Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2016.
- [11] Herma S., *Modelowanie 3D w systemie AutoCAD dla inżynierów produkcji*. Bielsko-Biała, Akademia Techniczno-Humanistyczna, 2015.

[12] Kania L., *Podstawy programu AutoCAD – modelowanie 3D*, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2007.

[13] Oczóś K.E., Liubimov V., *Struktura geometryczna powierzchni : podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych*. Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2003.