

Interdyscyplinarność w badaniach naukowych

Prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Interdyscyplinarność w badaniach naukowych

Prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Marii Grądz



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2020

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko

prof. dr hab. inż. Oleksandra Hotra

dr hab. inż. Piotr Miller, prof. uczelni

dr hab. inż. Jakub Gajewski, prof. uczelni

dr inż. Wojciech Cel

dr inż. Wojciech Surtel

dr inż. Oksana Boyko

dr inż. Joanna Szulżyk-Cieplak

dr inż. Andrzej Kociubiński

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-432-5

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

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Spis treści

Agnieszka Martychowiec , Kinga Kondracka, Norbert Kwietniewski,

Mariusz Sochacki

Usuwanie fotorezystu w technologii mikroelektronicznej metodą suchego trawienia
RIE 7

Damian Dobrzański

Analiza charakterystyk pracy przetwornic rezonansowych LLC oraz CLLC prądu
stałego do zastosowań dwukierunkowego transferu energii 22

Dawid Zarzeczny

Biokompatybilność urządzeń medycznych 40

Ewelina Krawczak

Trendy w technologiach krzemowych ogniw słonecznych 51

Michał Rogala

Badanie wpływu kształtu inicjatora zgniotu na przeciążenia w pojazdach 64

Jakub Paśnik

Analiza wpływu sprzężeń mechanicznych na postacie drgań własnych belki
kompozytowej 76

Magdalena Michalska

Metody analizy fraktalnej w diagnostyce zmian barwnikowych ludzkiej skóry 91

Magdalena Michalska

Analiza tekstury obrazów dermatoskopowych 103

Bartłomiej Mroczek

Przegląd proponowanych strategii realizowanych poprzez algorytmy matematyczne
w procesie V2G 115

Monika Mańko

Impedancyjne metody pomiaru i analizy właściwości elektrycznych elektrolitów i tkanek 139

Arkadiusz Urzędowski, Monika Flis, Joanna Styczeń

Analiza oraz sposoby wyznaczania i opisu zjawisk transportu ciepła zachodzących na styku materiałów w strukturach warstwowych 151

Łukasz Furgala

Model systemu zarządzającego pracą dźwigów oparty o mikrousługi na platformie Docker 164

Aleksander Chudy

Zarządzanie flotą pojazdów elektrycznych w sieciach inteligentnych – sterowanie ładowaniem oraz zagadnienia optymalizacyjne 183

Bartosz Drzymała

Analiza symulacyjna pracy nieregulowanej izolowanej przetwornicy rezonansowej DC/DC typu LLC zasilanej z modułów fotowoltaicznych PV 196

* Agnieszka Martychowiec⁽¹⁾, Kinga Kondracka⁽¹⁾, Norbert Kwietniewski⁽¹⁾,
Mariusz Sochacki⁽¹⁾

Usuwanie fotorezystu w technologii mikroelektronicznej metodą suchego trawienia RIE

Streszczenie: Wytwarzanie wysokiej jakości przyrządów półprzewodnikowych wymaga precyzyjnego opanowania każdej z wielu metod technologii mikroelektronicznej. Stosowanie emulsji światłoczułych przy maskowaniu powierzchni podczas ich kształtowania jest niemal nieodłącznym elementem technologii. W artykule opisano eksperyment polegający na usuwaniu fotorezystu metodą RIE, rezygnując tym samym z trawienia mokrego i związanych z nim wad i zagrożeń dla jakości i stabilności działania wytwarzanych przyrządów.

Słowa kluczowe: reaktywne trawienie jonowe, RIE, technologia mikroelektroniczna, fotorezyst

Reactive ion etching for photoresist stripping in microelectronic technology

Abstract: The fabrication of high-quality semiconductor devices requires precise mastery of each of the many microelectronic technology methods. The use of photosensitive emulsions when masking surfaces during their formation processes is almost an integral part of the technology. The article describes an experiment consisting in removing photoresist using the RIE method, thereby resigning from wet etching, the associated disadvantages and threats to the quality and stability of fabricated devices.

Keywords: reactive ion etching, RIE, microelectronic technology, photoresist

1. Wstęp

W związku z ciągłym wzrostem zapotrzebowania na układy elektroniczne o niskim koszcie realizacji, wysokiej niezawodności i szybkości działania oraz coraz mniejszych rozmiarach, oczekiwania stawiane wobec technologii mikroelektronicznej są coraz wyższe. Aby uzyskać wysoką jakość przyrządów elektronicznych należy zadbać o gruntowne poznanie i dopracowanie każdego z etapów ich wytwarzania. Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących w strukturach półprzewodnikowych podczas ich działania, nawet niewielkie nieprawidłowości powstałe podczas wytwarzania mogą powodować poważne błędy lub pogorszenie działania gotowego przyrządu.

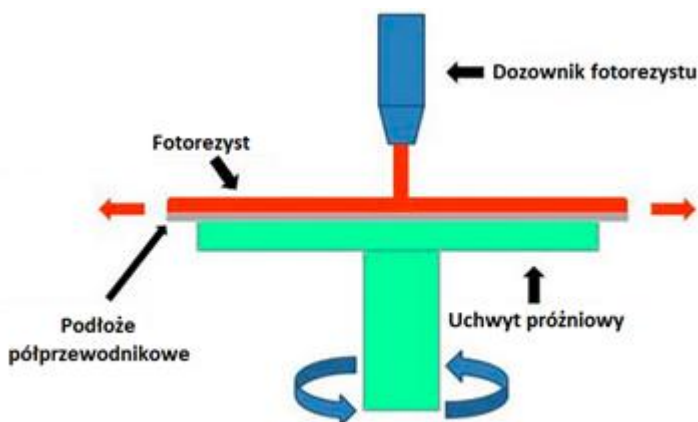
Nieodłącznym etapem wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych jest nadawanie strukturom odpowiedniego kształtu. Najpowszechniejszą

*agnieszka.martychowiec.dokt@pw.edu.pl,
i Optoelektroniki, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika
Warszawska

⁽¹⁾Institut Mikroelektroniki

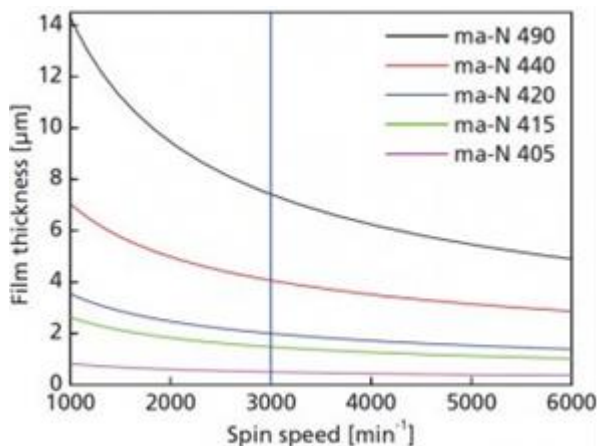
pozwalającą na to metodą jest fotolitografia. Polega ona na przeniesieniu kształtu z maski fotolitograficznej na powierzchnię próbki. W tym celu na powierzchnię próbki nanosi się warstwę emulsji światłoczułej, która jest naświetlana przez maskę promieniowaniem ultrafioletowym. Następnie próbka z naświetlonym fotorezystem zostaje zanurzona w tzw. wywoływaczu, który wypłukuje emulsję z obszarów naświetlonych UV (fotolitografia pozytywna) lub z obszarów zasłoniętych przez maskę fotolitograficzną podczas naświetlania (fotolitografia negatywna).

Odpowiedni dobór i aplikacja emulsji światłoczułej ze względu na jej rodzaju oraz właściwości jest istotna dla powodzenia procesu. Powszechną metodą pokrywania warstwą fotorezystu powierzchni podłoża jest rozwirowywanie. Metoda ta umożliwia otrzymanie cienkiej i jednorodnej pod względem grubości warstwy. Schemat przykładowego układu do rozwirowywania emulsji fotolitograficznych przedstawiono na rysunku 1. Charakterystyki emulsji zawarte w specyfikacjach technicznych informują o prędkości obrotowej wirówki pozwalającej na otrzymanie określonej grubości fotorezystu (Rys. 2).



Rys. 1. Schemat przykładowego układu dozującego i rozwirowującego fotorezyst [1]

Podłoża z emulsją powinny zostać poddane procesowi suszenia. Zazwyczaj wymagane jest suszenie wstępne przed naświetlaniem UV oraz suszenie końcowe po procesie naświetlania. Suszenie wstępne ma na celu usunięcie resztek rozpuszczalnika z warstwy fotorezystu, poprawę adhezji do podłoża oraz wstępne utwardzenie, co pomaga uchronić emulsję przed mechanicznym uszkodzeniem podczas jej przenoszenia lub kontaktu z maską. Suszenie końcowe zwiększa odporność warstwy rezystu na działanie czynników trawiących, a ponadto istotnie zwiększa adhezję warstwy do podłoża. Temperatury suszenia zazwyczaj zawierają się w $(60 \div 120)^{\circ}\text{C}$ [2].



Rys. 2. Wykres zależności grubości warstwy od prędkości obrotowej rozwirowania dla przykładowych fotorezystów negatywowych [3]

Następnym krokiem po przeniesieniu kształtu z maski technologicznej na fotorezyst jest odwzorowanie go na próbce poprzez wytrawienie odsłoniętych fragmentów powierzchni. Jakość wytworzonego kształtu nie zależy tylko od powodzenia procesu naświetlania i wywołania, ale też od procesu trawienia. Podstawowe wielkości charakteryzujące techniki trawienia, mające wpływ na dokładność odwzorowania kształtu na trawionej powierzchni to:

- anizotropowość – stosunek szybkości trawienia w kierunku pionowym do szybkości trawienia w kierunku poziomym,
- selektywność – stosunek szybkości trawienia warstwy maskującej do szybkości trawienia podłoża.

Po wytrawieniu odsłoniętych części powierzchni podłoża na odpowiednią głębokość należy pozbyć się pozostałego fotorezystu. Metodą konwencjonalną jest zanurzenie próbki w acetonie, który rozpuszcza emulsję. Metody tego typu niosą ze sobą jednak pewne zagrożenia dla jakości powierzchni. Poszukuje się zatem innych sposobów na usunięcie pozostałości fotorezystu nie ryzykując uszkodzeniem powierzchni i w efekcie pogorszeniem działania całej struktury.

2. Trawienie w technologii mikroelektronicznej

Procesy trawienia można realizować wieloma metodami. Ich podstawowy podział wyróżnia trawienie mokre i trawienie suche. Trawienie mokre polega na zanurzaniu próbek w wodnych roztworach i z definicji jest izotropowe. Korzystając z metod trawienia mokrego możliwe jest uzyskanie wysokiej selektywności trawienia. Do podstawowych parametrów mokrego trawienia należą skład roztworu trawiącego, temperatura i czas procesu. Ze względu na

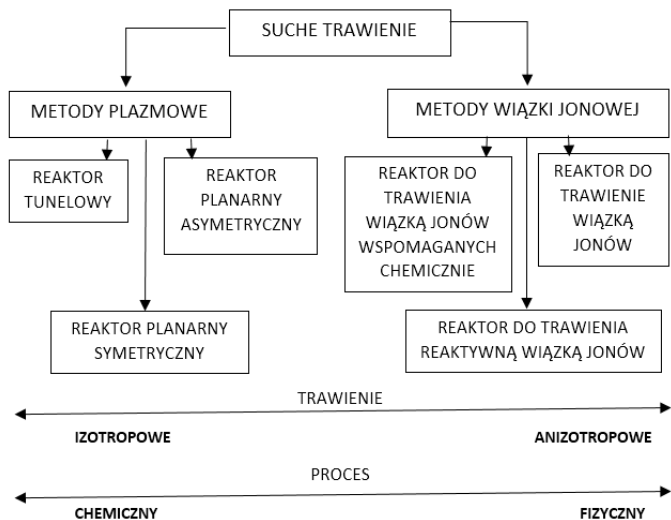
swoje własności (izotropowość, dobra selektywność) techniki trawienia mokrego stosuje się do usuwania całych warstw z podłoża, wytrawiania stosunkowo dużych obszarów (np. warstw izolacyjnych nad metalizacją przygotowaną pod kontakt omowy), procesów mycia.

Trawienie suche realizowane jest poprzez oddziaływanie na podłoże za pomocą plazmy w postaci wiązki niemal neutralnych, wysokoenergetycznych cząstek, które oddziałują chemicznie z odsłoniętymi miejscami trawionego materiału (trawienie chemiczne) lub rozpędzonych jonów, które bombardując powierzchnię wybijają z niej cząstki materiału (trawienie fizyczne). Trawienie suche charakteryzujące się przewagą czynnika trawiącego chemicznie cechuje się wyższą izotropowością oraz wyższą selektywnością niż metody trawienia o charakterze fizycznym.

Najbardziej użyteczną metodą trawienia w technologii mikroelektronicznej byłby proces o dużej szybkości, anizotropii i selektywności. Własności warunkujące te cechy częściowo wykluczają się wzajemnie, a więc należy wybierać metodę zapewniającą największą szansę na powodzenie w zależności od pożądanego rezultatu procesu. Najważniejszą cechą trawienia często bywa anizotropia konieczna do uzyskania głębokich struktur o pionowych zboczach. Podstawowe mechanizmy suchego trawienia odpowiadające za anizotropowość:

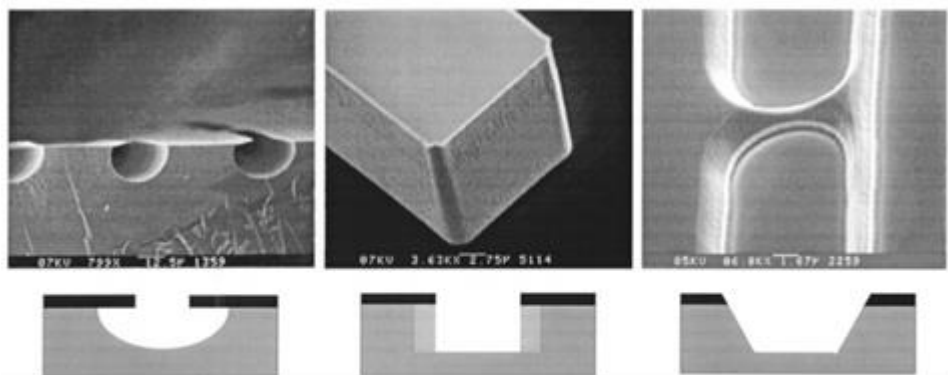
- niszczenie wiązań chemicznych powierzchni materiału poprzez bombardowanie jonami,
- rozpylanie fizyczne materiału poprzez bombardowanie powierzchni ukierunkowaną wiązką jonów o dużych energiach kinetycznych,
- chemiczne trawienie w plazmie wspomaganej jonami. Jony bombardując przyspieszają trawienie chemiczne i zwiększają jego kierunkowość. Stopień anizotropowości zależy od energii jonów.

Wśród technik suchego trawienia wyróżnia się podział na metody plazmowe i metody wiązki jonowej (Rys. 3).



Rys. 3. Klasyfikacja metod suchego trawienia oraz typy reaktorów [2]

Podstawowe trzy metody plazmowego trawienia suchego to chemiczne trawienie plazmowe PE (ang. *Plasma Etching*), fizyczno–chemiczne reaktywne trawienie jonowe RIE (ang. *Reactive Ion Etching*) i fizyczne trawienie wiązką jonową IBE (ang. *Ion Beam Etching*). Każda z tych metod prowadzi do nieco innych rezultatów. Różnice wynikające z innych mechanizmów trawienia przedstawiono na rysunku 4.

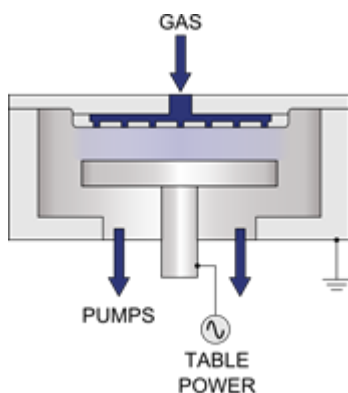


Rys. 4. Typowe rezultaty różnych mechanizmów trawienia suchego. Od lewej: chemiczne PE, fizyczno–chemiczne RIE, fizyczne IBE [4]

Reaktywne trawienie jonowe

Najpowszechniej stosowaną techniką trawienia suchego jest RIE. Metoda reaktywnego trawienia jonowego polega na wykorzystaniu zarówno czynnika chemicznego, jak i fizycznego podczas usuwania materiału z podłoża.

W reaktorze plazmowym pracującym z częstotliwościami radiowymi wytwarzana jest plazma, której cząsteczki reagują z podłożem, a jednocześnie jony bombardują jej powierzchnię wybijając z niej cząsteczki materiału. Typowy system do RIE (Rys.5) składa się z komory próżniowej, w jej dolnej części znajduje się odizolowany elektrycznie stolik, na którym umieszczany jest trawiony element. Gazy wprowadzane są do komory od góry, a odprowadzane od dołu za pomocą odpowiedniego układu próżniowego. W zależności od potrzeb stosowane są różne mieszanki gazów roboczych, np. gazy fluorowe, jak SF₆ i CF₄ stosowane są do trawienia krzemu, a do trawienia aluminium stosuje się plazmy zawierające chlor [5]. Najważniejszymi parametrami odpowiadającymi za przebieg procesu RIE jest ciśnienie panujące w komorze (zazwyczaj utrzymywane na poziomie pomiędzy kilka a kilkanaście militorrów), parametry plazmy, temperatura procesu, skład i ilość gazów. Wysokie średnie energie jonów padających na podłoże są generowane dzięki niesymetrycznym elektrodom i wynoszą (100÷500) eV. W przypadku techniki PE bazującej na reaktorze z elektrodami symetrycznymi energie te są rzędu (50÷100) eV.



Rys. 5. Schemat przekroju przykładowego systemu RIE [4]

Bardzo istotnym elementem wpływającym na rezultaty każdego procesu technologicznego jest temperatura. Razem z entalpią i entropią wpływa na każdą reakcję energetyczną w reaktorze RIE, np. adsorpcję. Do czynników, które mogą zwiększyć temperaturę powierzchni podłoża należą bombardowanie jonami, reakcje egzotermiczne na powierzchni podłoża, wzrost temperatury na skutek obecności częstotliwości radiowych w procesie oraz prądów wirowych. Celem nadrzędnym jest zapewnienie stałych warunków cieplnych w komorze reaktora, gdyż adsorpcja i desorpcja są zależne m.in. od temperatury. Zazwyczaj systemy

RIE są wyposażone w wodne układy chłodzące w znacznym stopniu rozwiązujący problem zmiennej temperatury.

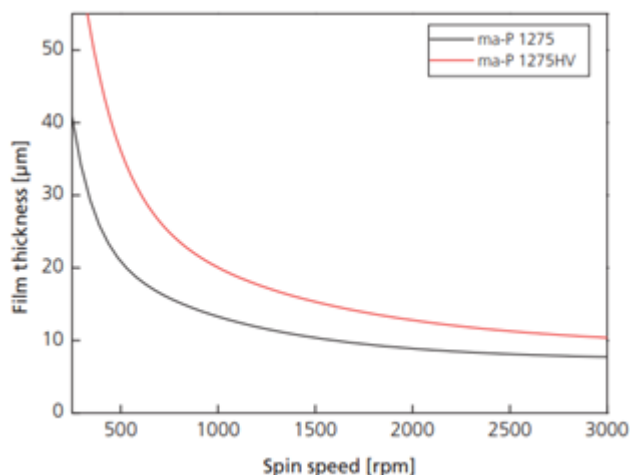
3. Motywacja i przedmiot badań

Powszechnie stosowaną metodą usuwania warstw ze struktur mikroelektronicznych i kształtowania ich powierzchni jest proces mokrego trawienia. Swoją popularność zawdzięcza dużym szybkościom trawienia, relatywnej prostocie i łatwej dostępności, braku skomplikowanego sprzętu, co wpływa również na niższe koszty w porównaniu do metod suchych korzystających ze skomplikowanych i kosztownych urządzeń. Jednak w wielu przypadkach procesy mokrego trawienia nie są wystarczające, np. ze względu na potrzebę anizotropii procesu. Wśród wad mokrego trawienia można wymienić:

- trudniejsza kontrola procesu w porównaniu do metod suchych,
- problematyczne utrzymanie czystości odczynników, przez co łatwo dochodzi do zanieczyszczeń podłoża,
- brak możliwości wytrawiania małych struktur ze względu na izotropowość,
- potrzeba stosowania dużej ilości odczynników i ich częstej wymiany,
- trawienie chemiczne może mieć niekorzystny wpływ na jakość wiązań międzyatomowych trawionej powierzchni.

Alternatywą dla zmagania się z problemami związanymi z chemicznym trawieniem w roztworach może być zastąpienie go trawieniem suchym. Przebieg procesów wykonywanych z udziałem plazmy, w tym RIE, jest bardzo złożony oraz zależny od wielu zmiennych i wrażliwy na zmiany parametrów. Z tego powodu należy dokładnie zbadać kinetykę procesów wykonywanych na danym urządzeniu przed przystąpieniem do procesów właściwych [5–7].

W niniejszym artykule opisano eksperyment mający na celu zbadanie kinetyki trawienia oraz możliwości zastosowania RIE do usuwania warstwy fotorezystu rezygnując tym samym z procesów mokrego trawienia. Podczas dobierania dogodnej metody trawienia zazwyczaj kieruje się możliwością uchronienia maski przed nadmiernym zniszczeniem i wytrawieniem podłoża, a więc metody, w której selektywność trawienia maski względem trawienia podłoża jest największa. W przypadku opisanego eksperymentu sytuacja była odwrotna – celem było całkowite wytrawienie warstwy fotorezystu bez uszkodzania pozostałych warstw. Zbadana została kinetyka trawienia fotorezystu pozytywowego ma-P 1275 (Rys. 6) naniesionego na podłoża krzemowe z warstwą dwutlenku krzemu. Materiały te zostały wybrane do badań z powodu powszechności ich stosowania. Gazem wykorzystywanym podczas procesów RIE był tlen ze względu na własności zapewniające korzystną selektywność trawienia w przeprowadzanych badaniach. Procesy epitaksji dwutlenku krzemu oraz trawienia przeprowadzono korzystając z systemu Plasmalab 80 Plus.



Rys. 6. Wykres zależności grubości warstwy fotorezystu ma-P 1275 od prędkości jej rozwirowania na podłożu [8]

4. Przebieg eksperymentu

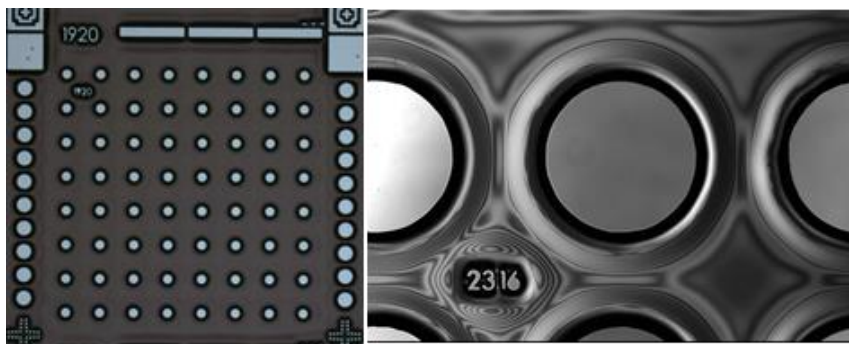
Eksperyment przebiegał w następujących krokach:

- Osadzenie warstwy SiO_2 na płytce krzemowej metodą PECVD.
- Nałożenie, naświetlenie i wywołanie fotorezystu ma – P 1275.
- Reaktywne trawienie jonowe w O_2

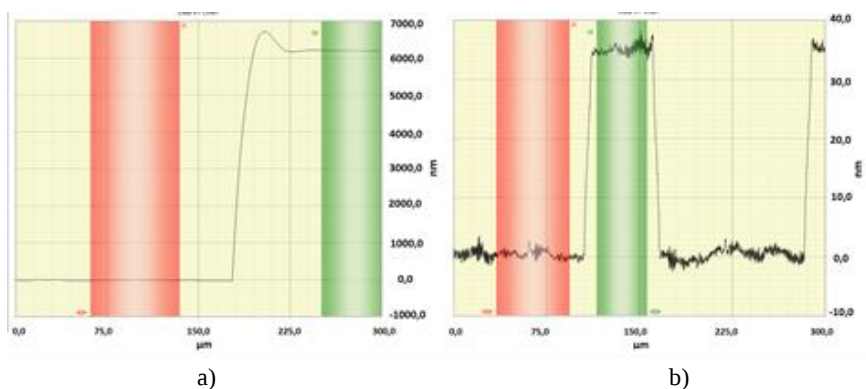
Ponadto krok trzeci podlegał kolejnym etapom:

- Etap wstępny mający na celu poznanie kinetyki trawienia emulsji i dwutlenku krzemu w określonych warunkach oraz wyliczenie wartości prędkości i selektywności trawienia.
- Seria procesów trawienia, na podstawie których wyznaczono najbardziej korzystną wartość mocy.
- Seria procesów trawienia przy określonej wcześniej wartości mocy, na podstawie których wyznaczono najbardziej korzystną wartość ciśnienia.

Podczas formowania warstwy fotorezystu korzystano z maski fotolitograficznej zawierającej oznaczone moduły złożone z okrągłych struktur, co umożliwiała jednoznaczną identyfikację wybranych struktur podczas pomiarów (Rys. 7). Wykonywano pomiary profilometryczne i elipsometryczne po każdym z kroków eksperymentu charakteryzując grubość poszczególnych warstw oraz strukturę ich powierzchni, w tym chropowatość i stopień nachylenia zboczy (Rys 8).



Rys. 7. Obraz z mikroskopu konfokalnego próbek testowych po wywołaniu fotorezystu

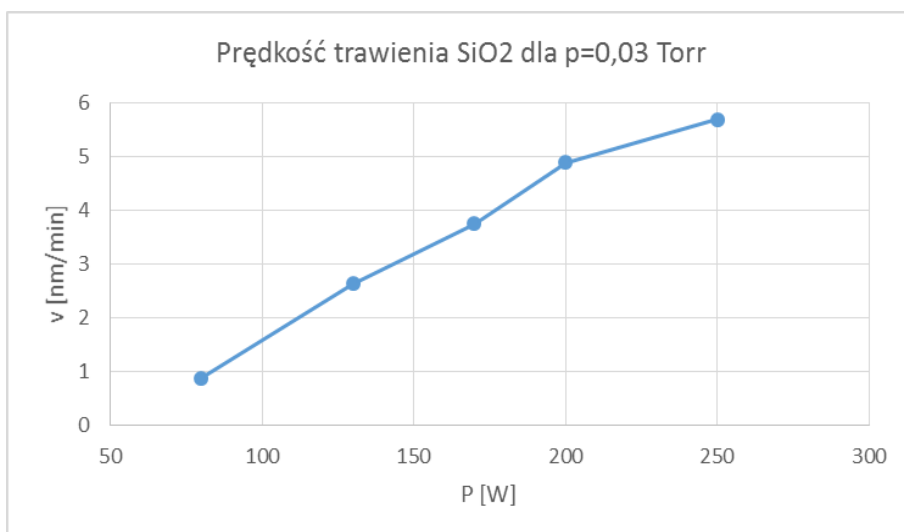


Rys. 8. Przykładowe profilogramy badanych struktur: a) z warstwą fotorezystu, przed trawieniem; b) po trawieniu, bez warstwy fotorezystu

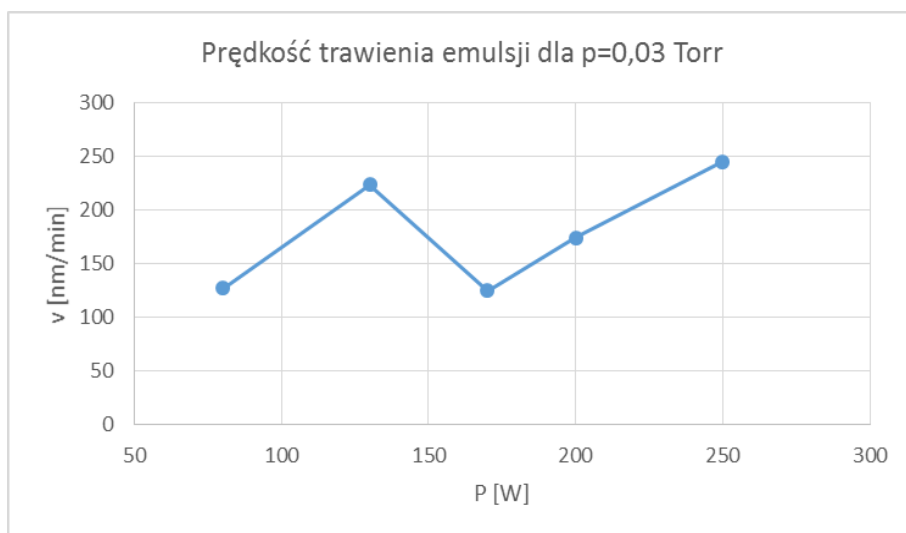
Każdy z wymienionych kroków eksperymentu był wielokrotnie powtarzany, a parametry procesów odpowiednio modyfikowane tak, aby w pierwszej kolejności znaleźć najkorzystniejszą wartość mocy, przy której wytwarzana jest plazma, a następnie ciśnienia panującego w komorze urządzenia. Aby zwiększyć dokładność badania mechanizmów zachodzących podczas trawienia, ich liniowość i wpływ na powierzchnię dwutlenku krzemu, zastosowana grubość fotorezystu była kilkakrotnie większa niż grubość stosowana przy standardowych procesach. W przypadku typowych procesów fotolitograficznych 1,5 μm grubości warstwy emulsji jest wystarczająca, a więc po procesie trawienia grubość emulsji jest dodatkowo zredukowana. Na potrzeby eksperymentu grubość ta została zwiększona do 3,5 μm oraz 7 μm , przez co czasy trawienia próbek były również odpowiednio dłuższe.

5. Rezultaty

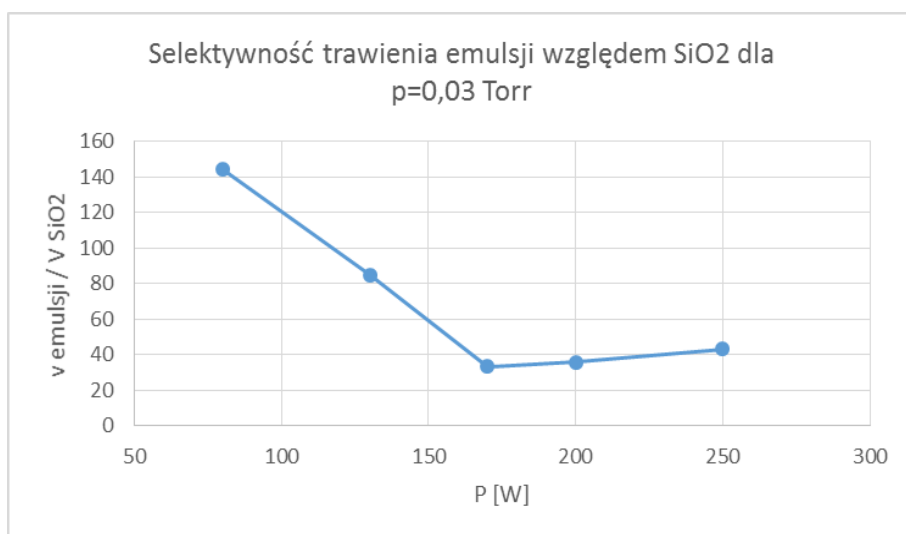
W pierwszej kolejności przeprowadzono szereg procesów, dzięki którym możliwe było poznanie kinetyki trawienia emulsji i dwutlenku krzemu w określonych warunkach oraz wyliczenie wartości prędkości i selektywności trawienia. Parametry procesów zawierały się w zakresach $(80 \div 250)$ W mocy oraz $(0,03 \div 0,8)$ Torr ciśnienia. Na podstawie wyników pomiarów wyznaczano parametry w kolejnych procesach. Następnie określono najbardziej korzystną wartość mocy ze względu na selektywność trawienia dla typowego ciśnienia w tego rodzaju procesach $p = 0,03$ Torr (Rys. 9 – 11). Na tym etapie emulsja nie była dotrawiana do końca, a jej pozostałości zmywano acetonem.



Rys. 9. Wykres zależności prędkości trawienia dwutlenku krzemu od mocy przy stałym ciśnieniu $p = 0,03$ Torr



Rys. 10. Wykres zależności prędkości trawienia fotorezystu od mocy przy stałym ciśnieniu $p = 0,03$ Torr



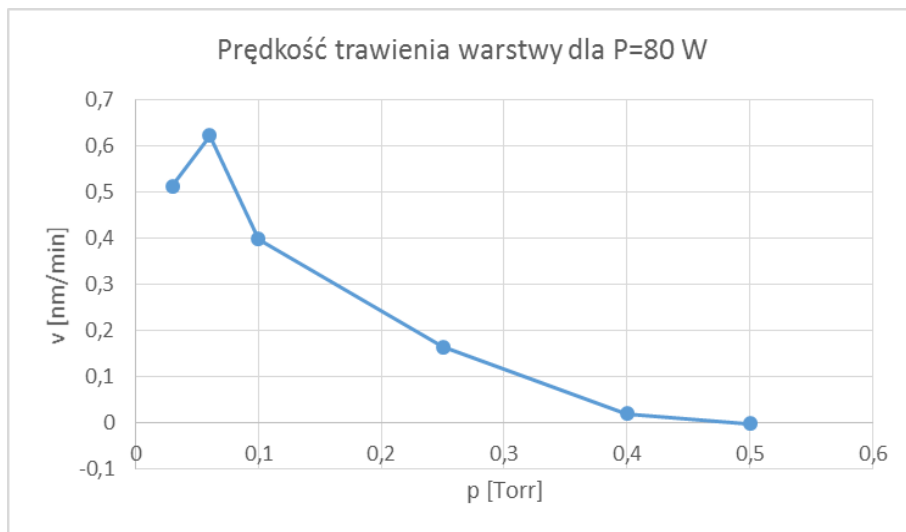
Rys. 11. Wykres zależności selektywności trawienia emulsji względem trawienia dwutlenku krzemu od mocy przy stałym ciśnieniu $p = 0,03$ Torr

Następnym krokiem były testy procesu umożliwiającego strawienie emulsji do końca bez znacznego naruszania powierzchni dwutlenku krzemu. W tym celu

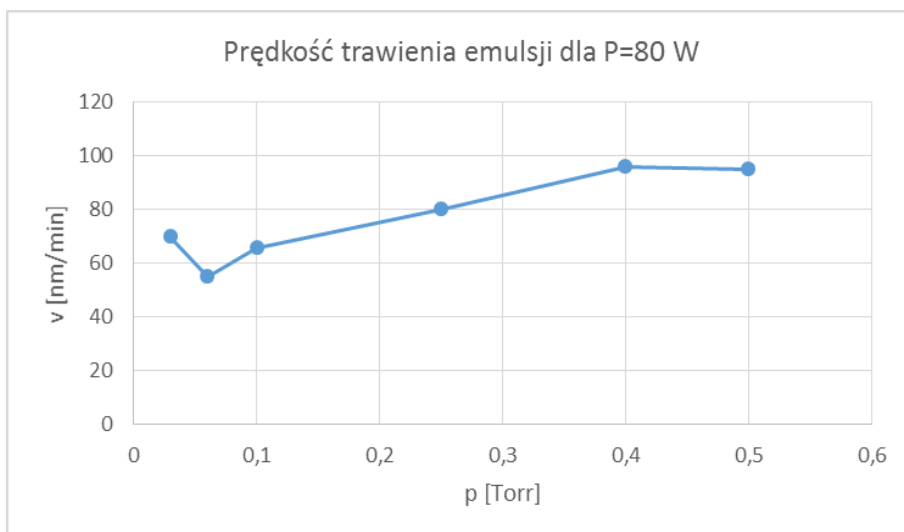
wykorzystywano wybraną wartość mocy i zmieniano wartości ciśnień podczas kolejnych trawień (Rys. 12 – 14).

Najlepsze rezultaty uzyskano dla procesów przeprowadzonych z mocą $P = 80 \text{ W}$, ciśnieniem $p = 0,5 \text{ Torr}$, przepływem gazu roboczego $\text{O}_2 = 50 \text{ sccm}$. Danych z tych procesów nie uwzględniono na wykresie przedstawionym na rysunku 14, ponieważ nie wykazano ubytku w warstwie SiO_2 , z czego wynika, że prędkość jego trawienia w tym procesie dążyła do zera.

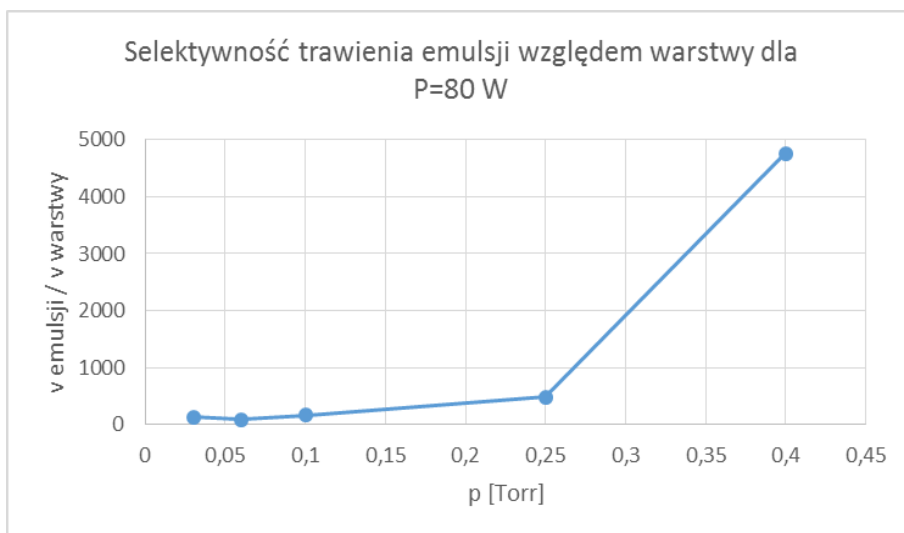
Pomiary profilometryczne umożliwiają nie tylko zbadanie wysokości uskoku na próbce powstałej wyniku trawienia, ale i chropowatość powierzchni. Pomiary przeprowadzane przed i po trawieniu wykazały zwiększenie chropowatości powierzchni dwutlenku krzemu w przypadku próbek, których czasy trawienia zostały znacznie wydłużone w celu dotrawienia resztek emulsji (ostatni etap eksperymentu), co świadczy o niekorzystnym wpływie długiego działania RIE na powierzchnię.



Rys. 12. Wykres zależności prędkości trawienia dwutlenku krzemu od ciśnienia przy stałej mocy $P = 80 \text{ W}$



Rys. 13. Wykres zależności prędkości trawienia emulsji od ciśnienia przy stałej mocy $P = 80\text{ W}$



Rys. 14. Wykres zależności selektywności trawienia emulsji względem trawienia dwutlenku krzemu od mocy przy stałej mocy $P = 80\text{ W}$

6. Podsumowanie

Przeprowadzony eksperyment wykazał możliwość stosowania metody RIE do usuwania warstwy fotorezystu z powierzchni dwutlenku krzemu, np. podczas końcowego etapu fotolitografii. Odpowiednio dobrane parametry trawienia stwarzają warunki nie wykazujące niszczącego działania na powierzchnię SiO₂. Najbardziej dogodnymi, zbadanymi parametrami procesu trawienia są relatywnie niskie moce i wysokie ciśnienia:

- moc: $P = 80 \text{ W}$,
- ciśnienie panujące w komorze RIE: $p = 0,5 \text{ Torr}$,
- przepływ gazu roboczego: $O_2 = 50 \text{ sccm}$.

Wykazano średnio czterokrotny wzrost parametru chropowatości powierzchni w przypadku procesów o wydłużonym czasie trwania. Należy jednak pamiętać, że w związku z ponad cztery razy grubszą warstwą emulsji, a tym samym znacznie dłuższym czasem trawienia, wszelkie skutki RIE widoczne na próbkach testowych są również kilkukrotnie bardziej uwydatnione niż byłyby na strukturach właściwych w standardowych warunkach technologicznych.

Prace nad opisanym eksperymentem będą kontynuowane, a ich zakres rozszerzony. Plany obejmują zbadanie innych materiałów stosowanych w technologii mikroelektronicznej oraz zwiększenie zakresów parametrów procesów trawienia wykorzystując w pełni możliwości, jakie oferuje system Plasmalab 80 Plus.

Czynności wykonane w niniejszej pracy wykonano korzystając ze sprzętu dostępnego w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej.

Literatura

- [1] Abbas N., Saeed U., Riaz M., Abbasi S. A., *On designing an assorted control charting approach to monitor process dispersion: an application to hard-bake process*, Journal of Taibah University for Science, 14(1), 65–76, 2020.
- [2] Waczyński K., Wróbel E., *Technologie mikroelektroniczne: metody wytwarzania materiałów i struktur półprzewodnikowych*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2006.
- [3] <https://www.microresist.de/en/products/> (dostęp 05.03.2020).
- [4] Jansen, H., Gardeniers H., de Boer M., Elwenspoek M., Fluitman J., *A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology*, J. Micromech. Microeng, 6, 14–28, 1996.
- [5] Hu C.C., *Półprzewodniki. Nowoczesne rozwiązania w układach scalonych*, Gliwice, Helion, 2010.

- [6] Sze S.M., *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd ed., New York, John Wiley & Sons, 2006.
- [7] Pierret R.F., *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison–Wesley Publishing Company Inc., 158–167, 1996.
- [8] <https://technolutions.pl/reactive-ion-etching-rie/> (dostęp 05.03.2020).

Analiza charakterystyk pracy przetwornic rezonansowych LLC oraz CLLC prądu stałego do zastosowań dwukierunkowego transferu energii

***Streszczenie:** Celem badawczym prezentowanego rozdziału jest próba odpowiedzi na pytanie, która topologia LLC czy CLLC jest bardziej odpowiednia dla dwukierunkowych układów DC/DC. Zaprojektowano oraz przebadano za pomocą symulacji komputerowych, rezonansowe przetwornice prądu stałego stosowane w stacjach szybkiego transferu energii. Przeprowadzono dyskusję nad wynikami i przewagami jednego rozwiązania nad drugim. Stwierdzono możliwość osiągnięcia miękkiej komutacji dla transferu w kierunku V2G oraz wskazano, że zastosowanie układu CLLC pozwala uzyskać lepsze parametry pracy niż LLC. dla pracy dwukierunkowej.*

Słowa kluczowe: Przetwornica rezonansowa, CLLC, transfer dwukierunkowy, LLC, V2G, ZVC

Analysis of operation of LLC and CLLC DC/DC converters in bidirectional energy transfer applications

***Abstract:** Goal of this chapter is to find an answer, which of two topologies: LLC or CLLC is more suitable for bidirectional DC/DC converter applications. Resonant converters used in rapid charging stations were designed and simulated. Simulation results are discussed and compared against each other, to determine advantages of one solution over the other. Possibility of soft switching in vehicle-to-grid transfer mode was claimed and it was proven, that CLLC topology can achieve better parameters than LLC converter in bidirectional operation.*

Keywords: Resonant converter, CLLC, bi-directional converters, V2G, LLC, ZVC

1. Wstęp

Przetwornice prądu stałego wykorzystywane są w zdecydowanej większości dostępnych na rynku zasilaczy, począwszy od ładowarek do szczoteczek do zębów, przez ładowarki samochodów elektrycznych po wysokomocowe przetwornice wykorzystywane w mostach energetycznych HVDC (ang. High Voltage Direct Current) takich jak SwePol Link – podwodnej linii kablowej wysokiego napięcia prądu stałego pomiędzy Szwecją a Polską. Skupiając się na rok do roku rosnącym sektorze elektromobilności i wymaganiom przez niego stawianym takim jak zapewnienie separacji galwanicznej [1] oraz możliwie najwyższej sprawności urządzeń w szerokim zakresie pracy, również i w tym

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

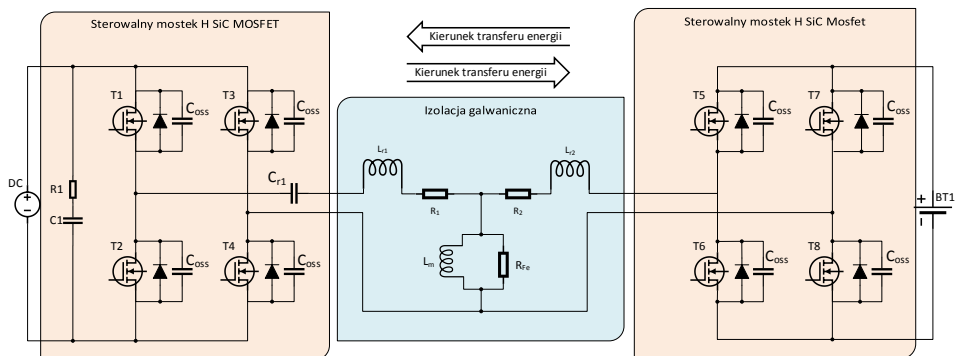
przypadku najrozsądniejsze wydaje się wykorzystywanie przetwornic prądu stałego. Następnym z powodów kierujących prace wielu naukowców na całym świecie w stronę przetwornic prądu stałego jest usługa dwukierunkowego transferu energii G2V–V2G (ang. Grid to Vehicle– Vehicle to grid). Dwukierunkowość ta zaimplementowana zarówno w ładowarkach pokładowych, jak i stacjonarnych wydaje się być jednym z ciekawszych–pod kątem bezpieczeństwa energetycznego – potencjalnych możliwości wykorzystania coraz większej ilości pojazdów elektrycznych w celach magazynowania i wspomagania systemu elektroenergetycznego.

Z aktualnie istniejących rodzajów konwerterów możemy wyłonić dwa typy spełniające wyżej wspomniane wymagania– PSFB (ang. Phase Shifted Full Bridge) oraz przetwornice rezonansowe FB–LLC (ang. Full Bridge LLC) i jej pokrewne [2]. W niniejszej pracy zwrócono szczególną uwagę na przetwornice rezonansowe, parametry pracy a także możliwość zwiększenia ich sprawności za pomocą rozwinięcia podstawowej topologii o dodatkowe elementy rezonansowe oraz wykorzystując parametry pasożytnicze. Pamiętając o mnogości zastosowań przetwornic DC/DC poprawa jakości nawet o części procenta warta jest prowadzenia badań i nieustających udoskonaleń dzięki efektowi skali dając znaczne oszczędności w zużyciu energii a w związku z czym emisji gazów cieplarnianych. W drugim rozdziale przybliżono czytelnikowi sposób projektowania przetwornic rezonansowych oraz podstawowe różnice pomiędzy topologiami LLC oraz LCC.

W części trzeciej przedstawiono odmianę wykorzystującą czteroelementowy zbiornik rezonansowy CLLC. Czwarty rozdział będący podsumowaniem zawiera porównanie charakterystyk pracy wspomnianych konwerterów w kierunku V2G oraz próbę odpowiedzenia na pytanie który z nich byłby najodpowiedniejszy w zastosowaniach dwukierunkowego transferu energii.

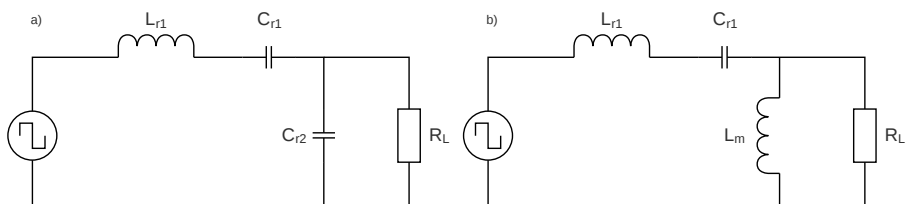
2. Przetwornica rezonansowa typu LCC/ LLC

Pomijając ze względu na ich wady, proste przetwornice rezonansowe szeregowo lub równoległe, podstawowym rodzajem przetwornic rezonansowych wykorzystywanych w większości rozwiązań wymagających separacji galwanicznej są przetwornice szeregowo równoległe typu LCC/LLC. Układy o takich topologiach wykorzystują dodatkowo wprowadzone pojemności oraz indukcyjności zarówno po stronie pierwotnej jak i wtórnej transformatora (rys. 1).



Rys.1. Uproszczony schemat przetwornicy DC/DC –LLC w układzie pełnego mostka H umożliwiającej transfer dwukierunkowy; Q1–Q8–tranzystory, C_{r1} , wprowadzona pojemność dodatkowa dla układu CLLC; R_{Fe} – rezystancja symbolizująca straty moc czynnej w rdzeniu transformatora; R_1 , R_2 – rezystancja uzwojeń, L_{r1} , L_{r2} – indukcyjność rozproszenia; L_m –indukcyjność magnesowania transformatora; Indeksy dolne– r_1 – (str. pierwotna transformatora), r_2 – (str. wtórna transformatora).

Jednym z rozwiązań eliminującym problemy zachodzące w układach przetwornic szeregowych i równoległych jest układ o topologii LCC (rys. 2a) wykorzystujący dodany równolegle kondensator. Rys. 2b prezentuje schemat zastępczy ideowych fragmentów przedstawionych na rys. 1.



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu rezonansowego przetwornicy: a) LCC, b) LLC,

L_{r1} – indukcyjność rozproszenia, L_m – indukcyjność magnesowania transformatora, C_{r1} , C_{r2} – wprowadzone pojemności dodatkowe układu, R_L – obciążenie rezystancyjne

Posiada on jednak znaczący minus, oba występujące w układzie kondensatory muszą być dobrane pod kątem wysokich prądów co generuje dodatkowe koszty. Dążąc nieustannie do poprawy istniejących technologii opracowano alternatywny układ wykorzystujący tylko jeden dodatkowy kondensator tworząc układ LLC (rys. 2.2b). Znaczną zaletą wpływającą na koszt całego urządzenia jest fakt, że indukcyjności wykorzystywane w obwodzie rezonansowym, zazwyczaj występują w już w układzie–indukcyjność

rozproszenia oraz indukcyjność magnesowania transformatora. Ponadto zbadano, że topologia LLC pozwala na regulację mocy w szerokim zakresie przy zachowaniu stosunkowo niewielkich odstępstw od częstotliwości przełączania tranzystorów osiągając wysokie sprawności dzięki miękkiej komutacji napięciowej ZVS (ang. Zero Voltage Switching).

Wykorzystanie indukcyjności magnesowania rdzenia transformatora wymusza zmianę podejścia do kwestii obliczeń oraz uwzględnienia indukcyjności magnesowania podczas rozważań nad pracą w stanie jałowym. Przez co częstotliwość obwodu w szczycie rezonansu (f_{co}) wyrazić można jako funkcję zależną od obciążenia zawartą w zakresie $f_p \leq f_{co} \leq f_0$, dla f_p – częstotliwość biegunowa, f_0 – częstotliwość rezonansowa, co zostało opisane wzorami (1) i (2).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

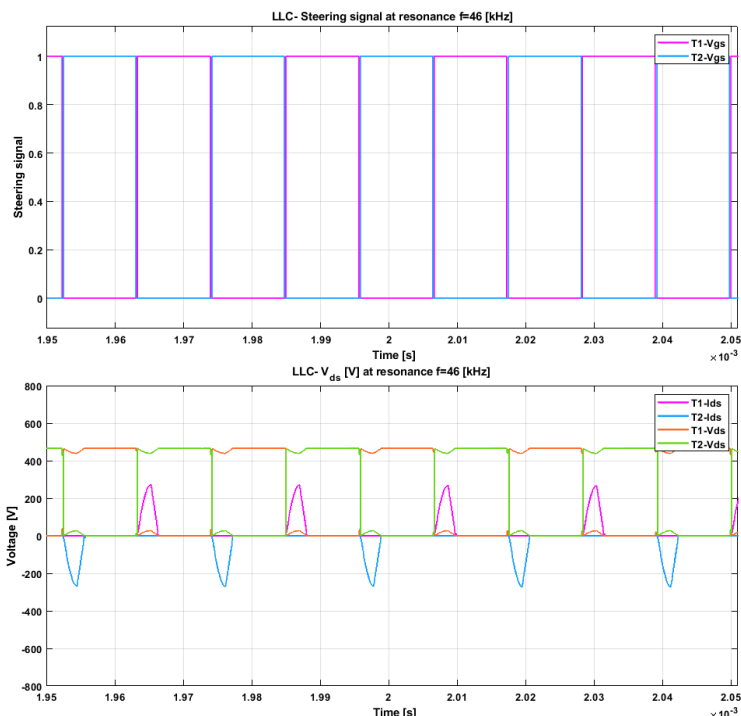
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_\mu) C_r}} \quad (2)$$

Należy tutaj zaznaczyć, że zachodzi zależność $f_{co}=f_p$ przy pracy w stanie jałowym, f_{co} dążące do f_0 wraz ze wzrostem obciążenia oraz $f_{co}=f_0$ dla stanu zwarcia zacisków obciążenia. Ponadto wzór (1) jest zawsze prawdziwy niezależnie od obciążenia a wzór (2) tylko w przypadku stanu jałowego.

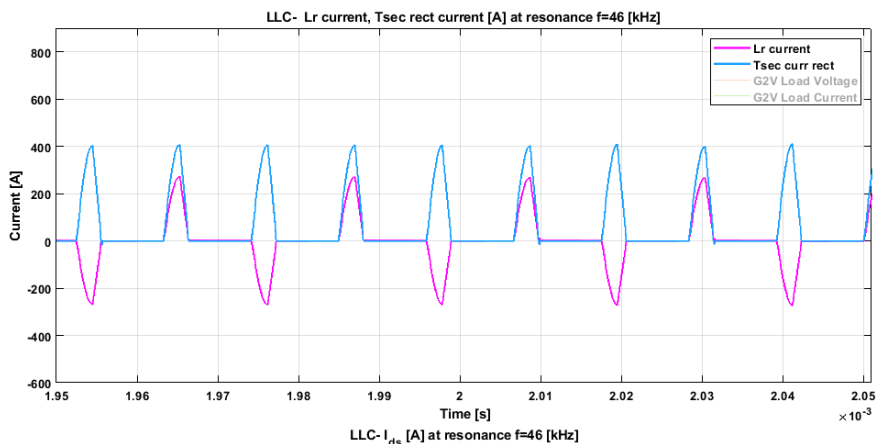
Na charakterystykach (rys. 3 i 4) przedstawiono wyniki symulacji zaprojektowanego modelu przetwornicy rezonansowej typu Full Bridge LLC dla częstotliwości rezonansowej oraz niskiego obciążenia rezystancją $R_L=75 \text{ m}\Omega$ będącą odpowiednikiem rezystancji wewnętrznej ogniwa Li-Ion 18650 [3]. Spowodowane to zostało niewielkimi różnicami pomiędzy konwerterami LLC i CLLC pracującymi przy obciążeniu wyższym od 20% [4], jednak wyraźnymi rozbieżnościami zachodzącymi przy transferze niewielkich mocy.

Wartości stref martwych kluczowania tranzystorów –deadband– w celach porównawczych zostały nastawione identyczne do wszystkich zaprezentowanych w tej pracy przebiegów. Porównując sygnały V_{gs} , V_{ds} , I_{ds} zaobserwowano zjawisko przełączania się tranzystorów przy zerowym bądź bliskim 0 prądzie– ZCS.

Pierwsza, (górną) charakterystyka (rys. 3) przedstawia przebiegi sterujące kluczami tranzystorowymi dla częstotliwości rezonansowej układu. Dolna natomiast ich odpowiedź w formie napięcia pomiędzy drenem a źródłem jak i prądów płynących przez tranzystory T1,T2 w trakcie pracy. Przedstawione (rys. 4) przebiegi przedstawiają prąd płynący przez indukcyjność rozproszenia (rys. 2) obrazującą indukcyjność rozproszenia transformatora oraz prąd strony wtórnej po wyprostowaniu.



Rys. 3. Układ LLC, kierunek G2V– częstotliwość rezonansowa $f=46$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V]– dla T1,T2



Rys. 4. Układ LLC, kierunek G2V– częstotliwość rezonansowa $f=46$ [kHz], $I_{r\ current}(t)$ [A]– przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{sec\ curr\ rect}(t)$ [A]– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu

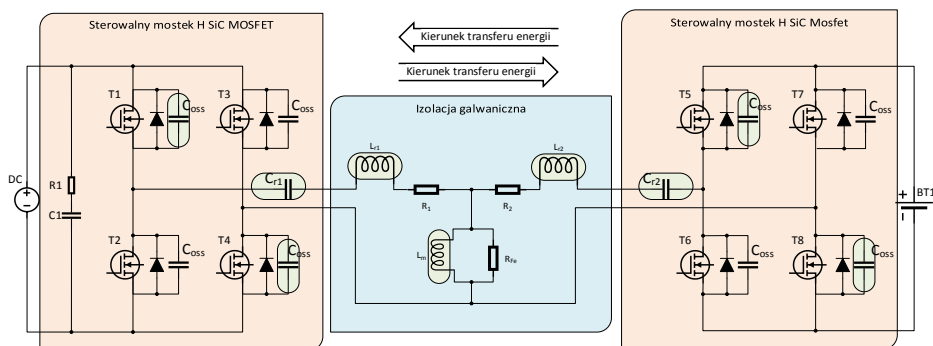
Wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych (rys. 3 i 4) badań [4] dla różnych obciążeń potwierdzają możliwość efektywnego stosowania przetwornic LLC do

transferu energii w kierunku G2V pod warunkiem dopasowania ich w sposób umożliwiający pracę w średnim i wysokim obciążeniu. Dzięki możliwości osiągnięcia synchronicznych warunków ZVS jak i ZCS dla różnych trybów pracy, istnieje możliwość znaczącego ograniczenia strat łączeniowych przetwornicy.

3. Przetwornica rezonansowa typu CLLC

Omówiona w rozdziale drugim przetwornica typu LLC dobrze sprawdza się w jednokierunkowym transferze energii. Niemniej jednak w przypadku transferu odwróconego, np. zwrotu energii z pojazdu do sieci (V2G) indukcyjność magnesowania nie bierze udziału w rezonansie, pozostawiając zwykły rezonans szeregowy LC[5]. Powoduje to występowanie wszystkich niepożądanych zjawisk analogicznie do prostych układów wymuszając stosowanie wysokich częstotliwości kluczowania tranzystorów, w związku z czym odkształcenie sygnałów podobne jak zostało to wspomniane w rozdziale drugim oraz w konsekwencji utratę miękkiej komutacji. Ponadto wzmocnienie układu wykorzystującego szeregowy rezonans jest zawsze mniejsze niż 1 przez co możliwości regulacji napięcia wyjściowego są znacznie ograniczone.

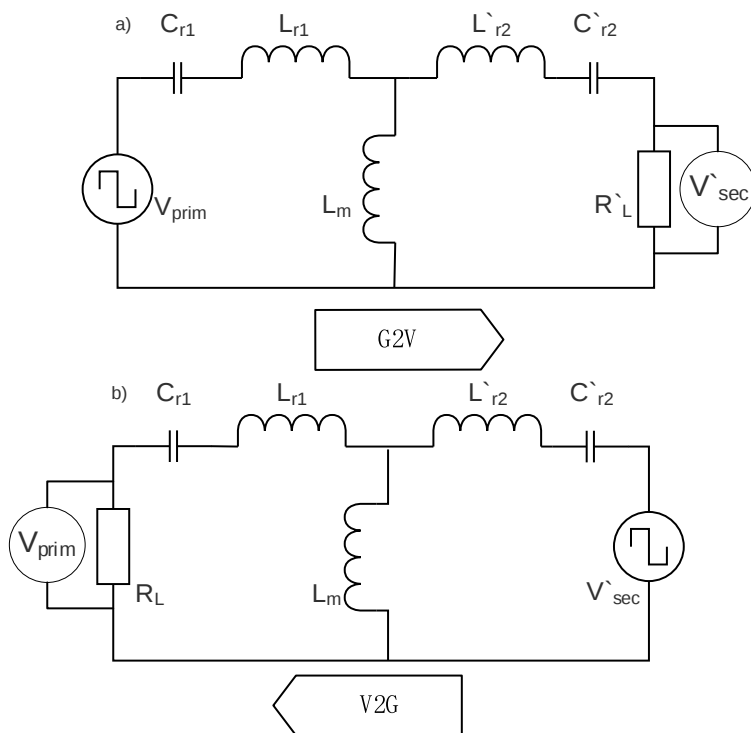
Wspomniane zależności ograniczają możliwość wykorzystania rozwiązań opartych o topologię LLC w ładowarkach pojazdów elektrycznych. Ograniczenia te zostają znacząco zredukowane w topologiach wykorzystujących cztero-elementowy zbiornik rezonansowy CLLC (rys. 5).



Rys. 5. Uproszczony schemat przetwornicy DC/DC –CLLC w układzie pełnego mostka H umożliwiającej transfer dwukierunkowy; Q1–Q8–tranzystory, C_{r1} , C_{r2} –wprowadzone pojemności dodatkowe dla układu CLLC; R_{Fe} – rezystancja symbolizująca straty moc czynnej w rdzeniu; R_1 , R_2 – rezystancja uzwojeń, L_{r1} , L_{r2} – indukcyjność rozproszenia; L_m – indukcyjność magnesowania transformatora; Indeksy dolne– r_1 –(str. pierwotna transformatora), r_2 – (str. wtórna transformatora)

Niezbędne do zbudowania przetwornicy w układzie CLLC jest dodanie dodatkowego kondensatora (C_{r2}) po stronie wtórnej transformatora. Dzięki wniesionej pojemności rezonans zachodzący po stronie pierwotnej oraz wtórnej

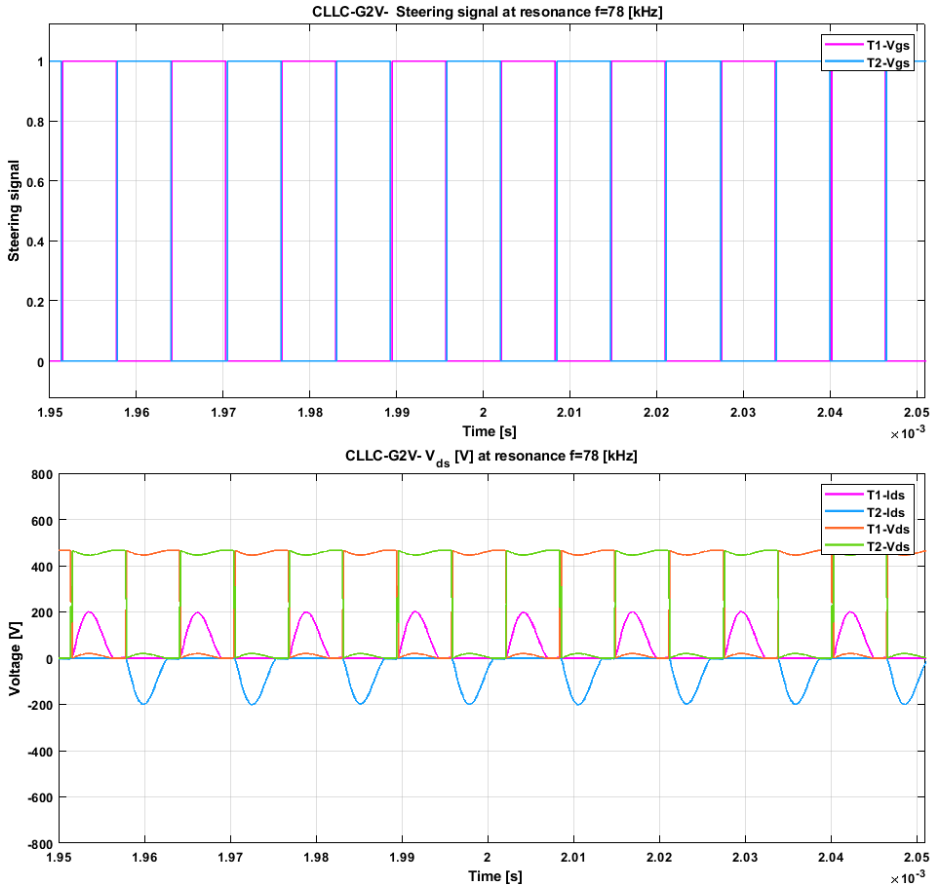
osiąga zbliżone charakterystyki do dwóch niezależnych przetwornic LLC w adekwatnie do kierunku a schematy zastępcze sprowadzają się do zamiany miejscami źródła i obciążenia (rys. 6).



Rys. 6 Schemat zastępczy obwodu rezonansowego przetwornicy: a) CLLC– kierunek G2V, b) CLLC–V2G; L_{r1}, L_{r2} – indukcyjności rozproszenia, L_m – reaktancja indukcyjności magnesowania transformatora, C_{r1}, C_{r2} – zastępcze wprowadzone pojemności dodatkowe układu zależne od przekładni transformatora, R_L – rezystancja obciążenia, r_{L1}, r_{L2} – strona pierwotna, wtórna transformatora, V_{prim} – pomiar napięcia strony pierwotnej, V_{sec} – pomiar napięcia strony wtórnej transformatora

Na potrzeby przeprowadzonych analiz stworzono modele symulacyjne zarówno przetwornicy LLC jak również CLLC dla parametrów napięciowych zbliżonych do akumulatorów NMC samochodu BMW i3 tj. w zakresie 410–290V. Przekładnię transformatora określono na poziomie $n=1,5:1$ przyjmując napięcie wejściowe– V_{prim} w przedziale 700–400V, natomiast napięcie wyjściowe V_{sec} w zakresie 466–266V. Przyjęte parametry pozwalają na naładowanie większości baterii wysokiego napięcia stosowanych w pojazdach elektrycznych o napięciu znamionowym zbliżonym do 360V DC. Na podstawie charakterystyk (rys. 7 i 8) pracy zamodelowanego układu

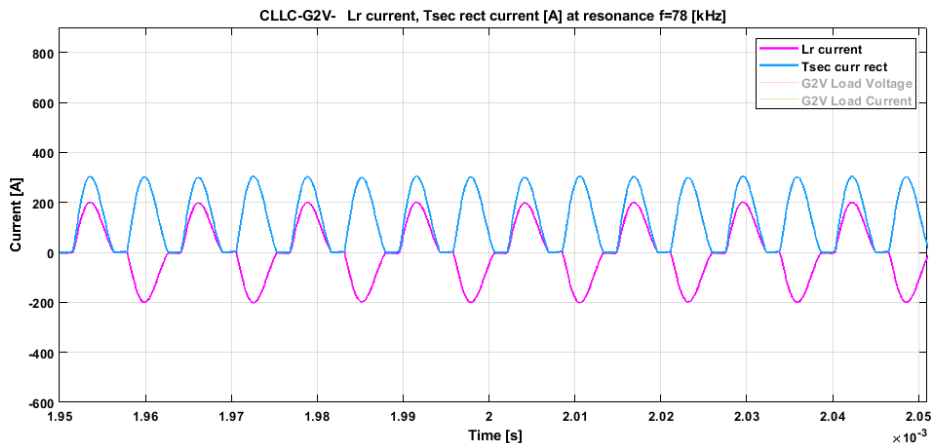
jednoznacznie potwierdzono możliwość osiągnięcia zarówno ZVS jak i ZCS w obu kierunkach transferu energii dzięki czemu straty generowane przez urządzenie są znacząco zredukowane[7–8]. Porównując przedstawione przebiegi do sygnałów (rys. 3 i 4) rozdziału drugiego zaobserwowano zdecydowanie lepszą odpowiedź tranzystorów na sygnał sterujący co przełożyło się na zmniejszenie przerw w przewodzeniu transformatora a w związku z tym ograniczenie prądów koniecznych do przetransferowania tej samej mocy w stosunku do przetwornicy LLC .



Rys. 7. Układ CLLC, kierunek G2V– częstotliwość rezonansowa $f=78$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V]– dla T1,T2

Pomimo zachowania tego samego obciążenia w obu rozważanych przypadkach, znaczące różnice zachodzące w sposobie odpowiedzi układu na sygnał sterujący tranzystorami jasno wskazują na wyższość topologii CLLC dla zastosowań wymagających regulacji w wyższym zakresie niż dostępne dla

rozwiązań LLC. Należy tutaj wspomnieć, że zaprezentowane w rozdziale drugim i trzecim celowo zostały zablokowane na częstotliwościach rezonansowych każdego z układów aby w miarodajny, w ocenie autora, sposób porównać ich reakcję na obciążenia mniejsze niż 15% obciążenia nominalnego.

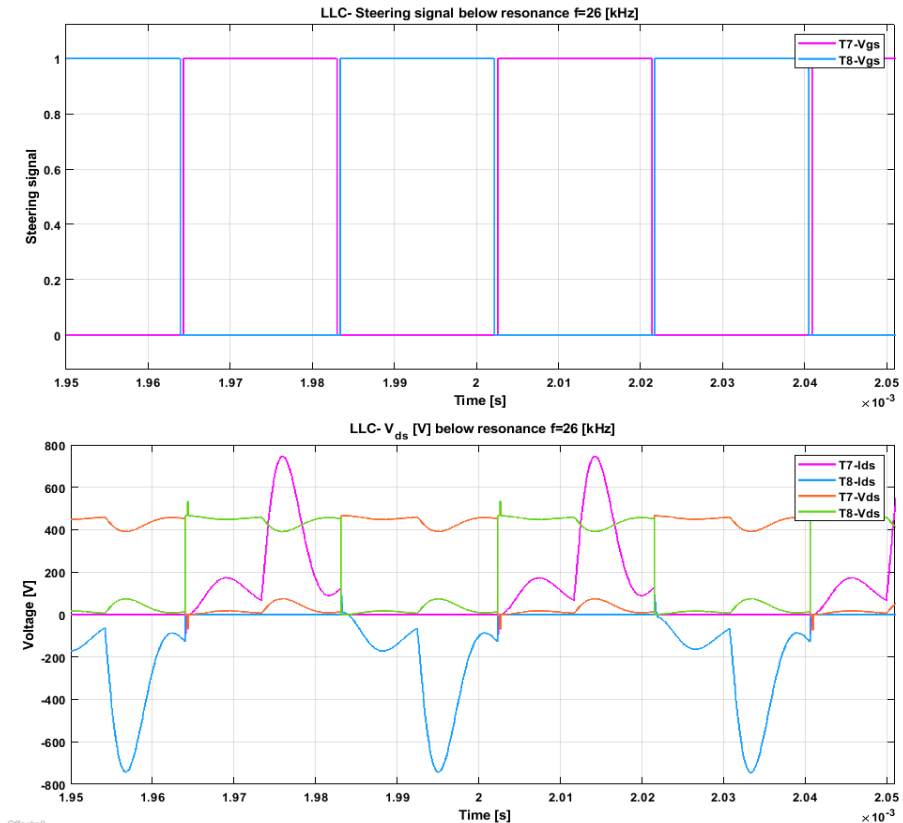


Rys. 8. Układ CLLC, kierunek G2V– częstotliwość rezonansowa $f=78$ [kHz], $L_r \text{ current}(t)$ [A] – przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{sec \text{ curr rect}}(t)$ [A]– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu

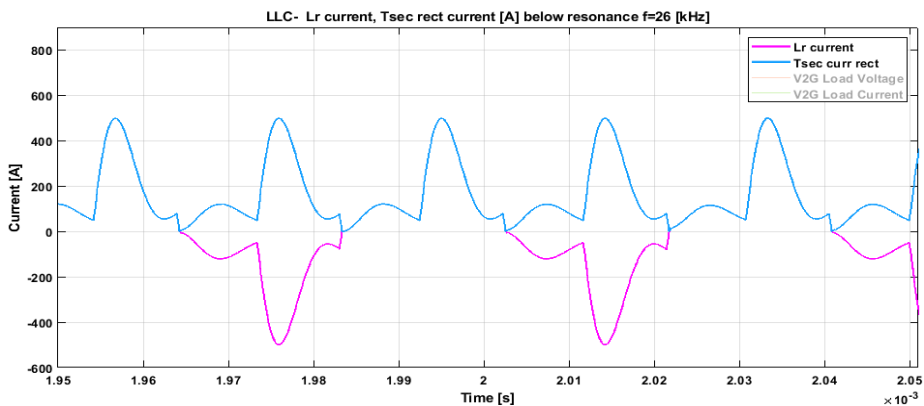
4. Porównanie charakterystyk pracy przetwornicy LLC oraz CLLC w kierunku V2G

Przedstawione w drugim i trzecim rozdziale przebiegi ukazują różnice pomiędzy konwerterami LLC oraz CLLC w przypadkach pracy w tradycyjnym kierunku G2V dla częstotliwości rezonansowej i niewielkim obciążeniu. Niemniej jednak wspomniana we wstępie dwukierunkowość wymaga możliwości transferu energii również w stronę V2G [9]. W związku z czym ten sam układ po zamianie stronami (analogicznie jak w schematach uproszczonych) źródła z obciążeniem, poddany został ponownym badaniom symulacyjnym dla częstotliwości pod-rezonansowych, rezonansowych oraz nad-rezonansowych. Wyniki przeprowadzonych symulacji dla przetwornicy LLC w kierunku V2G przedstawione zostały odpowiednio dla częstotliwości pod-rezonansowej $f=26$ [kHz] (rys. 9 i 10), rezonansowej $f=46$ [kHz] (rys. 11 i 12) oraz $f=66$ [kHz] (rys. 4.5, rys. 4.6). Na podstawie przeprowadzonych symulacji zaobserwowano, że przekształtnik zbudowany na podstawie topologii LLC pracujący w odwrotnym kierunku do podstawowego, tj. pojazd $\rightarrow$ sieć utracił możliwość przełączania tranzystorów w trybie ZCS w częstotliwościach $f < f_0$, $f = f_0$ oraz $f > f_0$. Pomimo ciągłego przewodzenia problemy wynikające z faktu braku wykorzystania indukcyjności magnesowania i sprowadzenia układu do

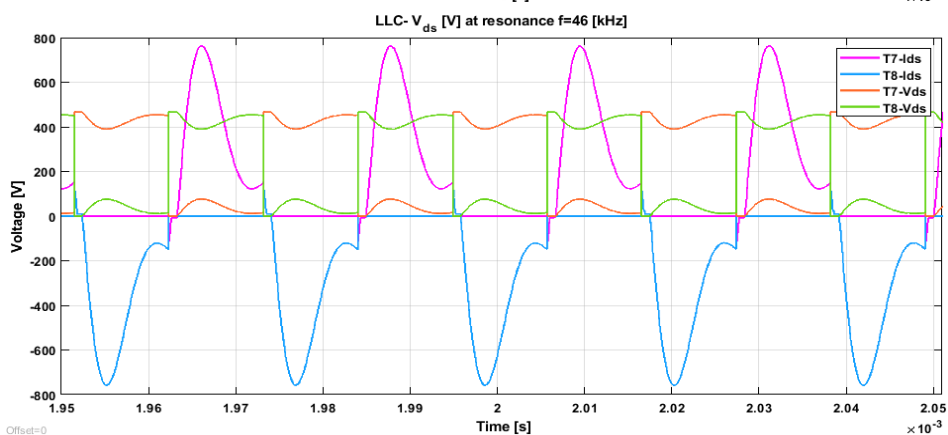
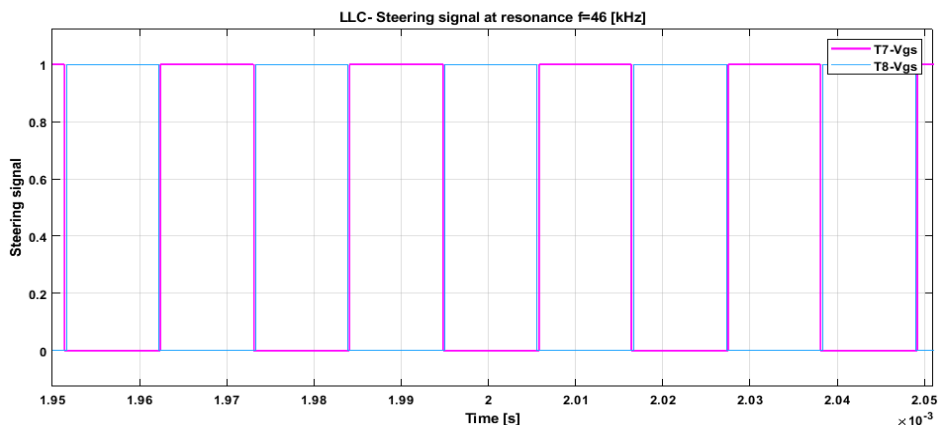
rezonansu szeregowego, niemożliwe staje sięysterowanie konwertera w równie szerokim co w kierunku G2V zakresie częstotliwości. Dla $f < f_0$, $f = f_0$ odpowiedź tranzystorów w formie prądu I_{ds} staje się niestabilna, wyraźnie widoczny jest problem zysterowaniem oraz wysokie wartości szczytowe prądu przewodzenia, najbardziej optymalna okazała się praca w częstotliwości $f > f_0$ jednak warunki pracy odpowiadające ZCS nie zostały w dalszym ciągu osiągnięte.



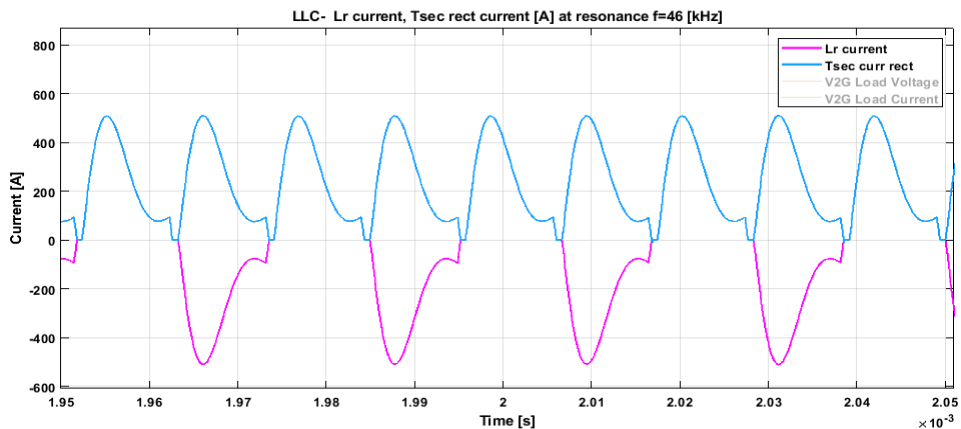
Rys. 9. Układ LLC, kierunek V2G– $f=26$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V]– dla T1,T2



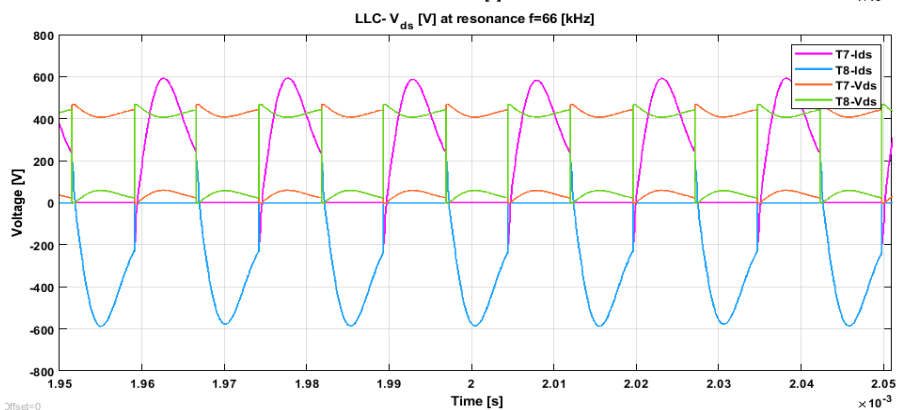
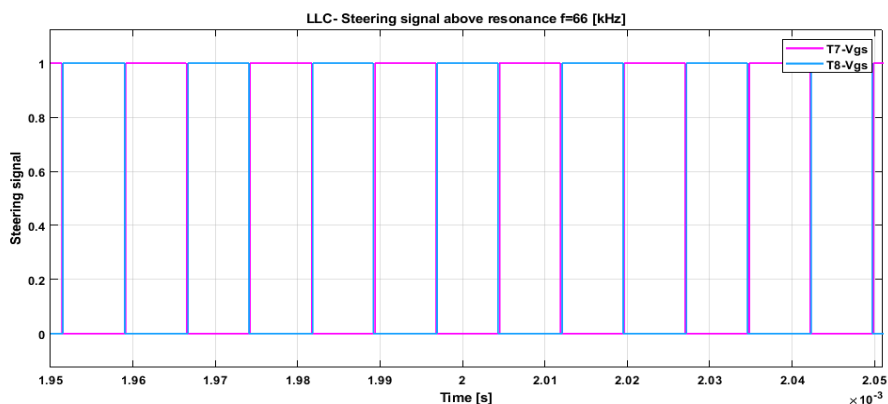
Rys. 10. Układ LLC, kierunek V2G– $f=26$ [kHz], $Lr_{current}(t)$ [A]– przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{sec curr rect}(t)$ [A]– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu ,



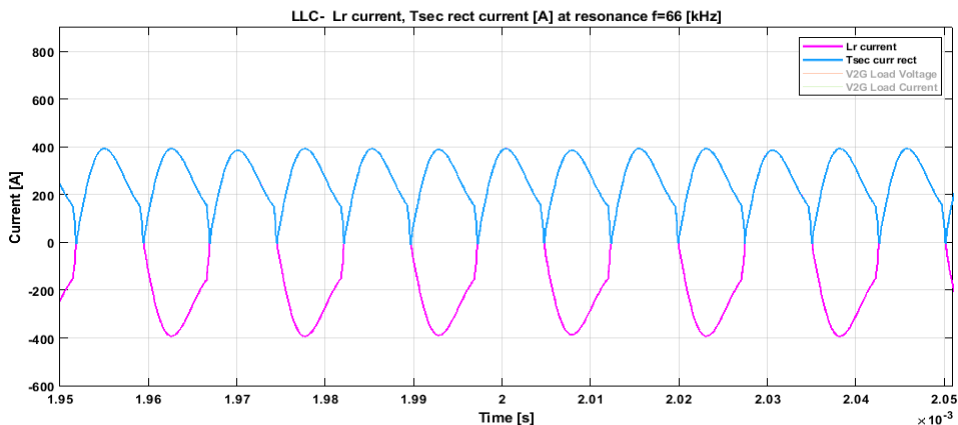
Rys. 11. Układ LLC, kierunek V2G– $f=46$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V]– dla T1,T2



Rys. 12 Układ LLC, kierunek V2G– $f=46$ [kHz], $Lr_{current}(t)$ [A]– przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{sec curr rect}(t)$ [A]– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu

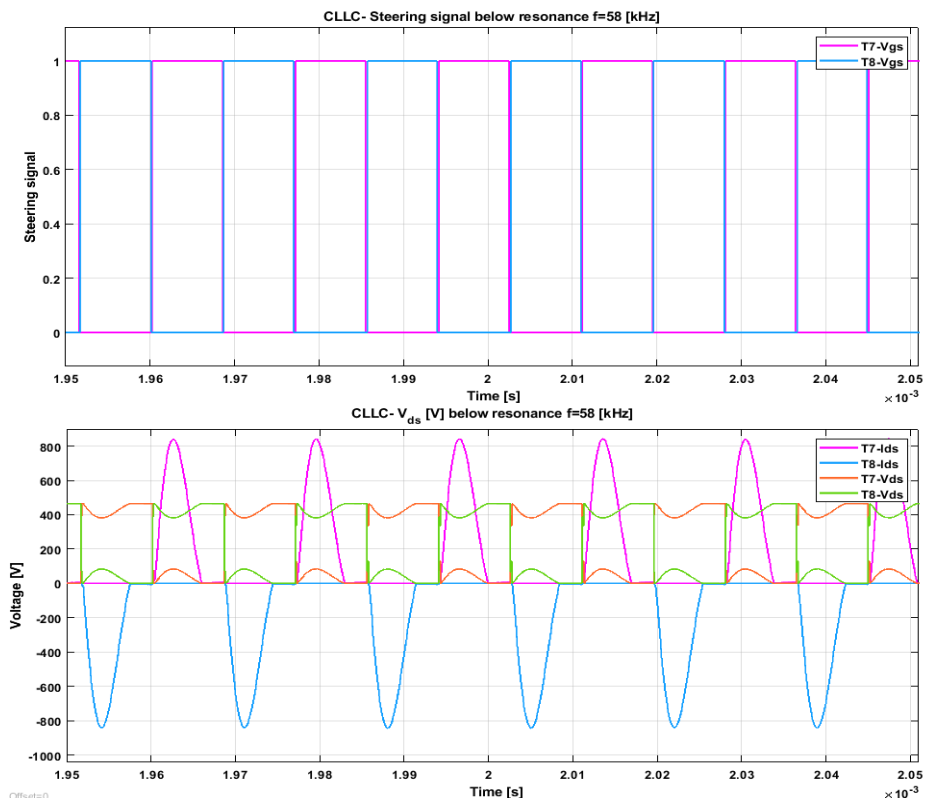


Rys. 13. Układ LLC, kierunek V2G– $f=66$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V] – dla T1,T2

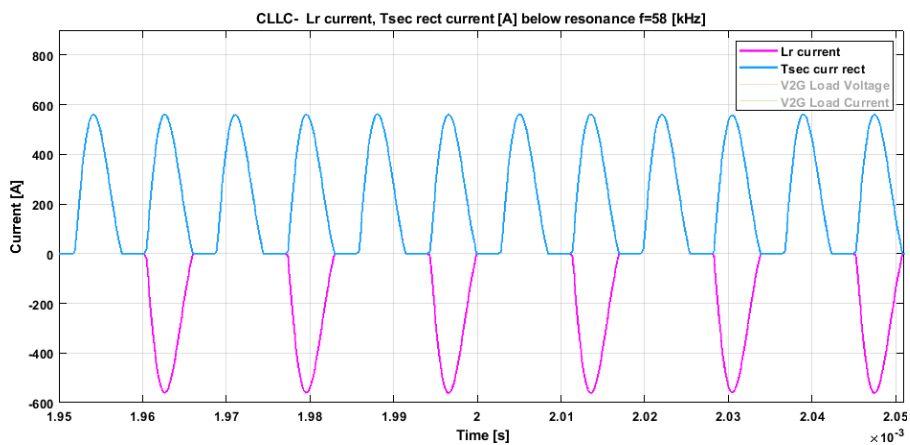


Rys. 14. Układ LLC, kierunek V2G– $f=66$ [kHz], $Lr_{current}(t)$ [A]– przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{sec\ curr\ rect}(t)$ [A]– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu

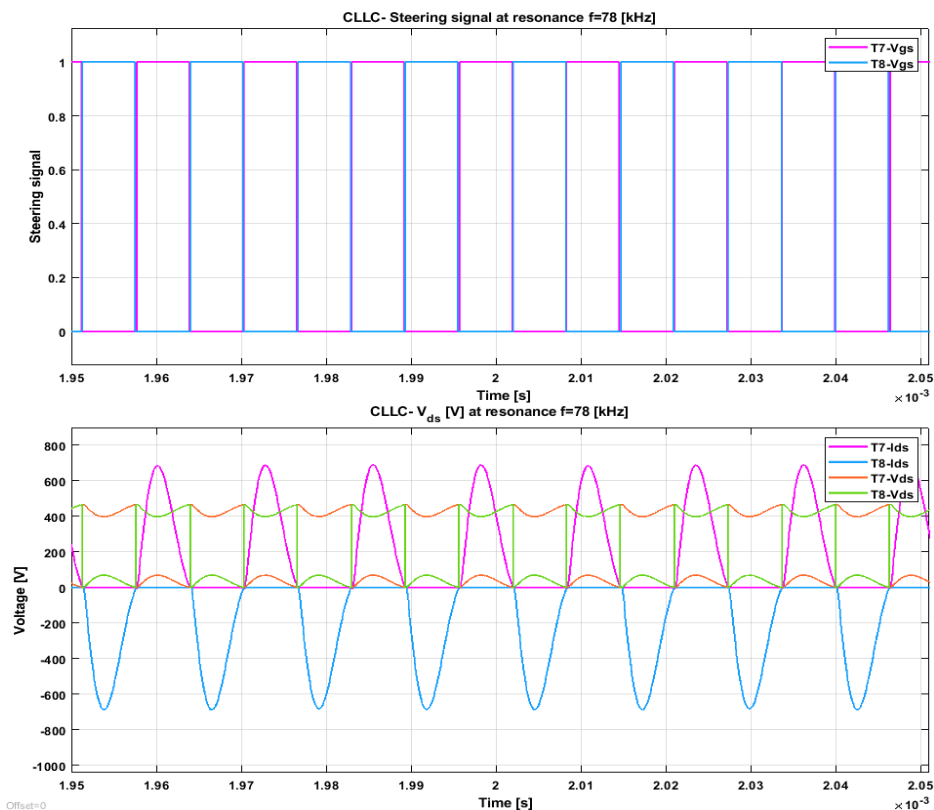
Analogicznie do badań przeprowadzonych na przekształtniku FB–LLC wykonano symulacje pracy przetwornicy FB–CLLC. Na przedstawionych charakterystykach odpowiednio dla częstotliwości pod rezonansowej $f=58$ [kHz] (rys. 15 i 16), rezonansowej $f=78$ [kHz] (rys. 17 i 18) oraz $f=98$ [kHz] (rys. 19 i 20) zaprezentowano przebiegi sygnałów sterujących $V_{gs}(t)$, prądu przewodzenia $I_{ds}(t)$, napięcia potwierdzającego zadziałanie klucza tranzystorowego $V_{ds}(t)$ oraz $Lr_{Current}$ – prądu płynącego przez indukcyjność rozproszenia i $T_{sec\ curr\ rect}$ prądu strony wtórnej transformatora po wyprostowaniu. W przypadku $f < f_0$, prąd przewodzenia ze względu na dłuższe przerwy między wartościami szczytowymi, przy zachowaniu tej samej mocy, jest najwyższy, jednak dzięki zachowaniu ZCS straty przełączania są niewielkie. Dla pracy w częstotliwości rezonansowej $f=f_0$ odpowiedź tranzystorów na sygnały sterujące jest najbardziej zbliżona do sygnału sinusoidalnego moment przełączania następuje przy zerowym prądzie przewodzenia (ZCS) a jednocześnie skróconym czasie pomiędzy wartościami szczytowymi prądu I_{ds} w związku z czym również $T_{sec\ curr\ rect}$.



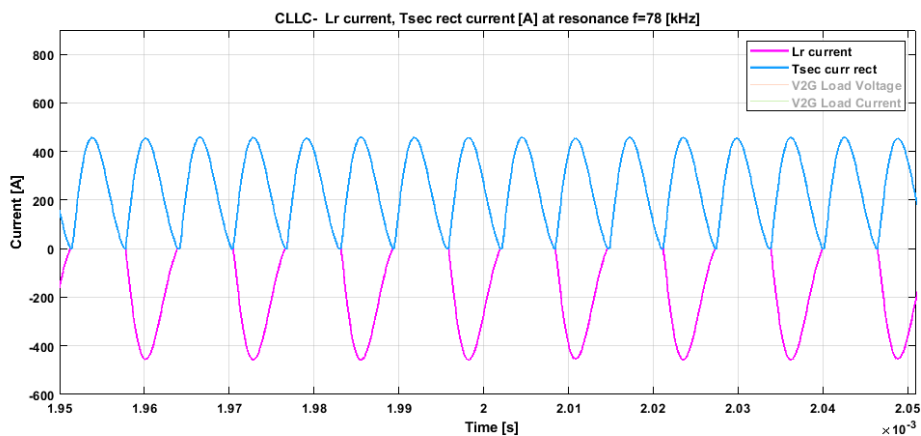
Rys. 15. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=58$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$ [A], $V_{ds}(t)$ [V]– dla T1,T2



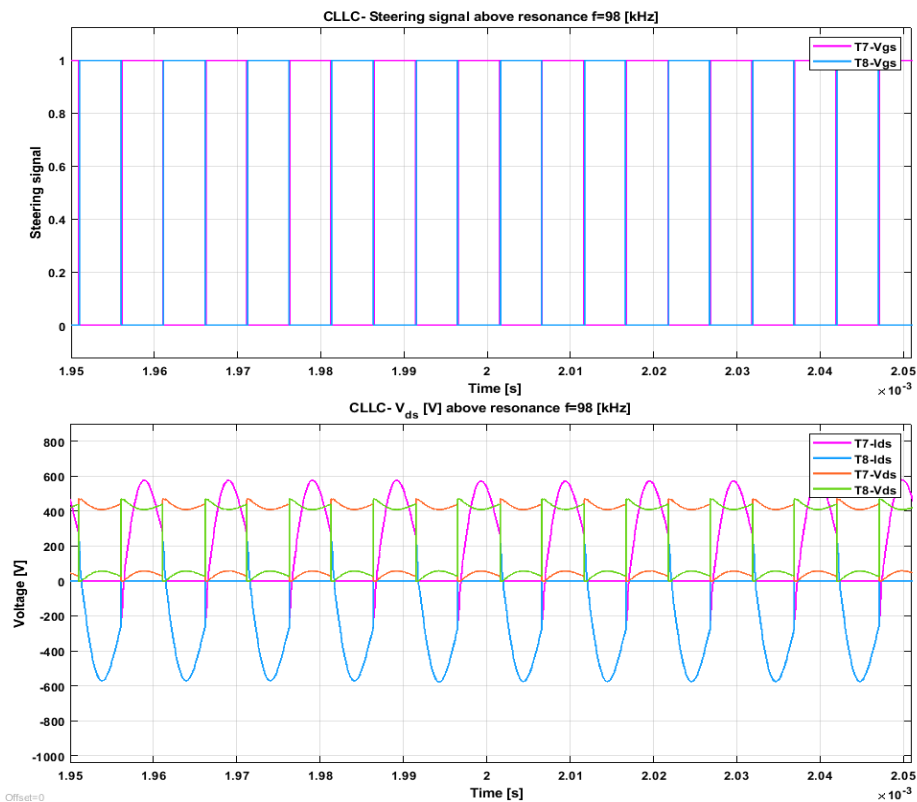
Rys. 16. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=58$ [kHz], $I_{r \text{ current}}(t)$ – przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $T_{\text{sec curr rect}}(t)$ – prąd strony wtórnej po wyprostowaniu ,



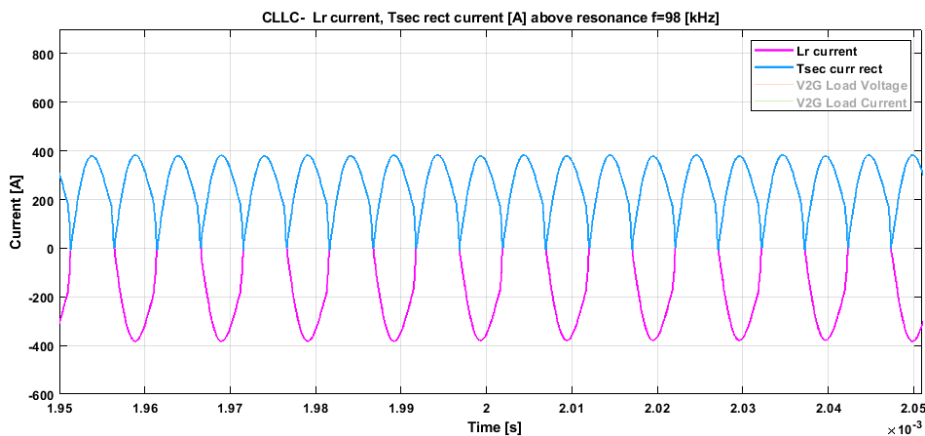
Rys. 17. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=78$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t), V_{ds}(t)$ – dla T1,T2



Rys. 18. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=78$ [kHz], L_r current(t)– przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, T_{sec} curr rect(t)– prąd strony wtórnej po wyprostowaniu



Rys. 19. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=98$ [kHz], przebiegi $V_{gs}(t)$ – sygnału sterującego pierwszą parą tranzystorów T1,T2 oraz $I_{ds}(t)$, $V_{ds}(t)$ – dla T1,T2



Rys. 20. Układ CLLC, kierunek V2G– $f=98$ [kHz], $I_{r \text{ current}}(t)$ – przebieg prądu płynącego przez cewkę symbolizującą indukcyjność rozproszenia, $I_{\text{sec curr rect}}(t)$ – prąd strony wtórnej po wyprostowaniu

5. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych symulacji, jednoznacznie wskazują na wyższość przetwornic rezonansowych opartych na topologii CLLC w aplikacjach wymagających dwukierunkowego transferu energii. Zastosowanie cztero-elementowego układu rezonansowego pozwoliło na osiągnięcie miękkiej komutacji zarówno w kierunku G2V jak i w kierunku V2G. Wykorzystanie przełączania tranzystorów przy zerowym prądzie lub napięciu pozwala na pracę w o wiele większym zakresie częstotliwości w stosunku do rozwiązań opartych na topologii LLC, a ponadto ma znaczący wpływ na zwiększenie sprawności urządzenia. Przełączanie pomiędzy pracą G2V–V2G następowało poprzez zamianę miejscami źródła i obciążenia oraz przełączanie mostka po stronie pierwotnej transformatora w tryb aktywny a po stronie wtórnej w pasywny – prostowniczy dla kierunku G2V, natomiast odwrotnie dla kierunku V2G. W przypadku zastosowań w stacjach transferu energii, podczas gdy znana jest wartość napięć i zapotrzebowanie na moc zarówno sieci jak i akumulatora pojazdu, kluczowym jest wysterowanie częstotliwości przełączania tranzystorów do wartości zapewniających ZVS lub ZCS[10]. W artykule przedstawiono różnice pomiędzy rozważanymi topologiami w odniesieniu do wysokosprawnego dwukierunkowego transferu energii jak również wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego układu.

Literatura

- [1] Dobrzański D., *Overview and characteristics of the EV fast charging connector systems*, Maszyny Elektryczne: Zeszyty problemowe, 3, 2017.
- [2] Xue L., Shen Z., Boroyevich D., Mattavelli P., Diaz D., *Dual Active Bridge-Based Battery Charger for Plug-in Hybrid Electric Vehicle with Charging Current Containing Low Frequency Ripple*, IEEE Transactions on Power Electronics, 12(30), 2015.
- [3] Types of Lithiumion, https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion, (dostęp 20.06.2020).
- [4] Dobrzański D., Kwaśny Ł., *Poprawa sprawności rezonansowej przetwornicy DC/DC poprzez zastosowanie miękkiej komutacji*, Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki, inżynierii biomedycznej i budownictwa: prace doktorantów Politechniki Lubelskiej, 7–22, 2019.
- [5] Vu Hai-Nam, Abdel-Monem M., El Baghdadi M., Mierlo J.V., Lataire P., Hegazy O., *A Non-Regulated Full-Bridge Resonant Converter for implementing CC and CV Charging strategies of Electric Vehicles*, 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), 2019.

- [6] Zou S., Lu J., Mallik A., Khaligh A., *3.3kW CLLC converter with synchronous rectification for plug-in electric vehicles*, Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IEEE, 2017.
- [7] Fatyga K., Mroczek B. „*Charakterystyki pracy dwukierunkowej przetwornicy DC/DC do pojazdów elektrycznych i architektura jej komunikacji w systemie operatora sieci elektroenergetycznej*” *Maszyny Elektryczne: Zeszyty problemowe*, 3, 2017.
- [8] Zieliński D., Tokovarov M., *Simulation and comparison of selected fast charger topologies*, *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 3, 2017.
- [9] Guo Z., Zhou Z., Zhou Y., *Impacts of Integrating Topology Reconfiguration and Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution System Operation*, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* , 2019.
- [10] Qu L. , Wang X. , Bai Z. , Liu Y. *Variable CLLC Topology Structure Technique for a Bidirectional on Board Charger of Electric Vehicle*, 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), 2019.

*Dawid Zarzeczny

Biokompatybilność urządzeń medycznych

Streszczenie: W pracy przedstawiono zagadnienia związane z biokompatybilnością urządzeń medycznych. Szczegółowo omówione zostały kryteria związane z biogodnością wyrobów przeznaczonych do implantacji. Przytoczono niezbędne definicje oraz regulacje prawne. Omówiono przyrząd, który posłużyć może to oceny wpływu wybranych materiałów na hodowlę komórkowe. Na wykresach pokazano wartości zmierzonych parametrów elektrycznych.

Słowa kluczowe: biokompatybilność, ECIS, urządzenia biomedyczne

Biocompatibility of medical devices

Abstract: The paper presents issues related to biocompatibility of medical devices. The criteria related to the biocompatibility of implantable devices were discussed in detail. Necessary definitions and legal regulations have been cited. A device was discussed that can be used to assess the impact of selected materials on cell cultures. The graphs show the values of the measured electrical parameters.

Keywords: biocompatibility, ECIS, biomedical devices

1. Wstęp

Nowe technologie odgrywają coraz większą rolę w życiu człowieka. Aparatura medyczna oparta na technologii BioMEMS znajduje swoje zastosowanie w urządzeniach do monitorowania stanu zdrowia, diagnostyki chorób, oraz poprawy funkcji życiowych organizmu. Połączenie elementów elektronicznych i użycie ich w bioinżynierii nie jest jednak prostym zadaniem. Problem dotyczy wymagań związanych z biokompatybilnością. Wybór materiału jest kwestią pierwszorzędą, od której zależy nie tylko poprawne działanie zaprojektowanego układu, lecz także jego funkcjonowanie w otoczeniu organizmu żywego. Najczęściej wykorzystywanymi są materiały metaliczne. Choć istnieje wiele materiałów, które są obecnie wykorzystywane w różnego rodzaju zastosowaniach biomedycznych, ich wpływ na organizm nie jest do końca dobrze poznany. Różne części ciała posiadają różne wartości pH i stężenia tlenu. W zależności od miejsca stosowania, mogą wystąpić niepożądane reakcje. W ich wyniku dochodzi do korozji, powodującej uwolnienie jonów o różnych poziomach toksyczności. Należy wziąć to pod uwagę podczas projektowania urządzeń biomedycznych oraz w czasie wyboru materiałów, z których mają być wykonane. Jest to szczególnie istotne

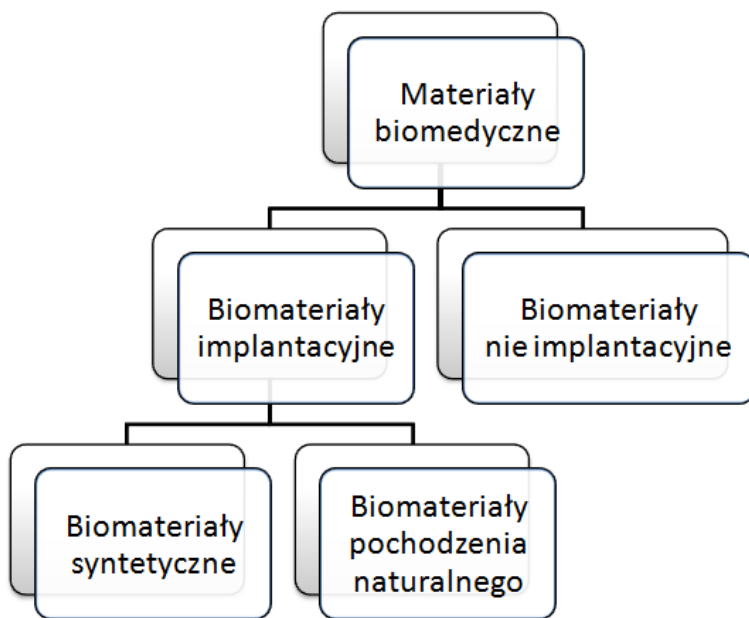
* dawid.adrian.zarzeczny@gmail.com, afiliacja: Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

w przypadku jeśli urządzenie przeznaczone jest do użytku in vivo. Zanim element lub urządzenie zostanie wszczepione pacjentowi, istnieje potrzeba weryfikacji wpływu użytego do produkcji materiału. Aby nie narażać pacjentów na niebezpieczeństwo, najlepszym sposobem na ocenę wpływu danego pierwiastka na organizm jest prowadzenie badań in vitro. W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z szeroko pojętą biokompatybilnością. Zaprezentowano przyrząd, za pomocą którego w przyszłości, możliwe będzie prowadzenie badań nad oceną wpływu danego materiału, na komórki żywe. Jest to niezwykle ważne, ponieważ umożliwi to przeprowadzanie tanich, szybkich i ogólnie dostępnych testów w miejscu opieki. Dodatkowo, prezentowane urządzenie pozwoli na monitorowanie zmian kultur komórkowych, poddanych działaniu toksyn oraz medykamentów[1–2].

2. Kryteria biokompatybilności

Termin „materiał biomedyczny” używany jest do reprezentowania elementu dowolnego urządzenia biomedycznego, posiadającego pośredni bądź bezpośredni kontakt z żywą tkanką. Definicja biomateriałów, rozpowszechniona w środowisku naukowym, używana jest do opisu materiałów, których wspólną cechą jest to, że stosuje się je w bliskim kontakcie z organizmem żywym. Ich użycie determinowane jest potrzebą diagnostyki, leczenia, wzmocnienia lub zastąpienia danej tkanki, narządu lub funkcji organizmu. Stąd biomateriały są implantowanymi materiałami biomedycznymi pochodzenia naturalnego lub sztucznego, stosowane i dostosowane do zastosowań medycznych. Rzadko występują jako materiały niezależne lub izolowane. Zazwyczaj zintegrowane są z implantami lub urządzeniami medycznymi. W zależności od wykorzystania, mogą charakteryzować się łagodnym wpływem na organizm, lub być mocno bioaktywne. Duże znaczenie ma miejsce, w którym dany materiał jest wykorzystywany. Reakcja na konkrety materiał może znacząco różnić się od miejsca zastosowania. Ważną kwestią jest również charakter powstających zmian, ponieważ każdy przypadek wymaga innego działania. W pewnych okolicznościach wymagane jest, aby materiał reagował z konkretnymi tkankami, a nie był przez nie ignorowany. Inne sytuacje wymuszają, aby materiał z czasem ulegał degradacji, a nie pozostawał w nim przez czas nieokreślony. Rosnąca liczba zastosowań biomateriałów spowodowała konieczność ich podziału, ze względu na pełnione funkcje. Wyróżniamy materiały bioinertowe (obojętne biologicznie), bioaktywne i biodegradowalne, oraz materiały zaprojektowane w celu stymulowania określonych odpowiedzi komórkowych na poziomie molekularnym. Odpowiedź tkanek na występowanie biomateriału obojętnego nie występuje, lub występuje w stopniu minimalnym. Bioinert ma na celu ograniczenie do minimum reakcji organizmu na implant. Bioaktywność zdefiniowana jest jako zdolność materiału do interakcji ze środowiskiem

biologicznym, w celu wzmocnienia odpowiedzi biologicznej. Biomateriały aktywne sprzyjają wzrostowi lub przyleganiu do tkanki otaczającej (przeszczep tkanek). Biodegradowalne materiały po pewnym czasie ulegają rozpuszczeniu (szwy rozpuszczalne). Ponadto, mogą być wykorzystane do stymulowania określonych odpowiedzi komórkowych na poziomie molekularnym. Należy jednak pamiętać, że biomateriały niezależnie od pełnionej funkcji, nie mogą wyrządzać szkody, zgodnie z pierwszą zasadą Hipokratesa, aby nie powodować uszczerbku na zdrowiu pacjenta. Jedną z definicji opisującą biomateriały brzmi następująco: „Biomateriał to dowolny materiał, naturalny lub sztuczny, który obejmuje całość lub część żywej struktury lub urządzenia biomedycznego, które wykonuje, wspomaga lub zastępuje funkcję naturalną”. Wspomnieć należy również, że przedrostek „bio” dla biomateriałów odnosi się do „biokompatybilności”, a nie „biologiczny” lub „biomedyczny”, co często bywa źle interpretowane [3–8].



Rys. 1. Podział biomateriałów ze względu na zastosowanie oraz rodzaj [4].

Biokompatybilność początkowo dotyczyła jedynie wszczepialnych urządzeń, które przez długi czas pozostawały w ciele danej osoby. Dla badaczy, którzy opracowywali i stosowali wszczepialne urządzenia pierwszych generacji, w latach 1940–1980, oczywistym stało się, że najlepszą wydajność biologiczną można osiągnąć przy użyciu materiałów, które były najmniej reaktywne chemicznie. Stąd, stale węglowe i wanadowe, które charakteryzowały się niską odpornością na korozję, zostały zastąpione coraz lepszymi stalami

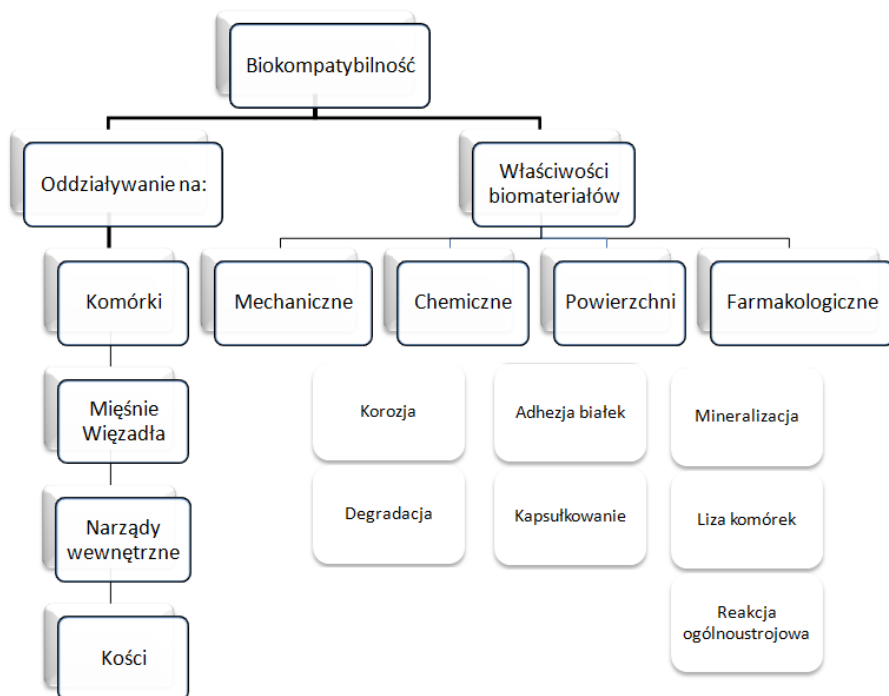
nierdzewnymi, a następnie silnie pasywowanymi stopami kobaltowo-chromowymi, stopami tytanu i metalami z grupy platynowców. W przypadku polimerów, łatwo dostępne i wszechstronne nylony i poliestry zastąpione zostały przez bardziej odporne na degradację PTFE, PMMA, polietylen i silikon. Przy większość z nich, dochodzi jednak do procesów związanych z uwolnieniem niektórych produktów korozji lub degradacji, dodatków lub zanieczyszczeń głównych składników biomateriału, a także ich późniejszej aktywności biologicznej, lokalnej lub globalnej [3–9]. Obecnie, do najpowszechniej stosowanych biomateriałów należą kauczuk silikonowy, darcon, celuloza, szkło akrylowe (poli(metakrylan metylu)), poliuretany, hydrożele, stal nierdzewna, tytan, tlenek glinu (Alumina), uwodniony fosforan wapnia (Hydroksyapatyt) oraz przetworzony kolagen [6]. Ich wykorzystanie na przełomie ostatniego półwiecza wykazuje stałą tendencję wzrostową. Wynika to z faktu, iż znajdują zastosowanie w takich dziedzinach jak medycyna, biologia, inżynieria materiałowa i inżynieria. Jednak przede wszystkim, ich głównym zastosowaniem są aplikacje medyczne. Należą do nich różnego rodzaju podłoża wykorzystywane w inżynierii tkankowej, implanty oraz urządzenia medyczne, które posiadają kontakt z krwią. Jako przykłady należy wymienić implanty stawowe, płytki kostne, cewniki, protezy naczyń krwionośnych, stenty, implanty ślimakowe, zastawki i rozruszniki serca, urządzenia do regeneracji skóry, implanty piersi, wyciski dentystryczne oraz soczewki kontaktowe [6–7].

Termin biomateriał wykorzystywany jest w wielu definicjach różnych środowisk naukowych i prawnych. W dziedzinie prawa, wyroby medyczne są zdefiniowane jako: „Dowolny przyrząd, aparatura, narzędzie, maszyna, urządzenie, implant, odczynnik lub kalibrator in vitro, oprogramowanie, materiał lub inne podobne bądź pokrewne aplikacje, przeznaczony do produkcji, który ma być stosowany łącznie lub osobno, dla ludzi, charakteryzujący się jednym lub kilkoma określonymi zastosowaniami dotyczącymi diagnostyki, zapobiegania, monitorowania, leczenia, badania, wspomagania lub podtrzymywania życia, kontroli poczęcia i dezynfekcji wyrobów medycznych”. Zgodnie z podaną definicją, biomateriał zdefiniowany jest jako składnik wyrobu medycznego. Materiał stosowany do wytwarzania soczewek kontaktowych i całkowitej wymiany stawu biodrowego jest biomateriałem. Natomiast materiały wykorzystywane do wytwarzania m.in. okularów i sztucznych protez, które mają jedynie kontakt ze skórą, nie są objęte definicją biomateriału. Wynika to z faktu, że skóra stanowi barierę dla świata zewnętrznego, a biomateriał powinien znajdować się w bliskim otoczeniu tkanek żywych, lub być częścią żywego układu [4–5], [10–11].

Nowy biomateriał lub wyrób medyczny, zanim zostanie wprowadzony na rynek, musi spełnić określone wymagania zawarte w poszczególnych aktach prawnych. Normy i procedury dotyczące materiałów i urządzeń wydawane są przez organizacje międzynarodowe, głównie Międzynarodową Organizację Normalizacyjną ISO oraz Amerykańskie Towarzystwo Badań i Materiałów

ASTM. Aby zapobiec wprowadzaniu na rynek nieodpowiednio przetestowanych urządzeń i materiałów, oraz aby podmioty nie posiadające odpowiednich kwalifikacji i zaplecza nie mogły produkować wyrobów medycznych, zarówno w Unii Europejskiej jak i USA ustanowione zostały odpowiednie systemy regulacyjne. Głównym europejskim wymogiem jest oznaczenie przez producenta wyrobu znakiem CE (Conformité Européenne). Tak oznaczony wyrób gwarantuje, iż wszystkie wymagania związane z bezpieczeństwem użytkowania, ochroną zdrowia i ochroną środowiska zostały spełnione. W USA ocena wyrobu dokonywana jest przez agencję rządową FDA (*ang.* *U.S. Food & Drug Administration* – Amerykańska Agencja ds. Żywności i Leków), która nie reguluje użytych w wyrobach medycznych materiałów, lecz swoją uwagę poświęca samym urządzeniom i skuteczności ich działania [1].

Zasadniczym wymogiem jaki musi spełniać biomateriał lub urządzenie biomedyczne jest jego biokompatybilność. Określa jego wydajność i skuteczność, dla danego zastosowania, odnosząc się do interakcji między materiałem, a komórkami biologicznymi [1, 5, 7, 12–13]. Wymagania dotyczące biokompatybilności są złożone i rygorystyczne, różniąc się w zależności od konkretnych zastosowań medycznych. Istnieje szereg czynników, które należy dokładnie rozważyć przy wyborze danego biomateriału. Jeden z nich dotyczy czasu ekspozycji otaczających komórek biologicznych lub płynów na biomateriał [3–7]. Uszkodzenie tkanek, wynikające z implantacji urządzenia, i/lub ciągłej obecności danego urządzenia w ciele, powodować może szereg złożonych zdarzeń. Należą do nich m.in. ostre zapalenie, przewlekłe zapalenie i zapalenie ziarniniakowe [12]. Na przykład membrana hemodializy jest w kontakcie z krwią pacjenta przez 3 godziny, soczewka kontaktowa może być noszona przez kilka dni lub miesięcy, a wymieniony staw biodrowy, soczewka wewnątrzgałkowa (IOL) lub zastawka serca, pozostaje w ciele pacjenta przez całe życie. Interakcja między komórkami biologicznymi lub płynami, a biomateriałem wyraźnie nie powinna wywoływać niekorzystnej odpowiedzi, co jest szczególnie istotne w przypadku implantów stosowanych przez dłuższy czas. Zalecenie, aby biomateriał nie wyrządzał żadnej szkody pacjentom może nie być wystarczające. W przypadku zaawansowanych technologii medycznych, w których wymagana jest konkretna funkcjonalność, biokompatybilność sprecyzowana jest jako funkcja odnosząca się do terapii medycznej, bez wywoływania jakichkolwiek niepożądanych efektów miejscowych lub ogólnoustrojowych u biorcy lub beneficjenta danej terapii, lecz do generowania najbardziej korzystnej odpowiedzi komórkowej lub tkankowej w konkretnej sytuacji i optymalizacji klinicznie istotnego jej działania [3,7]. Zgodnie z tym podejściem, kryteria wyboru wszczepialnych biomateriałów ewoluowały jako lista zdarzeń, których należy unikać [3,9].



Rys.2. Schemat ilustrujący składowe wchodzące w skład biokompatybilności [11].

Istnieją dwa kluczowe czynniki decydujące o biokompatybilności materiału: reakcja jaką powoduje materiał oraz tempo i skutki jego degradacji. Oczekuje się, że metalowy implant będzie wykonany z pierwiastków nietoksycznych, i nie będzie powodował miejscowych lub ogólnoustrojowych reakcji zapalnych, ani alergicznych [6]. Zastosowane stopy metali, jeżeli mają być wczepiane pacjentom, powinny zawierać pierwiastki obojętne [5]. Jeżeli występujący biomateriał opóźni lub wpłynie na naturalnie zachodzący proces biologiczny, który miał wspomóc, zostanie on uznany za niezgodny. Odpowiednią reakcją jest minimalne zakłócenie standardowej funkcji organizmu. W inżynierii tkankowej, jeśli podłoże nie sprzyja wzrostowi gładkiej monowarstwy komórek na swojej powierzchni, nie jest ono uważane za biokompatybilne, ponieważ jego oczekiwanym rezultatem jest umożliwienie wzrostu tkanki na jego powierzchni [1,5,7].

Należy pamiętać, że nie zawsze materiał wykorzystywany z powodzeniem do danego zastosowania, będzie odpowiedni do użycia w innej aplikacji. Na przykład w chirurgii ortopedycznej, dany materiał może spełniać stawiane mu wymagania, natomiast do zastosowania w układzie sercowo –naczyniowym, ze względu na właściwości zakrzepowe już nie. Ponieważ

biomateriał jest przeznaczony do stosowania w bliskim kontakcie z żywą tkanką, ważne jest, aby wszczepiony materiał nie powodował żadnych szkodliwych skutków. Zazwyczaj ocena biokompatybilności danego materiału ogranicza się do odpowiedzi w miejscu kontaktu implantu z tkanką żywą. Spojrzenie z szerszej perspektywy może dać odpowiedź na ogólnoustrojowe działanie danego materiału na organizm. Dopiero wtedy, możliwe jest sprecyzowane określenie charakteru powstających zmian [6]. W niektórych badaniach, biokompatybilność biomateriałów klasyfikowana jest według ich zdolności do indukowania śmierci komórek lub tkanek (cytotoksyczność), powstawania nowotworów (rakotwórczość), uszkodzeń genetycznych (mutagenność), odpowiedzi immunologicznych (pirogenność i alergenicność) lub krzepnięcia krwi (trombogenność) [4]. Jeśli chodzi o biokompatybilność materiałów implantowanych, obejmuje ona nie tylko chemiczne oddziaływania implantowanego materiału z układem fizjologicznym (np. korozja stopów i toksyczność jonów metali), ale także fizyczne oddziaływanie implantowanego materiału na otaczające tkanki (właściwości mechaniczne materiału), chociaż ta pierwsza jest kwestią bardziej powszechną i podstawową [4]. D.F. Williams sugeruje, że biokompatybilność obejmuje wszystkie aspekty związane z funkcjami i właściwościami biourządzeń, w tym interakcję komórek i tkanek z zastosowanymi biomateriałami [10]. Biomateriał wszczepiony do organizmu wywołuje reakcję na ciało obce. Stopień reakcji zależy od takich parametrów urządzenia jak kształt, rozmiar, chemia i chropowatość powierzchni, skład, sterylność, czas kontaktu i degradacja [4, 12].

Biorąc pod uwagę dane rodzaje problemów związanych z biokompatybilnością, FDA podała powszechnie obowiązującą definicję biokompatybilności, która definiuje, że materiał biokompatybilny nie powoduje wymiernej szkody dla organizmu. Dlatego każde stawiane wyrobowi medycznemu wymaganie, oparte musi być na bezpieczeństwie biologicznym, tj. biokompatybilności. Dlatego biokompatybilność urządzenia medycznego obejmuje zarówno kompatybilność użytych materiałów, jak i konstrukcję (np. geometrię, mechanikę i sterowanie elektryczne) urządzenia. Wiele komplikacji podczas wszczepiania implantów wynika bardziej z nieoptymalnej mechaniki urządzenia, niż parametrów użytych materiałów. Jednak właściwości materiałowe są zagadnieniem bardziej pierwotnym, wymagającym dalszego prowadzenia badań w tej dziedzinie.

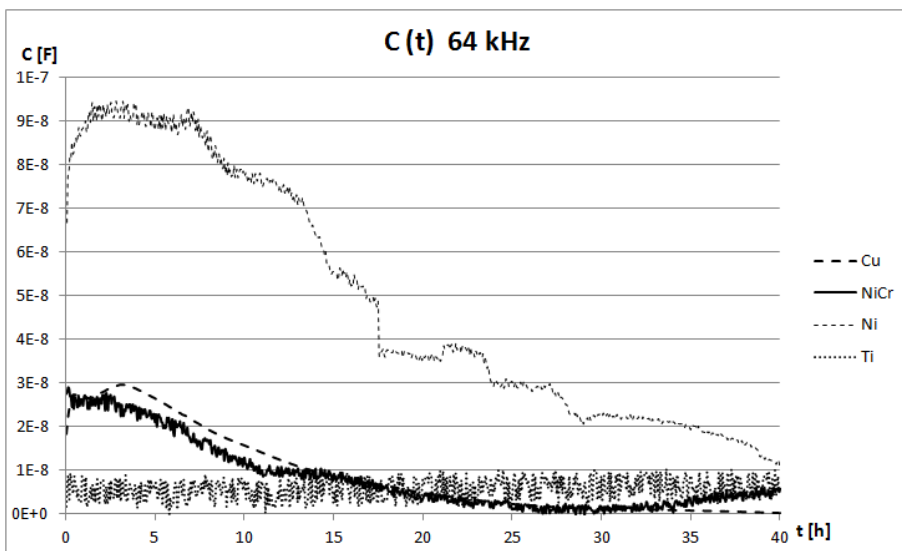
3. Matryce testowe

Przedstawione matryce testowe służą do pomiaru impedancji kultur komórkowych *in vitro*, w czasie rzeczywistym. Na podstawie zachodzących zmian, możliwe jest określenie, czy dany materiał nie wpływa negatywnie na funkcje komórek, związane z hodowlą, adhezją do podłoża, bądź

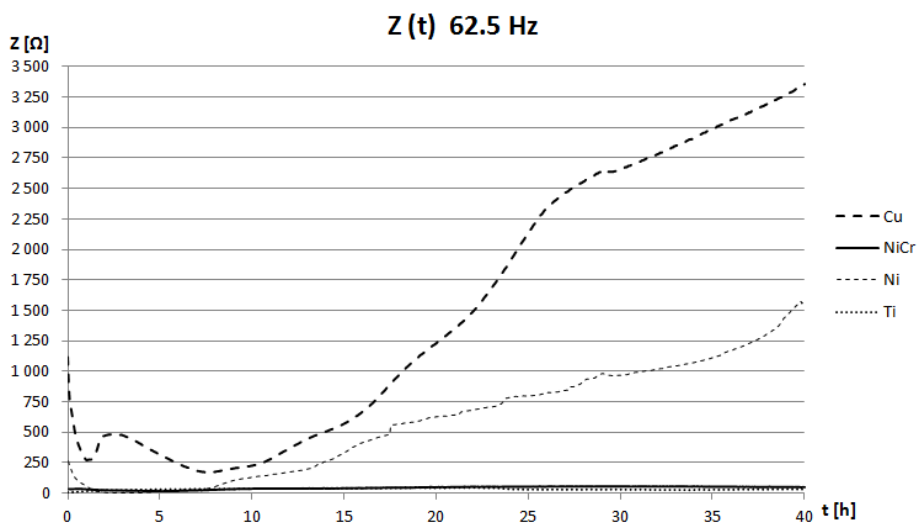
rozprzestrzenianiem na jego powierzchni. Dany przyrząd może rozszerzyć funkcję stosowanego komercyjnie systemu ECIS (ang. Electric Cell–substrate Impedance). W przypadku standardowych matryc testowych, obserwowane są zmiany zachodzące w obecności złotych elektrod. Wytworzenie elektrod z innego materiału pozwoli określić jego wpływ na badane komórki. Warunkiem koniecznym jest zastosowanie podłoża z biokompatybilnego materiału, nie wpływającego na otrzymywane wyniki. W przypadku omawianych struktur, elektrody wytworzone są w cienkiej warstwie metalizacji, osadzonej na biologicznie obojętnym poliwęglanie (PC), za pomocą napyłarki NANO 36™ firmy Kurt J. Lesker®, w procesie rozpylania magnetronowego. Wytworzone elektrody mają postać kondensatorów grzebieniowych, o wymiarach $200\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$. Nad każdym umieszczony jest specjalny pojemnik, który służy do przeprowadzenia hodowli. Następnie mierzone są jej parametry elektryczne. Eksperyment polega na przepuszczeniu prądu zmiennego o natężeniu 1mA, w zakresie częstotliwości od 62,5Hz do 64 kHz. Użycie niskiej wartości częstotliwości (<2kHz) dostarcza informacji związanych z adherencją komórek. Informacje dotyczące stopnia pokrycia elektrod przez komórki uzyskiwane są po przeprowadzeniu pomiarów z użyciem częstotliwości o wartości powyżej 40kHz [14–16].

4. Wyniki i wnioski

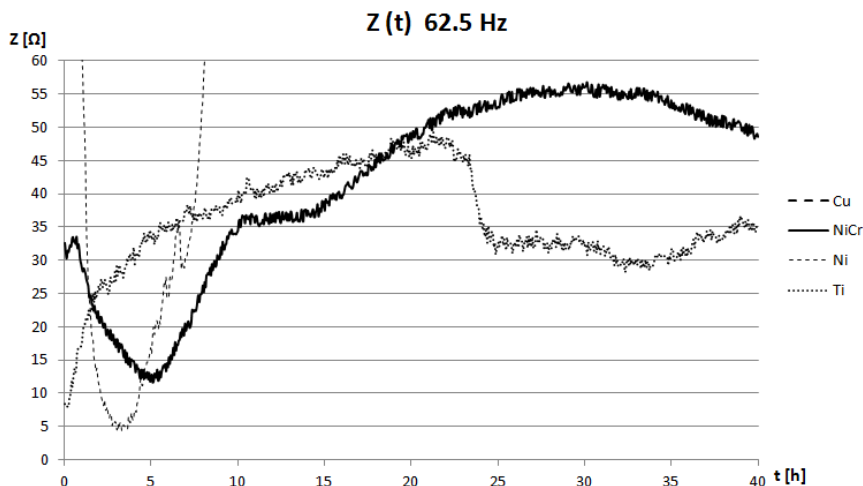
W ramach prowadzonych prac, wykorzystując różne materiały, wykonano matryce pomiarowe. Użyte do testów zestawy zawierały elektrody z miedzi, niklu, chromonikieliny oraz tytanu. Wyniki ukazują, iż możliwe jest prowadzenie badań nad komórkami, korzystając z danych przyrządów.



Rys.3. Wykres przedstawiający zmiany wartości pojemności w czasie



Rys.5. Wykres przedstawiający zmiany wartości impedancji w czasie



Rys.6. Wykres przedstawiający zmiany wartości impedancji w czasie

Zastosowanie każdego z materiałów umożliwiło zajście pełnego cyklu komórkowego. Na przedstawionych wykresach zaobserwować można zmianę wartości pojemności i impedancji w czasie. Oznacza to, iż komórki nie obumarły, zaczęły się rozrastać i rozprzestrzeniać na powierzchni elektrod. Dzięki otrzymanym informacjom, można twierdzić, że etap dotyczący wytworzenia przyrządu z materiałów nie wpływających negatywnie na badane kultury komórkowe został zrealizowany. W przyszłości, następnym krokiem będzie szczegółowa ocena wpływu danych materiałów na poszczególne kultury komórkowe, w różniących się warunkach środowiskowych, w obecności różnych związków chemicznych i biologicznych.

Literatura

- [1] Eliaz N., *Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review*, Materials (Basel), 12(3), 2019.
- [2] Xiao M., Chen Y.M., Biao M.N., Zhang X.D., Yang B.C., *Bio-functionalization of biomedical metals*, Materials Science & Engineering. C 70(2), 1057–1070, 2017.
- [3] Williams D. F., *On the mechanisms of biocompatibility*, Biomaterials 29(20), 2941–2953, 2008.
- [4] Chen Q., Thouas G.A., *Metallic implant biomaterials*, Materials Science and Engineering R: Reports 87(2015), 1–57, 2015.
- [5] Manam N.S., et al., *Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review*, Journal of Alloys and Compounds 701(2017), 698–715, 2017.

- [6] Tathe A., Ghodke M., Nikalje A.P., *A brief review: biomaterials and their application*, International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences 2(4), 19–23, 2010.
- [7] Menzies K.L., Jones L., *The Impact of Contact Angle on the Biocompatibility of Biomaterials*, Optom. Vis. Sci. 87(6), 387–399, 2010.
- [8] Bahraminasab M., Hassan M.R., Sahari B.B., Nasab M.B., *Metallic biomaterials of knee and hip—A review*, Trends Biomater. Artif. Organs 24(1), 69–82, 2010.
- [9] Sengupta T., Muthu P., *Evolution of BioMaterials for Dental Implants and Futuristic Developments*, IEEE 19th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), 625–633, 2019.
- [10] Williams D.F., *Specifications for Innovative, Enabling Biomaterials Based on the Principles of Biocompatibility Mechanisms*, Front. Bioeng. Biotechnol. 7(255), 2019.
- [11] Park J.B., Lakes R.S., *Introduction to Biomaterials*, Biomaterials, Springer, 1–13, 2007.
- [12] Onuki Y., Bhardwaj U., Papadimitrakopoulos F., Burgess D. J., *A review of the biocompatibility of implantable devices: Current challenges to overcome foreign body response*, Journal of Diabetes Science and Technology 2(6), 1003–1015, 2008.
- [13] Ratner B.D., Bryant S.J., *Biomaterials: Where We Have Been and Where We Are Going*, Annu. Rev. Biomed. Eng. 6(1), 41–75, 2004.
- [14] Stolwijk J.A., Matrougui K., Renken C.W., Trebak M., *Impedance analysis of GPCR-mediated changes in endothelial barrier function: overview and fundamental considerations for stable and reproducible measurements*, Pflügers Archiv – European Journal of Physiology In Press 467(10), 2193–2218 2015.
- [15] Prendecka M., Mlak 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(2), 293–297, 2016.
- [16] Kociubiński A., Zarzeczny D., Szypulski M., *Kondensatory grzebieniowe z miedzi do monitorowania funkcji życiowych komórek hodowlanych*, Przegląd Elektrotechniczny 1(9), 61–63, 2018.

Trendy w technologiach krzemowych ogniw słonecznych

Streszczenie: Dynamiczny rozwój rynku fotowoltaicznego w ostatnich latach bez wątpienia przyczynia się w coraz większym stopniu do poprawy jakości środowiska poprzez produkcję czystej energii elektrycznej. Jest również motywacją do podejmowania wszelkich prac badawczych nad rozwojem stosowanych technologii. W artykule omówione zostały poszczególne generacje ogniw słonecznych ze szczególnym uwzględnieniem najnowszych rozwiązań w technologiach opartych na krzemie krystalicznym, takich jak PERC, HIT, half-cut czy ogniwa dwustronne.

Słowa kluczowe: ogniwa słoneczne, technologie krzemowe, PERC, HIT, ogniwa dwustronne

Trends in silicon technologies of solar cells

Abstract: Dynamic development of the photovoltaic market in the last years undoubtedly leads to the quality improvement of the environment by clean electric energy production. It can be considered also as a motivation for research on the development of applied technologies. The article discusses particular generations of solar cells with special attention paid to the newest solutions based on crystalline silicon such as PERC, HIT, half-cut, or bifacial solar cells.

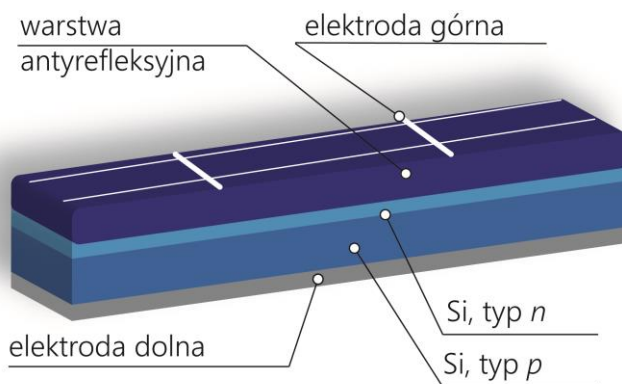
Keywords: solar cells, silicon technologies, PERC, HIT, bifacial solar cells

1. Wstęp

W ostatnich latach rosnące koszty energii elektrycznej i coraz większe zaniepokojenie postępującymi zmianami klimatycznymi spowodowały wzrost zapotrzebowania na czystą energię elektryczną pozyskiwaną z innych źródeł niż paliwa kopalne. Szacuje się, że wykorzystanie zasobów paliw kopalnych, takich jak węgiel drzewny, gaz ziemny czy też ropa naftowa, nastąpi w przeciągu najbliższych dziesięcioleci [1]. Jednakże należy wziąć pod uwagę, iż wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną powoduje szybsze wykorzystywanie dostępnych zasobów. Dodatkowo, spalanie paliw konwencjonalnych powoduje drugi, bardzo poważny problem, z którym społeczeństwo musi się zmierzyć – emisja gazów cieplarnianych do atmosfery. W każdym roku emisja ditlenku węgla do atmosfery wzrasta. W 2019 roku nastąpił wzrost o 0,5% w skali świata [2]. Państwa członkowskie Unii Europejskiej starają się dążyć do obniżenia emisji szkodliwych gazów, m.in. poprzez propagowanie użycia zielonej energii. Zapotrzebowanie na energię elektryczną, która determinuje jakość życia ludzkiego oraz potrzeba innowacji w zakresie czystych i przyjaznych dla

* e.krawczak@pollub.pl, Katedra Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

środowiska technologii ma obecnie kluczowe znaczenie. Wykorzystanie energii słonecznej do produkcji energii elektrycznej jest najbardziej rozpowszechnionym sposobem pozyskania „czystej” energii. Rozwiązaniem tego problemu może być również wykorzystanie technologii fotowoltaicznych. Ogniwa fotowoltaiczne odgrywają również coraz większą rolę w elektryfikacji obszarów oddalonych od zasilania sieciowego. Ponad 840 milionów ludzi na świecie wciąż nie ma dostępu do energii elektrycznej, pomimo ogólnego zaawansowania technologicznego [3]. Ogniwo fotowoltaiczne jest to element półprzewodnikowy, w którym zachodzi konwersja promieniowania słonecznego na energię elektryczną na skutek efektu fotowoltaicznego. Jest to urządzenie, którego właściwości elektryczne, takie jak prąd, napięcie lub rezystancja, zmieniają się pod wpływem natężenia promieniowania słonecznego padającego na jego powierzchnię [4]. Wyróżnia się trzy rodzaje technologii fotowoltaicznych zwanych generacjami. Moduły fotowoltaiczne zbudowane na bazie krzemu krystalicznego stanowią technologię I generacji. Tradycyjne ogniwo krzemowe, przedstawione na Rys. 1, składa się z dwóch krzemowych półprzewodników o różnym typie przewodnictwa (n–elektronowego i p–dziurowego), które tworzą złącze p–n (ang. positive–negative).



Rys. 1. Schemat budowy tradycyjnego ogniwa krzemowego (I generacja)

Drugą generację ogniw stanowi technologia cienkowarstwowa, w której ogniwa zbudowane są z materiałów takich jak krzem amorficzny, tellurek kadmu czy też diselenek miedziowo–indowo–galowy. Trzecia generacja są to ogniwa fotochemiczne, w których materiał półprzewodnikowy może zostać zastąpiony poprzez płynny lub żelowy elektrolit. Wśród ogniw III generacji możemy wyróżnić ogniwa organiczne, ogniwa barwnikowe czy też zdobywające coraz większą popularność ogniwa perowskitowe. Trzecia generacja ogniw bardzo szybko się rozwija osiągając coraz wyższe sprawności. Najwyższe osiągnięte sprawności konwersji energii ogniw laboratoryjnych wynoszą 20,9%,

11,9% oraz 11,2% odpowiednio dla ogniw perowskitowych, barwnikowych oraz organicznych [5].

Fotokonwersja krzemowych ogniw słonecznych ma kluczowe znaczenie przy rozpowszechnianiu fotowoltaiki, dlatego też naukowcy na całym świecie dążą do poprawy jakości konwersji energii słonecznej w energię elektryczną. Dodatkowo, aby fotowoltaika mogła być uważana za konkurencyjne rozwiązanie spośród wszystkich dostępnych na rynku należy dążyć do obniżenia jednostkowych kosztów energii elektrycznej poprzez ulepszanie ogniw słonecznych – technologii oraz obniżenia kosztów ich wytwarzania – proces produkcyjny. Niniejsza praca przeglądowa poświęcona jest najnowszym trendom w zakresie technologii krzemowych (I oraz II generacji) mających na celu zrealizowanie wyżej wymienionych założeń.

2. I generacja ogniw fotowoltaicznych

Pierwszą generację ogniw fotowoltaicznych tworzą ogniwa wykonane z krzemu krystalicznego (c-Si) i to właśnie ta generacja jest obecnie główną technologią stosowaną komercyjnie. Jest to najstarszy rodzaj ogniw fotowoltaicznych, który jest, jak dotąd najbardziej poznany, jednakże uzyskujący wciąż najwyższe parametry pracy. Produkcja ogniw fotowoltaicznych pierwszej generacji oparta jest na krzemie. W celu uzyskania wyższych mocy, ogniwa łączone są w moduły fotowoltaiczne w sposób szeregowy, równoległy, bądź mieszany. Wśród modułów pierwszej generacji można wyróżnić ogniwa z krzemu monokrystalicznego oraz polikrystalicznego. Odkąd w 1954 w laboratorium Bell Labs zostało przedstawione pierwsze ogniwo krzemowe zawierające złącze $p-n$ [6] stale cieszą się one zainteresowaniem zarówno naukowców, jak i osób pragnących korzystać na co dzień z urządzeń służących do konwersji energii. Ogniwa monokrystaliczne od lat cieszą się największą popularnością i są stosowane w większości dużych instalacji fotowoltaicznych [7]. Posiadają one ok. 90% światowego udziału w rynku fotowoltaicznym. Również w Polsce, w 2019 roku najczęściej sprzedawaną, a co za tym idzie również stosowaną technologią były generatory z krzemu monokrystalicznego [8]. W roku poprzednim, 2018, stanowiły one 39% rynku, żeby w 2019 osiągnąć pułap 81% całkowitej sprzedaży. Nastąpił ponad dwukrotny wzrost sprzedaży modułów monokrystalicznych. Pomimo, iż cena jednostkowa za moduł zbudowany z monokryształu jest wyższa, to wykazują one lepsze parametry pracy niż pozostałe rodzaje modułów. Ogniwa monokrystaliczne charakteryzują się barwą od ciemnoniebieskiej do czarnej. Ze względu na cylindryczny kształt monokryształu, pojedyncze ogniwa posiadają kształt kwadratów ze ściętymi narożami. Jeszcze kilka lat temu moduły w skali komercyjnej posiadały najwyższe sprawności z rzędu 15–18%.

Jednakże obecnie dostępne są na rynku moduły monokrystaliczne, których sprawność przekracza 20%. W styczniu 2020 roku została osiągnięta najwyższa dotychczas sprawność w wysokości 22,38% [9]. W skali laboratoryjnej osiągane są jeszcze wyższe wartości, nawet rzędu 26,7% [5, 10]. Szacuje się, że możliwa do osiągnięcia sprawność konwersji promieniowania słonecznego przez moduły z krzemu krystalicznego wynosi 37% [11]. Aby sprostać coraz to wyższym wymaganiom, naukowcy zmuszeni są cały czas doskonalić i ulepszać dostępne technologie. Początkowo, podniesienie sprawności zachodziło poprzez poprawę jakości technologii półprzewodnikowej. Na początku lat 2000 zaczęły pojawiać się coraz to nowsze rozwiązania, które pozwalały podnieść wydajność pracy modułów. Wśród nich możemy wyróżnić teksturyzację powierzchni, pasywację emitera czy też zastosowanie tylnych kontaktów. Technologie te pozwoliły na poprawę wydajności ogniw oraz na zmniejszenie kosztów produkcji, co przelożyło się na upowszechnienie generatorów fotowoltaicznych. Jednakże cały czas podejmowane są próby dalszego podniesienia sprawności konwersji energii słonecznej na elektryczną, zarówno przez naukowców z całego świata, jak i firmy zajmujące się produkcją modułów PV na szeroką skalę.

3. II generacja ogniw fotowoltaicznych

Do drugiej generacji ogniw fotowoltaicznych możemy zaliczyć ogniwa zbudowane z krzemu amorficznego (a-Si), tellurku kadmu (CdTe) czy diselenku miedziowo-indowo-galowego (CIGS) lub diselenku miedziowo-indowego (CIS). Jest to generacja nazywana cienkowarstwową (ang. *thin film*) z uwagi na niewielką grubość ogniw rzędu 1–3 mikrometra. II generacja charakteryzuje się tańszym procesem produkcyjnym z uwagi na używanie materiałów o stosunkowo niższej jakości strukturalnej w porównaniu do I generacji oraz ich mniejszym zużyciem. Cienkie warstwy nanoszone są na tanie podłoża, m.in. szkło, stal nierdzewna czy też dzięki niskiej temperaturze procesu wytwarzania – plastik. Ogniwa cienkowarstwowe mogą być również umieszczane na podłożu elastycznym [12]. Dodatkową zaletą ogniw tej generacji jest wysoki współczynnik absorpcji, wydajność w wysokiej temperaturze, a także zmniejszona wrażliwość na przegrzanie oraz łatwość integracji z budynkami [13]. Z tego względu technologie cienkowarstwowe, przy zwiększeniu sprawności konwersji fotowoltaicznej i zastosowaniu większych powierzchni cienkich warstw, mogą prowadzić do znacznego obniżenia ceny modułów, i tym samym mogą zwiększyć konkurencyjność tego sposobu wśród tradycyjnych form pozyskiwania energii.

Ogniwa amorficzne są bezpostaciowymi płytami krzemowymi, które są formowane poprzez naparowywanie cienkiej warstwy materiału krzemowego o grubości około 1 μm na podłożu, które wykonane jest najczęściej ze szkła lub metalu [4]. Pierwsze ogniwo z krzemu amorficznego powstało w 1976 roku

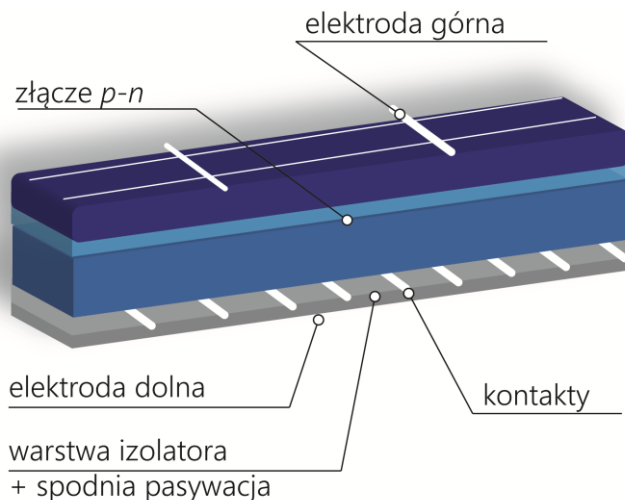
i osiągnęło sprawność 2,4% [14]. Obecnie sprawność ogniw amorficznych wynosi 10,2% [5]. Ogromną zaletą ogniw a-Si jest możliwość zastosowania ich na szeroką skalę w instalacjach fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem [15, 16]. Niestety jedną z poważniejszych wad tego typu technologii poza niską sprawnością (i tym samym znacznie większą powierzchnią wymaganą do osiągnięcia tej samej mocy instalacji w porównaniu do c-Si) jest niestabilność parametrów elektrycznych – efekt Stabler–Wrońskiego, co może powodować spadek wydajności do 30% podczas pierwszych kilku miesięcy użytkowania [17].

4. Trendy w ogniwach krzemowych

W celu uzyskania wyższych wydajności modułów z krzemu krystalicznego naukowcy najczęściej dokonują modyfikacji technologii ogniw PV, a co za tym idzie optymalizacji absorpcji promieniowania słonecznego czy też poprawienia efektywności przechwytywania generowanych nośników. Badania doprowadziły do powstania m.in. ogniw PERC czyli ze spodnią pasywacją emitera (ang. passivated emitter rear cell, PERC), ogniw IBC z pośrednim kontaktem zwrotnym (ang. interdigitated back contact cell, IBC) czy też ogniw heterozłączowych typu HIT z wewnętrzną cienką warstwą (ang. heterojunction with intrinsic thin-layer cell, HIT).

4.1. Ogniwa PERC

Ogniwa PERC są to ogniwa fotowoltaiczne, których budowa została zmodyfikowana względem tradycyjnych ogniw krzemowych poprzez spodnią pasywację złącza w celu podniesienia sprawności konwersji energii. Pasywacja ta powoduje odbicie promieni słonecznych w celu zwiększenia absorpcji fotonów. Pozwala również na absorpcję promieniowania podczerwonego. Schemat ogniwa PERC przedstawiono na Rys. 2. W budowie ogniwa możemy wyróżnić dodatkową warstwę izolatora, której zadaniem jest zmniejszenie przyciągania elektronów do elektrody dolnej. Wszystkie te cechy doprowadziły do zwiększenia wydajności kwantowej fotoogniwa PERC w porównaniu do ogniwa klasycznego.

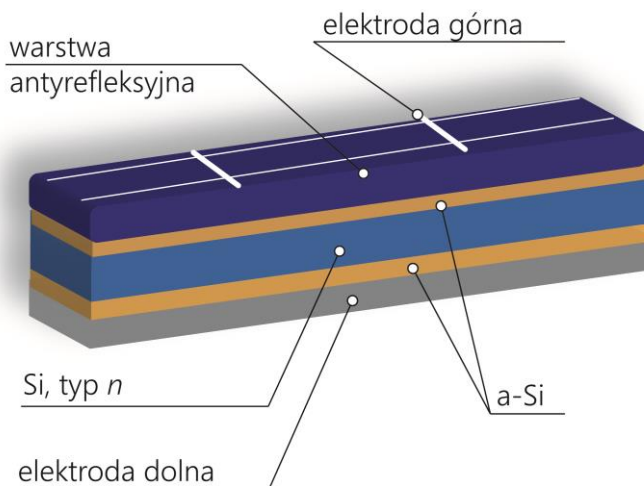


Rys. 2. Budowa ogniw krzemowych krystalicznych wykonanych w technologii PERC

Na podstawie danych Międzynarodowej Mapy Rozwoju Technologii Fotowoltaicznych (ang. *International Technology Roadmap for Photovoltaic*) [18] ogniw PERC w 2017 roku osiągnęły udział 21% wśród technologii krzemowych. Szacuje się, iż do 2028 roku, aż 60% rynku ogniw krzemowych będzie zdominowane przez technologię PERC. Ogniw te mogą osiągać sprawności rzędu 24% w masowej produkcji [19], co jest wynikiem bardzo zbliżonym do ogniw wykonanych w technologii tradycyjnej (26,7%). Koncepcja ogniw PERC została opracowana przez zespół Blakers et al. [20] w 1989 roku. Osiągnięto już wtedy sprawność na poziomie 22,8%. W ciągu trzydziestu lat naukowcy przeszli od koncepcji do masowej produkcji [21]. Obecnie grupy badawcze w dalszym ciągu pracują nad poprawą sprawności ogniw PERC. W pracy autorstwa Lv [22] przedstawiono teoretyczny i eksperymentalny model ogniw PERC, w którym do zastąpienia dolnej standardowej warstwy zastosowano kombinację substancji tri-SiNx:H z tlenkami glinu (AlO_x). Pozwoliło to na podniesienie sprawności ogniw z 21,72% do 21,87%. Prowadzone są również badania dotyczące domieszkowania półprzewodnika krzemowego w ogniwach PERC poprzez takie pierwiastki jak gal (Ga PERC) [23] czy też bor [24]. Uwagę naukowców przykuwają również procesy degradacyjne podczas pracy urządzenia przy zadanym natężeniu promieniowania. Okazuje się, że szybkość degradacji silnie zależy m.in. od sposobu pasywacji użytego podczas procesu produkcyjnego [25–26]. Prowadzone są również badania dotyczące dwustronnych modułów PERC [26–27].

4.2. Ogniwa HIT

Ogniwa typu HIT są to ogniwa składające się z krzemu monokrystalicznego typu n , który jest umieszczony pomiędzy cienkimi warstwami z krzemu amorficznego (jedna warstwa typu p , druga–typu n). Jest to hybryda ogniwa monokrystalicznego i amorficznego [28]. Budowę ogniwa typu HIT przedstawiono na Rys. 3.



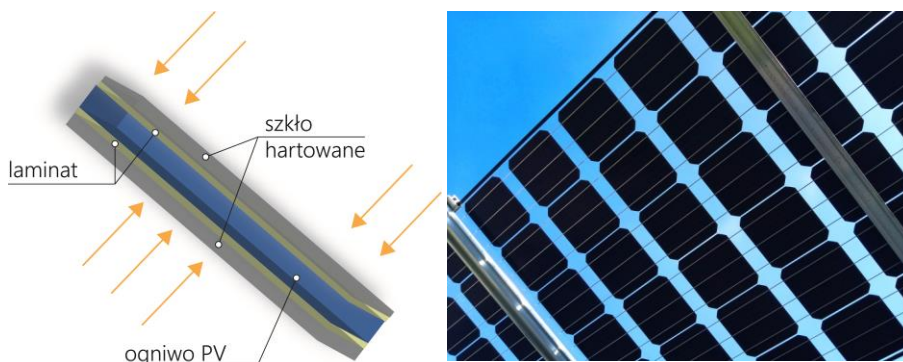
Rys. 3. Budowa ogniwa fotowoltaicznego typu HIT

Zastosowanie takiej struktury prowadzi do zmniejszonej utraty ładunku elektrycznego, co powoduje poprawę wydajności ogniwa, a co za tym idzie lepszą konwersję energii. Wysoka wydajność tych ogniw widoczna jest przede wszystkim w warunkach niskoenergetycznego promieniowania rozproszonego oraz w wysokich temperaturach otoczenia, bowiem ogniwa te posiadają stosunkowo niski współczynnik temperaturowy. Oznacza to, iż wraz ze wzrostem temperatury otoczenia, a co za tym idzie temperatury powierzchni ogniwa, spadek wydajności jest niewielki, zbliżony do modułów cienkowarstwowych. W ciągu ostatnich kilku lat technologia HIT została bardzo rozwinięta, co pozwoliło na uzyskanie sprawności rzędu 26% [10]. Naukowcy cały czas dążą jednak do poprawy wydajności. W artykule autorstwa m.in. Pang [29] została zastosowana modyfikacja budowy samego ogniwa, jako materiał, na którym zbudowane jest ogniwo został zastosowany materiał TPT (ang. *tedlar polyester tedlar*), szkło hartowane oraz aluminium. Z kolei w pracy autorstwa Ide [30] przedstawiono próbę podniesienia wartości napięcia obwodu otwartego V_{oc} oraz prądu zwarcia I_{sc} poprzez użycie cieńszych waflí krzemowych stanowiących bazę całego ogniwa. Prowadzone są badania modułów HIT

w rzeczywistych warunkach w różnych częściach świata (np. w Algierii [28], w Indiach [31, 32], czy też w Singapurze [33]), jednakże cały czas trwają również prace w laboratoriach. W pracy [34] zostały przeprowadzone badania w wyniku, których otrzymano charakterystykę prądowo–napięciową dla różnych wartości natężenia promieniowania oraz temperatur dzięki czemu można prowadzić obserwacje, jak zachowuje się moduł przy zmiennych warunkach pracy.

4.3. Ogniwa dwustronne

Warto również wspomnieć, iż ogromną popularnością cieszą się obecnie moduły krzemowe dwustronne (ang. *bifacial solar module*, bPV). Posiadają one dwie strony aktywne, zdolne do absorpcji promieniowania słonecznego i jego konwersji w energię elektryczną. Schemat modułu „bifacial” przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Po lewej: schemat budowy modułu dwustronnego. Po prawej: moduł dwustronny. Źródło: opracowanie własne.

Niewątpliwą zaletą takiego rozwiązania jest możliwość absorpcji promieniowania docierającego do spodniej powierzchni modułu po odbiciu od naturalnego otoczenia. Wraz ze wzrostem absorpcji promieniowania wrasta ilość generowanego prądu. Bardzo często moduły te budowane są bez ram, a ogniwa osadzone są w konstrukcji szkło–szkło. Moduły takie charakteryzują się dłuższą żywotnością w porównaniu do modułów o tradycyjnej konstrukcji, ponieważ ogniwa osadzone w szkło osiągają niższe temperatury powierzchni [35]. Badania nad technologią dwustronną rozpoczęły się ok. 1960 roku [36], jednakże ich proces produkcyjny był zbyt skomplikowany, aby wprowadzić je do masowej produkcji. Wydajność modułów dwustronnych zależy od wielu czynników zewnętrznych, wśród których można wyróżnić ilość promieniowania rozproszonego, współczynnik odbicia, m.in. gruntu, dachu, elewacji oraz

orientację i kąt nachylenia modułów [37]. Nie mniej ważna jest wysokość zamontowania modułów. Jeżeli moduły dwustronne są zamontowane pod optymalnym kątem dla danej szerokości geograficznej oraz na odpowiedniej wysokości nad gruntem uzysk energetyczny może się zwiększyć o ponad 20% [38]. Moduły „bifacial” w 2016 roku stanowiły zaledwie 5% rynku. Na podstawie danych Międzynarodowej Mapy Rozwoju Technologii Fotowoltaicznych [18] zakłada się, iż do 2027 roku będzie to aż 30%. Moduły dwustronne mogą być stosowane w instalacjach zintegrowanych z fasadami budynków (ang. *building integrated photovoltaics*, BIPV). W artykule [39] zbadano wpływ roślinności na albedo i wydajność systemu składającego się z modułów dwustronnych o orientacji wschód–zachód. Następnie porównano uzysk energii z dwóch systemów fotowoltaicznych: opisanym powyżej, złożonym z modułów dwustronnych, oraz systemu PV zbudowanego z tradycyjnych modułów (jednostronnych) o azymucie południowym. Powstaje bardzo dużo prac naukowych porównujących pracę modułów „bifacial” z modułami tradycyjnymi–jednostronnymi [39–41]. Okazuje się, że moduły dwustronne w wielu wypadkach osiągają lepsze parametry pracy niż moduły wykonane w technologii tradycyjnej. Wiele grup badawczych pracuje również nad udoskonaleniem technologii dwustronnej opracowując modele komputerowe oraz wykonując symulacje [42–43].

4.4. Moduły z ogniwami ciętymi na pół

Na rynku fotowoltaicznym istnieją również moduły z ogniwami ciętymi na pół. Jest to tzw. technologia „*half-cut*”. Pozwala ona zmniejszyć straty mocy i zapewnić lepszą wydajność poprzez przecięcie ogniw na pół. Ogniwa przecinane są laserem na pół prostopadłe do listew stykowych (ang. *busbar*). Moduły wykonane w technologii „*half-cut*” charakteryzują się czterokrotnie mniejszymi stratami mocy na linii ogniwo–moduł (ang. *cell-to-module*, CTM) poprzez redukcję strat na oporze szeregowym [44]. Zmniejszenie tych strat prowadzi do wzrostu wydajności, szczególnie podczas dużej irradancji z uwagi na wyższą wartość prądu zwarcia. Dodatkowo, moduł zbudowany z ogniw przeciętych na pół posiada większe wymiary zewnętrzne niż odpowiadający mu moduł tradycyjny, przez co współczynnik wypełnienia FF jest większy (ang. *Fill Factor*). Absorpcja światła słonecznego jest zwiększona poprzez odbicie promieni od spodniej części ogniwa z uwagi na większą ilość przestrzeni pomiędzy ogniwami [45]. Zastosowanie modułów z ogniwami ciętymi na pół pozwala również na zmniejszenie negatywnego wpływu częściowego zacienienia na pracę ogniwa.

5. Podsumowanie

Ogniwa krzemowe pomimo, iż należą do najstarszej i najbardziej poznanej technologii, wciąż uważane są za jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań w fotowoltaice. Tradycyjne ogniwa krzemowe posiadają wysokie parametry pracy dzięki nowoczesnym procesom produkcyjnym. Do niedawna moduły zbudowane z ogniw krzemowych posiadały moce rzędu 260 Wp. Obecnie dzięki rozwojowi technologii poprzez zastosowanie opisanych w niniejszym artykule modyfikacji uzyskują coraz wyższe moce. Na rynku obecne są już moduły monokrystaliczne wykonane w technologii *half-cut* o mocy nawet 450 Wp. Jednakże naukowcy nie powiedzieli jeszcze ostatniego słowa i wciąż pracują nad kolejnymi ulepszeniami. Ogniwa krzemowe posiadają obecnie udziały większościowe na rynku fotowoltaicznym i bazując na doniesieniach naukowych oraz dostępnych raportach nieprędko się to zmieni.

Literatura

- [1] <https://www.worldcoal.org/>, (dostęp 15 czerwca 2020).
- [2] Raport: *BP Statistical Review of World Energy*, 2020.
- [3] Raport: *The energy progress report 2019. Tracking SDG7*, IRENA, 2020.
- [4] Bagher A. M., Vahid M. M. A., Mohsen M., *Types of Solar Cells and Application*, American Journal of Optics and Photonics 3(5), 94, 2015.
- [5] Green M. A., Dunlop E. D., Hohl Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Ho Baillie A. W. Y., *Solar cell efficiency tables (Version 55)*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 28(1), 3–15, 2020.
- [6] Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L., *A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power*, Journal of Applied Physics 25(5), 676–677, 1954.
- [7] Sopian K., Cheow S. L., Zaidi S. H., *An overview of crystalline silicon solar cell technology: Past, present, and future*, AIP Conference Proceedings 1877(1), 020004, 2017.
- [8] Raport: *Rynek fotowoltaiki w Polsce 2020*, Instytut Energetyki Odnawialnej, 2020.
- [9] <https://www.gramwzielone.pl/energia-sloneczna/102303/rekord-sprawnosci-monokrystalicznego-modulu-fotowoltaicznego>, dostęp 16 czerwca 2020.
- [10] Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Uzu H., Yamamoto K., *Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%*, Nature Energy 2(5), 1–8, 2017.

- [11] Lu X., Li Y., Lun S., Wang X., Gao J., Wang Y., Zhang Y., *High efficiency light trapping scheme used for ultrathin c-Si solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 19, 657–64, 2019.
- [12] Ramanujam J., Bishop D. M., Todorov T. K., Gunawan O., Rath J., Nekovei R., Artegiani E., Romeo A., *Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review*, Progress in Materials Science 110100619, 2020.
- [13] Raport: *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy – 2014 edition*, 2015.
- [14] Carlson D. E., Wronski C. R., *Amorphous silicon solar cell*, Applied Physics Letters 28(11), 671–673, 1976.
- [15] Virtuani A., Strepparava D., *Modelling the performance of amorphous and crystalline silicon in different typologies of building-integrated photovoltaic (BIPV) conditions*, Solar Energy 146, 113–118, 2017.
- [16] Yoon J.-H., Song J., Lee S.-J., *Practical application of building integrated photovoltaic (BIPV) system using transparent amorphous silicon thin-film PV module*, Solar Energy 85(5), 723–733, 2011.
- [17] King D. L., Kratochvil J. A., Boyson W. E., *Stabilization and performance characteristics of commercial amorphous-silicon PV modules*, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000 (Cat. No.00CH37036), 1446–1449, 2000.
- [18], Raport: *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) Results 2017*, 2018.
- [19] Min B., Müller M., Wagner H., Fischer G., Brendel R., Altermatt P. P., Neuhaus H., *A Roadmap Toward 24% Efficient PERC Solar Cells in Industrial Mass Production*, IEEE Journal of Photovoltaics 7(6), 1541–1550, 2017.
- [20] Blakers A. W., Wang A., Milne A. M., Zhao J., Green M. A., *22.8% efficient silicon solar cell*, Applied Physics Letters 55(13), 1363–1365, 1989.
- [21] Green M. A., *The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production*, Solar Energy Materials and Solar Cells 143, 190–197, 2015.
- [22] Lv Y., Zhuang Y. F., Wang W. J., Wei W. W., Sheng J., Zhang S., Shen W. Z., *Towards high-efficiency industrial p-type mono-like Si PERC solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 204, 110202, 2020.
- [23] Grant N. E., Scowcroft J. R., Pointon A. I., Al-Amin M., Altermatt P. P., Murphy J. D., *Lifetime instabilities in gallium doped monocrystalline PERC silicon solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 206, 110299, 2020.
- [24] Zhou C., Ji F., Cheng S., Zhu J., Wang W., Hu D., *Light and elevated temperature induced degradation in B-Ga co-doped cast mono Si*

- PERC solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 211, 110508, 2020.
- [25] Oh K., Bae S., Lee K., Kim D., Chan S., *Mitigation of potential-induced degradation (PID) based on anti-reflection coating (ARC) structures of PERC solar cells*, Microelectronics Reliability 100–101, 113462, 2019.
 - [26] Sporleder K., Naumann V., Bauer J., Richter S., Hähnel A., Großer S., Turek M., Hagendorf C., *Root cause analysis on corrosive potential-induced degradation effects at the rear side of bifacial silicon PERC solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 201, 110062, 2019.
 - [27] Tang H. B., Ma S., Lv Y., Li Z. P., Shen W. Z., *Optimization of rear surface roughness and metal grid design in industrial bifacial PERC solar cells*, Solar Energy Materials and Solar Cells 216, 110712, 2020.
 - [28] Benlebna S., Kumar N. M., Tahri A., *Realtime monitoring on the HIT photovoltaic module characteristic parameters at STC, high and low irradiance conditions in Algeria*, Procedia Computer Science 132, 1238–1242, 2018.
 - [29] Pang W., Cui Y., Zhang Q., Yu H., Zhang X., Zhang Y., Yan H., *Comparative investigation of performances for HIT-PV and PVT systems*, Solar Energy 17, 937–47, 2019.
 - [30] Ide D., Taguchi M., Yukihiro Yoshimine, Toshiaki Baba, Toshihiro Kinoshita, Hiroshi Kanno, Sakata H., Maruyama E., Tanaka M., *Excellent power-generating properties by using the HIT structure*, 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1–5, 2008.
 - [31] Rajput P., Malvoni M., Manoj Kumar N., Sastry O. S., Jayakumar A., *Operational Performance and Degradation Influenced Life Cycle Environmental-Economic Metrics of mc-Si, a-Si and HIT Photovoltaic Arrays in Hot Semi-arid Climates*, Sustainability 12(3), 1075, 2020.
 - [32] Kumar Singh Y., Dubey S., K.Pandey, O.S.sastry., *Performance of HIT module in different climatic condition in India*, Materials Today: Proceedings 17, 321–328, 2019.
 - [33] Jiang F., Lim A., *Performance of heterojunction with intrinsic thin layer (HIT) PV module in Singapore*, 2010 Conference Proceedings IPEC, 95–98, IEEE, Singapore, Singapore, 2010.
 - [34] Singh R., Sharma M., Bora B., Sastry O. S., Yadav K., Banerjee C., *Estimation of Dynamic resistance of HIT technology module in dark and illuminated condition*, Materials Today: Proceedings 5(11, Part 2), 23242–23248, 2018.
 - [35] Lamers M. W. P. E., Özkalay E., Gali R. S. R., Janssen G. J. M., Weeber A. W., Romijn I. G., Van Aken B. B., *Temperature effects of bifacial modules: Hotter or cooler?*, Solar Energy Materials and Solar Cells 185, 192–197, 2018.
 - [36] Moehlecke A., Zanesco I., Luque A., *Practical high efficiency bifacial solar cells*, Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on

- Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC), 1663–1666, IEEE, Waikoloa, HI, USA, 1994.
- [37] Sun X., Khan M. R., Deline C., Alam M. A., *Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective*, Applied Energy 212, 1601–1610, 2018.
 - [38] Wang S., Wilkie O., Lam J., Steeman R., Zhang W., Khoo K. S., Siong S. C., Rostan H., *Bifacial Photovoltaic Systems Energy Yield Modelling*, Energy Procedia 77, 428–433, 2015.
 - [39] Baumann T., Nussbaumer H., Klenk M., Dreisiebner A., Carigiet F., Baumgartner F., *Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs*, Solar Energy 190, 139–146, 2019.
 - [40] Rodríguez-Gallegos C. D., Bieri M., Gandhi O., Singh J. P., Reindl T., Panda S. K., *Monofacial vs bifacial Si-based PV modules: Which one is more cost-effective?*, Solar Energy 176, 412–438, 2018.
 - [41] Yu B., Song D., Sun Z., Liu K., Zhang Y., Rong D., Liu L., *A study on electrical performance of N-type bifacial PV modules*, Solar Energy 137, 129–133, 2016.
 - [42] Zhang Z., Wu M., Lu Y., Xu C., Wang L., Hu Y., Zhang F., *The mathematical and experimental analysis on the steady-state operating temperature of bifacial photovoltaic modules*, Renewable Energy 155, 658–668, 2020.
 - [43] Gu W., Ma T., Li M., Shen L., Zhang Y., *A coupled optical–electrical–thermal model of the bifacial photovoltaic module*, Applied Energy 258, 114075, 2020.
 - [44] Haedrich I., Eitner U., Wiese M., Wirth H., *Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power*, Solar Energy Materials and Solar Cells 131, 14–23, 2014.
 - [45] Kumar N. D., Mounika C., Sailaja T., Mounika D., *Design and reduction of wattage losses in solar module using AR coating, cell-to-cell gap and thickness*, 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, 42–47, 2011.

*Michał Rogala

Badanie wpływu kształtu inicjatora zgniotu na przeciążenia w pojazdach

Streszczenie: Analizie numerycznej poddane zostały aluminiowe profile o przekroju kwadratowym z inicjatorami zgniotu o różnych kształtach. Profile zgniecione zostały energią o wartości 1700J. Analiza dynamiczna wykonana została za pomocą oprogramowania Abaqus CAE. Następnie na podstawie wielkości charakterystycznych opisujących zgniot wyznaczone zostały wskaźniki efektywności w tym wartości przeciążeń.

Słowa kluczowe: zgniot dynamiczny, analiza numeryczna, struktura cienkościenna

Testing the effect of the crush initiator shape on overloads in vehicles

Abstract: Aluminium profiles of square cross-section with initiators of crushing of different shapes were subjected to numerical analysis. The profiles were crushed with energy of 1700J. Dynamic analysis was performed using Abaqus CAE software. Then, based on the crush characteristic values, efficiency indicators including overload values were determined.

Keywords: dynamic impact, numerical analysis, thin-walled structure

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach podczas projektowania pojazdów mechanicznych, bardzo ważnym elementem jest bezpieczeństwo bierne [1]. Jest to zespół cech pojazdu mechanicznego mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa pasażerom podczas kolizji. Szczególnie ważnym elementem jest profil cienkościenny, którego zadaniem jest pochłonięcie możliwie dużej ilości energii [2,3]. Podczas zderzenia czołowego w zakresie prędkości 0–20km/h absorber energii całkowicie zabezpiecza elementy konstrukcyjne takie jak podłuznice. Ze względu na budowę możemy wyróżnić dwie główne grupy absorberów energii tj. o otwartym lub zamkniętym przekroju poprzecznym [4]. Profile cienkościenne w zależności od zastosowania i oczekiwanych cech przyjmują różne kształty np. kwadratowe, okrągłe, omegowe, sześciokątne [5]. W zależności od wykorzystania stosujemy różnego rodzaju materiały np. aluminium, stal, oraz materiały kompozytowe [6,7]. Wraz z rozwojem technologii popularnym rozwiązaniem stało się badanie kompozytowych absorberów energii, jednak z uwagi na anizotropię właściwości materiałowych

* michal.rogala@pollub.edu.pl, Katedra Podstaw konstrukcji maszyn i mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

mechanizm zniszczenia jest zupełnie inny niż w przypadku konwencjonalnych materiałów [8,9]. Ogólna zasada działania absorberów energii o przekroju kwadratowym jest występowanie lokalnych przegubów plastycznych [4,10]. Materiał podczas odkształcenia plastycznego pochłania energię chroniąc konstrukcję pojazdu. Wielkość lokalnego przegubu plastycznego zależy od szerokości profilu oraz od grubości ściany bocznej [11,12]. Ponadto możemy wyróżnić dwa rodzaje deformacji występujące podczas zgniotu profili kwadratowych. W przypadku gdy sąsiednie ściany odchylają się w tym samym kierunku następuje deformacja symetryczna, kiedy ściany rozchodzą się w przeciwnych kierunkach mówimy o deformacji asymetrycznej. W praktyce najczęściej obserwujemy deformację asymetryczną [13].

Elementem, który rozpoczyna proces zniszczenia jest inicjator zgniotu w literaturze zwany także triggerem [14,15]. Jest to osłabienie konstrukcji inicjujące proces w precyzyjnie określonym miejscu. Wyróżniamy wiele kształtów inicjatorów zgniotu np. wycięcia, nagniecenia na ścianach bocznych lub krawędziach czy też przetłoczenia zewnętrzne ścian bocznych [16,17]. Kolejną bardzo ważną funkcją pełnioną przez trigger jest zmniejszenie siły podczas pierwszego kontaktu pojazdu z przeszkodą, czyli zmniejszenia groźnych przeciążeń. Największa siła generowana podczas zderzenia najczęściej występuje podczas pierwszego kontaktu profilu z białakiem i jest ona nazywana jako Peak Crushing Force (PCF) [18]. Analizując dalszą część zgniotu, poszukiwaną cechą jest możliwie największa ilość pochłonięta przez każdą fałdę. W tym celu stosuje się różnego rodzaju wypełnienia wewnątrz konstrukcji cienkościennej. Początkowo stosowano dodatkowe ściany wewnątrz profilu w układach 3x3, 4x4, 5x5 czyli tak zwane Multi-cell'e [19,20]. Kolejnym sposobem na wykorzystanie potencjału energetycznego profilu jest struktura typu plaster miodu znajdująca się wewnątrz [21,22]. Zasada działania jest podobna jak w przypadku poprzedniego wzmocnienia czyli pionowe ściany zwiększają ilość pochłoniętej energii poprzez zwiększenie sztywności. Rozwiązanie takie posiadało pewne wady, podwyższało wielkość siły PCF przez co niekorzystnie wpływało na wysokość przeciążeń panujących podczas zgniotu. Obecnie najczęściej stosowanym wzmocnieniem konstrukcji jest wypełnienie materiałem spienionym [23,24]. Możemy wyróżnić dwa rodzaje piany o porach otwartych i zamkniętych. Z uwagi na swoją budowę piany tego typu będą się zachowywały w inny sposób z powodu innego mechanizmu twardnienia. W przypadku porów otwartych powietrze znajdujące się wewnątrz, może swobodnie uciec. Przy porach zamkniętych to właśnie powietrze uwięzione wewnątrz materiału odpowiada za jego twardnienie [25,26].

2. Wskaźniki efektywności zgniotu

Podstawowa wielkość określająca wydajność absorbera jest to ilość energii jaką pochłonię podczas zgniotu. Jest ona wyznaczana całką z funkcji przebiegu zgniotu, można ją także wyznaczyć za pomocą wzoru prostokątów.

$$EA(d_x) = \int_0^{d_x} F(x) dx \quad (1)$$

gdzie: d_x – długość zgniotu, oraz $F(x)$ – Siła zgniatająca, opisana za pomocą funkcji.

Następne wielkości niezbędne do opisu zgniotu to maksymalna siła niszcząca (PCF) i średnia siła niszcząca (MCF) przedstawiona za pomocą równania 2.

$$MCF = \frac{EA(d_x)}{d_x} \quad (2)$$

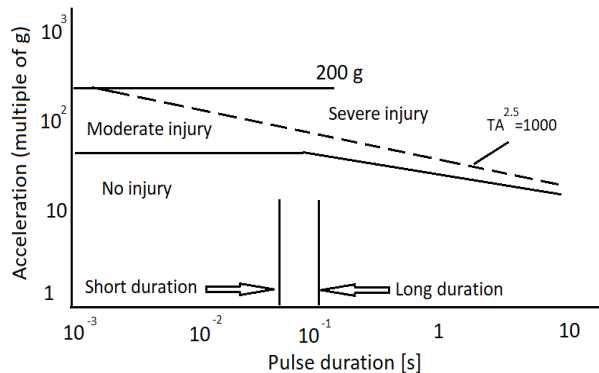
Wskaźnik opisujący wydajność zgniotu jest *CLE* (*Crush Load Efficiency*) i jest określony jako iloraz średniej do maksymalnej siły niszczącej wykrytej podczas zgniotu.

$$CLE = \frac{MCF}{PCF} \cdot 100\% \quad (3)$$

Ostatni wskaźnik opisujący wartość przeciążeń występujące podczas zgniotu dynamicznego jest to A , który jest wielokrotnością przeciążenia ziemskiego g . Opisany jest za pomocą poniższego równania

$$A = \frac{a}{g} \quad (4)$$

gdzie: a – całkowite przyspieszenie/opóźnienie ciała, g – przyspieszenie ziemskie.



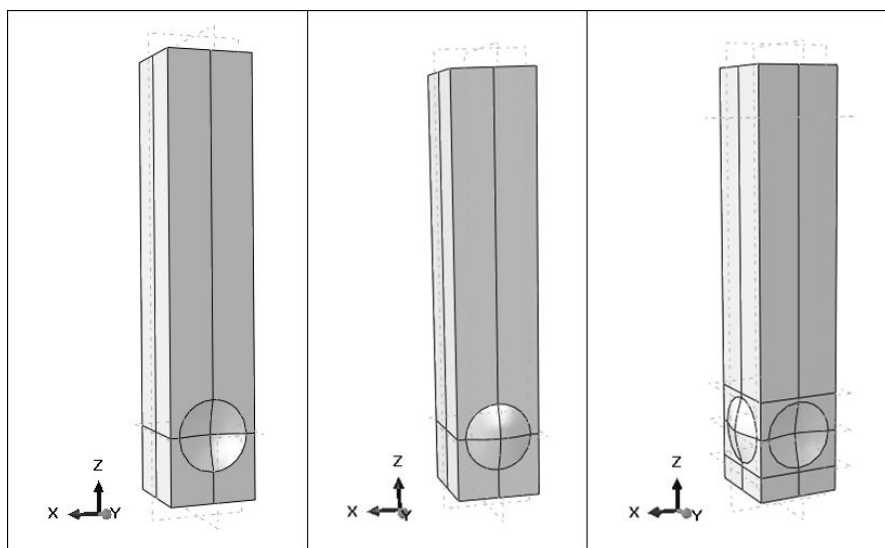
Rys. 1. Wykres określający szkodliwość przeciążenia od czasu jego trwania [11]

Powyższy wykres przedstawia zależność przeciążenia oraz czasu jego trwania pierwotnie opisany przez Macauley'a [11]. Za pomocą równania $TA^{2.5}=1000$ określona jest krzywa, która wyznacza granicę niskich oraz wysokiej szkodliwości dla ludzkiego życia. Co więcej wyznaczona jest granica, która oddziela krótki czas trwania impulsu i jest opisana jako 10^{-1} s.

3. Analiza numeryczna

Przedmiotem badań jest profil o przekroju kwadratowym z wgłębieniami na ścianach bocznych. Wymiary modelu to 200x40x40 (dł., szer., wys.). Grubość ścianki profilu to 1.2mm. Stałe parametry modelu to długość 200mm, odległość środka inicjatora zgniotu od krawędzi oraz średnica okręgu (32 mm) i jego głębokość (3,6 mm). Zmiennymi parametrami będzie wklęsłość lub wypukłość inicjatora zgniotu oraz wypełnienie wewnętrzne określonym rodzajem piany. Pierwszy model posiada dwa wgłębienie na sąsiednich ścianach profilu w późniejszych etapach pracy opisywany jako C32–3. Kolejny model to profil z dwoma inicjatorami zewnętrznymi, znajdującymi się na przeciwległych ścianach, określany jako B32–3. Ostatnia badana geometria to profil

z wgłębieniami na dwóch przeciwległych ścianach oraz z wypukłymi inicjatorami na pozostałych dwóch. Model ten w dalszych etapach pracy jest określany jako BC32–3. W przypadku badania modeli z wypełnieniem pianowym po pierwszym początkowej literze określającej dany model (rys. 2) pojawi się litera F odpowiednio CF, BF lub BCF oraz na końcu rodzaj piany wykorzystany do wypełnienia.



Rys. 2. Modele profili poddane symulacjom numerycznym, kolejno C, B, BC

Do wykonania modelu numerycznego, niezbędny okazał się program CATIA V5, którego zaawansowany moduł modelowania powierzchniowego pozwolił dokładnie stworzyć geometrię profilu, która następnie została zaimportowana do programu Abaqus 6.14–5. Pierwszym krokiem jest import modelu, oraz wykonanie dwóch płyt, znajdujących się na końcach profilu. Nieodkształcalna płyta pracuje jako podstawa, zaś druga z nich jako bijak. Ponadto, w tym kroku zostały wykonane partycje geometrii, które, w późniejszym etapie, pomogą zrealizować odpowiednie rozmieszczenie siatki.

Dodatkowo, na tym etapie pracy zostały stworzone punkty referencyjne na środkach płyt. Następnie do płyty pracującej jako bijak, przypisana została masa, które odbywa się przez skorzystanie z następujących opcji *Special > Inertia > Create*. Masa przypisana do punktu to 70 kg, odpowiada on wadze bijaka w warunkach rzeczywistych. Wykorzystując opcję *Predefined Field* zdefiniowana została prędkość bijaka jako 7m/s, tak aby uzyskać energię kinetyczną na poziomie 1700J.

Warunki brzegowe zastosowane do idealnego odwzorowania fizycznego przebiegu badania, zostały nadane w dwóch krokach. Pierwszy z nich dotyczył utwierdzenia wszystkich stopni swobody dla punktu referencyjnego znajdującego się na płycie dolnej. Drugim krokiem utwierdzenia, było zablokowanie wszystkich stopni swobody, za wyjątkiem stopnia translacyjnego na kierunku Z, które zostały przypisane do punktu referencyjnego znajdującego się na górnej płycie.

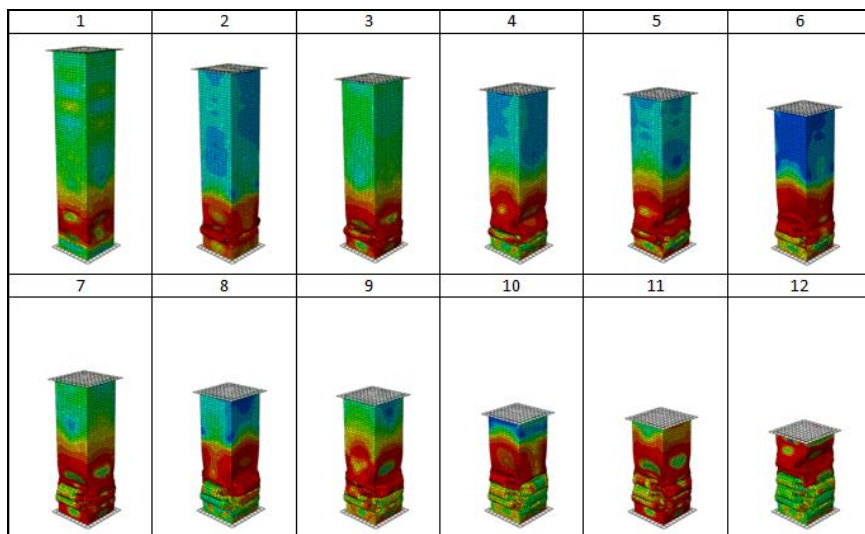
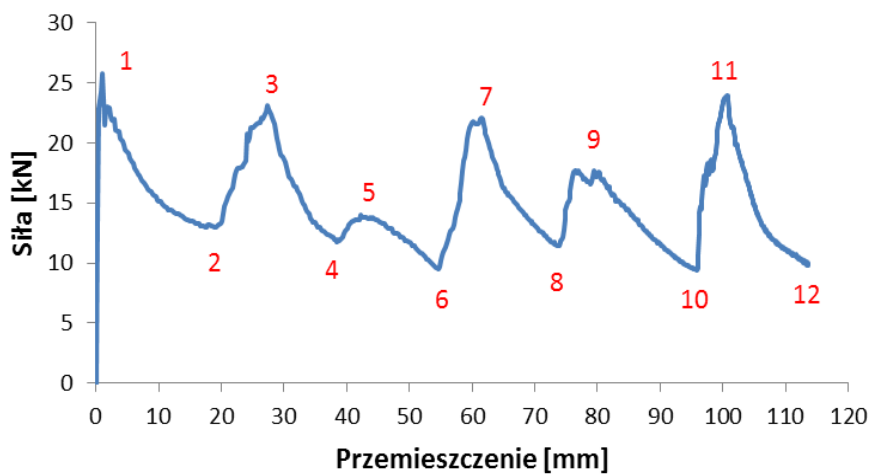
Model posiada dwa rodzaje elementów skończonych, pierwszy z nich wykorzystany do zamodelowania profilu cienkościennego to elementy typu

Shell, czyli powłokowego. Posłużył do wykonania profilu o grubości 1.2 mm, jak i płyty dolnej oraz górnej. Globalne rozmieszczenie węzłów na modelu to 3mm. W przypadku niektórych modeli, dyskretyzacja uległa zmianie, z uwagi na poprawność przebiegu analizy numerycznej. Kolejnym rodzajem elementu jest *Solid*, czyli element bryłowy, o 3 stopniach swobody, wykorzystany został do zamodelowania wypełnienia pianowego

Model materiałowy wypełnienia pianowego został wykonany w dziedzinie plastyczności jako: *crushable foam*. Jest to piana, która ulega odkształceniu plastycznemu, przez co nie powoduje efektu poduszki powietrznej podczas zgniotu próbki. Dane niezbędne do zamodelowania tego typu materiału to: gęstość, moduł *Young'a*, współczynnik *Poisson'a* oraz krzywa nakręcenie–odkształcenie. Następny współczynnik odpowiedzialny jest za twardnienie piany podczas ściskania. Wielkości te mogą zostać wprowadzone na dwa sposoby w zależności od rodzaju twardnienia piany. Pierwszy rodzaj to Izotropowe (*Isotropic*), gdzie parametry odpowiedzialne za twardnienie to: Granica plastyczności podczas ściskania (*Compression Yield Stress Ratio*) oraz Plastyczny współczynnik *Poisson'a* (*Plastic Poisson Ratio*). Drugim rodzajem opisu twardnienia modelu materiałowego jest podopieczna Objętościowe (*Volumetric*), w przypadku której, współczynniki niezbędne do wprowadzenia to: Granica plastyczności podczas ściskania (*Compression Yield Stress Ratio*) oraz Hydrostatyczna Granica plastyczności (*Hydrostatic Yield Stress Ratio*). Współczynniki odpowiedzialne za twardnienie piany zarówno do pierwszej jak i drugiej metody pozyskuje się podczas trójosiowego testu ściskającego (*triaxial compression test*). Do analizy numerycznej wykorzystane zostały cztery rodzaje pian o różnych właściwościach. Wielkości charakteryzujące materiał pianowy pozyskane zostały z czasopism międzynarodowych.

4. Wyniki analizy numerycznej

Przedstawiona poniżej grafika pozwala określić zachowanie próbki podczas zgniotu. Punkty charakterystyczne zaznaczone na wykresie odpowiadają przedstawionym poniżej postaciom zgniecionego profilu cienkościennego.



Rys. 3. Stadia zniszczenia profilu cienkościennego podczas dynamicznego zgniotu

Powyższe postacie pokazują zachowanie inicjatora zgniotu na początku procesu. Ponadto mapa naprężeń nałożona na profil cienkościenny odpowiada postaci wyboczenia wyznaczonej w analizie numerycznej. Analiza wyboczeniowa pozwala wprowadzić do modelu imperfekcję dzięki której zgniot dynamiczny odzwierciedla jej fizyczne zachowanie. Postać wyboczenia odpowiada częstości drgań własnych profilu.

Tab. 1. Wskaźniki efektywności zgniotu dla modeli B, C oraz BC.

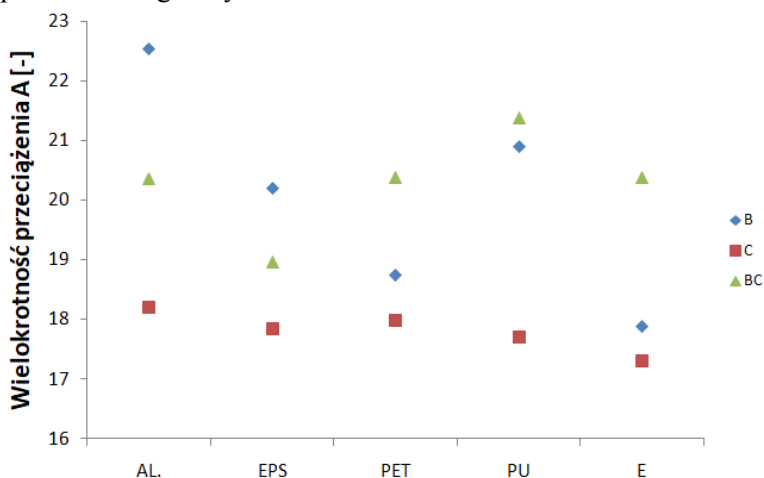
		U3	PCF	MCF	CLE[%]	STE	A
B	AL.	107,37	38,589	15,978	41,404	0,463	22,532
	EPS	114,82	37,980	14,957	39,382	0,426	20,202
	PET	116,70	38,036	14,703	38,655	0,417	18,752
	PU	118,17	38,036	14,513	38,157	0,409	20,897
	E	130,59	38,157	13,275	34,790	0,347	17,884
C	AL.	128,83	38,476	13,322	34,625	0,356	18,21
	EPS	133,95	38,476	12,813	33,303	0,330	17,846
	PET	129,64	38,476	13,240	34,411	0,352	17,978
	PU	133,34	38,485	12,875	33,455	0,333	17,697
	E	133,64	38,476	12,845	33,385	0,332	17,301
BC	AL.	113,63	31,766	15,071	47,444	0,432	20,366
	EPS	120,2	31,766	14,237	44,820	0,399	18,968
	PET	113,57	31,766	15,070	47,441	0,432	20,389
	PU	114,30	32,651	14,980	45,879	0,429	21,387
	E	117,89	31,840	13,261	41,648	0,411	20,389

Powyższa tab. 1. przedstawia wskaźniki opisane w rozdziale drugim. Podczas analiz dynamicznych wyznaczone zostały podstawowe siły, które następnie posłużyły do obliczenia wskaźników. Wielkości pokazują, że największa całkowitą wydajnością cechują się modele oznaczone BC, czyli z triggerem wklęsło-wypukłym. Wartości wahały się między 41–47%, w odniesieniu do najgorszych modeli różnica wynosiła od 8 do 13 punktów procentowych. Podstawowa wielkość pozwalająca określić zgniot oraz wyznaczyć energię

zabsorbowaną to skrócenie modelu określone w tabeli jako U3. Próbką kontrolną we wszystkich przypadkach był model E (empty – pusty). Mniejsze skrócenie dla modeli z różnymi wypełnieniami pianowymi, pokazuje że profil jest w stanie pochłonąć taką samą porcję energii. Wielkości te świadczą, że próbka aluminiowa w mniejszym stopniu ulega deformacji plastycznej. Dodatkową porcję energii pochłania wypełnienie pianowe. Mniejsza wartość skrócenia świadczy więc o lepszej wydajności energetycznej materiału pianowego.

We wszystkich modelach zauważalne jest, że rodzaj wypełnienia pianowego nie wpływa znacząco na najwyższą wartość siły (PCF), zależna jest jedynie od geometrii modelu. Wartość PCF znacząco odbiega od pozostałych w przypadku modelu BC, jednak jest to związane z podwójny inicjator zgniotu. Większe wahania wykazuje siła MCF. W zależności od zastosowanego wypełnienia siła zmieniała się o około 15%.

Ostatni bardzo ważny współczynnik określony w tabeli to A czyli wielokrotność przeciążenia ziemskiego G. Przedstawia on wartość dla całkowitego zgniotu próbki czyli w sposób globalny. Wartość nie jest wyznaczana dla poszczególnych chwil ponieważ nawet przy dużych wartościach przeciążenia, krótkotrwały czas działania impulsu spowodowałby jego nieszkodliwość dla organizmu ludzkiego. Wpływ działania impulsu oraz przeciążeń na organizm ludzki został przedstawiony na rysunku pierwszym. Wielkość przeciążenia zmienia się w zależności od geometrii triggera. Największa wyznaczona wartość to ok. 23 dla modelu B z wypełnieniem pianą aluminiową, która cechuje się największą sztywnością. Czas całkowitego zgniotu nie przekracza 0.045s. W związku z tym wartości przeciążeń nie są w stanie spowodować groźnych urazów.



Rys. 4. Zależność kształtu profilu i wypełnienia pianowego na wielkość przeciążeń

Na powyższym wykresie przedstawiono zależność kształtu inicjatora zgniotu na wielkość przeciążeń panujących podczas zjawiska dynamicznego. Najmniejszymi wartościami cechują się modele z wklęsłym triggerem oznaczone literą C (z j. ang. *concave*–wklęsły). Krzywa koloru czerwonego wskazuje najniższe wartości dla wszystkich rodzajów wypełnień pianowych. Dwie pozostałe dwa rodzaje inicjatorów BC oraz B wykazują dużo większą zmienność w zależności od zastosowanego wypełnienia.

5. Wnioski

Podczas badań numerycznie zgniotowi poddano trzy rodzaje profili aluminiowych. Każdy profil został wypełniony czterema rodzajami wypełnień pianowych. Profile były obciążane energią 1700J. Na podstawie zarejestrowanych sił wyznaczone zostały wskaźniki efektywności zgniotu, w tym wielkość przeciążeń. Wartości wahają się w zakresie od 17 do 23g. Największą rozbieżność przeciążeń obserwujemy dla wypełnień pianą aluminiową oraz poliuretanową. Obserwując wykres numer 4 wydać zależność pomiędzy kształtem inicjatora zgniotu a wielkością przeciążeń. Najlepiej współpracuje inicjator wklęsły. W przypadku wypełnień materiałem porowatym wskaźniki wykazują dużą zmienność i ciężko zauważyć proste zależności pomiędzy nimi. Patrząc na wydajność zgniotu określaną przez wskaźnik CLE, widać, że najlepsze wyniki osiąga model BC, czyli z triggerem na wszystkich ścianach. Wypełnienie nie wpływa w znacznym stopniu na wydajność (CLE), różnica pomiędzy modelami sięga maksymalnie 10%. Globalna obserwacja danych przedstawionych w tabeli 1 pozwala zauważyć, że wypełnienia pianowe w największym stopniu wpływają na wartość średniej siły niszczącej (MCF), oraz na STE. Maksymalna różnica wskaźnika STE wynosi około 25%. Tak duża różnica świadczy o tym, że profil wypełniony pianą pochłania tę samą porcję energii przy mniejszym skróceniu. Część profilu która nie uległa plastycznemu odkształceniu posiada potencjał na pochłonięcie energii. Zwiększona absorpcja energii na krótszej długości w konsekwencji podwyższa przeciążenia całkowite podczas analizy dynamicznej. Jednak pomimo zastosowania wypełnienia aluminiowego o dużej gęstości oraz sztywności przeciążenia nie przekraczają niebezpiecznych wartości dla życia ludzkiego.

Literatura

- [1] Różyło P., *Passive Safety of a Buggy-Type Car in the Aspect of a Dynamic Analysis of the Frame*, Acta Mech Autom, 13(2), 75–9, 2019.
- [2] Xu F, Zhang X, Zhang H., *A review on functionally graded structures and materials for energy absorption*, Engineering Structures, 2018.
- [3] Díaz J, Costas M., *Crashworthiness*, In: Encyclopedia of Continuum

- Mechanics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1–18, 2019.
- [4] Kopczyński A, Rusiński E. *Passive safety. Energy absorption by thin-walled profiles*, Wrocław: Publishing House of the Wrocław University of Technology, 2010.
 - [5] Meran AP., *Solidity effect on crashworthiness characteristics of thin-walled tubes having various cross-sectional shapes*, J. Crashworthiness, 21(2), 135–47, 2016.
 - [6] Samborski S, Rzeczkowski J, Paśnik J., *A study on delamination onset and propagation in CFRP beam specimens with mechanical coupling*, Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications, CRC Press, 602–5 2019.
 - [7] Paśnik J, Samborski S, Rzeczkowski J., *Application of the CZM Technique to Delamination Analysis of Coupled Laminate Beams*, IOP Conf Ser Mater Sci Eng., 416, 012075, 2018.
 - [8] Rozyło Patryk., *Stateczność i stany graniczne ściskanych cienkościennych profili kompozytowych*, 2019.
 - [9] Debski H, Rozyło P, Teter A., *Buckling and limit states of thin-walled composite columns under eccentric load*, Thin-Walled Struct, 149, 106627, 2020.
 - [10] Rogala M., *Neural networks in crashworthiness analysis of thin-walled profile with foam filling .*, Adv Sci Technol Res J., 14(3), 2020.
 - [11] Macaulay M., *Introduction to Impact Engineering*, Materials & Design. Dordrecht: Springer Netherlands, 9, 363–364, 1987.
 - [12] Jones N., *Structural Impact* Journal of Chemical Information and Modeling. Cambridge University Press, 1689–1699, 1990.
 - [13] Ferdynus M, Rogala M., *Numerical Crush Analysis of Thin-Walled Aluminium Columns with Square Cross-Section and a Partial Foam Filling*, Adv Sci Technol Res J., 13(3), 144–51, 2019.
 - [14] Rogala M, Gajewski J, Ferdynus M., *Numerical analysis of the thin-walled structure with different trigger locations under axial load*, IOP Conf Ser Mater Sci Eng, 710:012028, 2019.
 - [15] Kim HS., *New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency*, Thin-Walled Struct, 40(4), 311–27, 2002.
 - [16] Ferdynus M, Kotełko M, Urbaniak M. *Crashworthiness performance of thin-walled prismatic tubes with corner dents under axial impact – Numerical and experimental study*, Thin-Walled Struct, 144, 2019.
 - [17] Hussain NN, Regalla SP, Rao Yendluri VD. *Numerical investigation into the effect of various trigger configurations on crashworthiness of GFRP crash boxes made of different types of cross sections*, Int J Crashworthiness, 22(5), 565–81, 2017.
 - [18] Baykasoğlu A, Baykasoğlu C, Cetin E. *Multi-objective crashworthiness optimization of lattice structure filled thin-walled*

- tubes, Thin-Walled Struct. 2020.
- [19] Xie S, Yang W, Li H, Wang N., *Impact characteristics and crashworthiness of multi-cell, square, thin-walled, structures under axial loads*, Int J Crashworthiness. 22(5), 503–17, 2017.
 - [20] Li Z, Ma W, Hou L, Xu P, Yao S. *Crashworthiness analysis of corrugations reinforced multi-cell square tubes*, Thin-Walled Struct, 2020.
 - [21] Ha NS, Lu G., *A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications*, Composites Part B: Engineering, 2020.
 - [22] Wang S, Wang H, Ding Y, Yu F., *Crushing behavior and deformation mechanism of randomly honeycomb cylindrical shell structure*, Thin-Walled Struct, 2020.
 - [23] Szymański P, Gawdzińska K, Nagolska D., *Attempts to prepare precision composite castings by sintering Al₂O₃/AlSi11 using underpressure*, Arch Foundry Eng. 20(1):49–54, 2020.
 - [24] Vestrum O, Edvard L, Dæhli B, Sture O, Børvik T., *Constitutive modeling of a graded porous polymer based on X-ray computed tomography*, Mater Des. 188(January 2020):108449, 2020.
 - [25] Kumar N, Khaderi SN, Rao KT., *Impact on auxetic and metal foams*, 255–9, 2019.
 - [26] Rezvani M.J., Souzangarzadeh H., *Effects of triggering and polyurethane foam on energy absorption of thin-walled circular tubes under the inversion process*, J Energy Storage, 2020.

Analiza wpływu sprzężeń mechanicznych na postaci drgań własnych belki kompozytowej

Streszczenie: Poniższe opracowanie dotyczy analizy modalnej belek kompozytowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych w programie Abaqus oraz wpływu sposobu ułożenia warstw na postaci i częstotliwości drgań własnych próbki. Badaniom poddano belki kompozytowe wykonane z kompozytu szklano-epoksydowego oraz węglowo-epoksydowego. Analizy numeryczne wykazały zależności częstotliwości i postaci drgań własnych od sposobu ułożenia włókien w próbce.

Słowa kluczowe: drgania własne, częstotliwości własne, kompozyt, metoda elementów skończonych

Analysis on the influence of mechanical couplings on normal modes in composite beam

Abstract: This paper covers a modal analysis of composite beams with the use of finite element method in Abaqus as well as the influence of stacking sequence on normal modes and frequencies. The analyses were performed on glass-epoxy and carbon-epoxy composites. The results showed the impact of stacking sequence on normal modes and frequencies of composite beams.

Keywords: natural vibration, normal modes, composite, finite element method

1. Wstęp

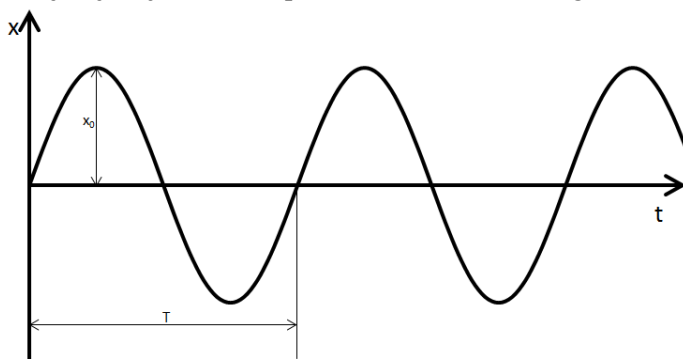
Materiały kompozytowe są szeroko stosowane w budowie maszyn oraz konstrukcjach. W wielu zastosowaniach wydają się dzisiaj być niezastąpione, jak np. lotnictwo, kosmonautyka, motoryzacja czy sprzęt sportowy. Dodatkowo ciągle odnajdywane są nowe zastosowania jak np. mosty kompozytowe. Szerokie zastosowanie materiałów kompozytowych niesie za sobą potrzebę przeprowadzania kompleksowych badań tych materiałów. Poza badaniem podstawowych właściwości mechanicznych jak wytrzymałość i sztywność istotne są również badania np. odporności na pękanie czy analiza częstotliwości i postaci drgań własnych, czego dotyczy poniższy artykuł. Drgania powstają w większości maszyn, urządzeń czy konstrukcji i są zwykle zjawiskiem niepożądanym. Częstokroć mogą mieć destrukcyjny wpływ na konstrukcję, dlatego też należy unikać źródeł powstawania drgań oraz eliminować je z obszaru pracy maszyny. W wielu przypadkach, jak np. budowa helikopterów, nie jest możliwa ich całkowita redukcja. Prowadzi to do potrzeby poznania postaci i częstotliwości drgań własnych i takie konstruowanie poszycia

* jakub.pasnik@pollub.edu.pl, Katedra Mechaniki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska

i oprzyrządowania, aby drgania powstałe podczas działania maszyny nie współdziałały z drganiami własnymi. Taka sytuacja może być niezwykle niebezpieczna zarówno dla maszyny, jak i dla ludzi wokół. Dlatego też tak istotne jest poznanie częstości i postaci drgań własnych elementów używanych w dużej mierze w lotnictwie.

2. Podstawy teoretyczne

Ruch drgający jest to ruch, podczas którego zmienna przemieszczenia x naprzemiennie zbliża się i oddala od pewnej wartości średniej, jak zostało to przedstawione na Rys. 1., który obrazuje szczególny przypadek, gdy ruch drgający jest ruchem harmonicznym. Wszystkie elementy maszyn czy mechanizmów, w których występuje ruch są poddane działaniu drgań. Większość drgań występujących w maszynach są to zakłócenia wprowadzone do układu niecelowo. Najczęściej są one rezultatem nieidealnego wyważenia elementów obrotowych oraz odkształcalności części składowych, co powoduje powstanie zmiennych sił działających na poszczególne elementy maszyny. Drgania własne są to drgania, w które wpada element po odjęciu siły, która powodowała wytrącenie tego elementu z położenia równowagi. Każdy element posiada własną, charakterystyczną częstość drgań własnych. Poniższe opracowanie obejmuje wyznaczenie postaci oraz częstości drgań własnych belki



Rys. 1. Przebieg ruchu harmonicznego

kompozytowej oraz zależność powyższych parametrów od sposobu ułożenia włókien w tejże belce. W budowie maszyn czy konstrukcji znajomość częstości oraz postaci (czasem nazywanych modami) własnych jest niezwykle istotnym zagadnieniem. Pozwala ona nie tylko poznać charakterystykę pracy danego elementu, ale przede wszystkim umożliwia ustrzeżenie się przed wystąpieniem zjawiska rezonansu mechanicznego. Rezonans mechaniczny jest to zjawisko występujące, gdy częstość drgań wymuszenia pokrywa się z częstością drgań

własnych. Powoduje to nagły wzrost amplitudy drgań do nieskończoności (w praktyce z powodu występowania sił tarcia oraz innych oporów amplituda rośnie do skończonych wartości). Zjawisko to jest niezwykle niebezpieczne, może prowadzić do poważnych uszkodzeń lub nawet całkowitego zniszczenia elementu, maszyny lub konstrukcji. Drgania występują szeroko w lotnictwie, gdzie potężne silniki są generatorami szkodliwych drgań. Z uwagi na szerokie zastosowanie kompozytów w tej gałęzi przemysłu istotnym jest, aby badać drgania własne elementów konstrukcji lotniczych tak, by móc zapobiegać uszkodzeniom oraz minimalizować możliwość powstania wypadków w wyniku wystąpienia np. rezonansu mechanicznego.

Materiały kompozytowe jest to specjalna grupa materiałów, które składają się z przynajmniej dwóch materiałów. Składowe te nazywamy zwykle osnową i zbrojeniem. Ze względu na rodzaj osnowy (czasem nazywanej również matrycą) materiały te możemy podzielić na kompozyty na osnowie metalowej, na osnowie ceramicznej oraz na osnowie polimerowej. Badania przedstawione w poniższej pracy dotyczyły kompozytów na osnowie polimerowej zbrojonych długimi włóknami. Zbrojenie w tych kompozytach mogą stanowić włókna węglowe, szklane, grafitowe, aramidowe i inne. Wybrane zostały do analizy belki kompozytowe o włóknach szklanych oraz węglowych. Kompozyty są materiałami o niespotykanych w klasycznych materiałach właściwościach. Mają wysoką sztywność przy zachowaniu niskiej masy. Są to również materiały sztywne co jest dużą zaletą w konkretnych zastosowaniach. Pomimo ich niezaprzeczalnych zalet posiadają również pewne wady. Są podatne na obciążenia dynamiczne, ich charakterystyczna budowa determinuje ich właściwości – są materiałami ortotropowymi (lub w szczególnych przypadkach anizotropowymi). Dodatkowo, podczas wytwarzania mogą powstawać pewne błędy wytwarzania wynikające często ze skomplikowanego procesu produkcji, które obniżają wytrzymałość czy sztywność elementów. W kompozytach włóknistych, tj. kompozytach o długich włóknach ułożonych w jednym kierunku w obrębie jednej warstwy, możliwe jest wystąpienie specjalnego ułożenia warstw powodującego tzw. sprzężenie mechaniczne. Według klasycznej teorii laminacji (z ang. Classical Lamination Theory – CLT) równanie konstytutywne przyjmuje postać:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: **A** oznacza macierz sztywności rozciągania, **B** macierz sztywności sprzężeń, **D** macierz sztywności zginania, **N** wektor siły i **M** wektor momentu, ε oraz κ oznaczają odkształcenia i krzywizny wzdłuż opisanych indeksami osi. Jak przedstawiono w pracy [1], macierze **A** i **D** mogą przyjąć tylko dwie formy:

- w przypadku laminatów prostych

$$[A_S] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} [D_S] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

- w przypadku, gdy wszystkie wyrazy macierzy są niezerowe (pełne sprzężenie)

$$[A_F] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix}, [D_F] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ponadto, macierze z przypisanymi indeksami „0” oznaczają macierze o wszystkich składowych równych zero. W przypadku macierzy sprzężeń **B**, występuje sześć jej form [1]: **B**₀, **B**_L, **B**_T, **B**_{LT}, **B**_S, **B**_F. W tej pracy do rozważań przyjęto dwa rodzaje sprzężeń w kompozytach opisane w szczegółach przez Yorka [3]:

- Laminat sprzężony typu bending–twisting (BT), który może zostać opisany jako **A**_{S**B**_{0**D**_F z następującym układem warstw: $[\theta/0/\theta/\theta/0/-\theta/0/-\theta/-\theta/-\theta/0/-\theta/0/0/0/\theta]$,}}
- Laminat sprzężony typu bending–extension (BE), oznaczany jako **A**_{S**B**_L**D**_S o układzie warstw: $[\theta/-\theta/0/-\theta/0/\theta/90/\theta/-\theta]$,}

3. Opis badanych próbek

W opisywanym przypadku analizie numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych poddana została belka wykonana z laminatu. Belka miała postać prostopadłościanu o wymiarach 150 x 25 mm oraz o grubości zależnej od ilości warstw kompozytu użytego do wykonania próbki. Każda warstwa kompozytu miała grubość 0,2 mm. Ilość warstw w belce wahała się od 9 do 18. Dokładny wykaz ilości warstw oraz kierunków ich ułożenia (orientacji) przedstawia Tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie analizowanych próbek kompozytowych

L.p.	Oznaczenie belki	Liczba warstw w belce	Orientacja włókien w belce	Przebadane kąty ułożenia włókien
1	Jednokierunkow, niesprężona	18	$[\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta/\theta]$	$\theta = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ\}$
2	Prosta, niesprężona	16	$[\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta/\theta/-\theta]$	$\theta = \{45^\circ\}$

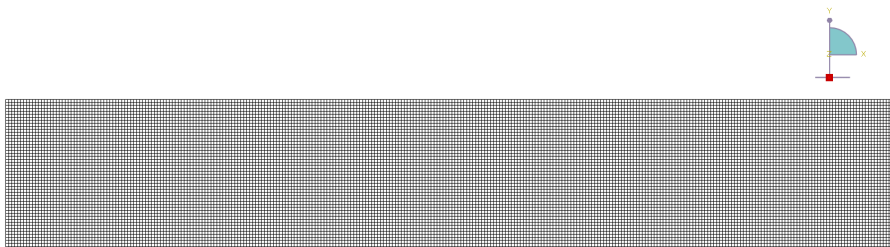
			$\theta / \theta / -\theta /$	
3	Sprężona, bending – extension	9	$[\theta / -\theta / 0 / -\theta / 0 / \theta /$ $90 / \theta / -\theta /$	$\theta = \{30^\circ, 45^\circ,$ $60^\circ\}$
4	Sprężona bending–twisting	18	$[\theta / 0 / \theta / \theta / 0 / -\theta / 0 /$ $-\theta / -\theta / -\theta / -\theta / 0 / -\theta /$ $\theta / 0 / 0 / \theta / \theta /$	$\theta = \{30^\circ, 45^\circ,$ $60^\circ\}$

3.1 Opis materiału

Przeprowadzone analizy numeryczne dotyczyły belek wykonanych z dwóch materiałów. W obu przypadkach matrycę stanowił materiał polimerowy, była to żywica epoksydowa. Rolę zbrojenia pełniły długie włókna węglowe oraz szklane. Podstawowymi danymi materiałowymi wymaganymi przy rozważanej analizie numerycznej są właściwości sprężyste materiału, a więc moduły sprężystości wzdłużnej na dwa prostopadłe względem siebie kierunki (zakładamy, że zastosowany materiał jest materiałem ortotropowym), tzw. „większy” współczynnik Poissona, oraz moduły sprężystości poprzecznej, tzw. moduły Kirchhoffa. Dla kompozytu zbrojonego włóknami węglowymi mają one wartości odpowiednio: $E_1 = 112,1$ GPa, $E_2 = 7,4$ GPa, $\nu_{12} = 0,27$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 3,338$ GPa natomiast dla włókien szklanych: $E_1 = 43,5$ GPa, $E_2 = 9$ GPa, $\nu_{12} = 0,336$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 3,2$ GPa. Dodatkowo analiza typu wyznaczenie częstości i postaci drgań własnych struktury wymaga podania gęstości materiału, która w badanym przypadku została określona jako $\rho = 1,8$ g/cm³.

3.2 Model numeryczny

W celu wygenerowania wyników skorzystano z opcji wyznaczania częstości i postaci drgań w środowisku obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych Abaqus Standard. Analiza modalna pozwala wyznaczyć określoną liczbę postaci drgań, w rozpatrywanym przypadku wyznaczone zostało pierwsze dziesięć postaci drgań belki kompozytowej. Model próbki wykonany został z wykorzystaniem elementów typu powłokowego (Shell). Siatka elementów skończonych składała się z elementów typu S4R–elementy typu powłokowego ze zredukowanym całkowaniem. Całkowita liczba elementów skończonych w badanym modelu to 15000, przy czym rozmiar każdego z nich to ok. 0,5 mm. Rysunek 3.1 przedstawia widok siatki elementów skończonych w środowisku Abaqus.



Rys. 2. Siatka elementów skończonych belki kompozytowej

Zadanie obliczeniowe zostało zdefiniowane jako *Frequency* w zakładce *Linear Perturbation*. Jako że, zgodnie z [2], wybór solvera ma znikomy wpływ na wyznaczanie częstości własnych, wybrano domyślny solver obliczeniowy *Lanczos*. Warunki podparcia modelu numerycznego zostały zdefiniowane w module *Load*. Jedna z bocznych (krótszych) krawędzi belki została całkowicie utwierdzona, zostały jej odebrane wszystkie stopnie swobody. Model nie został dodatkowo obciążony w żaden sposób.

4. Wyniki badań numerycznych

Przeprowadzone analizy numeryczne pozwoliły wygenerować postacie drgań własnych modelu MES belki kompozytowej wraz z przypisaną do niej częstotliwością. Rezultaty zostały przedstawione w formie Tab.rycznej jak również w formie rysunków uzyskanych z modułu wizualizacji programu Abaqus.

Tab. 2. Pierwsze dziesięć częstości drgań własnych belki wykonanej z kompozytu szklano-epoksydowego.

SZ KŁO	Oznaczenie próbki							
Kol ejne postaci	± 4 5	BE 30	BE 45	BE 60	BT3 0	BT 45	BT 60	0°
1	58, 865	47, 409	36, 470	31, 893	100, 720	90, 448	86, 971	63, 689
2	36 6,93	29 5,82	22 7,87	19 9,39	615, 92	55 9,77	53 9,40	33 9,31

3	43 2,54	51 8,63	53 6,91	49 3,06	682, 59	60 2,28	57 2,69	39 7,46
4	99 8,20	68 4,41	60 9,38	55 8,64	927, 83	92 5,42	83 4,56	81 8,07
5	10 31,8	82 9,56	64 1,89	56 3,63	170 1,6	15 46,1	14 88,6	10 76,4
6	20 31,2	15 93,4	12 68,6	10 96,5	261 4,9	26 16,6	23 65,0	11 06,4
7	24 84,9	16 29,0	17 10,6	15 53,2	325 1,3	29 70,9	28 58,9	19 69,5
8	30 79,6	26 92,0	21 11,2	18 14,5	396 5,2	36 23,5	34 25,5	21 50,5
9	33 54,5	27 24,6	28 85,8	26 17,0	454 6,8	45 37,6	41 13,3	30 88,8
10	40 87,8	37 20,3	31 63,9	27 09,4	520 3,2	47 87,6	46 08,3	35 17,6

Tab. 2 oraz Tab. 3 przedstawiają wyniki obliczeń numerycznych. W wierszach zapisano częstości dla kolejnych otrzymanych postaci drgań własnych natomiast w kolumnach zaprezentowano rodzaje próbek kompozytowych względem ułożenia włókien. Są to kolejno: próbka z układem włókien ± 45 , która jest próbką niesprężoną, prostą składającą się z 16 warstw. Następne trzy kolumny przedstawiają wyniki dla belki ze sprężeniem mechanicznym, jest to sprężenie giętno – wzdlużne (z ang. bending–extension). Zastosowane zostały tutaj kolejne trzy orientacje włókien w ramach sprężenia: 30° , 45° oraz 60° . W dalszej kolejności zaprezentowane zostały rezultaty również dla belki ze sprężeniem, tym razem jest to sprężenie giętno–skrętne (z ang. bending–twisting). Podobnie jak w poprzednim przypadku, zastosowano trzy orientacje włókien: 30° , 45° oraz 60° . Ostatnia kolumna ukazuje częstości własne dla belki prostej, niesprężonej, jednokierunkowej o układzie włókien wzdluż dłuższej krawędzi belki, orientacja

taka opisana jest jako 0° . Wyniki przedstawione w Tabeli 2 odnoszą się do próbek szklano–epoksydowych, podczas gdy Tab. 3 prezentuje rezultaty dla kompozytu węglowo–epoksydowego. Analiza wartości częstości pierwszej postaci drgań ukazuje podobieństwo w wartościach dla próbek $\pm 45^\circ$, próbek o włóknach ułożonych wzdłużnie oraz dla $BE30^\circ$. Wartości częstości dla postaci 1–10 (z wyjątkiem postaci 3.) są wyższe dla próbki prostej, średnio różnica ta wynosi ok. 23%. Podobna sytuacja występuje przy porównaniu wartości z kolumny pierwszej oraz ostatniej. W tym przypadku średnia różnica wynosi ok. 20,5%, przy czym wartości dla postaci 6. oraz 8. wyraźnie się różnią pomiędzy próbkami natomiast dla pozostałych mod wartości są bardzo zbliżone. Jak można łatwo zauważyć, wartości częstości dla pozostałych modeli, czyli dla $BE45^\circ$, $BE60^\circ$ oraz wszystkich BT w sposób znaczący odstają od wymienionych wyżej. Co ciekawe, dla obu próbek sprzężonych zwiększenie kąta orientacji włókien powoduje dla większości przypadków zmniejszenie częstości drgań własnych. Różnice w obrębie sprzężeń nie są znaczące: dla sprzężenia giętno–wzdłużnego jest to odpowiednio ok. 16% oraz 13% gdzie dla sprzężenia giętno–skrętnego otrzymujemy jeszcze mniejsze różnice–7% oraz 6%. Warty zauważenia jest fakt, iż częstość drgań własnych pierwszej postaci jest największa dla belki BT30 i jest ona niemal dwukrotnie większa przy porównaniu z belką $\pm 45^\circ$ czy 0° czy nawet ponad dwukrotnie większa dla belek sprzężonych typu bending–extension. Z analizy wynika, że największe różnice w częstości drgań własnych dla poszczególnych postaci występują pomiędzy próbkami sprzężonymi BT30 oraz BE60. Taka rozbieżność w wartościach częstości spowodowana może być charakterystyką sprzężeń, belki o sprzężeniu giętno–skrętnym mają dużo większą sztywność na zginanie niż belki o sprzężeniu giętno–wzdłużnym. Dodatkowo, występuje zjawisko, w którym dwie następujące po sobie postaci mają bardzo zbliżone częstości a kształty ich postaci są niemal identyczne, szczególnie widoczne jest to w belkach ze sprzężeniem BT oraz w belkach prostych przy postaci 2. oraz 3. gdzie różnica w częstości nie jest znaczna w porównaniu do belek o sprzężeniu BE. Podobną sytuację można zaobserwować w belce o włóknach ułożonych wzdłuż dłuższej krawędzi belki, różnica częstości pomiędzy postaciami 5. oraz 6. jest zaniedbywalna w zestawieniu z pozostałymi konfiguracjami belek.

Tab. 3. Pierwsze dziesięć częstości drgań własnych belki wykonanej z kompozytu węglowo-epoksydowego.

WĘG IEL	Oznaczenie próbki							
Kolejn e postaci	+– 45	B E30	B E45	B E60	B T30	B T45	BT 60	0°
1	66, 544	68, 695	46, 720	35, 889	14 8,16	13 1,69	126, 000	10 1,92
2	41 7,80	42 7,59	29 2,20	22 4,47	89 0,10	80 9,70	777, 16	36 8,94
3	46 9,25	76 4,60	78 3,41	62 9,87	99 2,22	86 5,36	810, 38	63 3,75
4	11 96,0	10 26,6	82 8,66	70 0,23	12 51,3	11 88,7	105 2,8	11 88,3
5	14 58,4	12 03,8	89 6,72	80 0,90	24 35,8	22 14,5	212 5,7	12 26,1
6	24 00,7	23 43,8	16 50,3	12 39,1	34 47,6	33 50,3	293 8,5	17 53,1
7	28 01,1	23 70,9	25 60,4	20 55,5	45 63,7	41 98,6	403 4,7	24 07,7
8	40 21,1	39 14,8	27 61,9	22 51,5	57 69,2	52 33,9	488 4,8	33 77,1
9	43 78,0	39 96,0	41 53,3	30 76,4	60 32,4	57 91,3	516 1,8	40 16,9
10	44 19,9	55 64,7	42 93,9	37 65,9	71 37,8	66 64,7	641 9,0	45 69,9

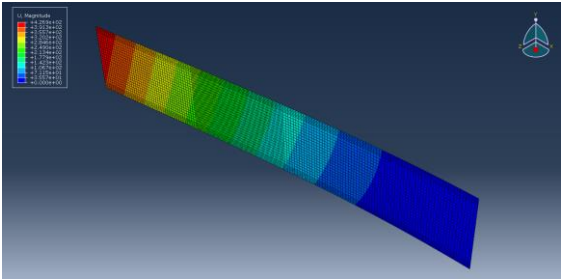
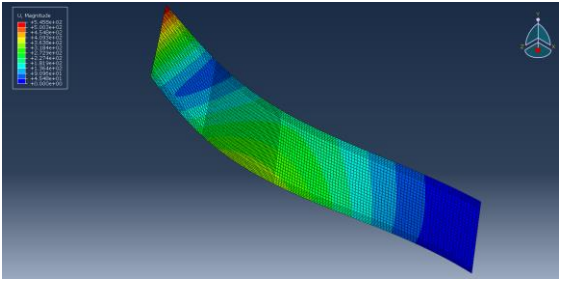
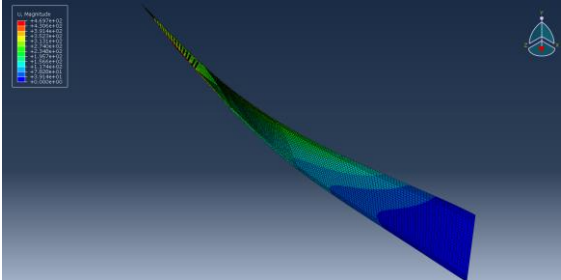
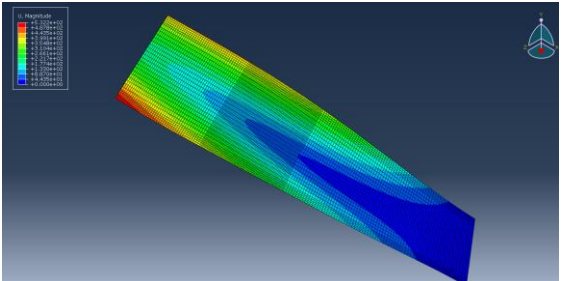
Tab. 3. przedstawia rezultaty analizy numerycznej wyznaczania częstości i postaci drgań własnych dla belki wykonanej z kompozytu węglowo-epoksydowego. Układ tabeli jest identyczny jak Tabeli 2. W przypadku belek węglowych występuje podobne schematy jak dla próbek szklanych. W tym przypadku również najwyższe częstości przejawiają próbki ze sprzężeniem giętno skrętnym. Zarówno w belkach BE jak i BT częstości maleją wraz ze wzrostem kąta orientacji włókien, choć nie są to znaczące różnice. Można zauważyć tutaj wysokie podobieństwo częstości dla próbek $\pm 45^\circ$ i BE30 oraz $\pm 45^\circ$ i 0° , chociaż w drugim przypadku pierwsze częstości są znacznie od siebie oddalone. Największa różnica ponownie występuje pomiędzy próbkami BT30 oraz BE60, przy czym w większości postaci wartości częstości dla modelu ze sprzężeniem giętno-skrętnym są ponad dwukrotnie wyższe. W przypadku próbek węglowych również występuje zjawisko powstawania postaci o zbliżonych częstościach i bardzo podobnych postaciach drgań, zauważalne jest w próbce BE30 przy postaciach 6. i 7., BT45-postacie 2. i 3. czy próbce 0° przy postaciach 4. i 5.

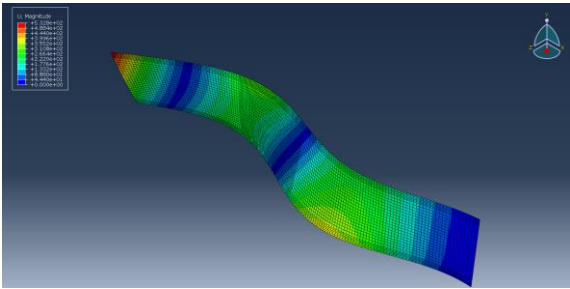
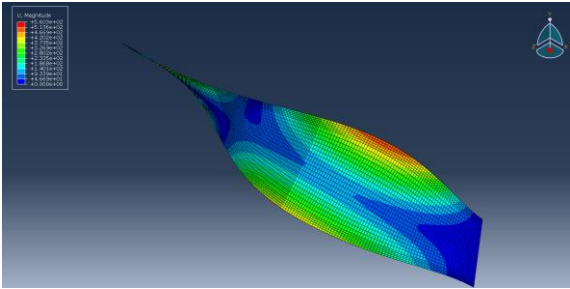
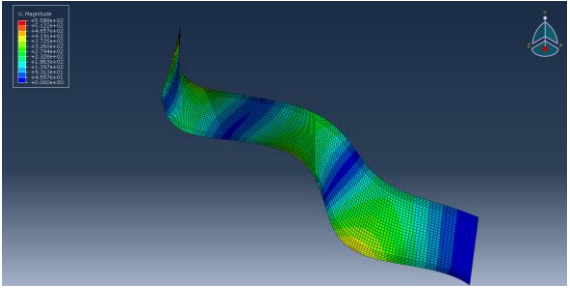
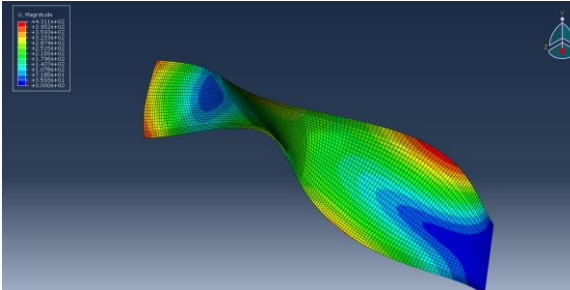
Przy porównaniu częstości dla dwóch materiałów, tj. dla belek szklano-epoksydowych oraz węglowo-epoksydowych również występuje różnica. Średnia różnica częstości dla wszystkich próbek wynosi ok. 35%. Różnice są niewielkie w obrębie konkretnych postaci drgań, większe różnice występują, gdy analizą objęte zostaną poszczególne konfiguracje ułożenia włókien w próbkach. Ogólnie rzecz ujmując, belki węglowe mają większe pierwsze dziesięć częstości drgań własnych dla wszystkich analizowanych belek.

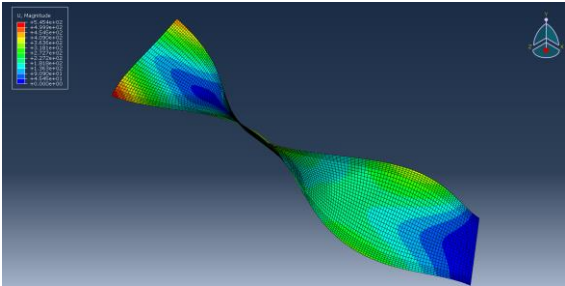
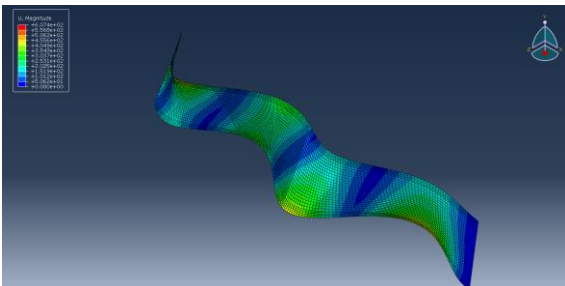
Rysunki poniżej przedstawiają postacie drgań wygenerowane w analizie metodą elementów skończonych wygenerowane w programie Abaqus dla próbki sprzężonej giętno-skrętnej wykonanej z kompozytu węglowo-epoksydowego.

Tab. 4. Mody drgań belki BT30

Nr postaci	Częstotliwość [Hz]	Mody drgań
------------	--------------------	------------

1	148,16	
2	890,10	
3	992,22	
4	1251,3	

5	2435,8	
6	3447,6	
7	4563,7	
8	5769,2	

9	6032,4	
10	7137,8	

Na rysunkach zamieszczonych w Tabeli 4. łatwo odczytać sposób w jaki drga próbka przy danej częstotliwości, ponieważ obok widoku modelu belki pokazana została dana wyjściowa w postaci przemieszczenia całkowitego (na rysunku oznaczona jako U). Jak można zauważyć występują postaci zarówno giętne (np. 1., 2., 5., 10) jak i skrętne (np. 4., 6., 8.). Jak można było zauważyć podczas analizy częstotliwości, występuje zjawisko „podwójnych postaci”, w powyższym przypadku mody nr 8 oraz 9 są bardzo podobne patrząc na kształty belek w Tabeli 4. Różnią się jedynie stopniem zniekształcenia przy konkretnej wartości częstotliwości, natomiast kształt, jaki osiąga belki przy tej częstotliwości jest niemal identyczny. Pozostałe belki, których postaci nie zostały przedstawione powyżej z powodu dużej ilości analiz, charakteryzują się podobnymi rezultatami, jeśli chodzi o kształty kolejnych mod.

5. Wnioski

Analiza modalna pozwala na wyznaczenie postaci oraz częstości drgań własnych elementu lub nawet całej konstrukcji. Jest to bardzo istotne zagadnienie mechaniczne w kontekście budowy oraz eksploatacji i bezpieczeństwa maszyn i konstrukcji. Przedstawiona w powyższym tekście analiza dotyczy wyznaczenia częstotliwości i postaci drgań belki kompozytowej

szklano-epoksydowej oraz węglowo-epoksydowej. Celem tej pracy było sprawdzenie jaki wpływ na analizę modalną ma zmiana układu warstw. Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że zmiana układu warstw ma znaczący wpływ na częstotliwości drgań własnych natomiast mniejszy na kształt otrzymanych postaci. Rezultaty przedstawione w Tabeli 2 oraz Tabeli 3 pokazują znaczący wpływ sprzężeń mechanicznych na wartości częstotliwości drgań. O ile sprzężenie BE nie zmienia znacząco wartości, a nawet daje wyniki bardzo zbliżone do próbek prostych, o tyle sprzężenie BT zwiększa częstotliwości pierwszej postaci około dwukrotnie. Ukazuje to znaczący wpływ sprzężenia giętno-skrętnego na analizę modalną. Dodatkowo można zauważyć, że w obu przypadkach próbek ze sprzężeniem występuje spadek częstotliwości wraz ze zwiększeniem kąta orientacji włókien w obrębie sprzężenia (30° do 45° i kolejno do 60°). Sytuacja taka nie występuje w modelach próbek prostych. Ponadto, zmiana kąta ułożenia włókien w próbkach prostych lub nawet zmiana sposobu ułożenia (rozpatrywane są tu zarówno próbki jednokierunkowe 0° jak i próbki $\pm 45^\circ$) nie wpływa na rezultaty analizy modalnej. Kolejnym aspektem wartym zauważenia jest różnica w częstotliwościach dla dwóch materiałów rozpatrywanych w tym przypadku, przy czym próbki węglowe osiągnęły wyższe wartości niż próbki szklane.

Literatura

- [1] Samborski S., *Numerical analysis of the DCB test configuration applicability to mechanically coupled Fiber Reinforced Laminated Composite beams*. Composite Structures 152, 477–487, 2016.
- [2] Abaqus/CAE 6.14 User's Guide. Providence, RI: Simulia; 2014.
- [3] York CB., *Tapered hygro-thermally curvature-stable laminates with nonstandard ply orientations*. Compos A, 8, 44–140, 2013.
- [4] De Morais A. B., de Moura M. F., Goncalves J. P. M., Camanho P. P. *Analysis of crack propagation in double cantilever beam tests of multidirectional laminates*. Mechanics of Materials, 35, 641–652, 2003.
- [5] Davidson B. D., Krüger R., König M., *Effect of stacking sequence on energy release rate distributions in multidirectional DCB and ENF specimens*. Engineering Fracture Mechanics, 55, No. 4, 557–569, 1996.
- [6] Paśnik J., Samborski S., Rzeczkowski J., *Application of the CZM technique to delamination analysis of coupled laminate beams*. [w]: Materiały 7th International Conference on Advanced Materials and Structures. Timisoara, Rumunia, 2018.
- [7] Burlayenko V. N., Sadowski T., *FE modeling of delamination growth in interlaminar fracture specimens*. Budownictwo i Architektura, 2, 95–109, 2008.

- [8] Kim H.-Y., Hwang W., *Estimation of normal mode and other system parameters of composite laminate plates*. Composite Structures 53, 345–354, 2001.
- [9] Fernandes R.M.R.P., Chousal J.A.G., de Moura M.F.S.F., Xavier J., *Determination of cohesive laws of composite bonded joints under mode II loading*. Composites: Part B 52, 269–274, 2013.
- [10] Barile C., Casavola C., Gambino B., Mellone A., Spagnolo M., *Mode-I Fracture Behavior of CFRPs: Numerical Model of the Experimental Results*. Materials 12, 513, 2019.
- [11] Różyło P., Ferdynus M., Dębski H., Samborski S., *Progressive Failure Analysis of Thin-Walled Composite Structures Verified Experimentally*. Materials 13(5):1138, 2020.
- [12] Gliszczyński A., Samborski S., Wiącek N., Rzeczkowski J., *Mode I Interlaminar Fracture of Glass/Epoxy Unidirectional Laminates. Part II: Numerical Analysis*. Materials 12(10):1604, 2019.
- [13] Samborski S., Rzeczkowski J., Paśnik J., *Issues of Direct Application of Fracture Toughness Determination Procedures to Coupled Composite Laminates*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 416(1):012056, 2018.
- [14] Skoczylas J., Samborski S., Kłonica M., *The application of composite materials in the aerospace industry*. Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering 5, 1–6, 2019.
- [15] Samborski S., Rzeczkowski J., *Numerical modeling and experimental testing of the DCB laminated composite beams with mechanical couplings*. AIP Conference Proceedings 1922(1):080010, 2018.
- [16] Rogala M, Gajewski J, Ferdynus M. *Numerical analysis of the thin-walled structure with different trigger locations under axial load*, IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 710:012028, 2019

Metody analizy fraktalnej w diagnostyce zmian barwnikowych ludzkiej skóry

Streszczenie: Ważnym aspektem analizy tekstury jest określenie fraktalności, ponieważ cecha ta charakteryzuje złożoność struktury. Metody fraktalne są narzędziem do pomiaru nieregularności występujących w ramach barwnikowej zmiany skórnej. Barwnikowe zmiany skórne są obrazowane na wiele sposobów np. dermatoskopia, narzędzie Siascopy, mikroskopia. W opracowaniu skutecznego sposobu diagnostyki nowotworów dermatologicznych wykorzystywane są powstałe dzięki nim obrazy.

Słowa kluczowe: fraktale, wymiar fraktalny, wymiar pudełkowy, lakunarność, zmiany skórne

Fractal analysis methods in the diagnosis of human skin pigmentation changes

Abstract: An important aspect of texture analysis is determining the fractal, because this feature characterizes the complexity of the structure. Fractal methods are a tool for measuring irregularities occurring within the pigmented skin lesion. Pigmented skin lesions are imaged in many ways, e.g. dermatoscopy, Siascopy tool, microscopy. The images created thanks to them are used in the development of an effective way to diagnose dermatological cancers.

Keywords: fractals, fractal dimension, box dimension, lacunarity, skin lesions

1. Wstęp

Przyjęto wiele metod pozwalających na ocenę przez dermatologa zmiany skórnej pod kątem wykrycia czerniaka skóry. Należą do nich opracowane przez lekarzy skale charakteryzujące badane znamiona dermatologiczne: klasyczna analiza wzorca, skala ABCD (czasem rozszerzana do postaci ABCDE), algorytm CASH, skala Huntera, skala Clarka i Breslowa, skala TNM, lista 3 punktów, lista 7 punktów, metoda Menziesa, Chaos–Clue. W procesie diagnostyki lekarze posługują się wybraną przez nich metodą (skalą) [1–3]. O zakwalifikowaniu zmiany jako złośliwej decyduje wartość wybranej ze skali. W zależności od wybranej cechy (np. barwa, tekstura, nieregularność zmiany, tekstura) obliczana jest finalna wartość [4].

Metoda analizy wzorca służy do oceny barwnikowych wykwitów skórnych. Naturalny kolor skóry (różny dla każdego człowieka) często stanowi punkt odniesienia w procesie analizowania kolorów znamienia. Wykwit barwnikowy

* mmagdamichalska@gmail.com, Katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

zwykle składa się z więcej niż jednego koloru, co może stanowić utrudnienie w rozróżnieniu barw przez ludzkie oczy.

Skala ABCD(E) jest stosowana przez lekarzy w przypadku diagnozowania czerniaka. Na jej podstawie możliwe jest obliczenie wskaźnika TDS określającego, czy badane znamię posiada cechy czerniaka.

$$TDS = 1,3 \times A + 0,1 \times B + 0,5 \times C + 0,5 \times D \quad (1)$$

gdzie: A to asymetryczny względem każdej osi; B to brzegi nierówne i postrzępione; C – kolor różnorodny, D – średnica > 5 mm lub dynamika zmian morfologicznych w guzie; w rozszerzonej wersji E uwypuklenie się zmiany ponad otaczający naskórek.

Skala Glasgow uznawana jest za zestaw objawów klinicznych czerniaka rozwiniętego miejscowo [5]. Algorytm CASH charakteryzuje porównywalną czułość przy nieco większej swoistości. Do wskaźników skuteczności lekarzy zalicza się swoistość oraz czułość [6, 7]. Skale Clarka [8] oraz Breslowa [9] określają stopnie naciekanie zmian w głąb. W skali Breslowa istnieją cztery stopnie naciekania. Stopnie odpowiadają głębokości naciekania wyrażonej w milimetrach. Im wyższy stopień, tym rokowania są gorsze. W badaniu dermoskopowym, poza analizą wzorca zmian barwnikowych, stosuje się algorytmy diagnostyki dermoskopowej (reguła 7–punktowa, 3–punktowa), zasadę Menziesa.

Analizowane cechy zależą od dostępnych metod diagnostyki, lecz nie wszystkie cechy obrazu są zauważalne przez człowieka. Metody fraktalne są narzędziem do pomiaru nieregularności występujących w ramach zmiany skórnej. Wymiar pudełkowy opisuje liczbowo struktury geometryczne, przydatny jest w klasyfikacji zmiany i przypisywaniu mu wybranych cech. Idea możliwego związku między rakiem a fraktalami została zasugerowana w wielu pracach.

W rozdziale monografii opisane zostały fraktale, wymiar pudełkowy i zastosowania metody fraktalnej w diagnostyce barwnikowych zmian skórnych. Analizie fraktalnej poddano obrazy pochodzące z mikroskopu, dermatoskopu oraz z narzędzia SIAscopy.

2. Fraktal i wymiar pudełkowy

Fraktal jest jednym z intrygujących wzorów w przyrodzie, obserwowanych jako „samopodobne” nieregularne krzywe lub kształty, które powtarzają swój wzór po powiększeniu lub zmniejszeniu. Termin ten po raz pierwszy wprowadził w drugiej połowie XX wieku francuski matematyk – Bendoit Mandelbrot [10]. Wzory fraktalne powstają w warunkach dalekich od równowagi lub wyłaniają się z chaosu. Przykłady wzorów fraktalnych obejmują

zarówno wielkoskalową strukturę świata, jak i geometrię niektórych tkanek biologicznych. Fraktale charakteryzują się niżej wymienionymi podstawowymi cechami [11]:

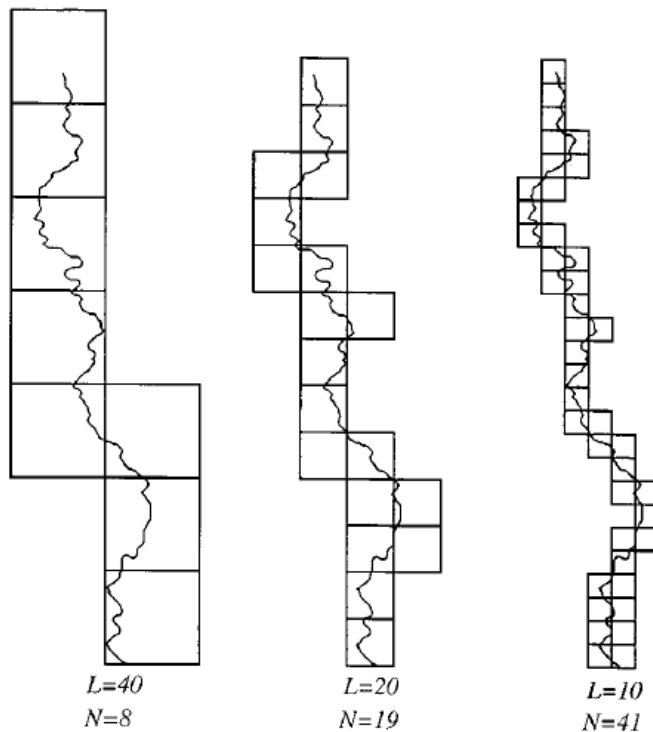
- opis za pomocą zazwyczaj prostej zależności rekurencyjnej; □
- samopodobieństwo przejawiające się tym, że fraktale wyglądają podobnie bez względu od przyjętej skali,
- posiadany przez nie wymiar nie jest liczbą całkowitą;
- wymiar Hausdorffa jest większy niż wymiar topologiczny;
- posiadają względnie prostą definicję rekurencyjną,
- mają naturalny („poszarpany”, „kłębiasty” itp.) kształt.

Fraktal posiada charakteryzujący go parametr wymiar fraktalny, który można określić jako liczbę reprezentującą stopień nieregularności i chaotyczności. Poniżej przedstawiono wzór definiujący wymiar fraktalny, gdzie N to ilość pudełek o boku ε , które zawierają badany fraktal, (zakładając nieskończenie małe ε) wymiar fraktalny D będzie wynosił:

$$D_{poj.} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N_{\varepsilon}(F)}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}, \quad (2)$$

Wymiar fraktalny nazywany jest również wymiarem Kołmogorowa [12].

Wymiar pudełkowy (*ang. box-counting dimension*) pozwala na określenie nieregularności struktury geometrycznej badanego obiektu. Jego wartość obliczana jest na podstawie kratek (pudełek) zajmowanych przez fragment obrazu, po wcześniejszym umieszczeniu dwuwymiarowego obrazu binarnego na płaszczyźnie zbudowanej z identycznych kwadratów, razem budujących siatkę [13]. Metoda pudełkowa zajmuje się znalezieniem najmniejszej liczby kwadratów potrzebnej do pokrycia wszystkich czarnych pikseli. Algorytm zbiega się do minimum w nieskończonym czasie, więc wyniki są jedynie przybliżeniem najlepszego zasięgu. Ta metoda jest popularna, ponieważ jest prosta i można ją dostosować do wielu sytuacji. Obiekt może zawierać się w kwadratach lub ramkach, można przeprowadzić analizę statystyczną w celu ustalenia jego wymiaru fizycznego. Aby obliczyć wymiar fraktalny obrazów w płaszczyźnie, operację rozpoczyna się od pokrycia obszaru siatkami o różnych rozmiarach siatki. Następnie porównywane są rozmiary siatki i liczby kwadratów zawierających co najmniej część obrazu. Stosunek rozmiarów siatki do liczby siatek zawierających obiekt określa wymiar.



Rys. 1. Działanie metody pudełkowej w obliczaniu wymiaru fraktalnego. Dwadzieścia zdjęć raka skóry po zdiagnozowaniu stopnia zaawansowania czerniaka skóry [14]

Rys. 1 ilustruje zastosowanie metody pudełkowej w celu oszacowania fraktalnego wymiaru ścieżki o minimalnej długości [14]. Określana jest L – długość boku kwadratu i ilość kwadratów – N .

3. Lakunarność

Podczas obliczania wymiaru fraktalnego może okazać się, że dwa obiekty posiadają te same obliczone wartości. By móc je rozróżnić wprowadzono dodatkowe pojęcie – lakunarność (ang. lacunarity). Określa ono rozmieszczenie dziur (porów) [15]. Określane jest jako kwadrat współczynnika zmienności (CV):

$$\lambda_{\varepsilon} = CV^2 = \left(\frac{\sigma_{\varepsilon}}{\mu_{\varepsilon}} \right)^2, \quad (3)$$

Odchylenie standardowe pudełek o długości krawędzi ε określone jest przy pomocy zmiennej δ_s , liczbę pikseli w pudełku oznaczono we wzorze powyżej jako μ_s .

Wartość lakunarności jest średnią arytmetyczną z obliczonych wcześniej cząstkowych wartości dla każdej długości krawędzi pudełka:

$$L = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{N}, \quad (4)$$

dla $i = 1, \dots, N$, gdzie N jest liczbą długości krawędzi pudełek. Lakunarność L obiektów wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$L_{\varepsilon,g} = \left(\frac{\sigma_{\varepsilon,g}}{\mu_{\varepsilon,g}} \right)^2, \quad (5)$$

gdzie σ jest odchyleniem standardowym średniej ilości pikseli μ w elemencie siatki o boku ε dla ułożenia g . Krok jest powtarzany obracając strukturę ($g = 1, 2, 3, 4$) [16]. Im analizowana struktura jest bardziej jednorodna tym mniejsza jest uzyskiwana wartość lakunarności.

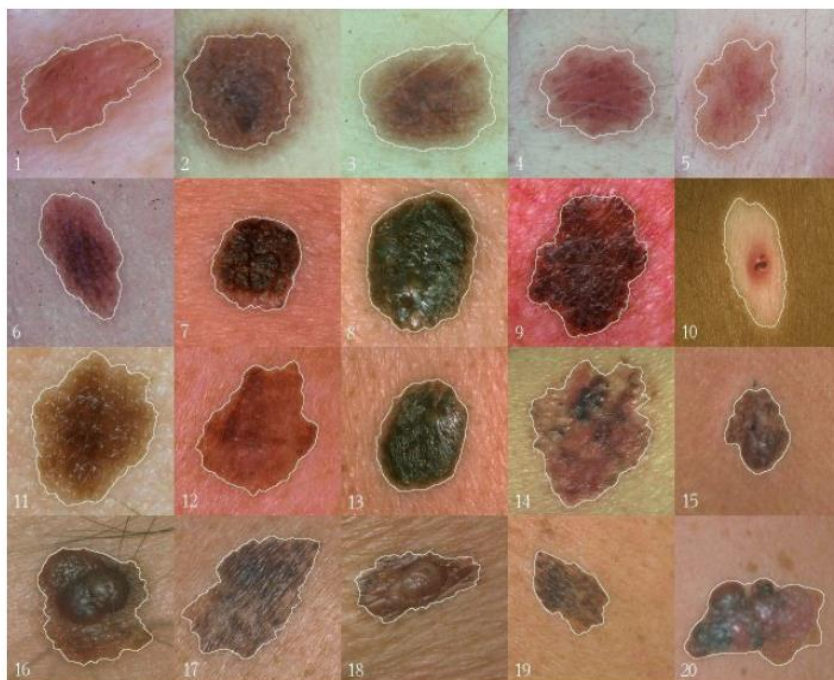
4. Zastosowanie metod fraktalnych w analizie znamion barwnikowych

Fraktale od wielu już lat znajdują zastosowanie w diagnostyce. Coraz częściej stają się użytecznym narzędziem w diagnostyce dermatologicznej. Szczególnie interesujące przypadki medyczne to nowotwory skórne, wśród nich należy wymienić czerniaka skóry. Ważnym aspektem analizy tekstury jest określenie fraktalności, ponieważ cecha ta charakteryzuje złożoność struktury. Ostatnie badania wykazały, że fraktale są samopodobnymi strukturami. Wykazują podobne cechy przy różnych powiększeniach, w sposób niezmienny w skali. Barwnikowe zmiany skórne są obrazowane na wiele sposobów. Należy do nich dermatoskopia, wideodermatoskopia, spektrofotometria, narzędzie Siascopy, mikroskopia.

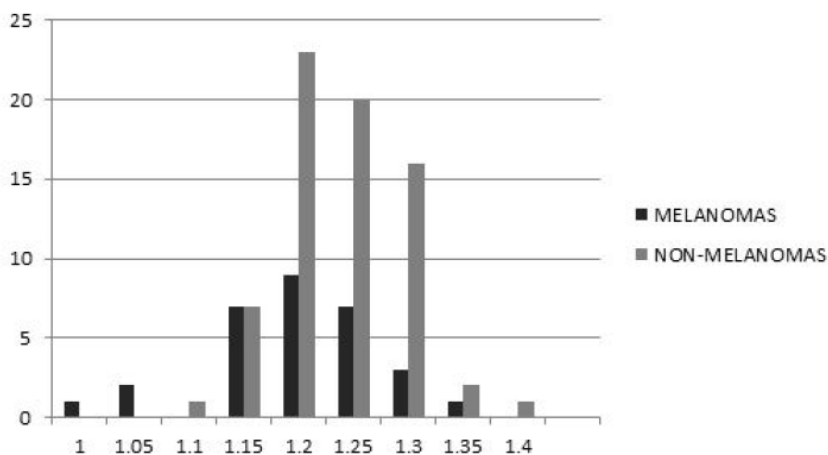
4.1. Obrazy dermatoskopowe

W tym artykule [17] zaproponowano narzędzia do określenia nieregularności obramowania pigmentowanych zmian skórnych za pomocą wymiaru fraktalnego. Zaproponowana została metoda pudełkowa i metoda Sausage do analizy oryginalnych obrazów. W artykule wyjaśnia się nieprawidłowości w obramowaniu zmiany skórnej. Obramowanie za pomocą występu i wcięć. Proponowana metoda pudełkowa (DB) i metoda Sausage (DS) daje bardzo dokładne wyniki. Z wymiaru zmiany skórnej można określić stopień

zaawansowania choroby. Zwiększony wymiar skutkuje wyższym zaawansowaniem choroby. W badaniach wykorzystano szacowanie fraktalnego wymiaru D za pomocą dwóch różnych DB i DS dla 20 próbek. Na Rysunku 5 przedstawiono wyniki działania wykorzystanych metod. Obrazy 1–6 zostały zdiagnozowane przez algorytmy jako typowe, 7–13 jako łagodna odmiana czerniaka, zaś 14–20 to obrazy złośliwego czerniaka. Tabeli 5 przedstawione zostały wyniki metody pudełkowej dla obrazów, które zdiagnozowane jako te ukazujące złośliwą odmianę nowotworu skóry czerniaka.

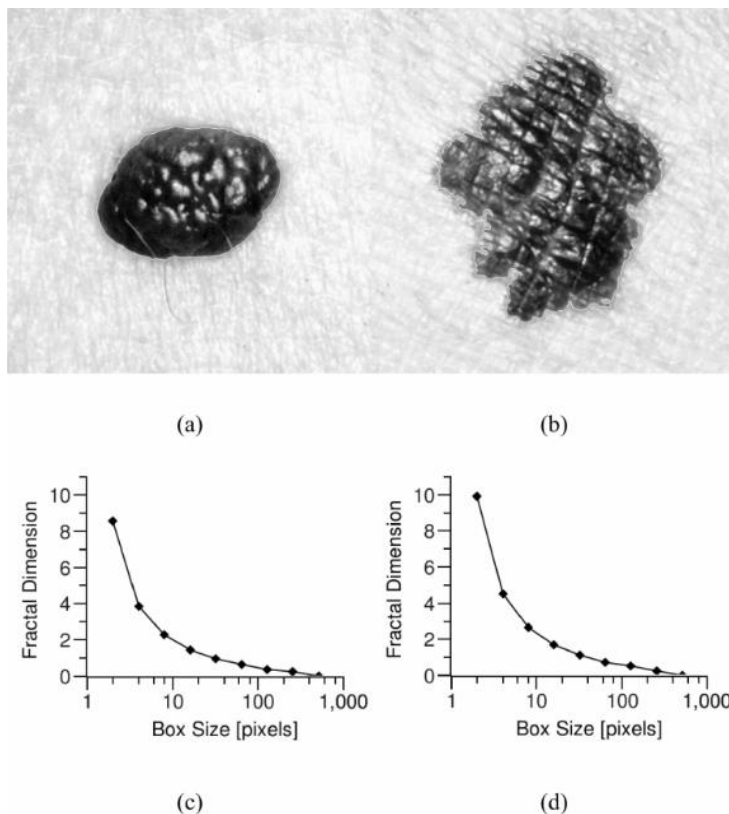


Rys. 5. Dwadzieścia zdjęć raka skóry po zdiagnozowaniu stopnia zaawansowania czerniaka skóry [17]



Rys. 5. Histogram szacowanych wymiarów fraktali wg Harfa dla konturów [18]

Istnieje wiele cech odróżniających normalne znamię skórne od czerniaków. Jedną z nich jest ich nieregularność brzegowa, którą można określić ilościowo za pomocą wymiaru fraktalnego. W [19] obliczono wymiar fraktalny normalnych znamion i czerniaka przy użyciu metody pudełkowej. Średnia wydajność w odróżnianiu łagodnych zmian od czerniaków osiągnęła 85%, określając to narzędzie jako wystarczające do automatycznego diagnozowania.

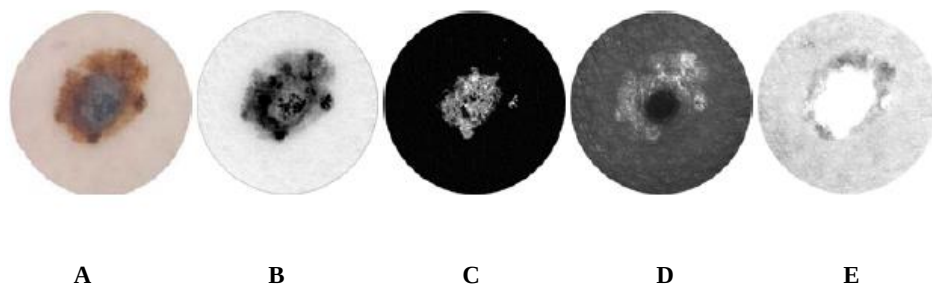


Rys.8. Wykrywanie granic dla (a) normalnego mola i (b) czerniaka oraz ich fraktalnej krzywej wymiaru obliczonej przy użyciu metody pudełkowej, (c) normalnego znamienia i (d) czerniaka [19]

4.2. Wykorzystanie obrazów wielowarstwowych

SIAscopy (*ang. Spectrophotometric Intracutaneous Analysis*) jest nową metodą optycznego obrazowania skóry stworzoną przez firmę Aston Clinica w Wielkiej Brytanii. Dzięki niej można dokonać analizy pigmentacji skóry (obecność melaniny), ukrwienia skóry i jej struktury kolagenowej. W narzędziu zrekonstruowane komputerowo obrazy ujawniają szereg informacji o badanej skórze. SIAscopy mierzy warstwy skóry, ilości hemoglobiny, melaniny i kolagenu w warstwie rogowej naskórka i skóry właściwej do głębokości 2 mm. Ze względu na jego zdolność do unikalnego wglądu w strukturę skóry staje się preferowanym narzędziem do diagnozowania pigmentowanych zmian skórnych i wykrywania wczesnego stadium czerniaka skóry [20–22]. Na Rys.6. przedstawiono pięćwielowarstwowych obrazów wynikowych otrzymanych dzięki oprogramowaniu. Ukazują one kolorowy obraz czerniaka i mapami

parametrycznymi całkowitą melaninę, melanią w warstwie skóry właściwej, kolagen, krew skórną.



Rys. 6. A) Kolorowy obraz czerniaka wraz z mapami parametrycznymi pokazującymi: B) całkowitą melaninę; C) melanina skórna w warstwie dermis; D) kolagen; E) krew skórną [22]

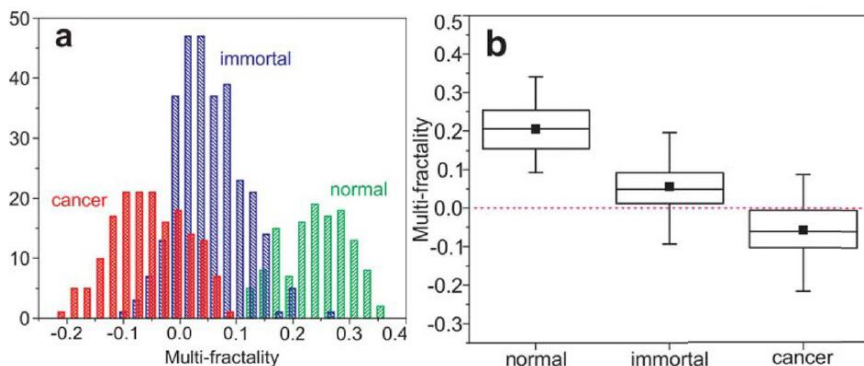
Analiza barwnikowych zmian skórnych ukazanych na wielowarstwowych obrazach opiera się głównie na detekcji i klasyfikacji wyodrębnionych z obrazów zmian [23–24]. W [25] wykazano, że fraktalne charakterystyki wielowarstwowych obrazów barwnikowych zmian skórnych są dobrym narzędziem w diagnostyce nowotworów skóry. Obliczono wartości wymiaru pudełkowego oraz lakunarność posiadanych obrazów znamion. Analiza fraktalna zdjęć ukazujących absorpcję melaniny, kolagenu i hemoglobiny daje bardzo dobre wyniki i wykazuje się wystarczającą skutecznością, by mogła służyć jako wiarygodne narzędzie diagnostyczne.

4.3. Wykorzystanie obrazów mikroskopowych

Pomimo podjęcia wielu kroków ku zrozumieniu biofizycznych aspektów rozwoju nowotworu, wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi. Badaniem fizycznych zmian powierzchni tkanek zajmuje się wiele zespołów badawczych. W [26] zbadane zostały fizyczne zmiany powierzchni ludzkich komórek nabłonka podczas stopniowego rozwoju raka (od normalnego (normal), przednowotworowego (immortal) aż do złośliwego (cancer) za pomocą mikroskopii sił atomowych (AFM).

Rozwój raka wiąże się z pojawieniem się prostej geometrii fraktalnej na powierzchni komórki. W badaniach udowodniono, że w przeciwieństwie do poprzednio oczekiwanej korelacji między rakiem a fraktalami, geometria fraktalna występuje tylko w ograniczonym okresie rozwoju, gdy nieśmiertelne komórki stają się rakowe. Dalszy postęp choroby nowotworowej wykazuje odchylenie od fraktali. Aby to pokazać, badane jest pojawienie się możliwej geometrii fraktalnej na powierzchni komórki na różnych etapach postępu w kierunku raka.

Na Rysunku 8 przedstawiono histogramy rozmieszczenia wielu frakcji obliczone dla 540 komórek nabłonka zebranych od 6 pacjentów z rakiem (komórki rakowe), 6 zdrowych osób (normalne komórki) i unieśmiertnionych komórek (pochodzących z normalnych komórek 6 zdrowych osób) oraz wykres ramkowy wielu fraktali. Mediana jest pokazana jako pasek na środku pola. Średnia wartość jest pokazana z kropką wewnątrz ramki. Rozmiar pudełka to 75/25% percentyla. Słupki „błędu” wynoszą 5–95% percentyli.



Rys.8. Histogramy rozmieszczenia wielu frakcji obliczone dla pacjentów z rakiem (cancer) zdrowych osób (normal) i unieśmiertnionych komórek (immortal pochodzących z normalnych komórek zdrowych osób); (b) wykres ramkowy wielu fraktali [26]

5. Wnioski

Metoda analizy fraktalnej w szeroko pojętej diagnostyce dermatologicznej to bardzo obiecujące narzędzie w ocenie parametrów obrazów otrzymanych za pomocą wielu modalności. Analiza fraktalna jest poprzedzona szeregiem procesów przygotowujących oryginalny obraz.

Dermatologiczne nowotwory są modelowane jako chaotyczny i nieregularny proces, w którym geometria euklidesowa nie opisuje swojego zachowania. Jednak znacznie lepsze wyniki można uzyskać, analizując nieregularne zachowanie za pomocą teorii fraktali. W większości przeprowadzonych badań zaproponowano wymiar fraktalny w celu scharakteryzowania nieregularności granic barwnikowych zmian skórnych.

Ważne, aby rozwijające się techniki metod fraktalnych miały na celu ciągłe monitorowanie postępu wykrywania nowotworów złośliwych w każdej grupie otrzymanych obrazów. Potrzebne są modele zapewniające dobrze rozwinięte zdolności diagnostyczne oraz praktyczną potrzebę poprawy wczesnego wykrywania raka. Opisane działania w obrazowaniu poszczególnych zmian skórnych mogą znacznie zmniejszyć zachorowalność i śmiertelność.

Literatura

- [1] Korjakowska J. J., *Automatic detection of melanomas: An application based on the ABCD criteria*, Information Technologies, Biomedicine, Springer Berlin Heidelberg, 7339, 67–76, 2012.
- [2] Korotkov K., Garcia R., *Computerized analysis of pigmented skin lesions: A review*, Artificial Intelligence in Medicine, 2012
- [3] Leo G. D., Paolillo A., Sommella P., G. Fabbrocini G., Rescigno O., *A software tool for the diagnosis of melanomas*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 886–891, 2.010
- [4] Weng Y., Xu S., *A new approach to estimate fractal dimensions of corrosion images*, Pattern Recognition Letters 27, 2006.
- [5] Damilola A., Okuboyejo O., *Automating skin disease diagnosis using image classifications*, Proceedings of the world congress on engineering and computer science 2013, II, San Francisco, 2013
- [6] Henning J., Dusza S., Wang S., *The cash (color, architecture, symmetry, and homogeneity) algorithm for dermoscopy*, Archives of Dermatology 56, 45–52, 2007
- [7] Emery J. D., Hunter J., Hall P. N., *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
- [8] Clark W. H., From L., Bernardino E. A., *Histogenesis and biologic behavior of primary human malignant melanomas of the skin*, Cancer Research 29, 705–726, 1969.
- [9] Breslow A., *Thickness, cross-sectional areas and depth of invasion in the prognosis of cutaneous melanoma*, Annals of Surgery 172, 902–908, 1970.
- [10] Mandelbrot B., *The fractal geometry of nature*, Wyd. 1. New York, W.H. Freeman and Company, 1977.
- [11] Falconer K., *Techniques in fractal geometry*, John Willey and Sons, 1997.
- [12] Kudrewicz J., *Fraktale i chaos*, WNT, 54, 2007.
- [13] Omiotek Z., *Zastosowanie wymiaru fraktalnego do analizy konturu obiektów*, IAP GOŚ 02/2012.
- [14] Baish J.W., Jain R.K., *Fractal and Cancer*, Perspectives in Cancer Research 60, Boston 2000.
- [15] Nayak S.R., Mishra J., *An improved method to estimate the fractal dimension of colour images*, Perspectives in Science 8, 412–416, 2016.
- [16] Plotnick R.E., *Recurrent hierarchical patterns and the fractal distribution of fossil localities*, Geology, 45(4), 295–298, 2017.

- [17] Uthayakumar R, Jayalalitha G., *Border detection of skin cancer cells with fractal dimension*, Fractals, 17, 171–180, 2009.
- [18] Hadzieva E., Bogatinoska D. C., Petroski R., Shuminoska M., Gjergjeska L., Karadimce A., Trajkova V., *Is the fractal dimension of the contour–lines a reliable tool for classification of medical images?*, MATEC Web of Conferences 76, 05002, 2016.
- [19] Carbonetto S. H., Lew S. E., *Characterization of border structure using fractal dimension in melanomas*, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc., 4088–91, 2010.
- [20] 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.
- [21] Hunter J. E., *Triaging suspicious pigmented skin lesions in primary care using the SIAscope*, MD Thesis, University of Cambridge, 2008.
- [22] 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)*, 315–325, CRC Press, 2006.
- [23] Przystalski K., Nowak L., Ogorzałek M. J., *Semantic analysis of skin lesions using radial basis function neural networks*, Human–System Interactions 2010(1), 128–132, 2010.
- [24] Przystalski K., Nowak L., Ogorzałek M. J., *Decision support system for skin cancer diagnosis*, The Ninth International Symposium on Operations Research and Its Applications ISORA'10 1, 406–413, 2010.
- [25] Przystalski K., *Detekcja i klasyfikacja barwnikowych zmian skóry na zdjęciach wielowarstwowych [rozprawa doktorska]*, Warszawa, 2014.
- [26] Dokukin M. E., Guz N. V., Woodworth C.D., Sokolov I., *Emerging of fractal geometry on surface of human cervical epithelial cells during progression towards cancer*, New J Phys., 17(3), 10, 2015.

*Magdalena Michalska

Analiza tekstury obrazów dermatoskopowych

Streszczenie: *Tekstura obrazów dermatoskopowych jest analizowana na wiele sposobów. Należą do nich metody oparte na falkach, GLCM, kolorze. Rozdział zawiera przegląd wybranych metod analizy tekstury użytych do diagnostyki czerniak skóry. Powstaje bardzo wiele aplikacji ułatwiających użytkownikom nie będącym lekarzami ocenę zmian skórnej.*

Słowa kluczowe: dermatoskopia, melanoma, analiza tekstury, falki, GLCM

Texture analysis of dermatoscopic images

Abstract: *The texture of dermatoscopic images is analyzed in many ways. These include wavelet based methods, GLCM and color. This chapter provides an overview of selected texture analysis methods used to diagnose skin melanoma. There are a lot of applications that help non-doctors evaluate skin lesions.*

Keywords: *dermatoscopy, melanoma, texture analysis, wavelets, GLCM*

1. Wstęp

Analizą tekstury obrazów cyfrowych współcześnie zajmuje się wielu badaczy. Na podstawie odpowiedniej metody na podstawie tekstury można odróżnić od siebie dwa obrazy [1]. Tekstura jest źródłem informacji o obiektach przez odwzorowanie ich struktury w obrazie, istnieje bardzo wiele tekstur. Analiza tekstury jest dość ważną operacją w przetwarzaniu obrazów medycznych.

Rozpoznawanie na obrazach cyfrowych obszarów o określonych właściwościach wykorzystywane jest w wielu dziedzinach. Należy do nich analiza zdjęć satelitarnych, metalografia i krystalografia, kontroli jakości, diagnostyce zużycia narzędzi i elementów maszyn. Diagnostyka obrazów medycznych, również dermatoskopowych jest bardzo popularna.

Jak omówiono powyżej, systemy rozpoznawania tekstur znajdują wiele zastosowań [2,3]. Problemy związane z przetwarzaniem tekstur zostały częściowo rozwiązane i trwają aktywne badania w tym zakresie. W rozdziale zostały przedstawione kilka ważnych kwestii w obszarze analizy tekstur.

Podejścia do analizy tekstur są zwykle dzielone na kategorie strukturalne, statystyczny, na podstawie modelu i metody transformacji. W celu

* mmagdamichalska@gmail.com, Katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

wyodrębnienia funkcji opracowuje się różne podejścia. Wyodrębniane są różne metody wyodrębniające miary statystyczne i cechy tekstury statystycznej obrazów dermoskopowych. Porównywane są dokładności każdej metody wykrywania nowotworów złośliwych. Miary statystyczne, które są brane pod uwagę to średnia, odchylenie standardowe, uwzględniana jest także macierz współzależności poziomu szarości (GLCM) [4]. To ona jest opisana jako deskryptor tekstury w analizie tekstury. Tekstura oparta na falkach daje lepszy sposób wydobywania nieodłącznych obiektów i właściwości obrazu medycznego.

2. Funkcje są oparte na GLCM

Wczesna i dokładna diagnoza zależy głównie od dokładności wyodrębnienia elementu i wydajności metody klasyfikacji otrzymanego wysegmentowanego obrazu. Artykuł [5] przedstawia zautomatyzowaną metodę diagnozy czerniaka.

Wyodrębnione funkcje są oparte na GLCM (ang. Grey Level Cooccurrence Matrix i korzystają z MLP do klasyfikacji obrazów łagodnej zmiany skórnej i złośliwej. Macierz współwystępowania na poziomie szarości (GLCM) jest metodą statystyczną, która bada cechy tekstury, które opierają się na relacji przestrzennej między pikselami. Jest także GLCM określane jako macryca zależności przestrzennej i rozkład współwystępowania na poziomie szarości. Teksturę obrazu można przedstawić za pomocą funkcji GLCM, w których określone wartości pary pikseli są obliczane, a relacja przestrzenna powstająca na obrazie jest reprezentowane przez GLCM. W ten sposób miary statystyczne można uzyskać z macrycy GLCM.

Wyniki wskazują, że analiza tekstur jest przydatną metodą. Automatyczny licznik iteracji jest szybszy i domyślny licznik iteracji daje lepszą dokładność (100% dla zestawu treningowego i 92% dla zestawu testowego).

Celem ekstrakcji funkcji jest zmniejszenie oryginalnych danych by rozróżnić jeden wzorec wejściowy od drugiego. Funkcje oparte są na analizie tekstury przy użyciu GLCM, które jest potężnym narzędziem do ekstrakcji poprzez mapowanie współwystępowania poziomu szarości, prawdopodobieństwa oparte na relacjach przestrzennych pikseli budujących obraz. Funkcje wyodrębnione na podstawie GLCM to autokorelacja, kontrast, korelacja, widoczność klastra, odcień klastra, odmienność, energia, entropia, jednorodność, maksymalne prawdopodobieństwo, suma kwadratów wariancji, wariancja sumy, entropia sumy, wariancja różnicy, entropia różnicowa, informacja miara korelacji, różnica odwrotna jednorodny (INV), znormalizowana różnica odwrotna (INN) i odwrotny znormalizowany moment różnicy [6].

Następnie wybierane są tylko najważniejsze funkcje. Należy zwiększyć dokładność wykrywania za pomocą rankingu wyników Fishera[7]. Ranking wyników Fishera oblicza różnicę opisaną w kategoriach średnia i standardowe

odchylenie między dodatnim a negatywnymi przykładami związanymi z pewną cechą. Naukowcy w swoich badaniach wybierają zestaw interesujących ich technik zmianienia skórnego. Należy do nich korelacja, kontrast, entropia czy widoczność klastra. Tab. 1 pokazuje funkcje GLCM dla złośliwej i łagodnej klasy znamion.

Tab. 1. Wyszaczone dzięki GLCM wartości cech dla złośliwego i łagodnego nowotwora [5]

Cecha	Złośliwy czerniak	Łagodne znamię
Kontrast	0.0956152	0.1592465
Korelacja	0.9785536	0.8042529
Informacyjna miara korelacji 1	-0.7864709	-0.5797063
Informacyjna miara korelacji 2	0.9567472	0.7898776
Różnica odwrotna jednorodny (INV)	0.9530765	0.9504054
Znormalizowana Różnica odwrotna (INN)	0.9895394	0.9881743
Odwrotny znormalizowany moment różnicy	0.9985310	0.9976929
Widoczność klastra	121.79231	23.69187
Entropia różnicowa	0.3146659	0.3507624

3. Analiza koloru i tekstury obrazu

Celem [8] jest porównać rolę cech koloru i tekstury w klasyfikacji zmian i określić, który zestaw funkcji jest bardziej dyskryminujący. W tym artykule naukowcy skupiają się na dwóch typach funkcji obrazu (kolor i faktura). Starają się ocenić wydajność. Osiągnięta przez tylko cechy koloru, tylko przez cechy tekstury i łącząc oba z nich.

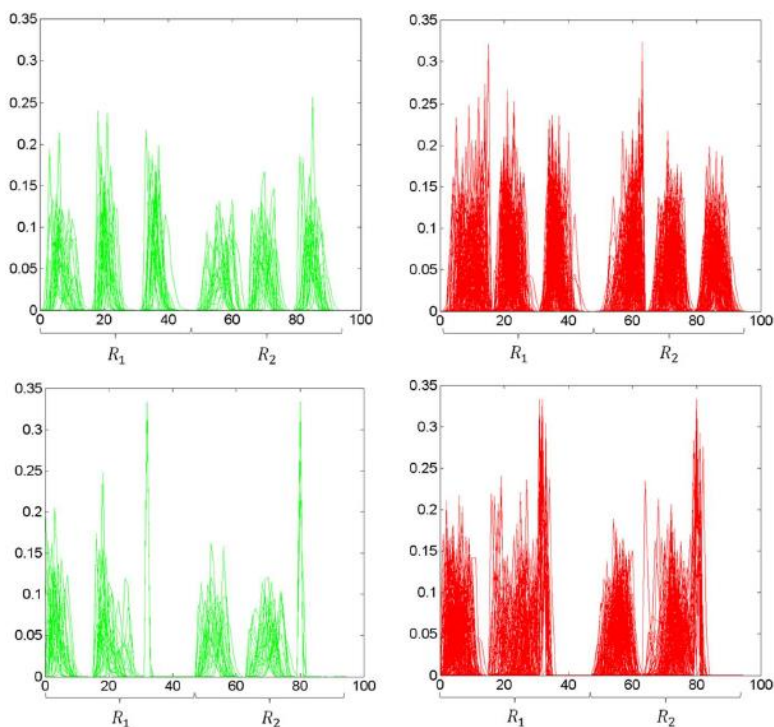
Tekstura obrazu reprezentuje przestrzenną organizację intensywności i koloru na obrazie. Niektóre metody wykorzystują statystyki pikseli. Obliczenie statystyk par sąsiadujących pikseli odbywa się przy użyciu macierzy kookurencji [9] i oblicza statystyki konfiguracji sąsiednich pikseli [10]. Tekstura została opisana również przez zastosowanie transformacji Fouriera do obrazu [11].

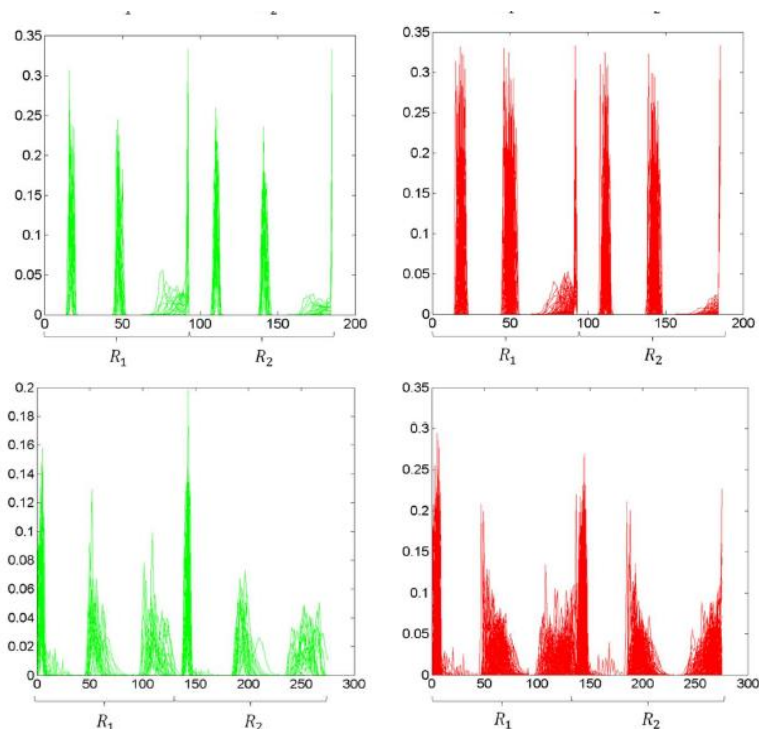
Najpopularniejszymi cechami stosowanymi w analizie dermoskopowej są kolory. W analizie obrazu brany jest pod uwagę średni kolor i wariancja kolorów [12]. Większość prac oblicza te statystyki dla składników kolorów RGB.

Przestrzeń kolorów RGB reprezentuje kolor docelowy jako mieszaninę trzech podstawowych kolorów, czerwonego (R), zielonego (G) i niebieskiego (B).

Do przedstawienia kolorów zostały zaproponowane np. biologicznie inspirowane przestrzenie kolorów, przestrzeń kolorów przeciwnika (Opp) [13], nasycenie odcienia i jasność (HSV i HSI) [14] lub percepcyjnie jednolite przestrzenie kolorów [14]. Wybór przestrzeni kolorów modyfikuje wyniki, ponieważ ich składniki prezentują różne statystyki i różne histogramy.

Na Rysunku 1 przedstawione zostały histogramy wszystkich sześciu wymienionych przestrzeni kolorów. Charakteryzujemy rozkład kolorów w obszarze uszkodzenia R (lub R1, R2) przy użyciu zestawu trzech histogramów kolorów. Stwierdzono, że funkcje koloru przewyższają funkcje tekstury gdy są jedynie stosowane i obie metody osiągają bardzo dobre wyniki.





Rys. 1. Skonsolidowane histogramy (pierwszego rzędu) RGB, (drugiego rzędu) L * u, v, (trzeciego rzędu) Opp i (czwartego rzędu) HSV dla (lewego) czerniaka i (prawego) łagodnej zmiany skórnej nie czerniaka, obliczone w R_1 i R_2 [8]

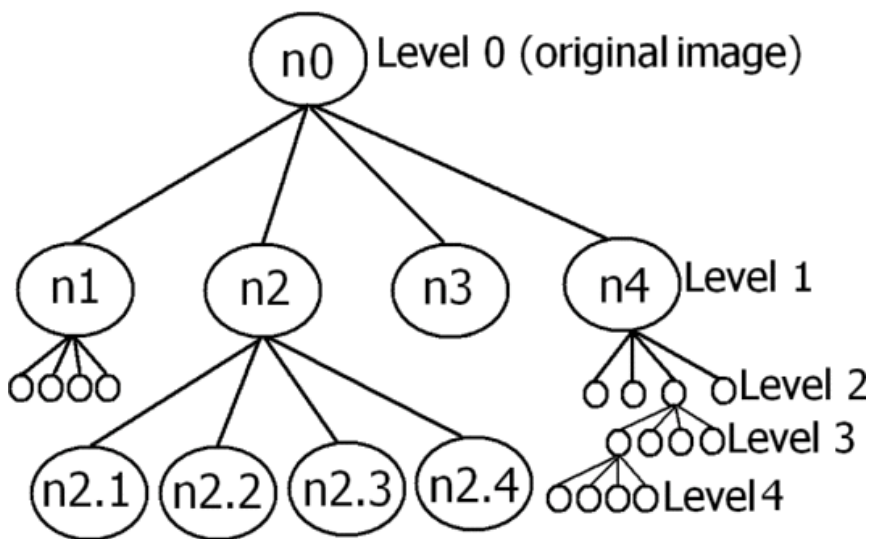
W [15] przedstawiony został system diagnostyki zmian skórnych, który segmentuje zmiany i klasyfikuje je. Proponowany system jest w stanie poradzić sobie z obrazami zmian skórnych uzyskanymi przez standardowe kamery i dermaskopy. Wprowadzamy hybrydowy model segmentacji zmian, który tworzy segmenty tekstury obrazu z korekcją oświetlenia przy użyciu techniki faktoryzacji. Następnie, w oparciu o charakterystykę tekstury skorygowanych i segmentowanych tekstur, obliczane są mapy istotności, które są łączone w celu ustalenia segmentów tekstury zmiany. W celu sklasyfikowania segmentowanej zmiany proponujemy multimodalny zestaw cech złożony z cech opartych na teksturze, kształcie i kolorze.

4. Analiza tekstury oparta na falkach

Wieloskalowe właściwości falek sprawiają, że analiza tekstury falkowej jest użyteczną techniką analizy obrazów dermoskopowych, ponieważ obrazy te są często wykonywane w różnych okolicznościach. Wyróżniane są struktury falkowe o strukturze piramidy i o strukturze drzewa [16, 17].

W [18] cechy tekstury pochodzą z zastosowania rozkładu falkowego, cechy granicy pochodzą z budowy modelu szeregów granicznych granicy zmianyskórnej i analizy jej w domenach przestrzennych i częstotliwościowych, a cechy geometryczne pochodzą z indeksów kształtów. Zoptymalizowany wybór cech uzyskuje się za pomocą metody współczynnika wzmocnienia, która okazała się być obliczeniowo wydajna w diagnostyce czerniaka. W tym artykule ekstrakcję cech opartą na fakturze osiągnięto poprzez zastosowanie czteropoziomowego rozkładu struktury falkowej o strukturze drzewa na kanały kolorów czerwonego, niebieskiego, zielonego i luminancji obrazów dermoskopowych. Proponowane są różne miary statystyczne i współczynniki w celu uzyskania użytecznych informacji ze współczynników falkowych i wykorzystywane do klasyfikacji [19].

Rysunek 2 przedstawia schemat drzewa falki z węzłami zaznaczonymi okręgami. dla każdego kanału koloru. Miary są stosowane na oryginalnym obrazie (zwanym poziomem 0), a także na współczynnikach falkowych każdego węzła (podobrazie) drzewa falek. Drzewo falkowe ma łącznie 341 węzłów i jest bardziej użyteczne dla klasyfikacji obrazów czerniaka, ponieważ może uchwycić zarówno ogólne właściwości, jak i szczegółową strukturę i wewnętrzną teksturę zmiany.



Rys. 2. Schematyczne czteropoziomowe drzewo falkowe z węzłami w okręgach [18]

5. Aplikacje

Od ostatnich lat dąży się do dotarcia do coraz to większej liczby pacjentów, którzy obawiają się o stan swoich znamion skórnych. W tym celu stworzono

wiele aplikacji, których można używać w prosty i łatwy sposób z pomocą tylko telefonu komórkowego lub tabletu z aparatem fotograficznym i dostępem do internetu. Należy do nich *Mole Detective*, *Doctor Mole*, *SpotMole*. Obie aplikacje *MelApp* i *Mole Detective* twierdzą, że zapewniają automatyczną analizę znamion i zmian skórnych pod kątem objawów czerniaka i zwiększają szanse konsumentów na wykrycie czerniaka we wczesnych stadiach nowotworu skóry. Aplikacje te zapewniają podstawową funkcję oceny zagrożenia przekształcenia się zmiany skórnej w nowotwór. Wspomniane aplikacje zawierają archiwizację, porównanie wykonanych fotografii i wcześniejszych wyników, przypominają o wykonaniu kolejnego badania, definiują umiejscowienie zmiany, informują o czynnikach zwiększających prawdopodobieństwo wystąpienia czerniaka [20–22].

Nowa aplikacja o nazwie *Mole Detect Pro* zapewnia użytkownikom zdalną profesjonalną diagnozę w ciągu 24 godzin. Aby to zrobić, bezpiecznie przechowuje zdjęcia zmian skórnych i wykorzystuje zaawansowany algorytm do oceny prawdopodobieństwa możliwego czerniaka w oparciu o metodę wykrywania ABCDE. Dermatolodzy często poruszają ten akronim podczas kontroli i proszą swoich pacjentów, aby pilnowali objawów w domu.



Rys.3. Widok z aplikacji Mole Detective [22]

Aplikacja *Mole Detective* w szybki sposób diagnozuje zdjęcie zmiany skórnej. Analizuje ją pod kątem jej symetrii, koloru, granic, średnicy i rozmiaru.

Na Rysunku 3 przedstawiony został rzut z ekranu smartphona, gdzie zmiana skórna została zdiagnozowana jako łagodna, co ukazano żółtym kwadratem na środku ekranu. Otrzymałą diagnozę użytkownik może zapisać i prowadzić dalszą obserwację swojej zmiany skórnej. Zapisane dane można porównywać ze sobą i obserwować jej zmianę w czasie.

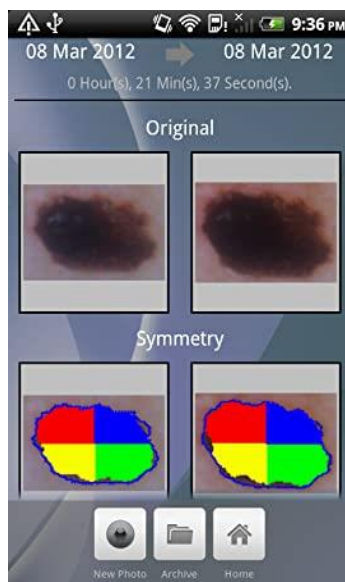
MelApp to aplikacja, która zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia czerniaka przez użytkownika, pod warunkiem, że użytkownik nie wprowadza w błąd aplikacji nie wprowadzając fałszywych danych. Aplikacje o wysokiej skuteczności sprawdzonej na obrazach zdiagnostyki klinicznej uważane są za urządzenia medyczne. MelApp stwierdził, że użył chronionych patentem algorytmów matematycznych i technologii rozpoznawania wzorców opartych na obrazie do analizy przesłanego obrazu zmiany skórnej. Mole Detective [23] to aplikacja do obliczania objawów czerniaka bezpośrednio na telefonie, może również analizować obraz za pomocą metody ABCDE i podać czynnik ryzyka w oparciu o objawy. Może przyczynić się ona do ratowania życia poprzez wczesne wykrycie potencjalnie śmiertelnego czerniaka za pomocą oprogramowania do rozpoznawania kształtów zmiany skórnej.

Aplikacja *Doctor Mole* posiada bardziej rozbudowane menu użytkownika. Zmiana skórna jest analizowana pod wieloma kątami. Rysunek 4b ukazuje oryginalny obraz analizowanej zmiany skórnej. Użytkownik w początkowym etapie wybiera zdjęcie, które ma zostać poddane analizie. Analizowane jest wówczas ryzyko (risk) – oceniany jest wtedy poziom asymetrii, granic i koloru (Rysunek 4a). Na Rysunku 4c została przedstawiona pełna diagnoza zmiany z opisem wszelkich nieprawidłowości. Tutaj w szczegółowy sposób została przeanalizowana procentowa asymetria, barwa znamienia i jej granice. Aplikacja umożliwia naukę oceny znamienia, dzięki zawarciu w niej rozbudowanego opisu każdego z diagnozowanych elementów zmiany. Na Rysunku 4d znajduje się pełny opis analizy koloru zmiany, co pozwoli użytkownikowi poznać tajniki oceny znamienia.

Powstały również aplikacje pozwalające użytkownikowi na podstawie określonych kryteriów pomocniczych samodzielnie analizować znamienia skórne. Do aplikacji tych należy zaliczyć *Skin Mole Analysis*, *Skin Scanner*, *Track-A-Mole*, *Mole Checker*. Jedną z aplikacji pozwalającą na konsultację z lekarzem dermatologiem w celu uzyskania głębszej diagnozy jest *iDoc24 Ask the dermatologist!*.



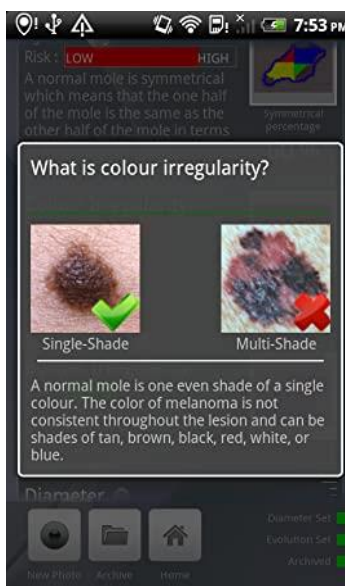
(a)



(b)



(c)



(d)

Rys. 4. Widok z aplikacji Mole Doctor Mole [23]

6. Wnioski

Czerniak uważany za najbardziej niebezpieczny rodzaj raka skóry. Diagnoza czerniaka wymaga dużego doświadczenia, ponieważ dla niedoświadczonej osoby jego różne etapy mogą wyglądać identycznie. Automatyczna diagnoza jest niezbędnym narzędziem dla mniej doświadczonych lekarzy. Zautomatyzowane systemy klasyfikacji czerniaka są stosowane na obrazach dermoskopowych jako narzędzie wspomagające wczesną diagnozę czerniaka złośliwego i melanocytowych zmiany patologicznych. W procesie tworzenia takich narzędzi bardzo przydatna okazuje się analiza tekstury.

Analiza tekstur odnosi się do charakteryzacji regionów na obrazie według zawartości ich tekstury. Analiza tekstur jest stosowana w wielu różnych aplikacjach, teledetekcji, automatycznej kontroli i medycznym przetwarzaniu obrazu. Analiza tekstur obrazów medycznych to solidna technika diagnozowania chorób i przyszłość zaburzeń biofizycznych w ciele. Przetwarzanie obrazu ma istotny wpływ na proces podejmowania decyzji medycznych, a nawet na działania chirurgiczne. Pacjent dzięki mobilnym aplikacjom może obserwować w czasie podejrzaną zmianę skórną i dodać się pełnej diagnostyce u lekarza dermatologa.

Literatura

- [1] Tamura H., Mori S., Yamawaki T., *Textural Features Corresponding To Visual Perception*, IEEE Trans. On Systems, Man And Cybernetics SMC, 8(6), 460–473, 1978.
- [2] Binder M, Steiner A, Schwarz M, Knollmayer S, Wolff K, Pehamberger H., *Application of an artificial neural network in epiluminescence microscopy pattern analysis of pigmented skin lesions: a pilot study*, Br J Dermatol, 130, 460–465, 1994.
- [3] Wiltgen M., Gerger A., Smolle J., *Analysis may be a useful method for the interpretation of melanocytic skin tumors*, Computer aided diagnosis of melanocytic tumors, 69 (1), 17–28, 2003.
- [4] Properties of gray-level co-occurrence matrix – MATLAB graycoprops, [Online], <http://www.mathworks.com/help/images/ref/graycoprops.html>. [dostęp: 24-Mar-2020].
- [5] Sheha M. A , Mabrouk M. S., Sharawy A., *Automatic detection of melanoma skin cancer using texture analysis*, International Journal of Computer Applications, 42(20), 0975–8887, 2012.
- [6] Gipp M., Marcus G., Harder N., Suratane A., Rohr K., König R., Männer R., *Haralick's Texture Features Computed by GPUs for Biological Applications*, IJCS, 36(1), 1–09, 2009.

- [7] Golub T., Slonim D., Tamaya P., Huard C., Gaasenbeek M., Mesirov J., Coller H., Loh M., Downing J., Caligiuri M., Bloomfield C., Lander E., *Molecular Classification of cancer: Class discovery and class prediction by gene expression monitoring*, Science, (286), 531–537, 1999.
- [8] Barata C., Ruela M., Francisco M., Mendonça T., Marques J. S., *Two Systems for the detection of melanomas in dermoscopy images using texture and color features*, IEEE Systems Journal, 8(3), 1–15, 2013.
- [9] Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I., *Textural features for image classification*, IEEE Trans. Syst., Man Cybern. SNC, 3(6), 610–621, 1973.
- [10] Ojala T., Pietikäinen M., Harwood D., *A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions*, Pattern Recog., 29(1), 51–59, 1996.
- [11] Azencott R., Wang J., Younes L., *Texture classification using windowed Fourier filters*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 19 (2), 148–153, 1997.
- [12] Iyatomi H., Oka H., Celebi M. E., Hashimoto M., Hagiwara M., Tanaka M., Ogawa K., *An improved Internet-based melanoma screening system with dermatologist-like tumor area extraction algorithm*, Comput. Med. Imaging Graph., 32(7), 566–579, 2008.
- [13] Bratkova M., Boulous S., Shirley P., *A practical opponent color space for computer graphics*, IEEE Comput. Graph. Appl., 29(1), 42–55, 2009.
- [14] Tkalcic M., Tasicl J., *Colour spaces: Perceptual, historical and applicational background*, Proc. IEEE Region 8 EUROCON_Computer as a Tool, 1, 304–308, 2003.
- [15] Saleem A., Bhatti M. N. A., Ashraf M. A., Zia M., Mahmood H., *Segmentation and classification of consumer-grade and dermoscopic skin cancer images using hybrid textural analysis*, J. of Medical Imaging, 6(3), 034501, 2019.
- [16] Scheunders P., Livens S., Van de Wouwer G., Vautrot P., Van Dyck D., *Wavelet-based texture analysis*, Journal on Computer Science And Information Management, 1(2), 22–34, 1998.
- [17] Van de Wouwer G., Scheunders P., Van Dyck D., De Bodt F., Van de Heyning P. H., *Wevelet-filvg class for speech analysis*, Proc. Int. Conf. Patt. Rec., Wiedeń, 1996.
- [18] Garnavi R., Aldeen M., Bailey J., *Computer-aided diagnosis of melanoma using border- and wavelet-based texture analysis*, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 16(6), 1239–1252, 2012.
- [19] Vautrot P., Bonnet N., Herbin M., *Comparative study of different spatial/spatrial-frequency methods (gabor filters, wavelets, wavelet packets*, IEEE Int. Conf. Proc., 3, 145–148, 1996.

- [20] Cook W., *Daily mail: Is that little mole a big problem? ask doctor mole, the smartphone app that checks for signs of skin cancer*, <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2212200> [dostęp:12.02.2014].
- [21] Doctor-Mole-The-smartphone-app-checks-signs-skin-cancer.html, [dostęp:12.02.2014].
- [22] <https://www.mobihealthnews.com/40770/ftc-fines-two-melanoma-risk-detection-apps-melapp-and-mole-detective>
- [23] <https://www.amazon.com/Doctor-Mole/dp/B007P8GA36>

Przegląd proponowanych strategii realizowanych przez algorytmy matematyczne w procesie V2G

Streszczenie: Artykuł stanowi pracę przeglądową proponowanych w opracowaniach naukowych algorytmów matematycznych możliwych do zastosowania w ramach szeroko pojętej technologii V2G. Przedstawiono ich możliwe wykorzystywanie dla różnych strategii funkcjonowania V2G w rynku energii. Widoczne są różne wizje dotyczące struktury systemu zarządzania usługą V2G, jednakże wspólnym mianownikiem jest podobny sposób prezentowania mechanizmu ich realizacji. Ponadto, wyjaśniono punkty optymalizacyjne dla stosowanych algorytmów oraz sposoby ich realizacji.

Słowa kluczowe: Elektryczny pojazd (EV), Vehicle to Grid (V2G), Algorytmy, Smart Grid, Agregator

Review of proposed strategies implemented through mathematical algorithms in the V2G process

Abstract: This paper is a revision of the proposed work in scientific studies of possible mathematical algorithms for use in the V2G technology. The possible use of algorithms for various strategies of V2G functioning in the energy market is presented. Various visions are visible regarding the framework service management system V2G, however, the common denominator is a similar way of presenting the mechanism for implementation. In addition, optimization points for the algorithms used and methods of implementation were explained.

Keywords: Electric Vehicle (EV), Vehicle to Grid (V2G), Algorithm, Smart Grid, Aggregator

1. Wstęp

Od kilku lat rosnąca świadomość zagrożeń dla naszej cywilizacji związanych z paliwami kopalnianymi w dalszym ciągu wykorzystywanymi w sektorze energetycznym, transportowym, przemysłowym ukierunkowuje poszukiwania naukowców na tor badań pozwalających ograniczać wykorzystywanie środowiska naturalnego [1]. Tym samym następuje transformacja energetyczna oraz stopniowe odejście poszczególnych państw od wykorzystywania tradycyjnych surowców energii takich jak węgiel czy ropa naftowa. Aktualnie Rada Europy zatwierdziła pełny proces dekarbonizacji w ww. sektorach dla

* (1) Bartłomiej.Mroczek@pollub.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

(2) Energa S.A. Grunwaldzka 472, 80–309 Gdańsk

państw członkowskich do roku 2050 [2]. Elementem łączącym wyżej wymienione sektory są między innymi samochody elektryczne (EV) jako zrównoważone rozwiązanie w odpowiedzi na zapotrzebowanie nowych wyzwań środowiskowych [3]. EV posiadają duży potencjał w zakresie mobilnego akumulowania energii dla różnych punktów w sieci energetycznej i stanowią, oprócz odnawialnych źródeł energii, istotny element inteligentnych sieci energetycznych (smart grid) [4].

Zważywszy na fakt, iż zgodnie z prognozami, roczny przyrost EV będzie znaczący, zwiększy się zapotrzebowanie na dodatkową moc i energię w systemie energetycznym. Ponadto, wzrośnie konieczność budowy nowych fragmentów sieci elektroenergetycznej lub ich modernizacja [5]. Zatem, w sposób naturalny, powstaje potrzeba budowania modeli optymalizacji bilansu energetycznego i kosztowego dla sieci klasy smart grid [6,7].

Jedną z metod proponowaną w literaturze naukowej jest wykorzystanie istniejących zasobników energii elektrycznej z pojazdów EV za pomocą układów przekształtnikowych, do dwukierunkowej współpracy z siecią niskiego napięcia, nazwaną V2G (vehicle to grid) [8]. Liczne publikacje naukowe wskazują na znaczące zalety techniczne i ekonomiczne zastosowania rozwiązania V2G [9,10,11]. Przede wszystkim zwiększenie stabilności i niezawodności sieci elektroenergetycznej, niższe koszty jej funkcjonowania (organicznie strat sieciowych, zaangażowania dużych jednostek mocy w systemie w okresie szczytu zapotrzebowania) oraz przechowywanie jako zapas energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii. Ze względu na udział wielu interesariuszy w rynku energii, koncepcja V2G umożliwia uzyskanie wielu korzyści z jej zastosowania dla różnych stron. W związku z tym na świecie prowadzone są badania naukowe budujące różne strategie zastosowania V2G dla poszczególnych ról procesowych (Operator Systemu Dystrybucyjnego, Agregator, Operatora Punktu Ładowania, Użytkownik EV, itd.) [12,13,14,15].

Motywacją autora do przeprowadzenia badań przeglądowych literatury było przede wszystkim ustrukturyzowanie prezentowanych w badaniach strategii zastosowania V2G, opis modeli strukturalnych V2G i mechanizmu ich funkcjonowania. Analiza i uszeregowanie proponowanych algorytmów matematycznych, a także ich klasyfikacja dla obszaru strategii. W kręgu zainteresowania przeglądowymi badaniami pozostaje również możliwość implementacji planowanych w literaturze rozwiązań oraz ewentualne doświadczenia z wdrożeń.

W rozdziale drugim została opisana idea V2G zbudowana przez pomysłodawcę koncepcji Kempton'a i Letendre. Opis idei stanowi punkt wyjścia do zrozumienia problematyki badawczej zagadnienia i ustrukturyzowania przywoływanych strategii V2G w literaturze. W rozdziale trzecim zaprezentowano dwa podstawowe systemy strukturalne stosowane w przez autorów w pracach naukowych. Dodatkowo opisano przykładowe strategie proponowane dla V2G wraz z powiązanymi funkcjami celu. Dla

właściwego zrozumienia logiki funkcjonowania V2G opisany został mechanizm realizacji algorytmu z podziałem na optymalizacje funkcji celu w obszarze on/offline. W rozdziale czwartym opisano rodzaje funkcji stosowanych w V2G oraz sposoby matematyczne ich optymalizacji. Na podstawie przeglądu literatury przywołano różne typy algorytmów wykorzystywanych na rzecz interesariuszy usługi V2G. W rozdziale piątym zaprezentowano potencjał projektów B+R w obszarze V2G realizowanych na świecie. Wykonano przegląd publikacji pod kątem prezentacji doświadczeń z wdrożeń proponowanych przez autorów algorytmów V2G.

2. Cele idei V2G

Idea V2G po raz pierwszy została opracowana w 1997 r. przez Kempton'a i Letendre [8]. U podstawy zaprezentowanego przez nich konceptu V2G leży zasada wzajemnej interakcji pomiędzy siecią energetyczną, a samochodem elektrycznym (EV). Interakcja polega nie tylko na dostawie energii elektrycznej dla EV, ale również poborze energii elektrycznej przez sieć energetyczną z EV jako źródła mocy i energii. Pierwsza idea V2G identyfikuje dla procesu świadczonych usług, funkcje celu w trzech obszarach. W ten sposób zostały zdefiniowane pryncypia przyszłych strategii stosowania nowej idei, gdzie pierwszy obszar to kontrola obciążenia/profilu w systemie energetycznym. Samochód elektryczny może pełnić rolę sterowanego punktu obciążenia w dwojaki sposób. W przypadku nadmiaru energii elektrycznej, zasobnik będzie wykorzystywany do odbioru energii z systemu elektroenergetycznego [16]. Taki przypadek może być zastosowany, gdy istnieje nadwyżka bilansowa energii generowanej przez odnawialne źródła energii (OZE)–rys.1, obszar 1A. Produkcja z OZE powoduje przepływ mocy w górę poprzez punkt węzłowy stację SN/nN. Wynika to z faktu, iż w danym momencie t nie ma pełnego zapotrzebowania na moc po stronie odbioru w danym fragmencie sieci nN. Taki przypadek może zaistnieć, gdy mamy do czynienia z bardzo dużą penetracją instalacji OZE [17]. W przypadku drugim (rys.1, obszar 1B) pobór energii z sieci jest poniżej wartości średniej profilu obciążenia danego fragmentu sieci [18]. Stanowi to potencjał na dociążanie sieci nN w jej dolinach.

$$\sum_{i=1}^n P_{obci\acute{a}żenia} (n) \times t \leq \sum_{i=1}^z P_{EV} (z) \times t, \quad (1)$$

$$\Lambda \sum_{i=1}^z SOC_{CH} (z) \geq E_{obci\acute{a}żenia} (t) \times [1 + \sum_{i=1}^z \eta(z)] \quad (2)$$

gdzie:

$P_{obci\acute{a}żenia}$ – wartość mocy czynnej wymagana do redukcji obciążenia przez system elektroenergetyczny w danym punkcie sieci nN

w czasie t (kW);

- P_{EV} – wartość mocy czynnej możliwa do odebrania przez EV w danym punkcie sieci nN w czasie t (kW);
- SOC_{CH} – wartość pojemności ogniwa EV dla ładowania (kWh);
- $E_{obciążenia}$ – wartość energii elektrycznej wymagana do odebrania w danym punkcie sieci nN w czasie t (kW);
- η – sprawność układu przetwornic statycznych AC/DC/DC;
- n, z – wartości argumentów.

Drugi obszar zastosowania V2G to wsparcie popytu na pobór energii z sieci energetycznej (rys.1, obszar 2). Rozwiązanie może stanowić w przyszłości element redukcji peak'ów szczytowego obciążenia systemu elektroenergetycznego, gdzie energia z EV będzie do niego oddawana [19].

$$\sum_{i=1}^n P_{obciążenia}(n) \times t \leq \sum_{i=1}^z P_{EV}(z) \times t, \quad (3)$$

$$\Lambda \sum_{i=1}^z SOC_{DCH}(z) \geq E_{\Delta Peak}(t) \times [1 + \sum_{i=1}^z \eta(z)] \quad (4)$$

gdzie:

- $P_{\Delta Peak}$ – wartość mocy czynnej wymagana do redukcji peak'ów przez system elektroenergetyczny w danym punkcie sieci nN w czasie t (kW);
- P_{EV} – wartość mocy czynnej możliwa do oddania przez EV w danym punkcie sieci nN w czasie t (kW);
- SOC_{DCH} – wartość pojemności ogniwa EV dla rozładowania (kWh);
- $E_{\Delta Peak}$ – wartość energii elektrycznej wymagana do oddania danym punkcie sieci nN w czasie t (kW);
- η – sprawność układu przetwornic statycznych AC/DC/DC;
- n, z – wartości argumentów.

Ostatni trzeci obszar (rys.1, obszar 3) to ograniczenie kosztów dla wszystkich stron zaangażowanych w V2G. Przede wszystkim mowa o poszukiwaniu optymalnego rozwiązania do zarządzania profilem obciążenia danego fragmentu sieci nN przy założeniu, że usługa będzie korzystna dla obu stron (systemu energetycznego i użytkownika EV) [20, 21, 22].

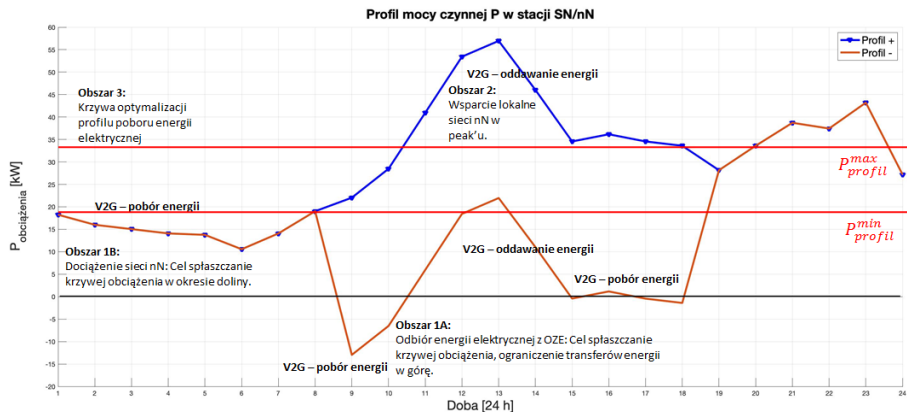
$$P_{profil}^{min} \leq \sum_{i=1}^n P_{odbiorca}(n) \pm \sum_{i=1}^z \Delta P_{EV}(z) \leq P_{profil}^{max} \quad (5)$$

$$\Delta P_{EV}(z) = [U_n \times U_z \times G_{nz} \cos \varphi_{nz}] \pm P_{EVz} \quad (6)$$

gdzie:

- P_{profil} – profil mocy czynnej w punkcie węzłowym (transformator SN/nN) (kW);
- $P_{odbiorca}$ – wartość mocy czynnej profilu obciążenia po stronie odbiorcy 1: n (kW);
- ΔP_{EV} – wartość mocy czynnej możliwa do regulacji przez EV pomiędzy węzłami n:z sieci nN w czasie t (kW);
- P_{EVz} – wartość mocy czynnej możliwa do regulacji przez EV w danym punkcie sieci nN 1: z w czasie t (kW);
- U_n – wartość napięcia w danym punkcie 1: n (V);
- U_z – wartość napięcia w danym punkcie 1: z, gdzie świadczona jest usługa V2G (V).

Reasumując, autorzy pierwotnej koncepcji V2G zaproponowali, że rozwiązanie będzie miało zastosowanie do sterowania profilem sieci elektroenergetycznej (z OZE: „profil –”, lub bez OZE „profil +”) na dobowy szczyt i dolinę dostaw energii elektrycznej oraz jej parametry techniczne. Na podstawie przykładowego profilu sieci nN zaprezentowany został wyżej opisany mechanizm na rys. 1. Zastosowanie koncepcji zgodnie z ideą wpłynie na ograniczenie kosztów funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jak również kosztów ponoszonych przez strony zaangażowane w proces V2G. Wyżej wymienione obszary stanowią punkt wyjścia do opracowania algorytmów matematycznych w celu automatyzacji procesu V2G i osiągnięcia założonych pryncypiów idei.



Rys.1. Idea V2G wraz z obszarami zastosowania

Warty zauważenia jest fakt, iż innowatorzy koncepcji V2G zdefiniowali role procesowe dla przyszłych strategii, uwzględniając min. użytkownika pojazdu elektrycznego. Ze względu na znaczącą udział w procesie, dla użytkownika pojazdu przewidziano dedykowany interfejs „*Auto Charge Controller*”[8]. Użytkownik pojazdu elektrycznego sam definiuje, bufor pojemności ogniwa, który będzie potrzebny do wykonania usługi V2G w zakresie jego ładowania i rozładowywania.

3. Systemy strukturalne dla V2G

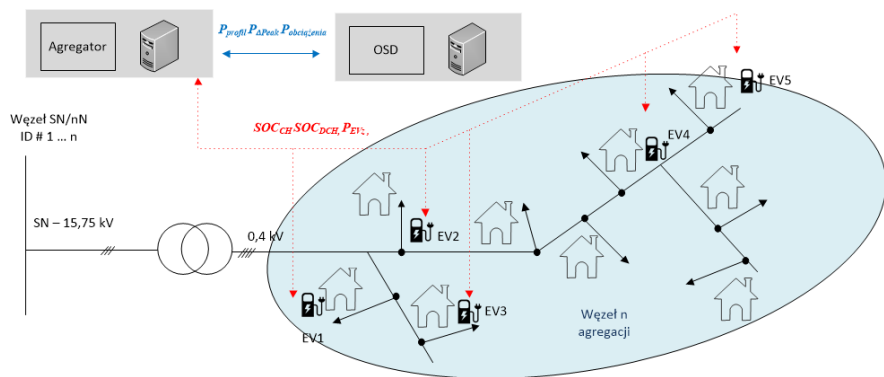
Twórcy idei V2G w swojej koncepcji zauważyli potrzebę budowy wspólnej topologii fizycznej i logicznej pomiędzy punktem ładowania jako elementem wykonawczym (dwa kierunki przepływu energii), a centralną jednostką sterującą [8]. W ten sposób narodziła się pierwsza architektura dla systemów strukturalnych (ang. *system framework*), umożliwiających logiczne sterowanie zdefiniowanymi funkcjami celu dla V2G. Funkcje celu, które mogą być realizowane na rzecz systemu elektroenergetycznego można ze sobą łączyć w pakiety tworząc strategię V2G. W tabeli nr 1, przedstawiono przykładowe strategię oparte o formułę V2G.

Tab. 1. Strategie V2G opisane w literaturze

Scenariusz dla strategii	Funkcja celu $f(x)$	Opis strategii
Pierwszy [23]	$P_{\text{profil_nN}}(t, R_{\text{nN}}, L_{\text{nN}}),$ $LF_i (P_n, P_{\text{odbioru}}),$	Skoordynowane ładowanie i rozładowywanie EV z profilem sieci nN. Optymalny dobór obciążenia sieci nN (współczynnik obciążenia).
Drugi [24]	$P_{\text{profil_nN_OZE}}(t, R_{\text{nN}}, L_{\text{nN}}, P_{\text{mpp}}),$	Skoordynowane ładowanie i rozładowywanie EV z profilem sieci nN i produkcją energii z OZE.
Trzeci [25]	$SOC(t, C_{\text{max}}, C_{\text{min}})$ $CC/CV(t)$ $DOD(T, \text{liczba cykli})$	Optymalizacja ilości ładowania i rozładowywania zasobnika energii, ograniczenie głębokości rozładowania.
Czwarty [26]	C_{DC} C_{pl} C_{CO2} C_{V2G}	Optymalizacja kosztów: – użytkownika pojazdu, – zanieczyszczenia powietrza,

		– emisji CO ₂ , – odsprzedaży energii z EV.
Piąty [27]	$U_N(Q)$ $f_N(P)$	Regulacja parametrów technicznych sieci energetycznej.
Szósty [28]	CFE(n-1, n-1-1)	Wsparcie awarii kaskadowych w sieci elektroenergetycznej.

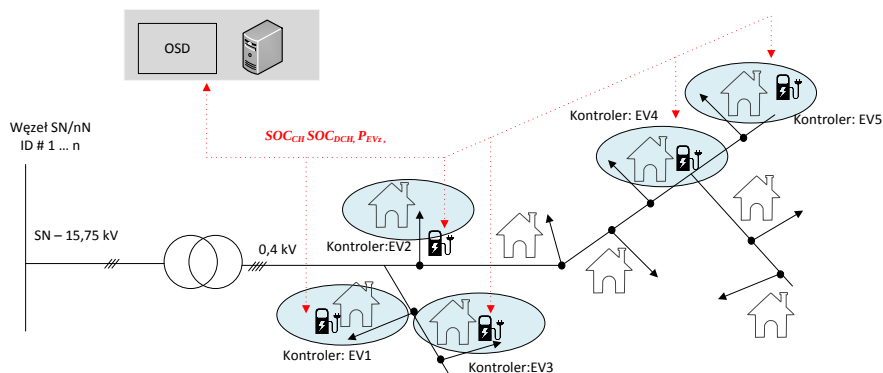
Autorzy artykułów naukowych prowadzących badania w obszarze V2G proponują zastosowanie dwóch głównych systemów *framework* [29]. Istnieją liczne modyfikacje tzw. hybrydy, jednakże podstawową różnicą jest miejsce podejmowania decyzji w zakresie realizacji scenariuszy strategicznych. Pierwszy z nich centralnie zarządzany przez nową rolę procesową w rynku energii–„Agregator” [30, 31]. Rolą Agregatora jest przede wszystkim optymalizacja kosztów funkcjonowania zdefiniowanych usług na rzecz użytkownika EV i operatora systemu dystrybucyjnego (OSD). Agregator działa hierarchicznie w oparciu o informacje/dane zbierane przez kontrolery globalne i/lub lokalne ze strony sieci energetycznej, dane z rynku energii oraz komunikację z użytkownikami EV. Poziom agregacji danych/informacji przypisany jest do danego obszaru, a technicznie do danego węzła np. SN/nN.



Rys.2. System strukturalny zarządzany centralnie

Drugi system strukturalny jest zdecentralizowany. Poszczególni użytkownicy sami podejmują decyzję w zakresie realizacji danych funkcji wymaganych przez OSD tj. udostępnienia w danym czasie mocy z zasobnika EV [32, 33]. Użytkownicy poprzez dedykowany interfejs i/lub kontroler współpracują z OSD.

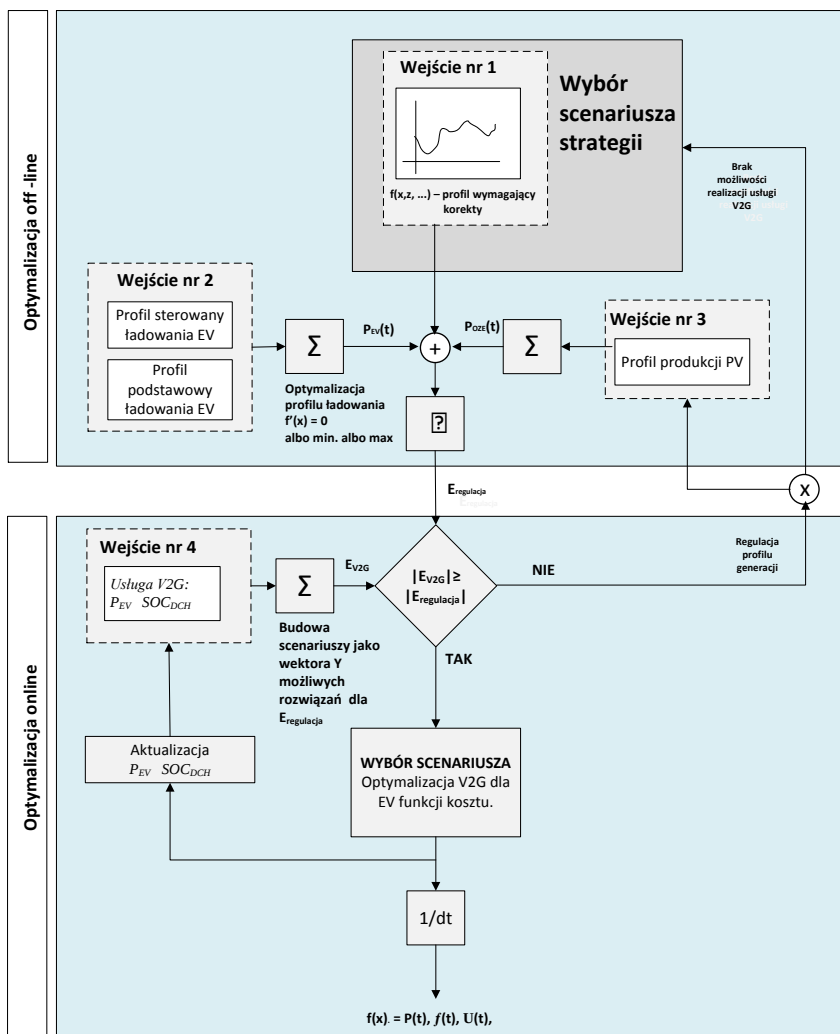
Sposób realizacji takiej struktury możliwy jest poprzez rozproszonych „Agentów” współpracujących bezpośrednio w danym węźle sieci energetycznej.



Rys.3. System strukturalny zarządzany lokalnie

Dodatkowo, dwa systemy strukturalne różnią się w zakresie złożoności obliczeniowej, elastyczności implementacji oraz sposobu wymiany informacji. Miejsce optymalizacji znajduje się w dwóch różnych ośrodkach decyzyjnych. Pierwszy na poziomie Agregatora zaś drugi na poziomie OSD.

Dla zobrazowania funkcjonowania struktury zarządzania V2G na rysunku nr 4 zaprezentowano mechanizm jego działania. W algorytmie istotne jest wskazanie strategii np. jednej z przywołanych w tabeli nr 5. To ona determinuje jakimi danymi trzeba zasilić mechanizm V2G. Mechanizm posiada dwa fragmenty optymalizacyjne. Pierwszy w trybie offline polegający na wyznaczaniu, na bazie danych historycznych, czasowego odchylenia $t_0 : t_n$ od wartości oczekiwanych identyfikując funkcję $f(x)$. Optymalizacja polega na zbudowaniu harmonogramu ładowania dla EV uwzględniającego generację z OZE oraz profil odbiorców końcowych. Jeżeli odchylenie w danym okresie t jest powyżej/poniżej wartości dopuszczalnej, wymagana jest kolejna optymalizacja innymi mechanizmami i uruchamiany jest kolejny tryb. Drugi tryb online, posiada mechanizm iteracyjny $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ (równania 1 – 6) i dąży do wyznaczenia optimum dla funkcji celu na bazie możliwych aktualnie rozwiązań i optymalnych kosztów. Autorzy publikacji wskazują, że im większa populacja EV zaangażowana w mechanizm V2G, tym efektywność i skuteczność danej strategii jest większa [34, 35]. Należy podkreślić fakt, iż istotne poznanie i nauczanie się natury sterowanego obiektu, w tym przypadku sieci nN, pojazdów EV oraz profili produkcji jednostek OZE [36, 37].



Rys.4. Mechanizm V2G w ujęciu algorytmu ogólnego dla węzła n

gdzie:

- $P_{EV}(t)$ – wartość optymalna mocy czynnej pobieranej przez EV(kW);
- $P_{OZE}(t)$ – wartość mocy czynnej generowanej w węźle (kW);
- E_{V2G} – wartość energii elektrycznej dostępna w V2G w czasie $t_0 : t_n$ (kWh);
- $E_{regulacja}$ – wartość energii elektrycznej wymagana do regulacji w czasie $t_0 : t_n$ (kWh).

4. Algorytmy stosowane w poszczególnych strategiach

A. Rodzaje funkcji celu

Wybór danej strategii do zastosowania dla V2G, determinuje jednoznacznie wybór funkcji celu $f(x)$, przykładowe zostały wskazane w tabeli nr 1. Funkcja celu reprezentuje dane wejściowe oraz ich rozkład. W przypadku, gdy funkcja jest znana oraz rozwiązanie równania różniczkowego opisującego dynamikę funkcji ma postać algebraiczną mamy do czynienia rozwiązaniem liniowym. Funkcja regresji przyjmuje postać zapisaną równaniem nr 7[38].

$$\hat{y} = ax + b \quad (7)$$

gdzie:

$\hat{y}_i$ – wartość zmiennej zależnej danej funkcji $f(x)$;

x – empiryczna wartość zmiennej niezależnej;

a – współczynnik regresji;

b – wyraz wolny.

W przypadku, gdy funkcja celu $f(x)$ i jej przebieg nie jest liniowy, ale jest możliwa do opisanie, mówimy wówczas o regresji wielomianowej. Funkcja przyjmuje postać zapisaną równaniem nr 8 [39, 40].

$$\hat{y} = a_1x + a_nx^n + b \quad (8)$$

gdzie:

n – stopień wielomianu.

Istnieje również możliwość zbudowania funkcji celu w oparciu o zbiór k zmiennych niezależnych $x_1, x_2, \dots, x_k$, a wpływających na wartość zmiennej zależnej Y . Taka funkcji celu będzie miała formę regresji wielorakiej, dla modelu liniowego zapisaną w postaci równania nr 9, a dla modelu nieliniowego nr 10 [41].

$$\hat{y} = a_1x_1 + a_kx_k + b \quad (9)$$

$$\hat{y} = a_1x_1 + a_kx_k^n + b \quad (10)$$

W przypadku konstruowania funkcji celu, gdy wartości oczekiwania zmiennej objaśniającej x od zmiennej objaśnianej $Y = f(x)$ nie są możliwe do opisanie ani w postaci regresji liniowej ani nieliniowej, wymagana jest budowa

modelu dopasowanego do danej próby. Zmienne objaśniające i objaśniane z błędem ε opisują matematycznie, z przybliżeniem dane zjawisko. Tworzona jest macierz X obserwacji dokonanych w n – elementowej próbie na $k+1$ zmiennych niezależnych. Otrzymujemy wektor y w n –elementowej próbie zmiennych zależnych [42]. Jest to zbiór rozwiązań dla $Y = (y_1, y_2, \dots y_n)$.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y = f(x_{nk}, \beta) + \varepsilon \quad (12)$$

gdzie:

- β – $k+1$ wymiarowy wektor regresji;
- ε – n wymiarowy wektor losowy.

B. Optymalizacja funkcji celu

Za każdym razem celem mechanizmu V2G (rys. 4) jest estymacja prowadząca do wyznaczenia optymalnych wartości sterowalnych zmiennych niezależnych. Algorytm zwraca wartość, dla której dany cel funkcji $f(x) \in$ jest optymalny. Pomimo wielu wejść 1: n , mechanizm V2G poprzez funkcję celu, poszukuje optymalnego rozwiązania z punktu widzenia technicznego i/lub kosztowego. Dla funkcji znanych posiadających własność liniową, miejsce zerowe to przecięcie się funkcji z osią x .

W przypadku dużej ilości danych wejściowych oraz funkcji liniowych, optymalizację dokonuje się metodą najmniejszych kwadratów. Optymalizacja dąży do rozwiązania w ten sposób, aby suma kwadratów zaobserwowanych reszt od hiperpłaszczyzny stanowiącej odniesienie była najmniejsza (równanie 13) [43].

$$s(a, b) = \sum \varepsilon_n^2 = \sum (y_n - a_1 x_{1k} - a_k x_{nk} - b)^2 = \min \quad (13)$$

Wyznacza się pochodne cząstkowej funkcji s względem niewiadomych a i b . Pochodne są przyrównane do wartości 0. Otrzymujemy postać równania 14.

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^k (y_n - a_1 x_{1k} - a_k x_{nk} - b) = 0 \\ \sum_{n=1}^k x_n (y_n - a_1 x_{1k} - a_k x_{nk} - b) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$a = \frac{\sum_{n=1}^k (y_n - \bar{y})(x_n - \bar{x})}{\sum_{n=1}^k (x_n - \bar{x})^2} = \frac{cov\ xy}{var\ x} \quad (14)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (15)$$

Natomiast wartości a i b dla równia nr 7 wyznaczane są poprzez formuły 14 i 15 [44].

W przypadku funkcji nieliniowych jednej lub wielu zmiennych optymalizacja wymaga obliczeń numerycznych. Jedną z metod stosowanych w algorytmach VZG są metody gradientowe prowadzące do wyznaczenia ekstremów funkcji $f(x)$. W sytuacji, gdy mamy do czynienia z funkcją, która zależy wyłącznie od jednej zmiennej x , ale jest nieliniowa, wyznacza się ekstrema funkcji lokalnej dla danego przedziału $(x_l: x_k)$ poszukiwanych rozwiązań metodą: *Newtona* [45, 46,]. Jest to iteracyjny algorytm, gdzie metodą zbieżności kwadratowej poszukiwany jest pierwiastek równania z punktu startowego x_0 .

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (16)$$

Warunki zbieżności:

$$|x^* - x_{k+1}| \leq |x^* - x_k|^2 \quad (17)$$

gdzie:

x^* – pierwiastek funkcji $f(x)$.

Gdy problem optymalizacji dotyczy funkcji wielowymiarowych (równanie 9 i 10) w sposób iteracyjny wykorzystywana jest metoda *Newtona–Raphsona* [47, 48].

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{J(x_k)} = x_k - f(x_k)J(x_k)^{-1} \quad (18)$$

$$J(f_{1:n}(x)) = f_{1:n}'(x) = \frac{\partial f_{1:n}(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Warunek zbieżności:

$$\frac{\|x^{k+1} - x^k\|}{\|x^k\|} \leq \varepsilon \quad (20)$$

gdzie:

- J – macierz Jakobiego dla $f_{1:n}'(x)$,
- ε – wartość dopuszczalnego błędu bliska 0.

Co więcej, w publikacjach stosowane są optymalizacje algorytmów dla V2G z zastrzeżeniem [49]. Realizacja funkcji celu posiada ograniczenia ze względu na istnienie innych funkcji $g(x, y)$. Optymalizacja dotyczy poszukiwania rozwiązania dla co najmniej dwóch zmiennych $f(x, y)$. Zastosowanie znajduję metoda obliczenia ekstremów warunkowych z wykorzystaniem mnożnika Lagrange'a [50].

$$\mathcal{L}(x, y, \lambda) = f(x, y) - \lambda g(x, y) \quad (21)$$

Warunek rozwiązania:

$$\nabla_{x,y,\lambda} \mathcal{L}(x, y, \lambda) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \nabla_{x,y,\lambda} f(x, y, \lambda) = \lambda \nabla_{x,y,\lambda} g(x, y) \\ g(x, y) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

gdzie:

- λ – mnożnika Lagrange'a.

Powyższe zależności matematyczne dla algorytmów V2G są możliwe do realizacji pod warunkiem, że dane wejściowe są stałe i można zidentyfikować funkcję $f(x, y, \dots, z)$. W przypadku, gdy funkcja opisująca zjawisko nie jest stała, zmienna w zależności od grupy danych wejściowych, wówczas algorytmy V2G wymagają zastosowania uczenia maszynowego. Tego typu algorytmy opierają się o rodzaj równań: 11 i 12 oraz znaczącą ilość danych. Optymalne rozwiązanie funkcji celu budowane jest na doświadczeniu i adaptacji do zmieniającej się sytuacji. Celem algorytmu jest iteracyjne nauczanie się danego zjawiska wg przyjętych klas, a następnie optymalny dobór wartości niezależnych x dla funkcji celu. Optymalizacja w stosunku do wyżej przywołanych rozwiązań jest dynamiczna i opiera się o funkcję kosztu J [51].

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_i (y^{(i)} - \phi(z^{(i)}))^2 \quad (23)$$

$$\phi(z^{(i)}) = f(w^T X - \theta) \quad (24)$$

$$\phi(z) = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } z \geq 0 \\ -1 & \text{w innym przypadku} \end{cases} \quad (24)$$

Zależność i-iteracyjna uczenia się:

$$\Delta w = -\eta \nabla J(w) \Rightarrow \min. \quad (25)$$

gdzie:

- w – wagi;
- Δw – zmiana wagi;
- X – macierz danych wejściowych;
- y – etykieta klasy dla pojedynczego treningu;
- η – wskaźnik uczenia się;
- ϕ – funkcja decyzji;
- f – funkcja aktywacji;
- θ – wartość przyjętego błędu.

Algorytmy predykcyjne funkcjonujące na bazie uczenia maszynowego coraz powszechniej opisywane są w literaturze naukowej dla obszaru V2G [52, 53]. Kierunki badań skierowane są na dokładność predykcji dla poziomu poprawności algorytmów powyżej 90%.

C. Przykłady Algorytmów V2G

Regresja liniowa

Stopień zaawansowania proponowanych algorytmów dla poszczególnych strategii V2G rośnie wraz z zaangażowaniem ilości obszarów samej usługi i jej poszczególnych funkcji celu. Pierwsze dwa algorytmy zaproponowane w literaturze dotyczyły podstawowych pryncypiów tj. wsparcie peak'ów oraz modelowanie korzyści dla użytkowników EV[8]. Poniżej równanie nr 5 opisujące wsparcie zapotrzebowania szczytowego na moc czynną.

$$CV = \frac{(TES \times DOD) - \left(\frac{RB}{EFF}\right) - \left(\frac{CD}{EFF}\right)}{DH} \quad (26)$$

gdzie:

<i>CV</i>	– wartość mocy czynnej dostępna dla wsparcia sieci energetycznej w peak'u (<i>kW</i>);
<i>TES</i>	– maksymalna wartość pojemności pojazdu <i>EV</i> (<i>kWh</i>);
<i>DOD</i>	– wartość głębokości rozładowania zasobnika (%);
<i>RB</i>	– wartość odległości stanowiąca bufor dla użytkownika <i>EV</i> (<i>km</i>);
<i>CD</i>	– wartość odległości planowana do pokonania przez użytkownika <i>EV</i> (<i>km</i>);
<i>EFF</i>	– efektywność jazdy <i>EV</i> (<i>km/kWh</i>);
<i>DH</i>	– czas dostępności usług (<i>h</i>).

Poniżej równanie nr 6 opisujące koszt użytkowania zasobnika energii z *EV* na rzecz właściciela.

$$STC = \left[\frac{BRC}{DOD \times CL} \right] + EC \quad (27)$$

gdzie:

<i>BRC</i>	– koszt wymiany ogniwa (<i>PLN/kWh</i>);
<i>CL</i>	– liczba cykli pracy zasobnika energii;
<i>EC</i>	– koszt naładowania zasobnika energii (<i>PLN/kWh</i>).

Regresja wielomianowa

Opierając się o mechanizm zaprezentowany na rys. 4, autorzy algorytmów V2G proponują optyimizację dla wejścia nr 4 (Agregator lub Agenci w węźle) poprzez wykorzystanie współczynnika popytu $f_{\text{Demand}} = S_{\text{max}}(\text{maksymalna wartość obciążenia w czasie } t) / S_N(\text{znamionowej mocy sieci})$. Współczynnik określa ilości mocy potrzebnej do odebrania lub wstrzyknięcia do sieci elektroenergetycznej energii w danym węźle sieci elektroenergetycznej [54]. Nadrzędną funkcją celu jest maksymalizacja uzyskanego zysku przez Agenta/Agregatora na rynku. Ta funkcja celu składa się trzech terminów (równanie nr 28):

- zysk uzyskany ze sprzedaży energii na rynku,
- koszt zakupu energii na rynku w celu pokrycia popytu,
- koszty poniesione na produkcję tej energii.

$$\{P_t^S, P_t^B, C_t^G\} = \sum_{t=t_0}^{\max} (\lambda_t^S P_t^S - \lambda_t^B P_t^B - \sum C_t^G) \quad (28)$$

gdzie:

- λ^S – godzinowa cena energii w kontrakcie sprzedaży (PLN/kWh);
- λ^B – godzinowa cena energii w kontrakcie kupna (PLN/kWh);
- P^S – moc czynna w czasie t sprzedana na rynek (PLN/kW);
- P^B – moc czynna w czasie t kupiona z rynku (PLN/kW);
- C^G – koszt generacji energii PLN (wstrzymanie produkcji, uruchomienie produkcji itd.).

Istotą zagadnienia pozostaje wyznaczanie ilości mocy czynnej i biernej potrzebnej do bilansu węzła w czasie t dla zdefiniowanego $f_{\text{Demand}}(\text{DF})$. DF można obliczyć przy użyciu macierzy Jacobiego J i iloczynu tensorowego J^f [55].

$$\begin{pmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j_{11}^f & j_{12}^f \\ j_{21}^f & j_{22}^f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta_{ji} \\ \Delta V_{ji} \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$\Delta S = J^f \cdot J^{-1} \cdot \Delta I = D^f \cdot \Delta I \quad (30)$$

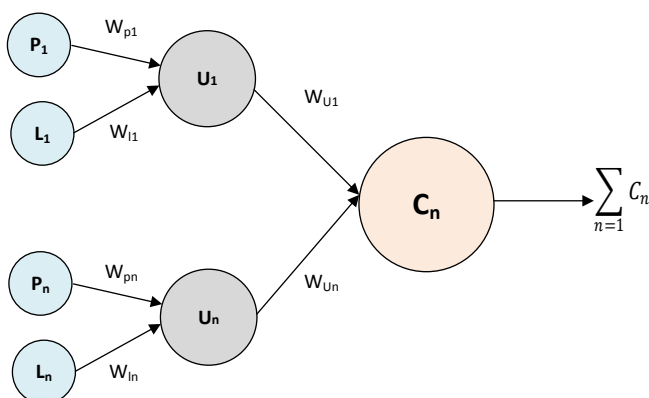
$$D^f = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \quad (31)$$

gdzie:

- ΔS – wektor przepływu mocy pozornej ($\Delta P + j\Delta Q$);
- D^f – macierz współczynnika popytu;
- ΔI – wektor poboru lub wstrzyknięcia mocy pozornej ($\Delta P + j\Delta Q$) w danym węźle.

Algorytmy predykcyjne

Kluczowe z punktu widzenia realizacji funkcji celu przez Agregatora lub Agentów jest wiedza w zakresie dostępności pojazdu dla usługi V2G. Część użytkowników *EV* będzie deklarowała swoją stałą gotowość do usługi, zaś część populacji wyłącznie w sposób nieusystematyzowany. W tym celu autorzy proponują zastosowanie algorytmów predykcyjnych opartych o uczenie maszynowe [56], po to by zbudować klasy rozpoznawalności użytkowników *EV* i powiązać je z cechami ich zachowań. Technicznie, wykorzystuje się w tym celu sieci neuronowe, gdzie każdy pojedynczy użytkownik *EV* reprezentowany jest jako pojedynczy węzeł U z danymi wejściowymi pochodzącymi z preferencji użytkownika P wraz z prawdopodobieństwem lokalizacji pojazdu na godzinę potencjalnego handlu na rynku L . Dodatkowo, każdy węzeł U został połączony z węzłem pojemności reprezentując dany obszar sieci nN, gdzie usługa może być realizowana przez Agregatora lub Agent dla OSD (rys. 5).



Rys.5. Przykładowa struktura sieci neuronowej dla usługi V2G.

Każda z danych wejściowych została zważona (W_{pn} , W_{ln}), aby umożliwić uczenie się sieci neuronowej decyzji podejmowanych przez użytkownika EV.

$$U_n = P_n W_{pn} + L_n W_{ln} \quad (32)$$

$$C_n = U_n W_{Un} C_{EV} \quad (33)$$

Algorytm uczenia maszynowego został opisany równaniami od 23– 25. Autorzy proponują, aby kwadrat błędu był liczony dla poszczególnych EV w zakresie ich gotowości, czyli odpowiedzi na usługę oraz w zakresie pojemności każdego EV, czyli sumy pojemności dla danego węzła [56]. W tabeli nr 2 zestawiono typy algorytmów dedykowanych dla danej strategii V2G.

Tab. 2. Zestawienie rodzajów funkcji dla V2G wraz z obszarem zastosowania

Obszar zastosowania	Cel optymalizacji	Rodzaj funkcji oraz algorytm optymalizacyjny dla V2G
OSD/ Agregator	Profil sieci nN w zakresie obciążenia przez odbiory;	Funkcje algebraiczne: liniowe i linearyzowane, Algorytmy: warunkowe, min. max lokalne,
	Profilu sieci nN w zakresie popytu i podaży;	Funkcje algebraiczne: liniowe i linearyzowane, Algorytmy: warunkowe,

		min. max lokalne,
	Parametrów technicznych sieci nN: napięcie, częstotliwość	Funkcje trygonometryczne: Algorytmy: warunkowe, iteracyjne, min. max lokalne,
	Awarii kaskadowych w sieci SN;	Funkcje dyskretne: logika rozmyta, heurystyczne kombinacje matematyczne, Algorytmy: warunkowe, min. max lokalne,
	Ograniczenie strat sieciowych	Funkcje dyskretne: programowanie liniowe; Algorytmy: warunkowe, iteracyjne, min. max lokalne,
Użytkownik EV	Minimalizacja kosztów funkcjonowania ogniwa EV	Funkcje: liniowe i linearyzowane, Algorytmy: warunkowe, iteracyjne, rojowe typu ABC (Artificial Bee Colony), PSO (Particle Swarm Optimization) itd.,
	Wsparcie użytkownika w zakresie deklaracji bufora pojemności ogniwa w EV	Funkcje: nieliniowe, Algorytmy: predykcyjne – uczenie maszynowe (optymalizacja poprzez kwadrat błędu),

5. Globalna mapa projektów dla V2G

Zgodnie z raportami [57, 58] na świecie w 2019 roku w realizacji było ponad 50 projektów V2G (rys. 6) nie tylko o charakterze badawczym, ale również z naciskiem na wdrożenia w przemyśle. Znacząca część z tych projektów zlokalizowana była w Europie i Ameryce Północnej. Znikoma część dotyczy obszaru Azji, gdzie przeważa zainteresowanie technologią V2H (ang. *vehicle to home*). Projekty V2G znajdują się na różnych etapach ewaluacji prac badawczych. Przeważający segment to projekty na etapie badań i testów. Część projektów w szczególności dot. obszaru lokalizacji USA i UK to prace wymagające potwierdzenia wyników laboratoryjnych. Istnieje również grupa projektów związanych z komercjalizacją potwierdzonych już wyników (Dania, USA, Japonia).



Rys.6. Mapa projektów V2G w roku 2019

Aktualnie nie zidentyfikowano projektów badawczych związanych z budową algorytmów V2G w Polsce. Raport dla kraju [59] wskazuje, że EV będą stanowiły w przyszłości element wsparcia dla infrastruktury sieci nN poprzez wykorzystanie usługi V2G.

Pomimo identyfikacji znaczącej liczby projektów badawczych realizowanych na świecie, aktualnie prezentowane artykuły naukowe dot. algorytmów V2G mają charakter wyłącznie symulacji lub testów laboratoryjnych. W niewielkim jeszcze stopniu artykuły prezentują wyniki badań w środowisku rzeczywistym [60, 61]. Kluczowym elementem podnoszonym w artykułach wdrożeniowych jest czas reakcji EV w procesie realizacji danej strategii. Autorzy wskazują, że odpowiedź ze strony popytu zachodzi w przedziale <5:20> sekund, co dla realizacji zaawansowanych funkcji celu nie zawsze jest niewystarczające.

6. Wnioski

Obszerność literaturowa jaka została poddana badaniu w zakresie algorytmów stosowanych w strategiach V2G nie wyczerpuje zagadnienia. Problematyka jest w dalszym ciągu eksplorowana przez naukowców łącząc interdyscyplinarnie tematykę w dziedzinie elektrotechniki i ekonomii oraz nauk społecznych, czy też informatycznych. Od początku powstania idei V2G minęło ponad 20 lat, mimo to nadal powstają nowe publikacje dotyczące zagadnienia. W dalszym ciągu opracowywane są nowe koncepcje dot. strategicznego wykorzystania V2G, gdzie funkcje liniowe zamieniane są na funkcje wielorakie z modelami predykcyjnymi dla optymalizacji rozwiązania. Na bazie wykonanego przeglądu zagadnienia badawczego można stwierdzić, że w najbliższym czasie powstanie znacząca ilość nowych artykułów dotyczących tematyki V2G. Powstają nowe propozycje algorytmów matematycznych opartych o nowe, połączone idee np. blockchain i V2G.

Największym ograniczeniem poprawnej walidacji działania zaproponowanych algorytmów jest kwestia praktycznej ich weryfikacji. Literatura wskazuje na dwie przyczyny. Pierwsza z nich to znikoma ilość pojazdów elektrycznych i powiązana z tym baza danych wejściowych służąca do analizy scenariuszy strategicznych. Druga przyczyna to niska gęstość energii elektrycznej około 250 Wh/kg w istniejących zasobnikach energii pojazdach elektrycznych [62], która ogranicza elastyczność usługi po stronie użytkowników EV.

Literatura

- [1] Habib S., Khan M. M., Abbas F., Sang L., Shahid U. M., Tang H., A Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical Challenges, Impacts and Prospects for Electric Vehicles, IEEE Access, 6, 2018.
- [2] The Commission presents strategy for a climate neutral Europe by 2050 – Questions and answers, Brussels, 2018.
- [3] Erdogan N., Erden F., Kisacikoglu M., *A fast and efficient coordinated vehicle-to-grid discharging control scheme for peak shaving in power distribution system*, J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 6(3), 555–566, 2018.
- [4] Hoang D. T., Wang P., Niyato D., Hossain E., *Charging and Discharging of Plug-In Electric Vehicles (PEVs) in Vehicle-to-Grid (V2G) Systems: A Cyber Insurance-Based Model*, IEEE Access, 5, 2017.
- [5] Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030, Ministerstwo Aktywów Państwowych, grudzień 2019.
- [6] Tomić J., Kempton W., *Using fleets of electric-drive vehicles for grid support*, Journal of Power Sources, 168(2), 459–468, 2007.
- [7] Kempton W., Tomić J., *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*, Journal of Power Sources, 144(1), 268–279, 2004.
- [8] Kempton W., Letendre S.E., *Electric vehicles as a new power source for electric utilities*, Transpn Res.–D Elsevier Science Ltd., 2(3), 157–175, 1997.
- [9] Lance N. J., Brodie J. F., Kempton W., Archer C.L., Budischak C., *Cost minimization of generation, storage, and new loads, comparing costs with and without externalities*, Applied Energy, 189, 110–121, 2017.
- [10] Noel L., Zarazua de Rubens G., Kester J., Sovacool B.K., *A Sociotechnical Transition Beyond Electric Mobility*, Energy, Climate and the Environment, Palgrave Macmillan, 2019.
- [11] Rajakaruna S., Shahnia F., Ghosh A., *Plug in electric Vehicle in Smart Grid*, Springer, 2015.

- [12] Stüdli S., Griggs W., Crisostomi E., Shorten R., *On Optimality Criteria for V2G Charging Strategies*, 2012 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), IEEE 2012.
- [13] Wang Z., Sun X., Liu L., *Study on control strategy of V2G in power peaking*, 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications, IEEE 2011.
- [14] Han H., Lv Z., Li Q., Huang D., *Analysis and Design of a High Performance Voltage Control Strategy for V2G System*, 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), IEEE 2017.
- [15] Turker H., Colak I., *An overview on V2G strategies to impacts from EV integration into power system*, 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), IEEE 2018.
- [16] Darabi Z., Ferdowsi M., *Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile*, IEEE Trans. Sustain. Energy, 2(4), 501–508, Oct. 2011.
- [17] Resener M., Rebennack S., Pardalos P. M., *Handbook of Optimization in Electric Power Distribution System*.
- [18] Hajagos L. M., Danai B., *Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies*, in IEEE Transactions on Power Systems, 13(2), 584–592, 1998.
- [19] Wang Z., Wang S., *Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using Vehicle-to-Grid Systems*, IEEE Transactions on Power Delivery 28(3), 2013.
- [20] Han Q., Xiaojing G., Yifang G., Hongmei Z., Zhipeng L., *Optimization of the Active Distribution Network Operation Considering the V2G Mode of Electric Vehicles*, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), IEEE, 2018.
- [21] Aryanezhad M., *Optimization of grid connected bidirectional V2G charger based on multi-objective algorithm*, 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, 519–524, 2017.
- [22] Ahmad M. S., Sivasubramani S., *Multi-objective V2G energy storage system for grid support with cost and emission reduction*, 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, 1925–1928, 2016.
- [23] Ginigeme K., Wang Z., *Distributed Optimal Vehicle-To-Grid Approaches With Consideration of Battery Degradation Cost Under Real-Time Pricing*, in IEEE Access, 8, 5225–5235, 2020.
- [24] Hassan A. S., Marmaras C. E., Xydias E. S., Cipcigan L. M., Jenkins N., *Integration of wind power using V2G as a flexible storage*, IET Conference on Power in Unity: a Whole System Approach, London, 1–5, 2013.
- [25] Wang Z., Wang S., *Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using Vehicle-to-Grid Systems*, in IEEE Transactions on Power Delivery, 28(3), 1822–1829, 2013.

- [26] Habib H. U. R., Subramaniam U., Waqar A., Farhan B. S., Kotb K. M., Wang S., *Energy Cost Optimization of Hybrid Renewables Based V2G Microgrid Considering Multi Objective Function by Using Artificial Bee Colony Optimization*, in IEEE Access, 8, 62076–62093, 2020.
- [27] Mishra S., Sahoo S., Pullaguram D. R., *A Systematic State of Charge based V2G Charging Framework for Frequency Response*, IFAC–PapersOnLine, 48(30), 31–36, 2015.
- [28] Adnan M., Ali M., Basalamah A., Tariq M., *Preventing Cascading Failure Through Fuzzy Co–Operative Control Mechanism Using V2G*, in IEEE Access, 7, 142607–142622, 2019,
- [29] Erdogan N., Erden F., Kisacikoglu M., *A fast and efficient coordinated vehicle–to–grid discharging control scheme for peak shaving in power distribution system*. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 6, 555–566, 2018.
- [30] Amamra S.A., Marco J., *Vehicle–to–Grid aggregator to support power grid and reduce electric vehicle charging cost*, IEEE Access, 7, 178528–178538, 2019.
- [31] Kaur K, Singh M., Kumar N, *Multiobjective optimization for frequency support using electric vehicles: An aggregator–based hierarchical control mechanism*, IEEE Syst. J., 13(1), 771–782, 2019.
- [32] Sree lakshmi G., Divya G., Sravani G., *V2G Transfer of Energy to Various Applications*, E3SWeb of Conferences, 2019.
- [33] Mehrabi A., Nunna K, Dadlani A., Moon S., Kim K., *Decentralized Greedy–Based Algorithm for Smart Energy Management in Plug–in Electric Vehicle Energy Distribution Systems*, in IEEE Access, 8, 75666–75681, 2020.
- [34] Jain P., Jain T., *Impacts of G2V and V2G power on electricity demand profile*, 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence, 1–8, 2014.
- [35] Letendre S. E., Kempton W., *The V2G concept: A new model for power?*, Public Utilities Fortnightly, 16–26, 2002.
- [36] Damiano A., Gatto G., Marongiu I., Porru M., Serpi A., *Vehicle–to–Grid Technology: State–of–the–Art and Future Scenarios*, Journal of Power and Energy Engineering, 8(1), 152–165, 2014.
- [37] Yilmaz M., 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.
- [38] Luenberger D., G., Ye Y., *Linear and Nonlinear Programming*, Springer, 2008.
- [39] BazaraaM., S., SheraliH., D., Shetty C., M., *Nonlinear Programming. Theory and Algorithms*, John Willey & Sons, INC, Canada, 2013.
- [40] Mordecai A., *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*, Dover Publishing. ISBN 0–486–43227–0.

- [41] Cohen J., Cohen P., West S. G., Aiken L. S., *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*, (3rd ed.). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2003.
- [42] Berry W. D., Feldman S., *Multiple Regression in Practice*, University of Kentucky, SAGE Publication, 1985.
- [43] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, 2009.
- [44] Bhatti M., A., *Practical Optimization Methods. With Mathematica Applications*, Springer 1998.
- [45] Singiresu S. R., *Engineering Optimization. Theory and Practice*, John Wiley & Sons, INC, USA, 2009.
- [46] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., *Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań*, PWN, 2009.
- [47] Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, WNT, Warszawa, 2006.
- [48] Chong E., K., P., Żak S., H., *An Introduction to Optimization*, John Wiley & Sons, INC, 2001.
- [49] Jin L., Yang H., Cheng F., Zhou Y. Zhao R., *A novel approach for the unit commitment with vehicle-to-grid*, 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo, 2012.
- [50] Seidler J., Badach A., Molisz W., *Metody rozwiązywania zadań optymalizacji*, WNT, Warszawa 1980.
- [51] Raschka S., *Python Machine Learning*, 3rd ed. Birmingham, U.K.: Packt, 2019.
- [52] Lee J., Park G-L., *V2G Demand Prediction Based on Daily Pattern Clustering and Artificial Neural Networks*, Advance in Neural Networks, 14 th International Symposium, ISSN 2017, Japan, 2017.
- [53] Mroczek B., Kołodyńska A., *The V2G Process With the Predictive Model*, in IEEE Access, 8, 86947–86956, 2020.
- [54] Lopez M.A., Martin S., Aguado J.A., de la Torre S., *V2G strategies for congestion management in microgrids with high penetration of electric vehicles*, Electric Power Systems Research, 104, 28–34, 2013.
- [55] Kumar A., Srivastava S., Singh S., *A zonal congestion management approach using ac transmission congestion distribution factors*, Electr. Power Syst. Res. 72(2004), 85–93, 2004.
- [56] Shipman R., Naylor S., Pinchin J., Gough R. Gillott M., *Learning capacity: predicting user decisions for vehicle-to-grid services*, Energy Informatics 2, 37(2019), 2019,
- [57] <https://everoze.com/v2g-global-roadtrip/>.
- [58] <https://www.irena.org/publications/2019/May/Innovation-Outlook-Smart-Charging>.
- [59] https://pspa.com.pl/assets/uploads/2019/05/V2G_raport_PL.pdf.

- [60] Andersen P., Hasemi S., Sousa T., Soerensen T.M., Noel L., Christensen B., *The Parker Project: Cross-Brand Service Testing Using V2G*, World Electr. Veh. J., 10(4), 2019.
- [61] Zabala E., Rubio A., Fernandez M., Alzola J.A., *Vehicle Characterization for Smart Charging and V2G strategies*, World Electr. Veh. J., 2010, DOI: 10.3390/wevj4040733.
- [62] https://parker-project.com/wp-content/uploads/2019/03/Parker_Final_report_2019_Appendices.pdf.

*Monika Mańko

Impedancyjne metody pomiaru i analizy właściwości elektrycznych elektrolitów i tkanek

Streszczenie: W artykule opisano wpływ temperatury, stężenia i rodzaju elektrolitu na jego przewodnictwo. Omówiono metodę pomiarów mostkowych właściwości elektrycznych elektrolitów z wykorzystaniem sprzętu znajdującego się w pracowni Katedry i Zakładu Biofizyki Uniwersytetu Medycznego w Lublinie. W drugiej części pracy opisano metody pomiaru impedancji elektrycznej ciała człowieka ze szczególnym uwzględnieniem opisu metody pomiaru rezystancji oraz impedancji elektrycznej z impedancji przedramion.

Słowa kluczowe: rezystancja, impedancja elektryczna, właściwości elektryczne tkanek

Impedance methods of measurement and analysis of electrical properties of the electrolytes and human tissues

Abstract: The article describes the impact of temperature, concentration and type of electrolyte on its conductivity. The paper describes the method of RLC bridge exemplary measurements of the electrolytes electrical properties with the use of equipment located in the laboratory of the Department of Biophysics at the Medical University of Lublin. The second part of the paper describes the methods of measuring the electrical impedance of the human body with particular emphasis on the description of the method of measuring electrical resistance and impedance from the impedance of the forearms.

Keywords: resistance, electric impedance, electrical properties of the human tissues

1. Wstęp

Powszechnie wiadomo, że konduktometria, czyli pomiar rezystancji elektrycznej roztworów elektrolitycznych i ich przewodności ma wiele ważnych zastosowań w nauce. Konduktometria, obok kalorymetrii, jest najstarszą fizykochemiczną metodą badawczą. Parametr ten jest najczęściej wykorzystywany do określania stężeń związków chemicznych posiadających właściwości przewodzące, a w przemyśle służy między innymi do monitorowania jakości wody oraz innych rozpuszczalników [1].

* monika.manko@umlub.pl, afiliacja podstawowa: Katedra i Zakład Biofizyki, Wydział Lekarski, Uniwersytet Medyczny w Lublinie
monika.manko@pollub.edu.pl, afiliacja dodatkowa: Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

2. Przewodnictwo elektryczne elektrolitów

Przewodność w roztworach wodnych jest właściwością, która informuje o zdolności wody do przewodzenia prądu elektrycznego. Im więcej jonów znajduje się w danym roztworze, tym lepsza (wyższa) jest jego przewodność. Innymi słowy, im więcej jonów jest w roztworze, tym silniejszy jest elektrolit [2].

Biorąc pod uwagę naturę naładowanych cząstek, przewodniki dzieli się na dwie grupy. Te z grupy pierwszej zawierają sieć atomów z zewnętrzną powłoką elektronów mogących swobodnie odrywać się od swoich atomów. Dzięki temu możliwy jest transport przez nie prądu elektrycznego. Do przewodników z grupy pierwszej należą przede wszystkim metale i grafit [2,3].

Grupę drugą stanowią przewodniki jonowe, w których kluczową kwestię w przepływie prądu odgrywają jony (a nie elektrony jak w grupie pierwszej). Przewodniki drugiej grupy to elektrolity.

Elektrolit jest substancją, która zawiera wolne jony i zachowuje się jak ośrodek przewodzący prąd elektryczny. Substancje te zwykle składają się z jonów zanurzonych w roztworze (są one również znane jako roztwory jonowe). Silny elektrolit to taki, w którego roztworze obecnych jest wiele jonów. Dzięki tym cechom jest on dobrym przewodnikiem. Słaby elektrolit to taki, w którym jonów jest niewiele, stąd jest on słabym przewodnikiem. Z kolei nieelektrolity w ogóle nie przewodzą prądu [1–3].

2.1. Jony jako nośniki ładunku elektrycznego

Przepływ ładunku elektrycznego w roztworach elektrolitów wynika z uporządkowanego ruchu jonów w polu elektrycznym, zgodnie z prawem Ohma (napiecie U powstałe w roztworze jest wprost proporcjonalne do przepływającego prądu I).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

gdzie: ρ to oporność właściwa [$\Omega \cdot m$], A to powierzchnia elektrod, l to odległość między elektrodami. Jednostką oporu jest ohm [Ω].

Zgodnie z powyższym wzorem (1), wielkość oporu elektrycznego (rezystancji R) jednolitego obiektu jest wprost proporcjonalna do jego oporu właściwego (ρ) oraz długości (l) i odwrotnie proporcjonalna do powierzchni jego przekroju poprzecznego (A), nawiązując do prawa Ohma. Z uwagi na fakt, iż zarówno powierzchnia elektrod A jak i odległość l pomiędzy nimi są trudne w pomiarze bezpośrednim, często używa się wartości stosunku odległości l do powierzchni elektrod A , zwaną stałą naczynka elektrolitycznego (lub pojemnością oporową naczynka). Odwrotnością oporu właściwego jest przewodnictwo właściwe (konduktywność κ):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

Przewodnictwo to odwrotność oporu (3):

$$G = \frac{1}{R} \quad (3)$$

Jednostką przewodnictwa jest odwrotność ohma [Ω^{-1}], czyli simens [S].

Przewodnictwo właściwe κ można także obliczyć z zależności (4):

$$G = \kappa \frac{A}{l} \quad (4)$$

Elektrolity w roztworze wodnym ulegają procesowi dysocjacji elektrolitycznej–jest to proces, w którym elektrycznie obojętna cząsteczka elektrolitu rozpada się w roztworze na jony, czyli fragmenty obdarzone ładunkiem elektrycznym [2].

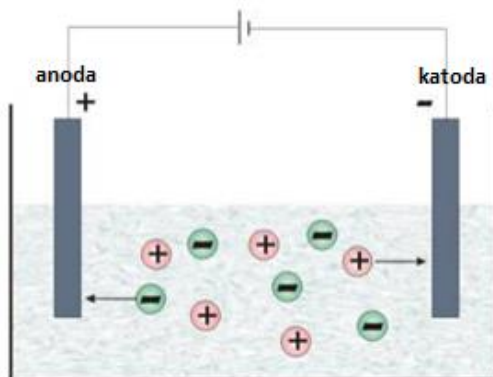
Dysocjacja jest procesem wstępnym, umożliwiającym dalszy przepływ prądu elektrycznego. Proces ten silnie zależy od temperatury a parametrem go charakteryzującym jest stała dysocjacji [2,3].

Suma ładunków elektrycznych jonów powstałych w procesie dysocjacji wynosi 0, w rezultacie czego roztwór elektrolitu nabywa zdolności przewodzenia prądu elektrycznego.

Aby proces przewodzenia prądu był możliwy, konieczne jest istnienie nośników ładunku elektrycznego w przewodniku i tę właśnie rolę pełnią w roztworze jony powstałe w wyniku dysocjacji [2].

2.2.Ruch jonów w polu elektrycznym

Ruch jonów w polu elektrycznym zapewniający przewodnictwo elektrolityczne roztworu przedstawiony jest na rysunku 1. Ruch ten następuje w kierunku przeciwnie naładowanych elektrod; jony dodatnie (kationy) przemieszczają się w kierunku bieguna ujemnego (katody), natomiast jony ujemne (aniony) w kierunku bieguna dodatniego (anody).



Rys.1. Ruch jonów w polu elektrycznym [3]

Ruch jonów w roztworze może być ograniczony ich wzajemnym oddziaływaniem (w szczególności w roztworach elektrolitów mocnych o dużych stężeniach). Jon ujemny może być otoczony chmurą jonów dodatnich (wskutek kulombowskich oddziaływań elektrostatycznych), które hamują ruch jonu centralnego w kierunku anody. Jest to tzw. efekt elektroforetyczny [3].

Innym, ograniczającym ruch jonów zjawiskiem jest efekt relaksacyjny. Polega on na tym, że za poruszającym się jonem ujemnym w kierunku anody tworzy się chmura jonowa z jonów przeciwnego znaku, podczas gdy z przodu chmura nie została jeszcze utworzona, bądź jest mała wskutek ruchu jonu. Taki niesymetryczny układ istnieje tylko w przypadku istnienia pola elektrycznego. Jeżeli wyłączy się prąd elektryczny, to w bardzo krótkim czasie, zwanym czasem relaksacji, jon centralny przywróci sferyczną symetrię swojej chmury jonowej.

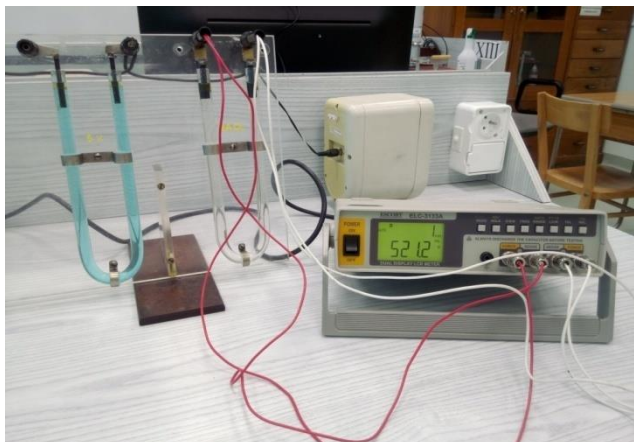
Do parametrów wpływających na przewodnictwo roztworów zalicza się przede wszystkim:

- temperaturę;
- rodzaj rozpuszczalnika (właściwości, takie jak lepkość, przenikalność elektryczną);
- rodzaj zdysocjowanego elektrolitu (jego ładunek jonowy, promień i ruchliwość jonu);
- stopień dysocjacji elektrolitu;
- stężenie zdysocjowanego elektrolitu [2].

Temperatura w istotny sposób wpływa na ogólną wartość przewodnictwa. Wyższa temperatura powoduje wzrost ruchu cząstek, co prowadzi do wzrostu ruchliwości jonów. Następuje wyższe przewodnictwo. Wzrost temperatury słabych elektrolitów prowadzi do wzrostu stałej dysocjacji oraz wzrostu wartości przewodnictwa. Dla danej temperatury w zakresie małych stężeń wzrost przewodnictwa właściwego (niemal linowy) jest wynikiem zwiększania się koncentracji jonów [1–3].

3. Metoda pomiaru oporu elektrolitów

Pomiary oporu elektrolitu można wykonać z wykorzystaniem mostka (miernika) RLC. W pierwszej kolejności należy połączyć przewody pomiarowe miernika (rys.2.) z zaciskami naczynia, w którym znajduje się elektrolit wzorcowy (nasycony wodny roztwór NaCl) w celu wyskalowania układu pomiarowego.



Rys.2. Połączenie elektrolitu wzorcowego NaCl z mostkiem RLC za pomocą przewodów

Napięcie przykładane jest do pary elektrod, tzw. biegunów. Miernik RLC mierzy przepływający przez nie prąd i na tej podstawie obliczane jest przewodnictwo badanego elektrolitu. W przypadku zastosowania do pomiarów prądu przemiennego jony nie migrują w jednym kierunku, lecz oscylują wokół swojej własnej pozycji stosownie do częstotliwości przyłożonego prądu. Z tego powodu w pomiarach przewodnictwa stosuje się prąd przemienny.

Należy jednak pamiętać, że nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie akumulacji jonów w pobliżu elektrod pomiarowych, a to z kolei prowadzi do powstawania dodatkowego oporu. Dzieje się tak, ponieważ tworzy się warstwa podwójna wpływająca negatywnie na ruchliwość jonów [2]. Można to porównać do zanieczyszczenia powierzchni elektrody, które tak samo zwiększa opór elektrolitu i jest zjawiskiem wysoce niepożądanym.

Po odczytaniu wartości rezystancji elektrolitu wzorcowego NaCl można przystąpić do przełączenia przewodów do zacisków drugiego naczynka z badanym elektrolitem. Im wyższe stężenie procentowe danego elektrolitu, tym większy opór elektryczny. Z kolei w roztworach elektrolitów o dużym stężeniu przewodnictwo początkowo rośnie wraz ze wzrostem stężenia, a następnie

maleje, ponieważ wartość stężenia wpływa nie tylko na ilość jonów, ale również na ich ruchliwość.

4. Pomiary impedancji elektrycznej ciała człowieka

Pomiar impedancji elektrycznej najczęściej wykonuje się przy użyciu elektrod rozmieszczonych na powierzchni ciała osoby badanej. Najczęściej stosuje się częstotliwość prądu poniżej 100kHz, a w celu poprawy jakości zapisów należy oczyścić naskórek (rzadko usuwa się go) oraz żel przewodzący, by zmniejszyć rezystancję.

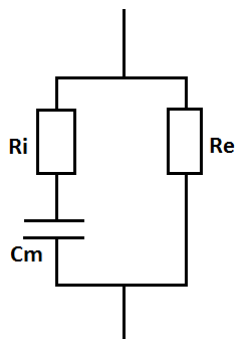
Istnieją dwie metody pomiaru impedancji elektrycznej ciała: dwuelektrodowa (bipolarna) i czteroelektrodowa (tetrapolarna). W warunkach laboratoryjnych najczęściej stosuje się metodę bipolarną [4–6].

4.1. Tkanki i ich właściwości elektryczne

Wielkością charakteryzującą zależność między napięciem a natężeniem prądu w obwodach prądu zmiennego jest impedancja. Poszczególne elementy ustroju ludzkiego wykazują różne wartości impedancji. Na przykład błona komórkowa jest półprzepuszczalna i pozwala na przenikanie w głąb tylko niektórych jonów [4], część ładunku zostaje więc zatrzymana (membrana przyjmuje rolę kondensatora). Tkanki ludzkie wykazują pewną rezystancję i pojemność elektryczną, nie wykazując jednak przy tym indukcyjności. Z kolei środowisko wewnątrzkomórkowe i zewnątrzkomórkowe wykazuje głównie rzeczywisty opór elektryczny.

Impedancja tkanek ludzkich silnie zależy od częstotliwości prądu użytego do pomiaru tej wielkości. Stan środowiska międzykomórkowego wpływa na przepływ prądu zmiennego o niskich częstotliwościach a stan błony komórkowej oraz przestrzeń międzykomórkowa wpływa bezpośrednio na przepływ prądu o wysokich częstotliwościach [5].

Do opisanie tkanki ludzkiej z powodzeniem można się posłużyć schematem zastępczym, przedstawionym na rysunku 3. R_i oznacza rezystancję komórek ciała, C_m oznacza pojemność komórek a R_e to rezystancja środowiska zewnątrzkomórkowego [5].



Rys.3. Schemat zastępczy tkanki ludzkiej [5]

4.2. Metody pomiaru impedancji skóry

Badania elektrycznych właściwości [6–10] skóry rozpoczęły się już w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. W jednym z nich [11] wykorzystano elektrody nieinwazyjne, nie przygotowując skóry przed badaniem, co aktualnie jest niedopuszczalne. Według autorów właściwości pojemnościowe skóry są szczególnie zauważalne w zakresie częstotliwości 1kHz–100kHz. Ogólny wniosek z tych badań jest następujący: impedancja skóry maleje wraz ze wzrostem częstotliwości zastosowanej w badaniu [11].

W porównaniu do poprzedniego badania, autorzy [12] zastosowali szerokie pasmo częstotliwości: 2Hz–15GHz oraz utrzymywali stałą temperaturę (1°C) i wilgotność powietrza (3%). Przedmiotem badań była zewnętrzna część przedramienia, a więc obszar bardzo zbliżony do aktualnie obowiązujących procedur. U części ochotników po zerwaniu naskórka stwierdzono znaczną zmianę właściwości elektrycznych skóry. Zaobserwowano także zmniejszenie impedancji skóry przy zwiększeniu wilgotności otoczenia. Po raz pierwszy zastosowano również emulsję nawilżającą na powierzchni skóry, dzięki czemu impedancja skóry wzrosła (mimo zwiększenia wilgotności otoczenia).

W badaniu [13] do mierzenia modułu impedancji Z skóry wykorzystano sondę pomiarową składającą się z elektrod koncentrycznych. Zaobserwowano, że średnia rezystywność warstwy rogowej naskórka oraz naskórka po użyciu emulsji nawilżającej maleje niemalże liniowo wraz ze wzrostem częstotliwości, a średnia rezystywność tkanki podskórnej oraz skóry właściwej jest stała, niezależnie od zastosowanej częstotliwości pomiarowej.

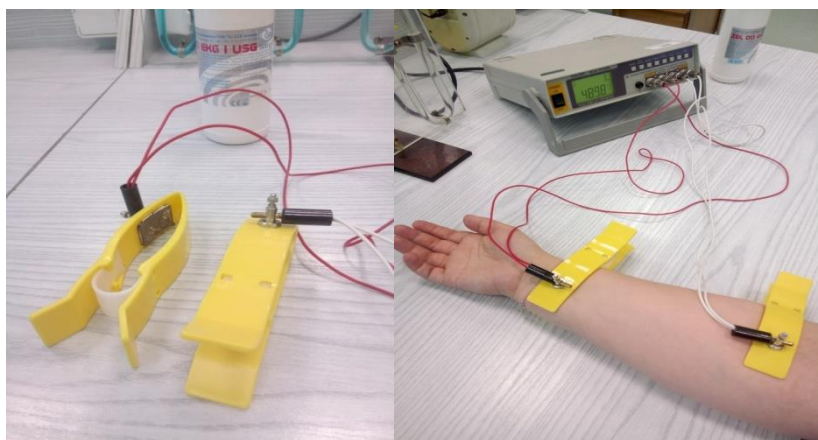
4.3. Metody pomiaru impedancji elektrycznej z przedramienia

Pomiary impedancji elektrycznej na przedramieniu umożliwiają scharakteryzowanie hemodynamiki, a w szczególności zmian w ilości krwi w ramieniu w wyniku rozszerzenia naczyń i/lub cyklu serca. Na wewnętrznej stronie przedramienia skóra jest bardzo delikatna, pozbawiona owłosienia, puls

jest wyraźnie wyczuwalny. Z tego względu właśnie ta część ciała stanowi miejsce umieszczania elektrod pomiarowych impedancji ciała człowieka.

W metodzie bipolarnej dwuelektrodowej każda z elektrod pełni jednocześnie dwie funkcje: aplikacyjną i pomiarową. Rozróżnia się 3 podstawowe rodzaje (układy) [13,14]:

- metoda napięciowa–napięcie z generatora (o małej rezystancji wewnętrznej) podawane jest do obszaru tkankowego a wartość prądu mierzonego w tym układzie jest miarą poszukiwanej impedancji;
- metoda prądowa–wartość mierzonego napięcia jest wprost proporcjonalna do poszukiwanej impedancji elektrycznej tkanek;
- metoda zerowa (mostkowa)–stosowane są w niej układy mostkowe, dzięki czemu łatwo można oddzielić składowe reaktancyjne od rezystancyjnych impedancji (rys.4.) [13,14].



Rys.4. Klipsy z elektrodami pomiarowymi; Połączenie klipsów z elektrodami do prawego przedramienia i prawego nadgarstka

Metoda mostkowa, jak wspomniano wcześniej, wymaga użycia dwóch klipsów z elektrodami pomiarowymi. Elektrody te umieszczone są po jednej na danym klipsie, po jego wewnętrznej stronie. Klipsy z kolei połączone są z miernikiem (mostkiem) RLC, na którym wyświetlane są odpowiednio wartości: rezystancji R oraz pojemności C z przedramion (rys.4.).

Przed przystąpieniem do odczytu powyższych wartości, powierzchnie elektrod klipsów należy umyć płynem odkażającym, wysuszyć a następnie posmarować żelom przewodzącym. Po wcześniejszym przemyciu i wytarciu wewnętrznej części prawego nadgarstka oraz prawego zagłębienia łokciowego należy podłączyć elektrody (starając się, aby były umieszczone w jednej linii):

- jedną elektrodę umieszcza się na wewnętrznej części zagłębienia łokciowego, nad naczyniami krwionośnymi zagłębienia łokciowego;

- drugą elektrodę umieszcza się na wewnętrznej części nadgarstka, nad naczyniami krwionośnymi (rys.4.).

Należy pamiętać, aby odczekać kilka sekund na ustabilizowanie się mostka. Z odczytanych wartości pojemności oraz rezystancji możliwe jest obliczenie reaktancji pojemnościowej R_c przedramienia (prawego i lewego) ze wzoru (5):

$$R_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5)$$

gdzie: f to częstotliwość pomiaru (zwykle 10kHz).

Przy założeniu, że rezystancja R oraz reaktancja pojemnościowa R_c są połączone równolegle, moduł impedancji Z przedramion oblicza się ze wzoru (6):

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{R^2}}} = \frac{R_c R}{\sqrt{R_c^2 + R^2}} \quad (6)$$

W pomiarach można zauważyć, że wartości rezystancji i pojemności elektrycznej prawego przedramienia są wyższe od wartości tych wielkości dla lewego przedramienia. Wynika to przede wszystkim z umiejscowienia mięśnia sercowego bliżej lewej strony ciała. Ponadto, wykonując serię pomiarów dla obu przedramion zauważa się także lekką rozbieżność odczytywanych wartości; wartość rezystancji i pojemności elektrycznej nie jest stała, lecz zmienia się w czasie trwania pomiarów. Ma to związek z krążeniem krwi w ciele i zwykle rośnie w miarę upływu czasu pomiaru (nawet po ustabilizowaniu się mostka).

4.4.Reografia impedancyjna

Jedną z nieinwazyjnych metod oceny czynności mechanicznej serca jest reografia (reokardiografia) impedancyjna wykorzystująca zjawiska towarzyszące przepływowi prądu przemiennego przez obszar niejednorodnego przewodnika objętościowego [15–17]. Sygnał reograficzny rejestrujący różnice potencjałów odbieranych na powierzchni danego segmentu tkankowego odzwierciedla impedancję elektryczną badanego obszaru [18–20].

Elektrody aplikacyjne stosowane w tej metodzie umieszczane są w pewnej odległości od elektrod odbiorczych, dzięki czemu dystrybucja gęstości prądu jest bardziej równomierna. W reografii impedancyjnej eliminuje się wpływ zmian impedancji kontaktowej na drodze elektroda–tkanka, co odróżnia tę metodę od innych służących do pomiaru impedancji elektrycznej tkanek.

Układ pomiarowy stosowany w reografii impedancyjnej wykorzystuje tetrapolarną technikę prądową pomiaru impedancji elektrycznej, wykorzystując zjawiska towarzyszące przepływowi prądu przemiennego przez obszar niejednorodnego przewodnika objętościowego [16]. Z tego względu

powszechnie stosuje się uproszczony model walcowy, aby zrozumieć związek pomiędzy zmianami objętości krwi a zmianami impedancji segmentu ciała.

4.5. Pneumografia impedancyjna

Kolejną z tetrapolarnych metod prądowych jest pneumografia impedancyjna służąca do pomiarów objętości powietrza w płucach. Dzięki niej możliwa jest rejestracja czynności oddechowej poprzez obserwację liniowego przejścia między mierzonymi wartościami impedancji elektrycznej a rzeczywistą objętością powietrza w płucach.

Pod wpływem zmian ilości powietrza w płucach następuje zmiana impedancji elektrycznej klatki piersiowej. Elektrody aplikacyjne i odbiorcze umieszcza się w po obu stronach klatki piersiowej osoby badanej (po 5 z każdej strony, w odległościach co 5cm od siebie). W pomiarach tego typu najczęściej jest stosowany pneumograf impedancyjny typu holterowskiego, który rejestruje: sygnał układu oddechowego, sygnał EKG, oraz sygnał z trzyosiowego akcelerometru [21].

5. Wnioski

Podstawą wszelkich metod i technik pomiarowych jest konduktometria, czyli pomiar rezystancji elektrycznej roztworów elektrolitycznych i ich przewodności. Zrozumienie, że przepływ ładunku elektrycznego w roztworach elektrolitów wynika z uporządkowanego ruchu jonów w polu elektrycznym, zgodnie z prawem Ohma, dało początek badaniom nad sposobem przepływu prądu elektrycznego przez skórę. Zależność między napięciem i natężeniem prądu w obwodach prądu zmiennego opisuje wielkość zwana impedancją.

Najlepszymi przykładami pomiarów pośrednich w fizjologii człowieka są pomiary impedancyjne. Objętość wyrzutową serca można określić przy zastosowaniu metody reografii (reokardiografii) impedancyjnej. Rejestracja czynności oddechowej, a więc monitorowanie rytmu oddechowego, jest możliwe dzięki metodzie pneumografii impedancyjnej. Z kolei do pomiaru impedancji elektrycznej ciała można wybrać jedną z kilku metod, na przykład metodę mostkową, która odczytując wartości rezystancji i pojemności elektrycznej z przedramion umożliwia scharakteryzowanie hemodynamiki ustroju.

Literatura

- [1] T. Bieszczad, M. Boczar, D. Góralczyk, W. Jarzęba, A. M. Turek: „Ćwiczenia laboratoryjne z chemii fizycznej”, UJ, Kraków 2000.
- [2] A. Bielański: „Podstawy chemii nieorganicznej”, PWN, Warszawa 1997.
- [3] https://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/chemia/a_e_chemia/6_chemia_roztworow/05_02_00.htm (dostęp na 22.07.2020).

- [4] Turek W., Koziół K., Turczyn R., *Elektrochemia i równowagi jonowe w roztworach elektrolitów – teoria i zadania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 25–37, 2016.
- [5] Birgersson I., Birgersson E., Ollmar S., Estimating electrical properties and the thickness of skin with electrical impedance spectroscopy: Mathematical analysis and measurements, *Journal of Electrical Bioimpedance* 3(1), 2012.
- [6] Rigaud B., Morucci J.P., and Chauveau N., *Bioelectrical impedance techniques in medicine. Part I: Bioimpedance Measurement. Second section: impedance spectrometry*, Crit. Rev. Biomedical Engineering, 24(4–6), 257–351, 1996.
- [7] Birgersson U., *Electrical impedance of human skin and tissue alterations: mathematical model and measurements*, Materials Sci., 2012.
- [8] Weyer S., Röthlingshöfer L., Walter M., and Leonhardt S., *Evaluation of bioelectrical impedance spectroscopy for the assessment of extracellular body water*, Acta Polytechnica 52(5), 120–124, 2012.
- [9] Kyle U.G., Bosaeus I., and De Lorenzo A.D., *Bioelectrical impedance analysis part I: review of principles and methods*. Clin.Nutr. 2004, 23: 1226–43.
- [10] Thomasset A., *Bio-electrical properties of tissue impedance measurements*, Lyon Med, 207, 107–118, 1963.
- [11] Rosell J., Colominas J., Riu P., Pallas-Areny R., and Webster J.G., *Skin impedance from 1Hz to 1MHz*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1988.
- [12] Clar E.J., Her C.P., and Sturelle C.G., *Skin impedance and moisturization*, Journal Society of Cosmetic Chemists of Great Britain, 26, 337–353, 1975.
- [13] Birgersson U., Birgersson E., Åberg P., Nicander I. and Ollmar S., *Noninvasive bioimpedance of intact skin: mathematical modeling and experiments*, Physiol. Meas, 32 (1), 1–18, 2011.
- [14] Lewitt A., Mądro E., Krupienicz A., *Podstawy teoretyczne i zastosowania analizy impedancji bioelektrycznej (BIA)*, Endokrynologia, Otyłość, Zaburzenia Przemiany Materii, tom 3, nr 4, 79–84, 2007.
- [15] Pałko T., Pawlicki W.G., *Reografia impedancyjna*, W: Problemy Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, t 2, Biopomiary, Wydawnictwo EXIT, Warszawa, 2001.
- [16] Żuchowski B., Guzik P., *Elektryczna bioimpedancja klatki piersiowej*, Anestezjologia i Ratownictwo, 2, 434–442, 2008.
- [17] Krześciński P., Gielerak G., Kowal J., *Kardiografia impedancyjna – nowoczesne narzędzie terapii monitorowanej chorób układu krążenia*. Kardiologia Polska, 67, 65–71, 2009.

- [18] Cybulski G., *Dynamic Impedance cardiography—the system and its applications*, Polish Journal of Medical Physics Engineering, 11(3), 2005.
- [19] Malmivuo J., and Plonsey R., *Impedance Plethysmography*, Bioelectromagnetism – Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields, Oxford University Press, New York, 1995.
- [20] Młyńczak M., Niewiadomski W., Żyliński M., Cybulski G., *Assessment of calibration methods on impedance pneumography accuracy*, Biomedical Engineering/ Biomedizinische Technik, De Gruyter, 2015.
- [21] Młyńczak M., Niewiadomski W., Żyliński M., Cybulski G., *Ambulatory impedance pneumography device for quantitative monitoring of volumetric parameters in respiratory and cardiac applications*. Proc. of CinC, 965–968, 2014.

Analiza oraz sposoby wyznaczania i opisu zjawisk transportu ciepła zachodzących na styku materiałów w strukturach warstwowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono mechanizmy wymiany ciepła w strukturach warstwowych z uwzględnieniem miejsc styku i zjawisk tam zachodzących. Przybliżono i omówiono na wybranych przykładach sposoby transportu ciepła towarzyszące obróbce metali, oraz zachodzące w konstrukcjach warstwowych ścian budowlanych. Przeprowadzono przegląd metod pozwalających na wyznaczenie wartości temperatury w miejscach styku materiałów na drodze analiz numerycznych, metod analitycznych i eksperymentalnych. Przedstawiono metodologię rozwiązywania zagadnień cieplnych wskazując na złożoność zjawisk zachodzących w miejscach kontaktu powierzchni, dla których poprawnej charakterystyki należy przyjąć więcej niż jedną wybraną formę wyznaczenia rozkładów temperatury.

Słowa kluczowe: transport ciepła, struktury warstwowe, powierzchnia kontaktu materiałów

Analysis and methods of determining and describing heat transport phenomena occurring at the interface of materials in layered structures

Abstract: The article presents the mechanisms of heat exchange in layered structures, taking into account the contact points and the phenomena occurring there. The methods of heat transport on selected examples, accompanying the processing of metals and occurring in the structures of layered building walls, were presented and discussed. A review of the methods allowing to determine the temperature value at the contact points of materials by means of numerical analyzes, analytical and experimental methods was carried out. The methodology of solving thermal problems is presented, indicating the complexity of the phenomena occurring at the contact points of surfaces, for which the correct characteristics should be adopted in more than one selected form of determining temperature distributions.

Keywords: heat transport, layered structures, contact surface of materials

1. Wstęp

Powierzchnie ciał stałych nigdy nie są idealnie gładkie a ich bezpośredni kontakt zachodzi jedynie w miejscach zwanych obszarami rzeczywistego styku. Wzajemne oddziaływanie pojedynczych nierówności powierzchni determinuje

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

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

całkowity udział obszarów styku w nominalnej powierzchni styku określanej mianem rzeczywistej powierzchni kontaktu α . Parametr ten ma wpływ na wiele zjawisk zachodzących w strefie kontaktu tj. transport ciepła, przepływ prądu czy tarcie. Dobrze zbadane i opisane zostały zjawiska cieplne zachodzące w materiałach izotropowych i strukturach warstwowych składających się z tych materiałów. Pomija się jednak wpływ chropowatości faktury materiałów na kontaktowe opory cieplne w obszarze styku. Jako przyczynę braku takich opracowań można wymienić nieznaczny wpływ zjawisk zachodzących w strefie kontaktu na całkowitą wartość współczynnika przenikania ciepła np. w przegrodach budowlanych. W mechanice natomiast zachodzi trudność wykonania poprawnych obliczeń ze względu na złożoność zachodzących tam mechanizmów np. przy periodycznym styku materiałów cienkowarstwowych czy w procesach przeróbki plastycznej, którym towarzyszą takie zjawiska jak wysokie ciśnienie kontaktowe, makroskopowa deformacja materiału czy wysoka różnica temperatur. Stąd wskazanym jest wykonywanie równoległe obliczeń analitycznych i numerycznych, symulacji komputerowych oraz metod eksperymentalnych w celu prawidłowej interpretacji zachodzących procesów. Tylko takie podejście do rozwiązywania zagadnień w zakresie mechaniki płynów prowadzi do wiarygodnego opisu zjawisk transportu ciepła zachodzących na styku materiałów w strukturach warstwowych.

2. Mechanizmy transportu ciepła

Przepływ strumienia ciepła odbywa wyłącznie w środowisku w którym występuje różnica temperatur z miejsc o wyższej temperaturze do miejsc o niższej temperaturze, aż do momentu ich wyrównania.

Wymiana ciepła w zależności od rodzaju ośrodka może przebiegać na drodze:

- przewodzenia (kondukcji)—charakterystycznego dla ciał stałych,
- przepływu (konwekcji)—charakterystycznego dla cieczy i gazów,
- promieniowania (radiacji)—charakterystycznego dla ciał stałych znajdujących się w ośrodku gazowym.

W materiałach charakteryzujących się porowatą strukturą wymiana ciepła zazwyczaj jest złożona i odbywa się zarówno na drodze przewodzenia jak i konwekcji oraz promieniowania (między ściankami porów w zależności od ich rozmiarów). W obliczeniach właściwości termicznych przyjęło się jednak opierać na wzorach wyprowadzonych na podstawie praw przewodzenia.

2.1. Przepływ ciepła na drodze przewodzenia

Przepływ ciepła na drodze przewodzenia polega na przekazywaniu energii kinematycznej między cząsteczkami ciała przy ich bezpośrednim styku. W rozważaniach teoretycznych zjawiska wymiany ciepła na drodze przewodzenia przyjmuje się, że ciało stałe jest izotropowe a zmiany temperatur

w jego różnych częściach zależą od czasu τ [1]. Zjawisko to można opisać wzorami wynikającymi z prawa Fouriera przedstawiającymi związek między gęstością strumienia cieplnego q a gradientem temperatury (1) oraz zależność między zmianą temperatury w czasie i zmianą temperatury w materiale (2):

$$q = -\lambda \frac{\delta t}{\delta x} \quad (1)$$

$$\frac{\delta t}{\delta x} = a \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} \quad (2)$$

2.2. Przepływ ciepła na drodze konwekcji

Przepływ ciepła na drodze konwekcji odbywa się w ośrodkach gazowych i płynnych, tzn. w środowisku w którym cząsteczki są w ruchu na skutek lokalnego ogrzania lub ochłodzenia i może występować zarówno przestrzeni ograniczonej jak i nieograniczonej. Intensywność wymiany ciepła na drodze konwekcji swobodnej wywołanej różnicą gęstości powietrza w strefie granicznej pomiędzy warstwami jest stosunkowo mała, można jednak ją zwiększyć wywołując mechaniczny ruch gazu – konwekcję wymuszoną [1]. Zjawiska oparte na zasadzie swobodnej konwekcji laminarnej zachodzą w szczelinach i porach powietrznych styku materiałów w strukturach warstwowych.

Wymianę ciepła przez konwekcję opisuje prawo Newtona:

$$q_k = \alpha_k (t_c - t_F) \quad (3)$$

gdzie:

q_k – gęstość strumienia cieplnego przepływającego między ośrodkiem a powierzchnią, W/m^2

α_k – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, W/m^2K

t_c – temperatura ośrodka, $^{\circ}C$

t_F – temperatura powierzchni, $^{\circ}C$

2.3. Wymiana ciepła na drodze promieniowania

Wymiana ciepła na drodze promieniowania polega na przenoszeniu energii między dwoma ciałami w próżni lub ośrodku gazowym za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Zjawisko to można podzielić na 2 fazy: zmiana energii cieplnej na elektromagnetyczną, zamiana energii elektromagnetycznej na cieplną. Źródłem promieniowania są wszystkie ciała o temperaturze większej od zera bezwzględnego a jego natężenie uzależnione jest od ich temperatury,

zdolności promieniowania, absorpcji i odbicia, kształtu, rozmiarów i wzajemnego położenia [1]. Ciało, które w danej temperaturze osiąga maksymalną zdolność wypromieniowywania ciepła określa się mianem ciała doskonale czarnego. Całkowita energia promieniowania Q_0 dochodząca do powierzchni ciała opisywana jest wzorem:

$$Q_0 = Q_\varepsilon + Q_p + Q_\eta \quad (4)$$

gdzie:

Q_ε – część energii pochłoniętej przez ciało,

Q_p – część energii odbitej od ciała,

Q_η – część energii przechodzącej przez ciało.

3. Transport ciepła na styku warstw

W warunkach rzeczywistych powierzchnie ciał stałych nigdy nie stykają się idealnie a kontakt występuje jedynie między wierzchołkami nierówności, prowadząc do wystąpienia zjawiska oporu cieplnego, zwanego również kontaktowym (r_s). Wówczas powstające pustki powietrzne wypełnione są płynem (gazem lub cieczą) o mniejszej przewodności cieplnej niż materiały stykających się ciał [1, 2]. Różnica temperatur na powierzchni styku $T_{s1} - T_{s2} = r_s q_s$.

Termiczny opór kontaktowy jest zależy od takich czynników jak [4]:

- błędy kształtu i położenia,
- falistość i chropowatość powierzchni,
- naciski jednostkowe,
- twardość i sprężystość ciał,
- właściwości cieplne ciał,
- temperatura ciał, zwłaszcza w strefie kontaktu,
- właściwości warstw wierzchnich,
- emisyjność i absorpcyjność powierzchni styku.

Termiczny opór kontaktowym [TOK] definiowany jest jako iloraz uskoku temperatury na powierzchni styku przez gęstość strumienia ciepła przepływającego przez tą powierzchnię:

$$R_K = \frac{\Delta T}{q_H} = \frac{T_{su2} - T_{su1}}{q_H} \quad (5)$$

3.1. Problem transportu ciepła na styku warstw w budownictwie

Materiały budowlane charakteryzują się wysoką wartością chropowatości powierzchni R_a , co wiąże się z powstawaniem porów powietrznych w strefie kontaktu. Podjęto wiele prób opisanie i wyznaczenie wartości termicznego

oporu kontaktowego, jednak żadne z tych opracowań nie podaje zunifikowanej metodologii obliczeń cieplnych na styku materiałów w strukturach warstwowych [5, 6, 7]. Zgodnie z normą PN-EN ISO 6946 [8] do współczynnika przenikania ciepła U , który jest odwrotnością sumy oporów przewodzenia materiałów w przegrodzie budowlanej, w uzasadnionych sytuacjach należy stosować poprawki:

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (6)$$

gdzie:

- poprawka z uwagi na pustki powietrzne ΔU_g ,
- poprawka z uwagi na łączniki mechaniczne ΔU_f ,
- poprawka z uwagi na dach o odwróconym układzie warstw ΔU_r .

Poprawka z uwagi na pustki powietrzne równa jest iloczynowi poprawki $\Delta U''$ (przyjętej z tablicy D.1., normy PN-EN ISO 6946) i ilorazu oporu cieplnego warstwy zawierającej szczeliny, przez całkowity opór cieplny komponentu z pominięciem mostków cieplnych:

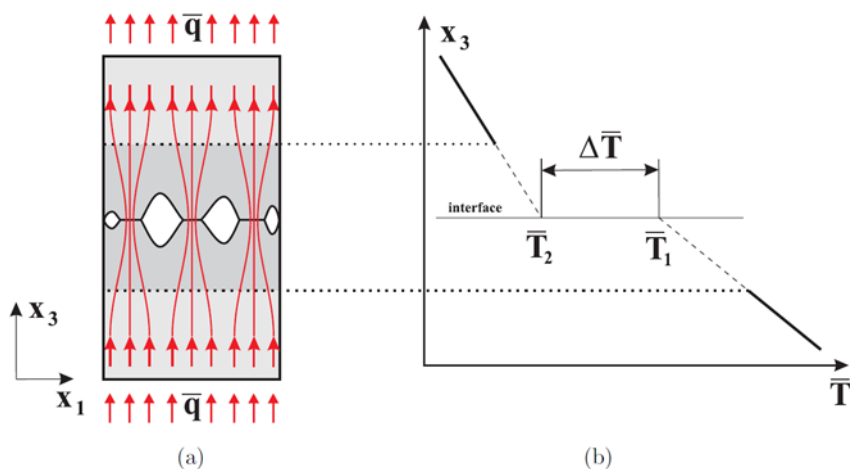
$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_1}{R_{T,H}} \right) \quad (7)$$

Tablica D.1. [8] podaje wartości współczynnika $\Delta U''$ w zależności od przebiegu i rozmiaru pustek powietrznych. Poziom 0, zakłada poprawkę $\Delta U''=0$ [W/m²K] dla występujących mniejszych pustek powietrznych. $\Delta U''$ powinna jednak uwzględniać występowanie oporu kontaktowego, ponieważ w obrębie styku materiałów zawsze występują pustki powietrzne. Mogą być one bardzo małe, ale nawet wtedy styk takich materiałów generuje opór cieplny. Zjawisko to można wykorzystać zarówno do poprawy izolacyjności przegród jak i do zwiększenia ekonomicznej opłacalności do ich stosowania poprzez zwiększenie uwarstwienia przegrody przy tej samej grubości izolacji oraz uwzględnienie w obliczeniach przenikania ciepła prowadzącego do mniejszego jego zapotrzebowania dla niektórych pomieszczeń.

3.2. Problem transportu ciepła na styku warstw w budownictwie

Udział całkowitego obszaru styku w powierzchni kontaktu jest określany jako rzeczywista powierzchnia kontaktu α , która jest jedną z podstawowych zmiennych opisujących warunki kontaktu [9]. Wiele zjawisk zachodzących w miejscach styku, wśród których można wymienić: tarcie i związane z nim zużycie czy przepływ ciepła i prądu pomiędzy ciałami w kontakcie zależą od rozkładu obszarów rzeczywistego styku. Zjawiska te są opisywane na dwóch poziomach obserwacji: mikro i makro, przy czym analiza w skali mikro jest lepiej rozpoznana oraz odpowiada nierównościom powierzchni a uzyskane wyniki wykorzystuje się do określenia właściwości połączeń w skali makro.

Liczba zjawisk zachodzących w strefie kontaktu powoduje trudności w ich opisie, ponieważ w rzeczywistych warunkach procesów przeróbki plastycznej metali ciała mogą znajdować się pod obciążeniem, przemieszczać się względem siebie a puste przestrzenie między nimi mogą być wypełnione gazem, zanieczyszczeniami lub smarem. Badania eksperymentalne przeprowadzone przez zespół badaczy w ramach realizacji projektu ENLUB [4, 5, 10] pozwoliły na zbadanie wpływu wybranych parametrów na proces formowania metalu i dostarczyły informacje pozwalające na poznanie niektórych zjawisk cieplnych towarzyszących procesom obróbki plastycznej.



Rys. 1. Podpis rysunku wykonujemy czcionką TNR. Rozmiar 9, wyjustowany 1 interlinia, linia podpisu nie może przekraczać krawędzi rysunku z lewej i z prawej strony [9].

Sadowski P. [9] wskazuje, że opis transportu ciepła przez powierzchnię kontaktu może być uproszczony w wybranych przypadkach, np. rozpatrywania zjawisk w próbkach niedużych rozmiarów, gdzie konwekcyjny ruch powietrza w porach w miejscach styku powierzchni jest mocno ograniczony. Ponadto strumień ciepła wywołany radiacją wskutek niewielkiej różnicy temperatury ciał pozostających w kontakcie nie jest duży i ma niewielkie znaczenie. Biorąc pod uwagę powyższe, opis transportu ciepła w strukturach warstwowych powierzchni chropowatych w wybranych modelach może uwzględniać wyłącznie przewodzenie przez obszary rzeczywistego styku (Rys. 1).

4. Metody rozwiązywania zagadnień transportu ciepła

Proces rozwiązywania zagadnień związanych z wymianą ciepła przebiega zazwyczaj według następującego schematu [11]:

- określenie modelu fizycznego zjawiska,

- sporządzenie modelu matematycznego zjawiska,
- dobór sposobu rozwiązania: analityczny, numeryczny lub eksperymentalny,
- dobór metody rozwiązania zagadnienia wśród sposobów analitycznych, numerycznych lub eksperymentalnych,
- przyjęcie danych liczbowych niezbędnych do rozwiązania konkretnego problemu,
- realizacja wybranej metody rozwiązania problemu,
- opracowanie wyników w postaci wzorów, tablic lub wykresów,
- analiza uzyskanych wyników pod względem interpretacji fizycznej i dokładności,
- wykorzystanie uzyskanych wyników do konkretnych obliczeń technicznych.

4.1. Analityczne rozwiązanie problemu transportu ciepła

Dla ograniczonej liczby typów zagadnień istnieje możliwość rozwiązania zagadnień cieplnych metodami analitycznymi. Metody analityczne dają wyniki w postaci wzorów matematycznych, które dokładne są dla prostych zagadnień wymiany ciepła [11]. Przy skomplikowanych kształtach i warunkach brzegowych rozwiązania analityczne wymagają uproszczeń dotyczących regularnego kształtu obszaru, „prostych” warunków brzegowych, założenia o jednorodności, rozważaniu zadania jednowymiarowego. Bez względu na te ograniczenia ewentualna możliwość odwołania się do rozwiązania analitycznego jest bardzo cenna w procesie weryfikacji rozwiązania przybliżonego.

Równanie przewodzenia ciepła dla ciał izotropowych można zapisać jako:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (8)$$

gdzie:

x,y,z – współrzędne,

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK],

T – temperatura [K],

$\dot{q}$ – wewnętrzne źródło ciepła [W/m³],

ρ – gęstość [kg/m³],

τ – czas,

α – dyfuzyjność cieplna.

Do rozwiązania tego równania niezbędne jest ustalenie warunków początkowych – definiujących stan układu w chwili początkowej w każdym punkcie, oraz warunków brzegowych opisujących zachowanie się funkcji na brzegu obszaru. Wyróżnia się trzy rodzaje warunków brzegowych:

- warunek brzegowy pierwszego rodzaju (Dirichleta)–znany jest rozkład temperatury we wszystkich punktach powierzchni ciała,
- warunek brzegowy drugiego rodzaju (Neumana)–znany jest rozkład gęstość strumienia ciepła q , we wszystkich punktach powierzchni ciała, nie znana jest temperatura ścianki T_s ,
- warunek brzegowy trzeciego rodzaju–dana jest temperatura płynu T_p otaczającego ciało stałe oraz współczynnik przejmowania ciepła, nie znana jest temperatura powierzchni ścianki T_s .

4.2. Numeryczne rozwiązanie problemu transportu ciepła

Obliczenia numeryczne wymagają dyskretyzacji obszaru co wiąże się z odejściem do oryginalnego równania oraz jego dokładnego rozwiązania na rzecz wyznaczenia rozwiązania przybliżonego w skończonej liczbie punktów. Pozwalają jednak one na uwzględnienie skomplikowanych kształtów i warunków brzegowych oraz zależności właściwości materiałowych od temperatury. Wśród metod wykorzystywanych do numerycznego rozwiązywania równań wyróżnia się trzy grupy, są to: metoda różnic skończonych, metoda elementów skończonych, metoda objętości skończonych.

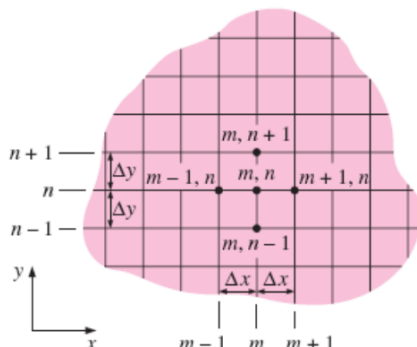
Metoda różnic skończonych polega na zmianie operatorów różniczkowych na odpowiednie operatory różnicowe, określone na dyskretnym zbiorze punktów izolowanych.

$$\frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (9)$$

Dzięki aproksymacji funkcji i jej pochodnych, wyjściowe zagadnienie brzegowe zostaje sprowadzone do układu równań algebraicznych, w których niewiadomymi są dyskretne wartości funkcji. W przypadku obliczeń rozpatrywanych dla obszarów dwuwymiarowych, dzieli się je na kwadraty, natomiast dla 3D na sześciany. Wymóg regularności powoduje, że odwzorowanie obszarów o złożonym kształcie nie jest sprawą prostą. Wstawiając ilorazy różnicowe do równania (8) dla dwuwymiarowego pola temperatury (Rys.2.) otrzymuje się równanie:

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n+1} - 2T_{m,n} + T_{m,n-1}}{\Delta y^2} + \frac{q_{m,n}}{\lambda} = 0 \quad (10)$$

gdzie m to numer kolejnego węzła $m=1, 2, 3, \dots, M-1$.



Rys. 2. Obliczanie temperatury w węzłach dla przypadku 2D

W przypadku rozpatrywania zjawisk zachodzących na styku w strukturach warstwowych równania te muszą być wyznaczone dla węzłów siatki w ciałach stałych i porach powietrznych z uwzględnieniem nieregularności kształtu powierzchni. Ze względu na wysoki stopień trudności rozwiązywania tak wielu złożonych równań, powszechnie używane są programy do komputerowej mechaniki płynów (CFD), tj. ANAYS Fluent, Autodesk CFD Ultimate czy Altair FLUX.

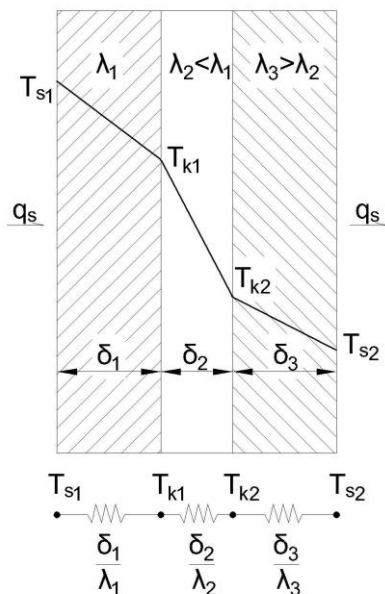
4.3. Metody eksperymentalne

Charakterystyczne dla badań eksperymentalnych z zakresu transportu ciepła jest wykorzystanie teorii podobieństwa, która podaje warunki jakie musi spełnić podobne zjawisko w modelu fizycznym, żeby możliwym było wyciągnięcie na jego podstawie wniosków o zjawiskach zachodzących w rozpatrywanym obiekcie rzeczywistym.

Wymiana ciepła przez styk może być tylko z dużym przybliżeniem obliczana teoretycznie, natomiast jest bardziej dokładnie określana na podstawie bezpośredniego eksperymentu. Szeroką dziedziną badań eksperymentalnych w wymianie ciepła są badania przejmowania ciepła na powierzchni ciała stałego dla nietypowych przypadków opływu występujących często w budowie maszyn. W wielu przypadkach badania przeprowadza się na odpowiednich modelach, w których występują zjawiska fizyczne tego samego rodzaju jak w obiekcie bazowym, a otrzymane wyniki opracowuje się na podstawie teorii podobieństwa. Modele do badań eksperymentalnych przygotowywane są w taki sposób aby obserwowane mogły być zjawiska podobne realizowane jednak w innej skali, przy zachowaniu podobieństwa fizycznego i geometrycznego zjawisk [11].

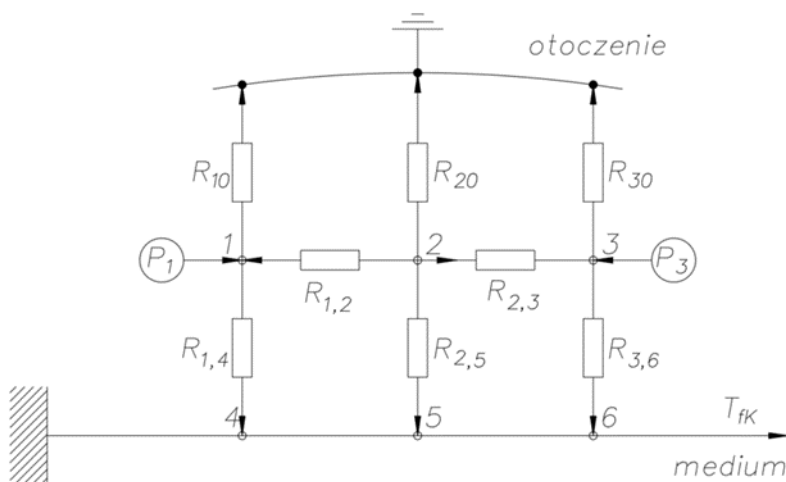
Wśród badań modelowych poza eksperymentami przeprowadzanymi na modelach fizycznych wyróżnić można również modelowanie matematyczne, które polega na rozwiązaniu odpowiedniego układu równań za pomocą metod

analitycznych, numerycznych lub analogowych. Wśród metody analogowych najczęściej wybiera się analogie elektryczne (Rys. 3), gdyż pomiary elektryczne charakteryzują się bardzo wysoką dokładnością.



Rys. 3. Przenikanie ciepła przez ściankę wielowarstwową

Chochowski A. zaproponował przedstawienie przestrzennego rozkładu temperatury i rozplywu strumieni cieplnych w kolektorze słonecznym z wykorzystaniem zastępczej sieci cieplnej (ZSC) [12]. Powstaje ona przez podział kolektora na szereg jednorodnych elementów o prostych geometrycznie kształtach, w granicach których istnieją jednakowe warunki nagrzewania i wymiany ciepła. Zastępcza sieć cieplna składa się z zastępczych schematów cieplnych tych elementów połączonych ze sobą, medium roboczym i otoczeniem w taki sposób w jaki odbywa się wymiana ciepła między tymi elementami. ZSC posiada „k” gałęzi i „n” węzłów, na gałęziach umieszczone są opory cieplne oraz jeden punkt spływu strat, którego temperatura w przeciwieństwie do temperatury węzłów jest stała i niezależna od stanu cieplnego sieci. Przykładową sieć cieplną przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Przenikanie ciepła przez ściankę wielowarstwową [12]

Termiczny opór kontaktowy wyznaczony może być również z wykorzystaniem specjalnego stanowiska pomiarowego, gdzie między płytą grzejącą a chłodnicą wodną umieszczane są dwie próbki walcowe o długości 50mm i średnicy 25mm [13]. Górne podstawy walców są w kontakcie, natomiast dolne umieszczone odpowiednio w grzejniku i chłodnicy. Wzdłuż osi walców wprowadza się po 3 termopary płaczowe typu E o średnicy 0,5mm, które podłączone są do komputerowego systemu akwizycji danych. Sterowanie pomiarem, rejestracja i zobrazowanie wskazań odbywa się z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania. Dla poprawnej interpretacji otrzymanych wyników niezbędna jest znajomość chropowatości powierzchni czołowych próbek, oraz nacisków jednostkowych na powierzchni styku. W trakcie pomiaru należy notować rejestrowane wartości temperatury z czujników. Po osiągnięciu stanu ustalonego zarejestrowane dane posłużą do wyznaczenia prostoliniowych rozkładów temperatury w próbkach (metodą najmniejszych kwadratów), średniej wartości gęstości strumienia ciepła oraz temperatur ekstrapolowanych na powierzchniach styku.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy wykazano, iż współczynnik przewodzenia ciepła zależy nie tylko od rzeczywistej powierzchni kontaktu, ale przede wszystkim od rozkładu obszarów rzeczywistego styku. Obszary te mogą być wyznaczane na dwa sposoby: poprzez spłaszczenie nierówności lub odcinanie wierzchołków nierówności. W efekcie kontaktowa przewodność cieplna ma nieznacznie większe wartości a różnice współczynnika przewodności cieplnej w zależności od przyjętej metody są porównywalne.

Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących w miejscach kontaktu powierzchni materiałów w strukturach warstwowych wymagane jest szczegółowe rozpatrywanie procesów transportu ciepła w ciałach stałych, jak i w powstających między nimi porach powietrznych. W tym celu, dla weryfikacji poprawności obliczeń powinno się stosować co najmniej dwie z wymienionych w pracy metod: analityczne, numeryczne lub eksperymentalne.

Wykorzystanie w obliczeniach metody różnic skończonych pozwala zbadać wpływ różnych czynników na kontaktową przewodność cieplną. Wyznaczona wartość zmienia się w zależności od wyboru schematu całkowania w elementach powierzchniowych oraz od gęstości siatki elementów skończonych. Wyniki będą zbieżne z tymi, które otrzymuje się na drodze eksperymentalnej, wraz z zagęszczaniem siatki. W obliczeniach przeprowadzonych dla trójwymiarowych modeli uwzględniających chropowatość powierzchni, duże zagęszczenie węzłów może prowadzić jednak do zbyt dużego rozmiaru zadania, którego wyniki obarczone będą pewnym błędem numerycznym.

Rozpatrywane zjawiska kontaktowe wymagają analizy na dwóch poziomach obserwacji: makro, oraz mikro–który to pozwala na opisanie nierówności powierzchni, wpływających na złożone procesy transportu ciepła zachodzące między ciałami. Liczba zjawisk termicznych w strefie wzajemnego oddziaływania ciał oraz wzajemne powiązania powodują trudność w ich jednoznacznym opisie, wymagają zatem one dalszej analizy z wykorzystaniem najnowszych rozwiązań numerycznych i eksperymentalnych.

Literatura

- [1] Żenczykowski W., Budownictwo ogólne. Problemy fizyki budowli i instalacje. Częstochowa: Arkady, 1987.
- [2] Van Dijk H. A. L., Van der Linden G. P., The PASSYS method for testing passive solar components, *Build. Environ.*, 28(2), 115–126, 1993.
- [3] Wójcicka–Migasiuk D., Analiza wymiany ciepła w ścianach słonecznych.pdf. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2008.
- [4] Wiśniewski T., Badanie wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał.pdf. Warszawa: Politechnika Warszawska, 1992.
- [5] Chen J., Wang H., Xie P., and Najm H., “Analysis of thermal conductivity of porous concrete using laboratory measurements and microstructure models,” *Constr. Build. Mater.*, 218, 90–98, 2019.
- [6] Orlandi P., Sassun D., and Leonardi S., “DNS of conjugate heat transfer in presence of rough surfaces,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, 100, 250–266, 2016.

- [7] Chen J., Chu R., Wang H., and Xie P., "Experimental measurement and microstructure-based simulation of thermal conductivity of unbound aggregates," *Constr. Build. Mater.*, 189, 8–18, 2018.
- [8] PN-EN ISO 6946 Komponenty budowlane i elementy budynku Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła Metoda obliczania, 2008.
- [9] Sadowski P., Modelowanie przepływu ciepła przez powierzchnie kontaktu ciał chropowatych w procesach przeróbki plastycznej. Warszawa, 2008.
- [10] ENLUB: Development of new environmentally acceptable lubricants, tribological tests and models for European sheet forming industry. FP5-GROWTH project G1RDCT- 2002-00740, 2002.
- [11] Wiśniewski S., Wiśniewski T. S., Wymiana ciepła. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [12] Chochowski A., Analiza stanów termicznych płaskiego kolektora płaskiego. Warszawa: Wydawnictwo SGGW, 1991.
- [13] Domański R., Jaworski M., and Wiśniewski T. S., Wymiana ciepła. Laboratorium dydaktyczne. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.

Model systemu zarządzającego pracą dźwigów oparty o mikrousługi na platformie Docker

Streszczenie: Dźwig osobowy to jeden z krytycznych elementów infrastruktury w budynkach. Do sprawnego zarządzania dużą liczbą tych urządzeń konserwator lub administrator wykorzystuje narzędzie, które integruje informacje z wielu lokalizacji oraz wielu typów dźwigów. Zastosowanie mikrousług pozwoli na precyzyjne wydzielenie wybranych funkcjonalności. Platforma Docker pozwoli w sposób skalowalny zarządzać, rozwijać, utrzymywać i konserwować komponenty rozwiązania.

Słowa kluczowe: winda, mikrousługa, docker

Model of a lift management system based on microservices on the Docker platform

Abstract: Passenger lifts are one of the critical infrastructure elements in buildings. To efficiently manage a large number of these devices, the administrator needs a software that integrates information from multiple locations and multiple types of lifts. The Docker platform will allow for a scalable management, development, maintenance of components.

Keywords: lift, microservice, docker

1. Wstęp

Model systemu zakłada zastąpienie standardowego, monolitowego podejścia do wytwarzania oprogramowania na korzyść architektury opartej o mikrousługi (mikroserwisy, microservices). Są to małe, jednofunkcyjne procesy, które dzięki możliwości łatwej integracji pozwalają tworzyć aplikacje w architekturze zorientowanej na usługi. Wśród wielu zalet wśród największych zdecydowanie można wskazać skalowalność, możliwość niezależnego rozwijania co przekłada się na łatwy podział odpowiedzialności pomiędzy członkami zespołu projektowego czy deweloperskiego.

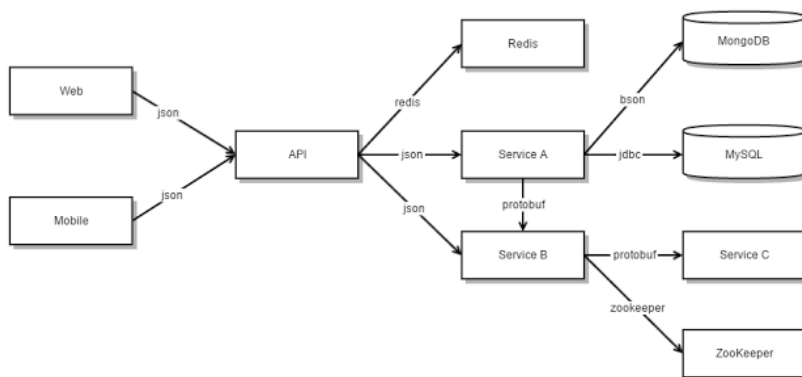
2. Architektura mikrousługowa

W dużym skrócie architektura mikrousług polega na zdekomponowaniu dużego systemu na wiele małych, funkcjonalnych bloków, które wykonują zdefiniowane czynności zgodnie z implementacją wynikającą z wymagań biznesowych. Odpowiednia integracja pomiędzy nimi daje możliwość

* lukasz.furgala@pollub.edu.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechnika Lubelska

wytworzenia funkcjonalności realizujących potrzebę biznesową. Odpowiednia analiza pozwoli na agregację w logicznej części funkcji, które serwują podobne usługi. Do komunikacji wewnętrznej zwykle wykorzystywany jest lekki mechanizm HTTP RESTful API w przeciwieństwie do opartego na notacji XML standardu WSDL.

Niezależnie od definicji mikrousługi kierują się podstawową ideą: podzielić duży system na małe elementy, dzięki czemu zostanie zmniejszona złożoność systemu, tym samym znacznie zmniejszy się ryzyko rozbudowy, modernizacji oraz eksploatacji i konserwacji systemu.

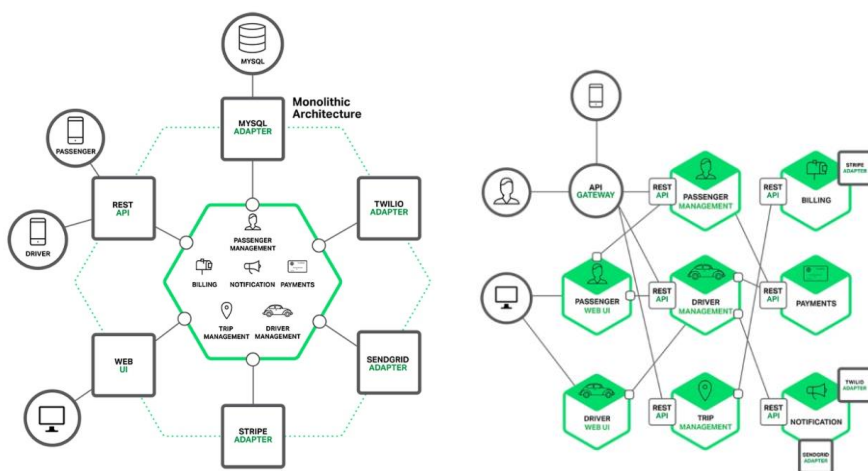


Rys. 2. Przykład wzorca architektonicznego mikrousługi

a. Podstawowe elementy mikrousług

- Uruchomienie usługi – usługodawca definiuje adres usługi (domenowy lub za pomocą adresu IP) pod którym jest dostępna;
- dostęp do usługi – usługodawca udostępnia wybrane usługi wybranym odbiorcom. Wywołanie może być po uwierzytelnieniu loginem i hasłem, po przedstawieniu się za pomocą certyfikatu lub dostępne bez autoryzacji;
- Interfejs API (application programming interface) – bez względu czy wybrany zostanie protokół REST czy WSDL na danym endpointzie dostępna jest zawsze jednoznacznie zdefiniowana funkcjonalność, zakres danych wejściowych i wyjściowych wraz z ewentualną obsługą błędów;
- service Gateway (brama dostępowa) – jest punktem styku dla requestów. Komponent ten może dokonywać routingu dynamicznego, służyć do uwierzytelniania użytkowników, blokowaniem dostępu, zarządzania limitami wywołań lub np.. priorytetyzacją w dostępie do usługi;

- load balancing (równoważenie obciążenia) – dostawca usług dla zapewnienia wysokiego poziomu dostępności, zazwyczaj świadczy usługi wykorzystując klastery/farmę maszyn serwującą tę samą funkcjonalność. W momencie wywołania żądania urządzenie sieciowe typu Load Balancer (np. firmy F5 Networks) przekierowuje zapytanie zgodnie ze zdefiniowanym algorytmem ruchu do odpowiednich maszyn (węzłów) w celu równoważenia obciążenia. Należy dodać, iż dla wywołującego usługę proces wyboru węzła jest transparentny;
- centrum ustawień i konfiguracji–zawiera informacje o konfiguracji (parametry, właściwości, definicje xml, xsd, xslt, yaml itp.). Jeden punkt konfiguracji pozwala uporządkować aspekty związane z procesem wdrażania poprawek, wersjonowania i zwiększa szansę na brak problemów związanych z dokumentacją wdrożeń;
- stos wywołań usługi (łańcuch)–dzięki podejściu modułowemu istnieje możliwość znalezienia przyczyny błędu;
- zarządzanie logami–dzięki wydzieleniu komponentu zarządzania logami audytu i udostępnienia danych osobowych możemy w każdej chwili przeanalizować, kto, kiedy, w jaki sposób wywołał usługę i do jakich danych miał dostęp (jakie dane zostały zwrócone). Analogicznie w przypadku systemów, które przetwarzają dane osobowe w jednym miejscu można zgromadzić każde zdarzenie związane z wyświetleniem, zapisaniem, udostępnieniem, przetwarzaniem danych osobowych.



Rys. 2. Przykładowy model monolityczny oraz usługowy

b. Szyna integracyjna ESB (Enterprise Service Bus)

Integracja danych wydaje się być jednym z najważniejszych wyzwań, przed którymi stoją obecnie firmy. Dzięki szynie danych łatwiej jest obsługiwać poszczególne procesy biznesowe, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia efektywności działań. Jednym z wartych uwagi narzędzi, które są w stanie zapewnić wysokiej jakości integrację danych, jest szyna integracyjna ESB. Jest to rozwiązanie, które ogranicza chaos spowodowany ilością połączeń, ponieważ stanowi swego rodzaju platformę, przez którą przechodzą wszystkie dane. W uproszczeniu można uznać, że integracja nowego systemu z infrastrukturą przedsiębiorstwa sprowadza się do obsłużenia tylko komunikacji z szyną danych, zamiast z wszystkimi innymi systemami.

Wykorzystanie szyny danych jest zasadne w przypadkach:

- udostępnianie usług podmiotom zewnętrznym;
- potrzeby integracji różnorodnych komponentów systemu IT;
- integracji więcej niż 2 aplikacji/systemów od różnych dostawców (do dwóch lepiej użyć konektorów point-to-point);
- korzystania z dużej liczby aplikacji, protokołów, transformacji danych (szczególnie w przypadku integracji starych systemów, które nie posiadają interfejsów komunikacyjnych);
- korzystania z różnych technologii (spoza HTTP/webservices np. JMS)

c. Metody uwierzytelniania

W ramach architektury mikrousług system składa się z mikroaplikacji. Każda z nich musi dokonywać uwierzytelnienia i autoryzacji dostępu (sprawdzić uprawnienia wywołującego użytkownika). Warto dodać, iż klientem usługi może być nie tylko przeglądarka webowa, ale także pojawia się potrzeba dokonywania zapytań bezpośrednio lub pośrednio przy pomocy szyny danych (szyny ESB) za pomocą komponentów wewnętrznych systemu. Nie wolno jednak traktować szyny ESB tylko jako rozwiązania do przesyłania danych – oferuje ona zdecydowanie szersze spektrum możliwości. Uproszczony schemat szyny ESB pozwala na zapewnienie systemu połączeń komponentów do jednego medium przepływu danych.

Można wydzielić cztery typowe rozwiązania zapewniające kompleksową obsługę uwierzytelniania:

- sesja rozproszona – przechowywanie informacji o uwierzytelnianiu użytkownika we współdzielonej pamięci różnych aplikacji. Gdy użytkownicy uzyskują dostęp do mikrousług, dane użytkownika można uzyskać z magazynu współdzielonego. Wadą tego rozwiązania jest to, że współdzielona pamięć masowa wymaga pewnego mechanizmu ochrony.

- mechanizm SSO (single sign-on, pojedyncze logowanie) – możliwość jednorazowego zalogowania się do usługi sieciowej i uzyskania dostępu do wszystkich autoryzowanych zasobów zgodnych z tą usługą. Technikę pojedynczego logowania zaimplementowano m.in. w Koncie Google, Facebook Connect, czy Koncie Microsoft. Stworzenie takiego logowania ułatwiają standardy potwierdzania tożsamości m.in. OpenID, OpenID Connect, czy OAuth;
- mechanizm loginu i hasła–przy każdym wywołaniu usługi przekazywany jest login i hasło, co obniża poziom bezpieczeństwa aplikacji;
- token klienta–rozwiązania polega na jednorazowym zalogowaniu za pomocą dopuszczalnych narzędzi a w odpowiedzi klient otrzyma token w postaci ciągu znaków, który będzie tymczasowo lub na stałe sparowany z danym klientem usługi. Przy kolejnych wywołaniach do każdego żądania zamiast loginu i hasła zostanie dołączony token w celu zapewnienia uwierzytelnienia użytkownika. To rozwiązanie jest stosunkowo bezpieczne, ale wylogowanie z uwierzytelniania stanowi duży problem. Metodą złagodzenia tej sytuacji mogą być tokeny czasowe (krótkoterminowe) i częste sprawdzanie usług certyfikacyjnych itp. Komunikacja może odbywać się za pomocą JSON (JWT);
- token w połączeniu z API – wszystkie żądania przechodzą przez bramę, skutecznie ukrywając mikrousługi. Na żądanie brama konwertuje oryginalny token użytkownika na token identyfikatora sesji wewnętrznej. W tym przypadku wylogowanie nie stanowi problemu, ponieważ brama może unieważnić token użytkownika podczas wylogowywania.

d. Implementacja modelu

Aplikacja została stworzona w technologii PHP w oparciu o wzorzec architektoniczny Model–Widok–Kontroler (Model–View–Controller). MVC zakłada podział aplikacji na trzy główne części, które są ze sobą wzajemnie połączone

- model–jest pewną reprezentacją logiki aplikacji. Edycja danych następuje za pomocą kontrolera, który modyfikuje model, model odświeża widok, a informacja z widoku dociera do użytkownika;
- widok–definiuje sposób prezentowania części modelu w ramach GUI. Składa się z subwidoków wyświetlających mniejsze elementy interfejsu;
- kontroler–oczekuje od użytkownika na interakcję, wprowadzenie za pomocą GUI danych wejściowych po czym koordynuje aktualizacją modelu oraz odświeżeniem widoków.

Matryca uprawnień pozwalająca na wywołanie odpowiednich funkcji CRUD (ang. create, read, update and delete, pol. utwórz, odczytaj, aktualizuj i usuń) w interfejsie użytkownika zapisana jest w bazie danych.

W proponowanym rozwiązaniu został wykorzystany framework Webgriffe ESB, który został upubliczniony i dostępny dla platformie github.com. Bazuje na silniku kolejek Beanstalkd oraz Elasticsearch. Rozwiązanie oparte o open-sourcowe biblioteki PHP: Amp, Symfony's Dependency Injection, Monolog.

W narzędziu zostały zdefiniowane 4 odseparowane kolejki:

- optymalizacji tablicy jazdy dźwigu bazując na algorytmie load-balancingu (nie opisane w niniejszej pracy);
- zarządzania parametrami windy (w tym kierunków otwierania drzwi na danych piętrach, które to muszą być krytycznie chronione przed przypadkową edycją. Dodatkowo krytyczne tabele związane z bezpieczeństwem zostały odseparowane/przeniesione do innej bazy danych);
- wywołania związane z panelem administratora/kokpitem menedżerskim, w tym np. generowane raporty, podgląd pracy dźwigów, statystyki użycia;
- pozostałe żądania (np. usterki, awarie).

API bazuje na OpenAPI3.0 i zostało stworzone za pomocą komendy Composera:
composer require zircote/swagger-php

Fragment przygotowanego API:

```
openapi: 3.0.0
paths:
  /lift:
    pobierzUprawnieniaByUser:
      summary: "pobierz uprawnienia dla użytkownika"
      responses:
        "200":
          description: "Macierz uprawnień"
      default:
        description: "problem"
```

Obecnie nie implementowano udostępnienia usług dla otwartej publiczności za pomocą API. Lista wybranych usług wystawionych jako wewnętrzne API (za pomocą szyny danych), z których korzystają wybrane komponenty logiczne aplikacji:

- lift/basic/zaloguj;
- lift/basic/wyloguj;
- lift/basic/pobierzUprawnieniaByUser;
- lift/admin/dodajUsera;
- lift/admin/edycjaUsera;
- lift/zarządzaj/Awarie (awarie, usterki);
- lift/zarządzaj/Budynek;
- lift/zarządzaj/Dashboard;
- lift/zarządzaj/Drzwi;
- lift/zarządzaj/GrupaWindy;
- lift/zarządzaj/Incident;
- lift/zarządzaj/KonfiguracjaPrzycisku (ustawienia, atrybuty, wygląd, funkcja, blokowanie);
- lift/zarządzaj/Ksiazka;
- lift/zarządzaj/Logi (parametry);
- lift/zarządzaj/NarzedzieAutoryzacji;
- lift/zarządzaj/PanelPrzyciskow;
- lift/zarządzaj/ParametrWindy;
- lift/zarządzaj/PoziomBudynku;
- lift/zarządzaj/Przycisk;
- lift/zarządzaj/Serwis (serwis, dozór techniczny);
- lift/zarządzaj/Uprawnienia (prawo administracji, prawo dostępu);
- lift/zarządzaj/Uzytkownicy (awatar, dane);
- lift/zarządzaj/Komunikacja (wiadomości, powiadomienia – wyślij, usuń);
- lift/zarządzaj/WindyUzytkownika;
- lift/zarządzaj/Wykres (kolory, rozmiar);
- lift/zarządzaj/ZespolPieter;

Do testowania interfejsów zostało wykorzystane narzędzie Postman.

3. Uruchomienie systemu w technologii PHP na Docker

Zalety uruchomienia aplikacji na kontenerze Docker:

- kontenery są przenośne, uruchamialne w innych środowiskach, odtwarzalne i można je natychmiast rozmieścić w dowolnym miejscu;
- kontenery zapewniają programistom jednolite i usprawnione środowisko pracy, które można łatwo udostępnić;
- kontenery pozwalają na uruchomienie aplikacji z wysoką dostępnością za pomocą Docker Swarm lub Kubernetes.

Większość początkujących programistów używa pakietu LAMP/WAMP jako podstawowego serwera PHP, MYSQL. W przypadku pracy nad projektem przez większy zespół projektowy, przy większej liczbie niezależnych gałęzi oprogramowania zaczną być potrzebne środowisko oparte na wirtualizacji, które będzie łatwe do udostępnienia, uruchomienia ponownego na nowych zasobach. Właśnie takim narzędziem jest Docker.

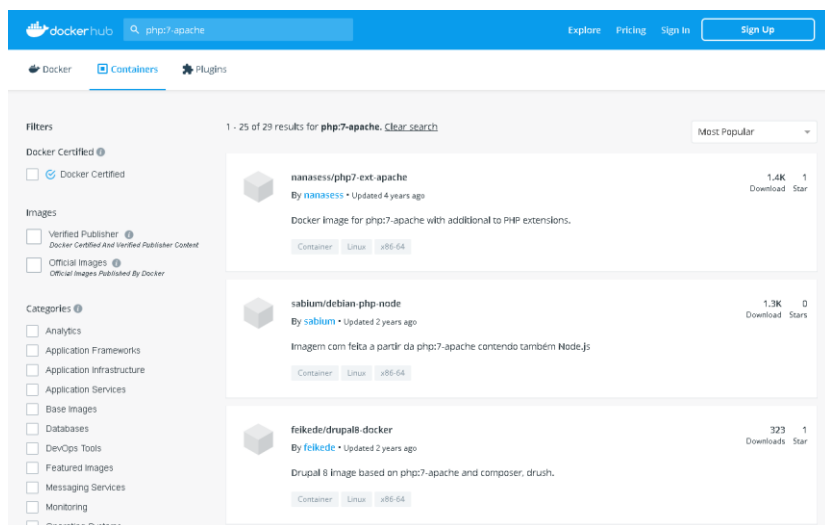
a. Uruchomienie Dockera

Docker bazuje na koncepcji budowania obrazów ISO zawierających niezbędne oprogramowanie i konfigurację dla instalowanych aplikacji. Możemy również uruchomić obrazy, które zawierają już wstępnie skonfigurowane oprogramowanie, takie jak serwer Apache, baza danych np. MySQL. Po edycji, dostosowaniu możemy udostępnić dla wszystkich nasz obraz za pomocą Docker Hub.

Proces instalacji jest zależny od platformy sprzętowej (Windows, Linux, MacOS). Możemy skorzystać z Docker Desktop albo oprogramowania dostępnego w repozytorium danego systemu operacyjnego. Przykładowe wywołanie dla Systemu Ubuntu:

\$ apt-get update && apt-get install docker

Po instalacji możemy spróbować pobrać obraz z sieci. Lista dostępna jest na stronie Docker Hub.



Rys. 3. Widok listy dostępnych obrazów na platformie Docker Hub (<https://hub.docker.com>)

Odszukujemy konkretny obraz, po czym aby pobrać je na komputer hosta w konsoli wpisujemy:

```
$ docker pull <imageName> np. docker pull nanasess/php7-ext-apache
```

Aby wyświetlić listę dostępnych obrazów na naszej maszynie wpisujemy:
`$ docker images`

Możemy stworzyć wiele instancji tego samego obrazu. Komenda:

```
$ docker ps
```

drukuje listę kontenerów uruchomionych na komputerze. Początkowo nie mamy żadnych kontenerów, więc należy stworzyć nowy kontener np. z obrazu php:7-apache przy użyciu flagi `-d` (uruchomienia zadania w tle). Wynikowy hash to nasz identyfikator kontenera, możemy go użyć, aby uzyskać dostęp do kontenera:

```
$ docker run -d php:7-apache  
24207d9251d183180d923298e6c7c58f5d742f84e1ed03ee46b1e6910eb1f22b
```

Do uzyskania dostępu do naszego kontenera należy wykonać polecenie:

```
$ docker exec -it apache_server bash
```

Ponieważ nasz kontener jest serwerem Apache, należy zapewnić możliwość do niego za pomocą przeglądarki www. Podczas tworzenia obrazu należy upewnić się, że udostępniamy określony port.

```
$ docker run -tid -p 8000:80 --name apache_server php:7-apache
```

Do sprawdzenia adresu IP wykorzystamy polecenie:

```
$ docker inspect \\\n-f '{{range NetworkSettings.Networks}}{{.IPAddress}}{{end}}' \\\nCONTAINER_ID_OR_NAME
```

Ostatni krok to zmapowanie adresu serwera Apache z katalogiem w celu uruchomienia naszej aplikacji (zamiast domyślnej strony głównej Apache). Oznacza to, że musimy synchronizować folder aplikacji z folderem głównym serwera (`/var/www/html`). Możemy to zrobić za pomocą flagi `-v`.

```
$ docker run -tid \\\n-p 8000:80 \\\n--name apache_server \\\n-v YOUR_HOST_WWW_ROOT:/var/www/html \\\nphp:7-apache
```

4. Model danych

Niniejsza praca definiuje model systemu zdalnego zarządzania dźwigami z uwzględnieniem wielopoziomowej kontroli dostępu, zarządzaniem parametrami każdego z urządzeń, przeglądami serwisowymi, dozorem technicznym, usterkami, awariami, incydentami, logami użycia. Uwzględniono również aspekty bezpieczeństwa systemu.

Prezentowany relacyjny model bazy danych z jedną, centralną bazą danych nie definiuje procesów biznesowych. Przedstawia jedynie schemat danych biznesowych w formie graficznej. Centralnymi encjami są tutaj:

- winda;
- użytkownik;
- usterka.

a. Informacje o windzie i stanach przycisków

Sekcja odpowiedzialna za zdefiniowanie podstawowych informacji o windzie składa się z następujących encji:

- *winda* (idwindy, nazwa, czasZapisu);
- *panelPrzyciskow* (idPaneluPrzycisku, ppNazwa, ppPoziomBudynku, ppMiejscePanelu, ppWinda, czasZapisu);
- *przycisk* (idp, pPanelPrzyciskow, pPoziomBudynku, pNapisNaPrzycisku, pFunkcjaPrzycisku, pRodzajPrzycisku, pPozycjaWierszNaPanelu, pPozycjaKolumnaNaPanelu, czasZapisu);
- *rodzajPrzycisku* (idrp, rkKod, rpOpis, rpInfo, czasZapisu);
- *funkcjaPrzycisku* (idfp, fpKod, fpOpis, fpIkona, czasZapisu);
- *grupaWind* (idgw, gwNazwa, gwOpis, czasZapisu).

Wiele z powyższych encji połączonych jest relacją typu wiele do wielu (m:n) innymi dlatego w implementacji wykorzystano tabele pośrednie/łączące, które tutaj pominięto.

Oprócz powyższych zdefiniowano również encje odblokowanie zawierającą informację o tym kto odblokował dany przycisk i jaką metodą (kluczykiem, kartą magnetyczną, za pomocą panelu webowego), *konfiguracjaPrzycisku*, *blokowaniePrzyciskow* w których przechowywane są informacji dotyczące dostępności (czasów odblokowania/zablokowania). Możliwe do zdefiniowania scenariusze dostępności lub niedostępności:

- w każdy wtorek od 8:00–16:00;
- od poniedziałku do piątku w styczniu, lutym, marcu (każdego roku);
- w każdą sobotę w godzinach: 8:00–12:00, 15:00–18:00, 20:00–22:00;

- codziennie w okresie od 12.04.2020 do 18.01.2021 w godzinach 08:00–16:00;
- co 10 (n) dzień w okresie od 10.05.2020 do 10.05.2021 począwszy od 10.05.2020;
- w każdy dzień powszedni (poniedziałek–piątek);
- co 3 (n) tygodnie (w każdy poniedziałek, środę, piątek). Sytuacja w tym przypadku komplikuje się ponieważ część miesięcy ma 4 a część 5 tygodni;
- co drugą środę w okresie od 1.01.2020 do 31.12.2020;
- każdego 15 dnia miesiąca od 10:00–12:00;
- ostatni piątek każdego miesiąca od 13:00–12:00;
- co następującą liczbę lat: 2 w 3. czwartek miesiąca kwiecień w okresie 1.01.2020–1.01.2030;

Encje *ikonaPrzycisku*, *wygladPrzycisku*, *wygladPanelu* definiują wygląd panelu i przycisków danej windy.

Encje *daneWcisniecia*, *stanPrzyciskuAktualny*, *stanPrzyciskuHistoryczny*, *stanPrzyciskuDozwolony* zawierają bieżące jak i poprzednie informacje odnośnie pozycji w jakich przycisk się znajdował wraz z czasem i informacją o źródle zmiany. Przechowywanie informacji staje się skomplikowane gdy weźmie się pod uwagę mnogość dostępnych wyłączników, czytników kart, pilotów, potencjometrów, które są dostępne na panelu windy. Listę obsługiwanych w proponowanej koncepcji wskazano w Tabeli 1. Dla każdego identyfikatora rodzaju przycisku (*idrp*) zdefiniowane są również jego możliwe stany np.:

- włącz/wyłącz;
- ustawiony w pozycji 1, ustawiony w pozycji 2...;
- wciśnięty 2,3 przycisk z 5 dostępnych;
- karta włożona/karta wyłożona;
- pozycja joysticka (zwykle przekazywana jako para liczb całkowitych x, y z zakresu <–512;512>);
- pozycja potencjometru;
- dane sterujące odczytane z czytnika kart, czytnika NFC, pilota;

Tab. 2. Lista dostępnych typów wyłączników i czytników umieszczona w tabeli *rodzajPrzycisku*

idrp	rpKod	rpOpis
1	temp_brak	NULL
1001	PUSH_BUTTON	zwykły – zatraskiwany

10 02	HELD_PUSH_BUTTON	zwykły – tylko trzymany
21 01	KEY_SWITCH_BUTTON	Klucz fizyczny na przycisku
21 02	KEY_SELECTOR_SWITC H	Klucz fizyczny wielopozycyjny (nie na przycisku)
22 01	SELECTOR_SWITCH	Przełącznik wielostanowy
22 02	SLIDE_SWITCH	Przesuwany przełącznik wielopozycyjny
22 03	PIANO_KEY_SWITCH	Przełącznik wielopozycyjny typu „organowego”
23 01	CARD_SWITCH	Czytnik Karty magnetycznej
23 02	PROXIMITY_KEY_FOB	Brelok zbliżeniowy
23 03	NFC_READER	Czytnik NFC (w tym smartphone)
24 01	INDICATOR_LAMP	Lampka informacyjna (również np. w kształcie przycisku)
25 01	DIP_SWITCH	Przełącznik typu DIP Switch
25 02	JOYSTICK_MODULE	Moduł Joystick Analogowy
25 03	POTENTIOMETER	Potencjometr
25 04	REMOTE_KEY_FOB	Pilot bezprzewodowy (jak do samochodu)
25 05	KEY_TAG_SWITCH	Hotelowy włącznik na kartę
26 01	LED_DISPLAY_CHAR	Wyświetlacz 8-segmentowy

Tab. *daneWcisniecia* przechowuje informacje o idPrzycisku, idWindy (nadmiarowa dana, ponieważ idPrzycisku jest globalnie unikalną wartością, przypisaną do danej windy, aczkolwiek dla przyspieszenia wykonania zapytań bazodanowych została celowo dodana), *ramkaSterująca*.

Warto zwrócić uwagę, iż kontrolery w różnych windach mogą dla identycznego przycisku wysyłać różne kody ramki sterującej co przedstawia Tab. 2. Przycisk o identyfikatorze 571 i 37 przesyłają różne wartości dla stanu „włącz” 101 i 1 a dla stanu wyłącz odpowiednio 102 i 0. Przycisk o id = 29 jest 4 stanowym przyciskiem typu SELECTOR_SWITCH (idrp = 2201) i zwraca jedną z 4 wartości (N, S, E, W), które to symbolizują kierunek w jakim jest aktualnie ustawiony (N–„do góry”, S–„do dołu”, E–„na prawo”, W–„na lewo”.

Tab. 3. Wybrane wiersze z tabeli ramkaSterujaca

idrs	rsPrzycisk_idp	rsKod	rsNazwa	rsOpis
12	571	101		Włącz
13	571	102		Wyłącz
214	29	N		Ustawiony na godzinę 12
215	29	S		Ustawiony na godzinę 6
216	29	E		Ustawiony na godzinę 3
217	29	W		Ustawiony na godzinę 9
258	37	1		Włącz
259	37	0		Wyłącz

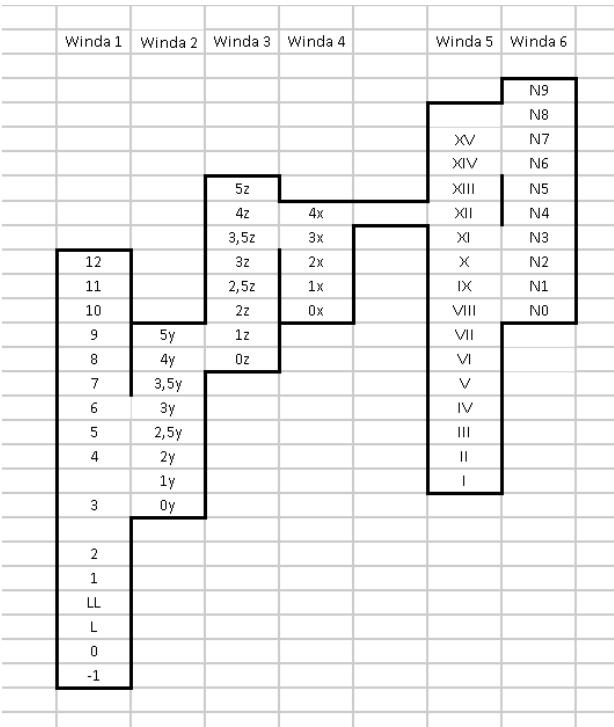
Tab. *funkcjaPrzycisku* definiuje dostępne typy operacji jakie mogą zostać wywołane po aktywacji przycisku. Pełna lista została zaprezentowana w Tabeli 3. Oprócz standardowych instrukcji (dyspozycja, wezwanie góra, wezwanie dół, wezwanie góra/dół) dostępne są funkcje pomocnicze (zapal światło, wywołanie rozmowy ratunkowej, uruchomienie dzwonka, uruchomienie wiatraka), sterujące (zamknij i otwórz drzwi, zresetuj dyspozycję, zatrzymaj windę). Te dwie ostatnie (reset i stop) nie są obecnie dodawane ze względu na bezpieczeństwo pasażerów. Istnieją jeszcze przyciski (często odblokowywane za pomocą fizycznego klucza), które pozwalają na tymczasowe odblokowanie możliwości nadania dyspozycji dojazdu na wybrane piętro lub zablokowanie działania całego dźwigu (umieszczane na panelu znajdującym się poza windą).

Tab. 4. Wybrane wiersze z tabeli funkcjaPrzycisku

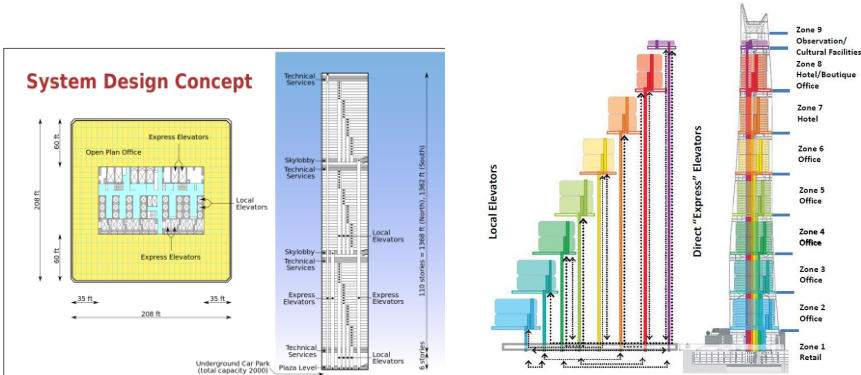
idfp	fpKod	fpOpis	fpInfo
3	FLOORBUTTON	Dyspozycja na piętro	D
6	UPWARDS	Wezwanie góra	W
7	DOWNWARDS	Wezwanie dół	W
9	UPDOWN	Wezwanie góra/dół	W
12	CLOSEDOOR	zamknij drzwi	STER
14	OPENDOOR	otwórz drzwi	STER
14	STOP	zatrzymaj windę	STER
19	RESET	zresetuj dyspozycję	STER
25	LIGHT	światło	INNE
28	CALL	wywołanie rozmowy	INNE
31	BELL	dzwonek	INNE
35	FAN	wiatrak	INNE
40	ENABLE_LIFT	odblokowywanie windy	
47	ENABLE_BUTTONS	odblokowywanie przycisków	

Dużym wyzwaniem w dokonaniu logicznej integracji wind (np. na potrzeby wspólnego sterowania) jest ich rozmieszczenie oraz układ pięter i budynków. Rys. 4. przedstawia przykład rozmieszczenia 6 wind wraz z roboczymi nazwami pięter oraz informacją na którym poziomie można się przesiąść do innej windy a na których jest to fizycznie niemożliwe (przykład pomiędzy windą 5 i 7 na

piętrze XII i XIII). Rys. 5. ilustruje rzeczywisty rozkład wind w budynku World Trade Center oraz Shanghai Tower.



Rys. 4. Przykładowy rozkład pięter (zespół pięter) wraz ich roboczymi nazwami dla każdej z wind



Rys. 5. Rozkład wind w budynku World Trade Center oraz Shanghai Tower

Do stworzenia fizycznej oraz logicznej struktury połączeń między windami wykorzystywane zostały następujące encje:

- *poziom*Budynku (idpb, pbBudynek, pbNazwa, pbKolejnosć);

- *budynek* (idb, bObiekt, bUlica, bNumer, bKod, bMiasto, bWojewodztwo, bPanstwo, CzasZapisu);
- *zespólPieter* (idzp, idWindy, zpNazwa, czasZapisu);
- *grupaWind* (idgw, gwNazwa, gwOpis, czasZapisu).

Do prawidłowego zapisania zachodzących relacji dla powyższych tabel niezbędne jest stworzenie tabel pośrednich.

Windy różnią się od siebie liczbą wejść do kabiny. Dostępny podział:

- nieprzelotowa – kabina z jednymi drzwiami (przesuwnymi teleskopowymi, przesuwnymi centralnymi lub otwieranymi);
- przelotowa – kabina z 2 przeciwległymi wejściami;
- kątowa – kabina z 2 wejściami umiejscowionymi pod kątem 90°;
- trójkonna – kabina z 3 wejściami na sąsiednich ścianach;
- z n wejściami.

Informacje o tym ile jest fizycznych wejść na danym poziomie (piętrze) dla danej windy i w którym kierunku są przetrzymywane w tabeli drzwi oraz 3 Tab.ch pośrednich.

W tabeli *parametrWindy* (oraz pomocniczych) przechowywane są aktualne i historyczne wartości definiujące parametry, właściwości windy, w tym: data produkcji, data uruchomienia/instalacji, data modernizacji, data zawieszenia działania, data usunięcia, numer fabryczny, numer rejestrowy dźwigu (udt), udźwig (maksymalna liczba osób), udźwig (waga maksymalna), powierzchnia kabiny, wysokość kabiny, prędkość znamionowa, klasa energetyczna, wytwórca, pogotowie dźwigowe 24h telefon, rodzaj budynku, rodzaj windy, typ dźwigu, rodzaj drzwi, rodzaj kabiny, rodzaj napędu – typ silnika, rodzaj napędu – moc, typ napędu, rodzaj napędu – sprawność, zakres modernizacji.

b. Informacje o uprawnieniach do dostępu i zarządzania zdalnego

Główne encje w sekcji uprawnień:

- *użytkownik* (idu, uImie, uNazwisko, uEmail, uEmailMD5, uHasloMD5, uPotwierdzony, uTelefon, uAvatar, uZalogowany, czasZapisu);
- *narzedzieAutoryzacji* (idna, naMetodaAutoryzacji, naStanAutoryzacji, naNumer, naNazwa, naOpis, czasZapisu);
- *prawoAdministracji* (idpa, paKod, paNazwa, paOpis, czasZapisu);
- *prawoDostępu* (idpd, pdKod, pdNazwa, pdOpis, czasZapisu);
- *log* (idl, idUzytkownik, idTypLogu, lKontroler, czasZapisu);

Tab. *prawoDostępu* (wraz z pomocniczymi) pozwala na zarządzanie dostępem do danej windy. Tab. *prawoAdministracji* (wraz z pomocniczymi)

pozwala na zdalne zarządzanie ustawieniami i monitorowaniem pracy konkretnych dźwigów.

Wybrane kody funkcjonalności określające prawa dostępu do wyświetlania/zarządzania w panelu administracyjnym/kokpicie menedżerskim dla danego użytkownika: BUILDINGS, BUILDINGSLEVELS, BUTTONFUNCTIONS, BUTTONS, BUTTONSTATES, BUTTONTYPES, CALLDISPOSITIONHISTORY, CURRENTBUTTONSTATES, INCIDENTS, INCIDENTSTYPE, LIFT_LIFTGROUP, LIFT_PARAMETERS, LIFTGROUP, LOGS, LOGSTYPES, PANELS, PARAMETERS, PRIVILEGESCARD, PRIVILEGESKEY, PRIVILEGESYSTEM, REPORTS, REVIEWSERVICE, SERVICEBOOK, STATISTICS, SUPERVISION, USER.

Istnieje wiele metod autoryzacji. Wśród nich należy wymienić: karty dostępowe, login i hasło, fizyczny token dostępowy, fizyczny klucz odblokowujący przycisk lub całą windę. Przykładowe dane zawiera Tab. *narzedzieAutoryzacji* oraz Tab. łącząca *na_p* przedstawiona w Tabeli 4 oraz Tab.i 5. Wiersz z idna równym 103 definiuje przycisk (idPrzycisk = 31) z kluczykiem, po przekręceniu którego wywoływana jest dyspozycja jazdy na piętro 3. Wiersz z idna równym 203 definiuje istnieje karty magnetycznej, która po zbliżeniu do czytnika pozwala na odblokowanie przycisków w kabinie, które umożliwią jazdę na piętra 3,9,10.

Tab. 5. Wybrane wiersze z tabeli *narzedzieAutoryzacji* oraz tabeli łączącej *na_p*

id na	naMetodaAutoryza cji_idma	naStanAutoryzacji_ idsa	naN umer	naNa zwa	naOpis
1 03	1	2	kl3	k3	klucz 3 piętro– idPrzycisk: 31
1 04	1	1	kl4	k4	klucz 4 piętro– idPrzycisk: 30
1 05	1	2	kl5	k5	klucz 5 piętro– idPrzycisk: 46
1 21	2	1	kl1	k1	klucz Multi 1 – idPrzycisk: 25,26
1 22	2	2	kl2	k2	klucz Multi 2 – idPrzycisk: 21,24,26
1 26	2	2	kl6	k6	klucz Multi 6 – idPrzycisk: 26
2 01	3	2	km1	c1	karta piętro 4
2 02	3	2	km2	c2	karta piętro 3, 5
2 03	3	1	km3	c3	karta piętro 3, 9, 10

Tab. 6. Wybrane wiersze z tabeli *na_p* łączącej narzędziaAutoryzacji z tabelą przycisk

na_pNarzedzieAutoryzacji_idna	na_pPrzycisk_idp
203	36
103	31
203	45
203	43

Tab. *logi* wraz z pomocniczymi (*parametrLogu*, *typLogu*) odpowiadają za rejestrację logów audytu, czyli rejestrację informacji kto, kiedy, jakie operacje wywołał i jaką dane otrzymał.

Tabele *uprawnieniaTabele*, *uprawnioneIpTabele* pozwala na ograniczenie dostępu do odczytu, edycji, aktualizacji konkretnych tabel na podstawie adresu IP oraz uprawnień.

c. Informacje o incydentach, usterkach, logach i książkach serwisowych

Główne encje:

- *incydent*;
- *dozorTechniczny*
- *przeglądSerwisowy*;
- *usterka*;

Tab. *dozorTechniczny* (z pomocniczą *wynikDozoruTechnicznego*), *przeglądSerwisowy* (z pomocniczą *wynikPrzegląduSerwisowego*) zawierają informacje dotyczące przeglądów oraz dokonywanych i planowanych dozorów technicznych wykonywanych przez Urząd Dozoru Technicznego. Do każdej windy dołączone są informacje związane z dokumentacją, szczegółami windy w tym np. w tabeli *ksiazkaSerwisowa* informacje o dostępnych książkach serwisowych do windy lub jej komponentów.

Tab. *incydent* (wraz z pomocniczą *typIncidentu*) przechowują informacje o incydentach np. przeciążenie, zacięcie drzwi, zablokowanie drzwi, zbyt długie otwarcie drzwi (np. po zasłonięciu czujnika).

Blok usterek jest bardzo złożony ze względu na zakres zagadnienia. Tabelą główną jest *usterka*. Powiązane do niej tabele (*grupaUsterek*, *userkaKod*, *usterkaTablicaKonwersji*, *usterkaTypUrządzenia*, *utserkaParametryUrządzenia*, *usterkaProducent*, Tab. *Prawdopodobieństw* wraz z pomocniczymi) przechowują informacje związane z kodami usterek jakie są zdefiniowane dla danego producenta lub danego producenta komponentu (np. silnika, napędu drzwi itd.). Tab. *prawdopodobieństw* wystąpienia usterki przechowuje dane predykcyjne wyliczane programowo na bazie dostępnych danych historycznych, danych

statystycznych awarii, daty instalacji, daty konserwacji i innych dat katalogowych dla danej części.

d. Informacje o portalu administracyjnym

Tabele *wykresDashboard*, *wykres*, *menuPanelu* (wraz z pomocniczymi) powiązane m.in. z tabelą użytkowników zapisują informacje o konfiguracji zdefiniowanych kokpitów menedżerskich/panelów administracyjnych oraz innych ustawień użytkownika (administratora, konserwatora, menedżera).

Tab. *news* (z pomocniczymi *adresatNews*, *kanalKomunikacji*) pozwala na wyświetlanie lub wysyłanie użytkownikom informacji:

- usterka/awaria;
- incydent;
- kończący się termin przeglądu serwisowego lub dozoru;
- komunikat od administratora–wysłany za pośrednictwem panelu administracyjnego;
- wciśnięcie przycisku alarm w kabinie windy;
- kilkukrotna błędna autoryzacja dostępu do panelu administracyjnego;
- kilkukrotna błędna autoryzacja kartą dostępową;
- próba wywołania windy lub przycisku poza zdefiniowanym okresem.

5. Wnioski

Model bazy danych składa się z 74 tabel oraz 9 procedur. Należy zastanowić się nad redukcją tej liczby. Zaobserwowano, że przechowywanie informacji o każdej zmianie stanu każdego przycisku dla każdej windy w jednej tabeli w relacyjnej bazie danych powoduje problemy z jej przeszukiwaniem (choćby do celu optymalizacji pracy windy–dynamicznej zmiany parametrów). Należy rozważyć wykorzystanie MongoDB–otwartego, nierelacyjnego systemu zarządzania bazą danych napisanego w języku C++. Wykorzystanie szyny danych dla wewnętrznego, spójnego technologicznie projektu jest tylko ćwiczeniem akademickim. Rzecz jasna wykorzystanie szyny danych do systemu wysyłki powiadomień SMS oraz e-mail powoduje zasadność użycia ESB. W momencie integracji z ewentualnymi systemami zewnętrznymi–narzędzi konfiguracji i diagnostyki windy, systemu zarządzania oświetleniem, archiwalnych baz, hurtowni danych, połączenia narzędzia np. Power BI spowoduje, iż zaproponowany model komunikacji będzie w pełni uzasadnionym. Krytyczne elementy zarządzania pracą windy zostały wyniesione do drugiej bazy danych (lista kierunków na które otwierają się drzwi na danym piętrze dla danego dźwigu) oraz wykorzystania podwójnej akceptacji zmian (przez minimum 2 użytkowników) podnosi bezpieczeństwo.

Literatura

- [1] <https://www.cloudforum.pl/2018/08/10/mikrouslugi-vs-monolit-nie-zawsze-architektura-oparta-o-mikroserwisy-to-najlepszy-pomysl/>
- [2] <http://dockone.io/article/3687>
- [3] Fowler M.: Patterns of enterprise application architecture. Addison-Wesley Professional, 2002, s. 330–331. ISBN 978–0321127426.
- [4] <https://github.com/webgriffe/esb>
- [5] <https://beanstalkd.github.io/>
- [6] <https://github.com/zircote/swagger-php>
- [7] <https://www.docker.com/products/docker-desktop>
- [8] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/World_Trade_Center_Building_Design_with_Floor_and_Elevator_Arrangement_t.svg/1280px-World_Trade_Center_Building_Design_with_Floor_and_Elevator_Arrangement.svg.png
- [9] https://www.researchgate.net/publication/283198314_Tall_Buildings_and_Elevators_A_Review_of_Recent_Technological_Advances

Zarządzanie flotą pojazdów elektrycznych w sieciach inteligentnych – sterowanie ładowaniem oraz zagadnienia optymalizacyjne

Streszczenie: W artykule przedstawiono informacje na temat zarządzania flotą pojazdów elektrycznych w sieciach inteligentnych. Poruszono kwestię skoordynowanego ładowania wraz ze scharakteryzowaniem scentralizowanej oraz zdecentralizowanej metody zarządzania ładowaniem. Zawarto również wiadomości na temat podstaw matematycznych technik optymalizacyjnych z uwzględnieniem funkcji celu, warunków ograniczających oraz algorytmu rozwiązywania.

Słowa kluczowe: elektromobilność; sterowanie ładowaniem; optymalizacja; sieci inteligentne

Electric vehicle fleet management in intelligent networks charging control and optimization issues

Abstract: The article presents information about the management of electric vehicle fleets in smart grids. The issue of coordinated charging is addressed, together with the characteristics of a centralised and decentralised charging control method. The article also includes information about the mathematical basis of optimisation techniques, taking into account the objective function, constraint conditions and the solution algorithm.

Keywords: electromobility; electric vehicles; charging control; optimization; smart grids

1. Wstęp

Elektromobilność jest powszechnie uznawana za jedno z rozwiązań, które może pomóc operatorom sieci inteligentnych w rozwiązaniu problemów z emisją gazów cieplarnianych. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej przewiduje się, że do 2030 r. liczba pojazdów elektrycznych osiągnie prawie 130 milionów [1].

Technologia Vehicle-to-Grid (V2G) umożliwia dwukierunkową wymianę energii między samochodami elektrycznymi i siecią. W ten sposób akumulator samochodu elektrycznego może przechowywać nadwyżkę energii w okresach mniejszego zapotrzebowania i oddawać ją z powrotem do sieci w okresach większego zapotrzebowania tak, aby osiągnąć równowagę podaży i popytu na energię elektryczną [2–3].

Integracja pojazdów elektrycznych na dużą skalę oznacza jednak również zwiększenie obciążenia sieci elektroenergetycznych [4]. W rezultacie potrzebne

* a.chudy@pollub.pl, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

są metody planowania ładowania tak, aby pojazdy elektryczne stały się atutem inteligentnej sieci, a nie tylko tradycyjnym obciążeniem.

Kluczem do rozwiązania problemów z dwukierunkowym przesyłem energii jest sposób budowy, korzystnego dla wszystkich stron, inteligentnego łącza komunikacyjnego w celu osiągnięcia skoordynowanej wymiany energii między samochodami elektrycznymi a siecią elektroenergetyczną. Obecne wysiłki badawcze poświęcone są scentralizowanym lub zdecentralizowanym metodom sterowania ładowaniem [3,5–6].

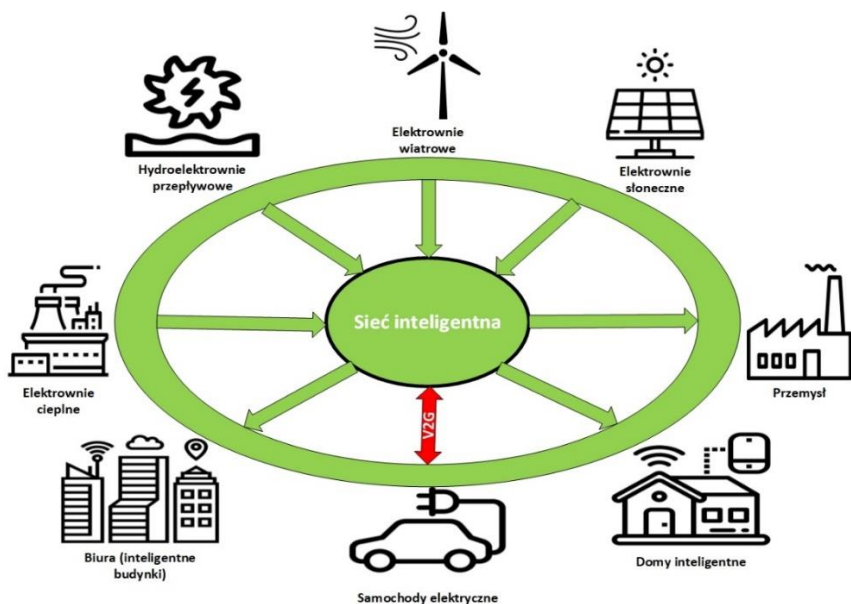
W najnowszej literaturze badacze koncentrują się przede wszystkim na skuteczności metod optymalizacyjnych stosowanych w rozwiązywaniu problemu integracji samochodów elektrycznych z siecią. Niewiele prac szczegółowo opisuje podejścia do rozwiązania i analizuje możliwości uzyskania strategii ładowania optymalnych pod względem ekonomicznym, wykorzystania odnawialnych źródeł energii, czy też floty samochodów elektrycznych do regulacji częstotliwości, szczególnie w przypadku dużej liczby pojazdów elektrycznych.

Celem niniejszego artykułu jest dokonanie kompleksowego przeglądu sposobów integracji samochodów elektrycznych z systemem elektroenergetycznym, metod zarządzania ładowaniem / rozładowywaniem (scentralizowane i zdecentralizowane) oraz przedstawienie podstaw matematycznych technik optymalizacji wraz z ogólną oceną istniejących metod optymalizacyjnych. Artykuł ma za zadanie być użytecznym przewodnikiem do przyszłych badań, które będą poruszać aspekty optymalizacyjne oraz zarządzania ładowaniem samochodów elektrycznych

2. Metody planowania ładowania samochodów elektrycznych

Sieci inteligentne (ang. smart grids) przyniosły ogromne usprawnienia w sposobie wytwarzania, dystrybucji i zużycia energii elektrycznej dzięki integracji zaawansowanych technologii wykrywania, komunikacji i kontroli działania sieci elektroenergetycznych. Integracja dużej liczby samochodów elektrycznych z systemem elektroenergetycznym jest poważnym wyzwaniem, które wymaga intensywnej oceny i obserwacji pod kątem wpływu ekonomicznego oraz korzyści z eksploatacji. Zaawansowana komunikacja w czasie rzeczywistym jest istotnym składnikiem wymiany informacji dotyczących cen, prognozy zużycia energii i zachowania użytkowników samochodów elektrycznych. Dlatego też, aby skutecznie zintegrować samochody elektryczne z systemem elektroenergetycznym, platforma sieci inteligentnych jest niezbędna [7].

Rys. 1. przedstawia głównych producentów i konsumentów energii elektrycznej w sieciach inteligentnych. Kierunek strzałki oznacza kierunek przepływu energii.



Rys. 1. Główni producenci i konsumenci energii elektrycznej w sieciach inteligentnych

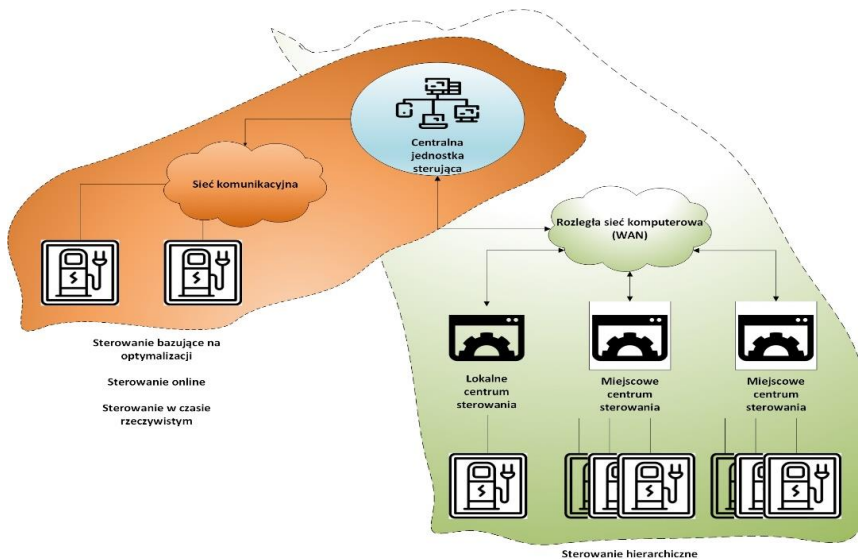
Wysoki stopień penetracji rynku transportowego przez samochody elektryczne może mieć znaczący wpływ na system elektroenergetyczny. Nieskoordynowane ładowanie może powodować wzrost zapotrzebowania na energię w godzinach szczytu, przeciążenie komponentów systemu oraz przyspieszenie potrzeby wymiany elementów sieci lub wzmocnienia już istniejącej sieci elektroenergetycznej. Większe obciążenie podczas zapotrzebowania szczytowego może prowadzić do przegrzania elementów systemu, na przykład elektroenergetycznych linii dystrybucyjnych i transformatorów, oraz skrócenia oczekiwanej żywotności tych elementów. Nieskoordynowane ładowanie może również powodować przerwy w dostawie energii z sieci, wpływając w ten sposób na jakość i niezawodność dostarczanego zasilania. Z tych względów konieczne jest zachęcenie właścicieli pojazdów do skoordynowanego ładowania w celu zwiększenia wydajności systemu, ale bez utraty satysfakcji właściciela samochodu elektrycznego [4,8–11].

Skoordynowane ładowanie można podzielić na dwie kategorie:

a) Scentralizowane

Główną koncepcją scentralizowanego ładowania jest wykorzystanie struktury scentralizowanej do pozyskiwania informacji z samochodów elektrycznych, przetwarzanie centralne pozyskanych danych i zapewnienie globalnego optymalnego rozwiązania z uwzględnieniem wszystkich ograniczeń sieci oraz użytkowników pojazdów. Główny aparat sterujący podejmuje decyzje dotyczące szybkości i planowania ładowania. W scentralizowanym planowaniu

i sterowaniu ładowaniem algorytm sterowania jest wykonywany po zebraniu wszystkich informacji o stanie samochodów elektrycznych i preferencjach ich właścicieli, a także innych danych systemowych, takich jak ceny rynkowe energii i ograniczenia systemowe. Centralnym aparatem sterującym może być agregator lub operator systemu. Scentralizowane aparaty sterujące zwykle zapewniają optymalne wykorzystanie zasobów systemowych, ale wymagają zaawansowanej infrastruktury komunikacyjnej. Ograniczeniem scentralizowanego ładowania jest to, że rozmiar problemu optymalizacji staje się duży wraz ze wzrostem liczby samochodów w danym obszarze. Jako rozwiązanie tego problemu w artykułach można spotkać się z hierarchiczną architekturą sterowania, która dzieli obciążenia wynikające z ładowania samochodów elektrycznych na kilka grup w zależności od ich lokalizacji. Centralny aparat sterujący zarządza tylko zapotrzebowaniem na energię z danych grup, a grupy używają lokalnego aparatu sterowania do zarządzania rozdziałem energii do poszczególnych pojazdów. Hierarchiczne sterowanie ładowaniem jest korzystne pod względem wymagań komunikacyjnych i obliczeniowych. W literaturze można spotkać się także z innymi strategiami sterowania ładowaniem wykorzystującymi scentralizowane podejście. Są nazywane *sterowaniem online* oraz *sterowaniem w czasie rzeczywistym* [12–16].

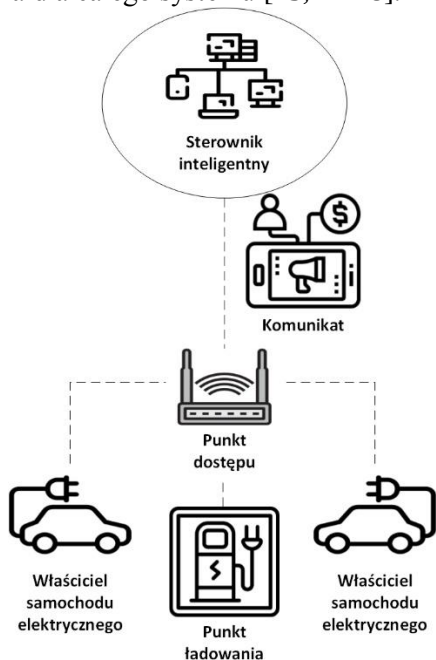


Rys. 2. Schemat ideowy zdecentralizowanego sterowania ładowaniem

b) Zdecentralizowane

W przypadku zdecentralizowanego (rozproszonego) sterowania ładowaniem decyzja dotycząca ładowania / rozładowywania nie jest

przetwarzana i generowana za pomocą agregatora lub operatora systemu. Zamiast tego operator wysyła informacje, aby zachęcić właścicieli samochodów elektrycznych do wykonania określonych działań. Właściciele pojazdów indywidualnie wybierają harmonogramy ładowania i każdy z nich decyduje o szybkości ładowania / rozładowywania na podstawie własnych preferencji. Żadne informacje prywatne nie są przesyłane z powrotem do agregatora lub operatora. W tego rodzaju rozwiązaniu cena energii elektrycznej i wygoda użytkownika są głównymi czynnikami przy podejmowaniu decyzji. Gdy właściciele samochodów elektrycznych decydują o swoich wzorcach ładowania, zdecentralizowane sterowanie nie gwarantuje uzyskania optymalnego globalnego rozwiązania dla całego systemu [15,17–18].



Rys. 3. Schemat ideowy zdecentralizowanego sterowania ładowaniem

Porównanie scentralizowanych i zdecentralizowanych metod planowania ładowania

W metodach scentralizowanych, koordynator ds. energii jest odpowiedzialny za optymalizację profilu ładowania / rozładowywania wszystkich zaangażowanych samochodów elektrycznych z uwzględnieniem ograniczeń sieciowych. Wraz z szybkim wzrostem stopniem penetracji samochodów elektrycznych rośnie wtedy złożoność obliczeniowa jest duża ze względu na przekleństwo wymiarowości, zwłaszcza w przypadku problemu programowania nieliniowego (NP). W związku z tym, koszty obliczeniowe dla optymalnego

profilu ładowania / rozładowywania również znacznie wzrosną. W szczególności jest to bardziej problematyczne przy planowaniu w czasie rzeczywistym w przypadku dużej floty samochodów elektrycznych. Z drugiej strony, w metodzie planowania zdecentralizowanego projektowanie mechanizmu cenowego energii odbywa się głównie na podstawie stanu sieci lokalnej i ogólnego zapotrzebowania samochodów elektrycznych na energię. Co więcej, każdy właściciel samochodu elektrycznego sam może zdecydować, czy chce ładować / rozładowywać akumulator samochodu elektrycznego dysponując aktualnym schematem cenowym. W związku z tym nie ma potrzeby optymalizowania tak dużej liczby zmiennych, jak w przypadku metody scentralizowanej, nawet jeśli w grę wchodzi duża flota pojazdów. Niemniej jednak, obserwuje się, że w niektórych zdecentralizowanych podejściach powtarzalny proces iteracyjny jest konieczny do poszukiwania optymalnego systemu cenowego, a konwergencji nie można zagwarantować. Ogólnie rzecz biorąc, podejście zdecentralizowane ma znaczną przewagę nad podejściem scentralizowanym w aspekcie kosztów obliczeniowych i dostępności do optymalnych rozwiązań w zakresie strategii planowania ładowania/rozładowania dużych flot samochodów elektrycznych. **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..** określa różnice pomiędzy scentralizowaną a zdecentralizowaną metodą zarządzania ładowaniem [3].

Tab. 1. Różnice między scentralizowaną a zdecentralizowaną metodą zarządzania ładowaniem [3]

Cecha	Metoda zarządzania ładowaniem	
	Scentralizowana	Zdecentralizowana
Możliwość decydowania właściciela pojazdu o ładowaniu	Niezapewniona	Zapewniona
Ryzyko dla bezpieczeństwa sieci	Niemal wolna od ryzyka	Potencjalne ryzyko
Obawy związane z prywatnością	Średnie	Marginalne
Złożoność obliczeniowa	Wysoka	Niska
Rozwiązanie optymalne	Globalne	Lokalne

W metodach scentralizowanych większy nacisk kładzie się na wydajność sieci i koszty operacyjne niż na indywidualnych użytkowników samochodów elektrycznych i ich możliwość decydowania o ładowaniu. Ponadto, ze względu na wymóg gromadzenia informacji o opłatach za ładowanie z rozproszonych w terenie samochodów elektrycznych potrzebna jest dwukierunkowa sieć

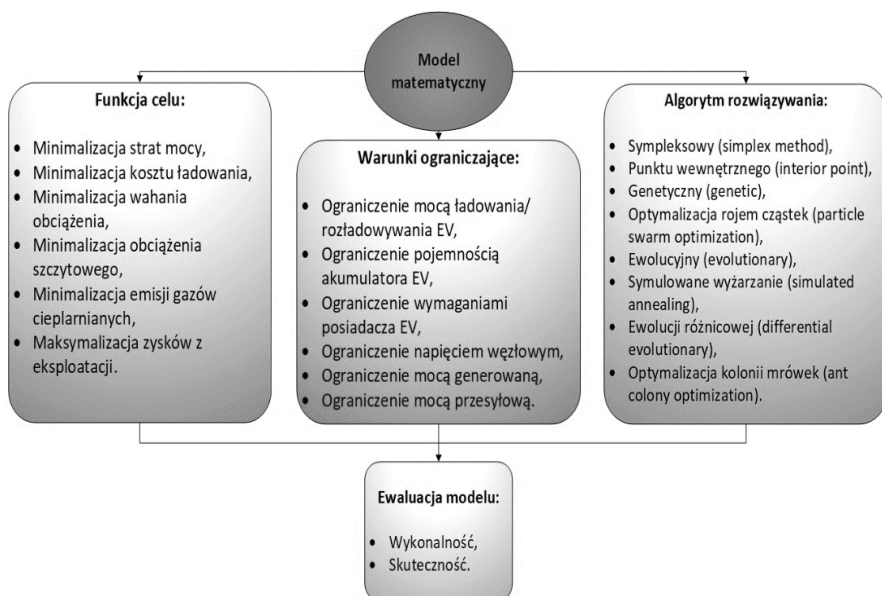
komunikacyjna. Powoduje to obawy o prywatność właścicieli samochodów elektrycznych (informacje o czasie podłączenia do i odłączenia od punktu ładowania oraz miejscu ładowania). W przeciwieństwie do metod scentralizowanych, podejścia zdecentralizowane pozwalają decydować indywidualnemu właścicielowi samochodu o ładowaniu. Takie rozwiązanie nie może więc gwarantować pożądanej przez operatorów sieci pracy całego systemu. Niestety może to budzić pewne obawy dotyczące bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego, gdy ogłaszany system cen nie spowoduje przesunięcia ładowania samochodów elektrycznych z okresów zapotrzebowania szczytowego na doliny obciążenia. Korzyści są jednak takie, że metody zdecentralizowane wymagają pokrycia jedynie niskich kosztów komunikacji i obliczeń. Charakteryzują się również znacznie mniejszymi obawami dotyczącymi prywatności właścicieli samochodów elektrycznych [3].

3. Podstawy matematyczne technik optymalizacyjnych

Podejmowanie decyzji strategicznych dotyczących wdrożenia V2G jest zasadniczo problemem optymalizacyjnym niezależnie od tego czy metoda planowania ładowania jest scentralizowana lub zdecentralizowana. Typowy matematyczny model programowania składa się z trzech części: funkcji celu, warunków ograniczających oraz algorytmu rozwiązywania. Rys. 4. przedstawia ogólną strukturę modelowania matematycznego przy planowaniu rozwiązania V2G.

Planowanie funkcji celu

Można uznać, że ostatecznymi celami wdrożenia V2G jest zintegrowanie wszystkich dostępnych zasobów (w tym między innymi EV, jednostek do magazynowania energii, źródeł generacji rozproszonej i OZE) oraz pełne wykorzystanie ich zalet w celu osiągnięcia maksymalizacji ogólnej efektywności energetycznej. Uważa się, że w ten sposób złożone korzyści gospodarcze i środowiskowe zostaną znacznie poprawione.



Rys. 4. Ogólna struktura modelowania matematycznego przy planowaniu rozwiązania V2G [3]

Ze względu na te cele podsumowano kilka popularnych poglądów na temat działania V2G [3]:

- Z technicznego punktu widzenia strategia planowania ładowania powinna dążyć do zrównoważenia podaży i popytu na energię elektryczną w zakresie wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii,
- Z ekonomicznego punktu widzenia strategia projektowania powinna być zgodna z zasadami uwzględniania wszystkich zainteresowanych stron (na przykład maksymalizacja zysków operacyjnych całego systemu elektroenergetycznego przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztów ładowania samochodów elektrycznych),
- Z punktu widzenia środowiska emisje dwutlenku węgla powodowane przez EV powinny zostać znacznie zmniejszone w ramach skoordynowanego harmonogramu ładowania / rozładowywania, przy założeniu zaspokojenia zapotrzebowania zainteresowanych stron.

Do najczęściej pojawiających się celów można zaliczyć minimalizację strat mocy przy zastosowaniu obliczeń optymalnego przepływu mocy, minimalizację zapotrzebowania szczytowego, złagodzenie odchyleń między energią zakupioną na rynku energii elektrycznej a energią zużytą do ładowania samochodów elektrycznych. Niektóre wysiłki koncentrują się na wielocelowych modelach optymalizacyjnych, na przykład: minimalizacja zarówno kosztów eksploatacyjnych jak i emisji CO₂ w skoordynowanym z jednodniowym wyprzedzeniem harmonogramie ładowania samochodów elektrycznych. Innym przykładem optymalizacji wielocelowej bywa również minimalizacja zarówno

ogólnych wahań obciążenia, jak i zadowolenia właścicieli samochodów elektrycznych ze strategii zarządzania energią. W [19] opracowano także optymalną metodę planowania ładowania pod względem zminimalizowania zarówno kosztów wytwarzania energii elektrycznej, jak i emisji dwutlenku węgla [3,20–21].

Warunki ograniczające

Ograniczenia możemy podzielić na dwie kategorie [3]:

- a) pochodzące od właściciela samochodu elektrycznego i wynikające z użytej technologii,
- b) pochodzące od sieci elektroenergetycznej.

Do pierwszej kategorii można zaliczyć ograniczenie mocą ładowania / rozładowywania akumulatora samochodu elektrycznego, ograniczenie pojemnością akumulatora, ograniczenie wynikające z pożądanego przez właściciela poziomu naładowania akumulatora. Przykłady ograniczeń pochodzących od sieci elektroenergetycznej to: wartość napięcia węzłowego oraz moc przesyłowa [3].

Algorytm rozwiązywania

Proces rozwiązywania modelu optymalizacji jest zwykle trudnym zadaniem, ponieważ wiąże się z dużą ilością zmiennych, gdy duża liczba samochodów elektrycznych łączy się z implementacją V2G. Ponadto ustanowiony model może składać się z nieliniowej funkcji celu lub ograniczenia nieliniowego. Z matematycznego punktu widzenia modele planowania wprowadzenia EV w obecnej literaturze obejmują modele programowania liniowego (LP), mieszanego całkowitoliczbowego nieliniowego (MIP), NP i inne. Mówiąc ogólnie, model LP zapewnia proste i wydajne podejście do rozwiązywania problemu ładowania samochodów elektrycznych przy użyciu tradycyjnych technik rozwiązywania, takich jak metoda sympleksowa. Niemniej jednak te tradycyjne techniki mają trudności z radzeniem sobie z modelami NP lub MIP. Dlatego opracowano i zastosowano inne techniki rozwiązywania modeli NP i MIP [3].

W istniejących pracach opracowano kilka modeli LP pod względem planowania ładowania EV, na przykład: [11,19,22]. Modele te są w stanie określić globalne optymalne rozwiązanie ładowania samochodu elektrycznego w dość prosty sposób, ale są ograniczone do celów i ograniczeń liniowych. Nie jest to jednak wystarczające dla bardziej skomplikowanego systemu V2G. Stąd modele NP i MIP są stosowane w celu rozwiązania nieliniowych funkcji celu lub nieliniowych ograniczeń liczb całkowitych. Model programowania kwadratowego (QP) jest typowym modelem NP. Zgodnie z ideą wygięcia, modele QP mogą należeć do wypukłych i niewypukłych modeli optymalizacji. Zasadniczo wypukły model optymalizacyjny potrzebuje mniej czasu na uzyskanie rozwiązania niż niewypukły model optymalizacyjny. Powodem jest to, że wypukły model programowania może być skutecznie rozwiązany przez algorytm punktu wewnętrznego. Co więcej, prawie nie ma kompletnych

i niezawodnych algorytmów do rozwiązywania modeli MIP lub innych modeli nieliniowych. W rezultacie wiele algorytmów metaheurystycznych służy jako alternatywna opcja w rozwiązywaniu złożonych modeli. Większość z algorytmów ma tę zaletę, że wymaga mniej czasu obliczeniowego niż tradycyjne metody optymalizacji. Mimo to prawie nie są w stanie zapewnić globalnie optymalnych rozwiązań. Najpopularniejsze algorytmy w rozwiązaniach V2G to optymalizacja rojem cząstek oraz algorytm genetyczny [3,23–25].

Ewaluacja modelu

Propozycja wprowadzenia rozwiązania V2G w danej sieci powinna zacząć się najpierw od jej krótkiego przedstawienia i analizy jej parametrów wraz z modelowaniem matematycznym. Następnie należy sformułować problem optymalnego sterowania, prowadzący do osiągnięcia optymalnych strategii ładowania / rozładowywania dla każdego samochodu elektrycznego w celu optymalizacji działania sieci pod względem wcześniej ustalonych celów. Skuteczność proponowanej optymalnej strategii kontroli ładowania trzeba następnie zweryfikować za pomocą symulacji. Na końcu analizy powinno nastąpić porównanie nieskoordynowanej strategii ładowania z nową metodą w celu podkreślenia wartości proponowanego podejścia.

4. Wnioski

Przy tworzeniu sieci inteligentnej należy uwzględnić zmiany, które należy wprowadzić w istniejącej infrastrukturze. W większości przypadków istniejąca sieć jest rozszerzana lub ulepszana. Należy także wybrać odpowiednią topologię w zależności od potrzeb operatora i konsumentów.

Bardzo ważnym aspektem jest także niezawodność sieci. Wykorzystanie akumulatorów samochodów elektrycznych oraz OZE może zapobiec przerwom w dostawach energii oraz pogorszeniu parametrów jakości energii. Sieć musi również zapewniać interoperacyjność wszystkich jej elementów, ponieważ technologie z bardzo różnych dziedzin inżynierii są zmuszone do współistnienia.

Samochody elektryczne będą w przyszłości stanowiły ważną część sieci inteligentnych. Pomimo wielu badań nad integracją samochodów elektrycznych z siecią elektroenergetyczną, szereg zagadnień wymaga jeszcze właściwego i kompleksowego rozwiązania. Istnieje potrzeba integracji dokładniejszych modeli infrastruktury komunikacyjnej ze strategiami ładowania samochodów elektrycznych. To szczegółowe modelowanie jest szczególnie ważne w polityce zarządzania opłatami za ładowanie / rozładowywanie, które ułatwiają świadczenie usług pomocniczych dla systemu.

Samochody elektryczne mogą mieć również niekorzystny wpływ na sieć, jeśli właściciele zdecydują się na ich ładowanie w godzinach szczytu [26]. W dalszym ciągu opracowane są strategie i algorytmy w celu optymalizacji samochodów pojazdów elektrycznych tak, aby nie przeciążać sieci. Można

zauważyć, że wszystkie mają na celu poprawę następujących aspektów: wydajności sieci, wskaźnika ekonomicznego i wskaźnika środowiskowego.

Literatura

- [1] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2019*, 2019.
- [2] Fathabadi H., *Utilizing solar and wind energy in plug-in hybrid electric vehicles*. Energy Conversion and Management, 156, 2018.
- [3] Zheng Y., Niu S., Shang Y., Shao Z., Jian L., *Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 2019.
- [4] Wiącek K., Chudy A., *Przewodowe i bezprzewodowe ładowanie samochodów elektrycznych oraz ich wpływ na sieć elektroenergetyczną*, Problemy współczesnej inżynierii wybrane zagadnienia elektroniki stosowanej i informatyki, Wyd. Politechniki Lubelskiej, 2019.
- [5] Zhan K., Hu Z., Song Y., Lu N., Xu Z., Jia L., *A probability transition matrix based decentralized electric vehicle charging method for load valley filling*, Electric Power Systems Research, 125, 2015.
- [6] Ma Z., Callaway D.S., Hiskens I.A., *Decentralized Charging Control of Large Populations of Plug-in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 21, 2013.
- [7] Mwasilu F., Justo J.J., Kim E.K., Do T.D., Jung J.W., *Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34, 2014.
- [8] Verzijlbergh R.A., Grond M.O.W., Lukszo Z., Slootweg J.G., Ilic M.D., *Network Impacts and Cost Savings of Controlled EV Charging*, IEEE Trans. Smart Grid, 3, 2012.
- [9] Chudy A., Stryczewska H.D., *Electric vehicle charging-aspects of power quality and electromagnetic compatibility*. Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom, 2019.
- [10] Ahmadi A., Tavakoli A., Jamborsalamati P., Rezaei N., Miveh M.R., Gandoman F.H. et al., *Power quality improvement in smart grids using electric vehicles: a review*, IET Electrical Systems in Transportation, 9, 2019.

- [11] Maigha, Crow M.L., *Cost-Constrained Dynamic Optimal Electric Vehicle Charging*, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8, 2017.
- [12] de Hoog J., Alpcan.T., Brazil M., Thomas D.A., Mareels I., *Optimal Charging of Electric Vehicles Taking Distribution Network Constraints Into Account*, IEEE Transactions on Power Systems, 30, 2015.
- [13] Seyyedeh Barhagh S., Mohammadi-Ivatloo B., Anvari-Moghaddam A., Asadi S., *Risk-involved participation of electric vehicle aggregator in energy markets with robust decision-making approach*, Journal of Cleaner Production, 239, 2019.
- [14] Yang L., Zhang J., Poor H.V., *Risk-Aware Day-Ahead Scheduling and Real-time Dispatch for Electric Vehicle Charging*, IEEE Transactions on Smart Grid, 5, 2014.
- [15] Faddel S., Al-Awami A., Mohammed O., *Charge Control and Operation of Electric Vehicles in Power Grids: A Review*, Energies 11., 2018.
- [16] Das H.S., Rahman M.M., Li S., Tan C.W., *Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120, 2020.
- [17] Gan L., Topcu U., Low S.H., *Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging*, IEEE Transactions on Power Systems, 28, 2013.
- [18] Ghavami A., Kar K., Gupta A., *Decentralized Charging of Plug-in Electric Vehicles With Distribution Feeder Overload Control*, IEEE Transactions on Automatic Control, 61, 2016.
- [19] Ahn C., Li C.T., Peng H., *Decentralized charging algorithm for electrified vehicles connected to smart grid*, Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011.
- [20] Bessa R.J., Matos M.A., *Global against divided optimization for the participation of an EV aggregator in the day-ahead electricity market. Part I: Theory*, Electric Power Systems Research, 95, 2013.
- [21] Zakariazadeh A., Jadid S., Siano P., *Multi-objective scheduling of electric vehicles in smart distribution system*, Energy Conversion and Management 79, 2014.
- [22] Escudero-Garzas J.J., Garcia-Armada A., Seco-Granados G., *Fair Design of Plug-in Electric Vehicles Aggregator for V2G Regulation*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61, 2012.
- [23] Jian L., Zhu X., Shao Z., Niu S., Chan C.C., *A scenario of vehicle-to-grid implementation and its double-layer optimal charging strategy for minimizing load variance within regional smart grids*, Energy Conversion and Management, 78, 2014.

- [24] Jian L., Zheng Y., Xiao X., Chan C.C., *Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid*, Applied Energy, 146, 2015.
- [25] Jian L., Xue H., Xu G., Zhu X., Zhao D., Shao Z.Y., *Regulated Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Minimizing Load Variance in Household Smart Microgrid*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60, 2013.
- [26] Chudy A., Mazurek P., *Electromobility—the Importance of Power Quality and Environmental Sustainability*, Journal of Ecological Engineering, 2, 2019.

Analiza symulacyjna pracy nieregulowanej izolowanej przetwornicy rezonansowej DC/DC typu LLC zasilanej z modułów fotowoltaicznych PV

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę symulacyjną funkcjonowania izolowanej przetwornicy rezonansowej DC/DC zasilanej z modułów fotowoltaicznych. Przedstawiono konfigurację przekształtnika prądu stałego pracującego z szeregowym obwodem rezonansowym LLC. Przeprowadzone zostały symulacje działania przekształtnika obniżającego napięcie zasilanego z modułów fotowoltaicznych PV. Przeanalizowano wpływ zmian częstotliwości na prądy napięcia po stronie wtórnej oraz pierwotnej przekształtnika.

Słowa kluczowe: przetwornica DC/DC, obwód rezonansowy, panel fotowoltaiczny, LLC, ZVS, ZCS

Simulation analyze of unregulated full isolated LLC resonant DC/DC converter powered from PV arrays

Abstract: The paper presents a simulation analysis of the operation of an insulated DC / DC resonant converter supplied from photovoltaic modules. Configuration of DC converter working with LLC resonance circuit is presented. Simulations of operation of the lowering converter powered from PV photovoltaic modules were carried out. The influence of frequency changes on voltage currents on the secondary and primary side of the converter was analyzed.

Keywords: DC/DC converter, resonant tank, PV array, LLC, renewable energy

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój sektora energii odnawialnej, sieci Smart Grid oraz elektromobilności spowodował rosnące zapotrzebowanie na nowoczesne urządzenia energoelektroniczne pracujące przy prądzie stałym DC i zmiennym AC. Rozbudowywujące się stale instalacje farm fotowoltaicznych oraz instalacje PV zwiększające swoją mocy i napięcia pracy stały się wyzwaniem dla inżynierów projektujących przekształtnik. Uzyskiwanie wysokich sprawności przy zachowaniu odpowiedniej stabilności parametrów pracy spowodowało konieczność powstawania nowych rozwiązań przekształtnikowych. Na rynku wśród przetwornic DC/DC współpracujących z instalacjami PV znaleźć można klasyczne topologie przekształtników podwyższająco-obniżających napięcie

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

(z ang. Buck – Boost Converter). Są to proste i naj tańsze rozwiązania, minusem których jest brak izolacji galwanicznej obwodów oraz ograniczone możliwości pracy przy napięciach rzędu 400V i mocach powyżej kilku kW. Do grupy spełniającej podane wymagania instalacji fotowoltaicznych można zaliczyć natomiast izolowane rezonansowe przetwornice prądu stałego SRC (z ang. Series resonant converter), do których zalicza się przekształtniki w topologii LLC[1-4].

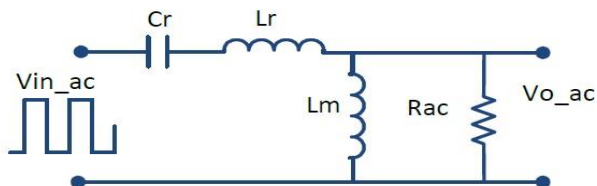
Przetwornice te dzięki zastosowaniu obwodu rezonansowego LLC i pracy z częstotliwościami bliskimi rezonansowej umożliwiają znaczne ograniczenie strat mocy powstających podczas komutacji kluczy tranzystorowych stwarzając warunki dla tzw. komutacji miękkiej (ang. soft switching). Przy podanych warunkach tranzystory komutują przy zerowym napięciu – ZVS (z ang. zero voltage switching) lub zerowym prądzie - ZCS (z ang. zero current switching). Praca w stanie miękkiej komutacji redukuje straty mocy podnosząc sprawność urządzenia, co umożliwia zastosowanie mniejszych i tańszych systemów chłodzenia. Kolejną zaletą przetwornic rezonansowych LLC jest ich praca z wysokimi częstotliwościami rzędu ok. 100kHz. Umożliwia to zastosowanie transformatorów o znacznie mniejszych rozmiarach i wadze, niż w tradycyjnych przetwornicach izolowanych co przyczynia się do miniaturyzacji urządzenia, zwiększając moc uzyskiwaną z cm² przekształtnika.

W poniższej pracy została przedstawiona analiza symulacyjna modelu nieregulowanej pełno-mostkowej przetwornicy prądu stałego LLC zasilanej z modułów fotowoltaicznych wykonana w programie Matlab/Simulink. Analizie poddano współpracę modułów PV z przetwornicą przy różnych wartościach częstotliwości pracy obwodu w obszarze pojemnościowym, rezonansowym oraz indukcyjnym. Po stronie pierwotnej przetwornicy zwrócono uwagę na napięcia i prądy płynące w obwodzie rezonansowym LLC oraz prąd i napięcie na tranzystorach MOSFET podczas komutacji. Po stronie wtórnej przetwornicy przeanalizowano stabilność napięcia wyjściowego na filtrze pojemnościowym, prąd wyjściowy oraz komutację mostka diodowego.

2. Rezonansowa przetwornica prądu stałego typu LLC

Klasyczna przetwornica DC/DC LLC składa się z kilku głównych bloków: po stronie pierwotnej znajdują się aktywne elementy (tranzystory), elementy pasywne, transformator wysokiej częstotliwości; po stronie wtórnej przetwornica składa się z prostownika diodowego oraz pojemności filtrującej. Kluczowym elementem przetwornicy LLC jest jej obwód rezonansowy (z ang. resonat tank), składający się z kondensatora rezonansowego C_r , dławika rezonansowego L_r oraz transformatora, w którym istotną rolę odgrywa jego indukcyjność magnesująca L_m . Istotą działania przetwornicy LLC jest praca w rezonansie pojemności C_r oraz indukcyjności L_r ($L_r + L_m$). Układ przekształtnika rezonansowego wygodnie jest analizować za pomocą schematu

zastępczego (Rys 2.1) oraz wzorów wielkości (1)(2) i funkcji transferu charakterystyk DC (3)(4) (Rys 2.2) [5-7].



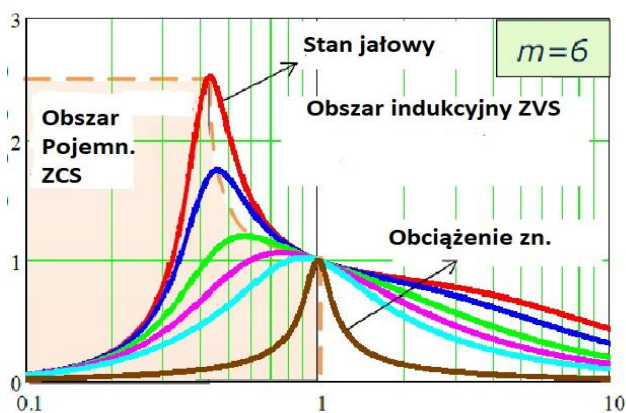
Rys.1. Schemat zastępczy przekształtnika LLC

$$R_{ac} = \frac{8}{\pi^2} * \frac{N_p^2}{N_s^2} * R_o \quad (11)$$

$$L_m = m * L_r \quad (2)$$

$$K(Q, m, fr) = \frac{|V_{o_s}|}{|V_{in_s}|} \quad (3)$$

$$K = \frac{fr^2 * (m - 1)}{\sqrt{(m - fr^2 - 1)^2 + Fx^2 * (Fx^2 - 1)^2 * (m - 1)^2 * Q^2}} \quad (4)$$



Rys. 2. Charakterystyki DC (wzmocnienia od częstotliwości) obwodu zastępczego dla różnych wartości

Na podstawie charakterystyk DC (Rys. 2.2) można zauważyć, że wzmocnienie obwodu LLC pracującego z częstotliwością rezonansową f_r zmienia się wraz z obciążeniem przetwornicy tzw. autoregulacja obciążeniem. Dla przekształtnika obciążonego znamionowo ($R_{ac} \sim \min$) wzmocnienie jest bliskie 1, natomiast dla stanu jałowego ($R_{ac} \sim \infty$) wzmocnienie jest bliskie wartości maksymalnej, ograniczonej przez wartości pojemności i indukcyjności. Dla obciążenia jałowego w rezonansie biorą udział indukcyjności L_r i L_m oraz pojemność C_r z których wyznacza się drugą częstotliwość rezonansową f_{r1} . Dla obciążenia znamionowego w rezonans zachodzi pomiędzy indukcyjnością L_r oraz pojemnością C_r . Kolejną interesującą możliwością zastosowania obwodu LLC jest możliwość pracy przetwornicy jako podwyższająco-obniżającej (ang. buck-bust). Dla danego obciążenia modulując odpowiednio częstotliwość f w zakresie od f_{r1} do f_r możliwe jest zmniejszanie lub zwiększanie napięcia podawanego na stronę pierwotną transformatora wysokiej częstotliwości. Jest to istotne w przypadku wahań napięcia po stronie szyny DC, gdzie możliwe jest utrzymywanie stałej wartości napięcia wyjściowego przekształtnika niezależnie od napięcia zasilania. Na rys. 2 zbiór charakterystyk został podzielony na dwa obszary: obszar pojemnościowy ZCS oraz obszar indukcyjny ZVS. Z podziału tego wynika kolejna ważna zaleta. Za pomocą regulacji częstotliwości możliwe jest takie wpływanie na fazę prądu aby wyprzedzał lub opóźniał się w fazie względem napięcia. Dzięki takiej właściwości można uzyskać warunki dla tzw. miękkiej komutacji (ang. soft switching) kluczy tranzystorowych. W przypadku pracy dla częstotliwości mniejszej od f_r dla obciążenia znamionowego uzyskuje się warunki dla komutacji ZCS – przy zerowej wartości prądu, a dla częstotliwości większej od f_r osiąga się warunki dla komutacji ZVS – przy zerowej wartości napięcia. Pozwala to znacząco zredukować straty przekształtnika co za tym idzie zmniejszyć temperaturę pracy oraz system chłodzenia co przekłada się na ekonomiczność takiego rozwiązania. Rezonansową przetwornicę LLC prądu stałego można zaprojektować postępując według podanego poniżej podstawowego algorytmu w kilku krokach[8]:

1. Obliczenie przekładni transformatora oraz wymaganych wzmocnień obwodu M:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_{we}}{U_{wy}} \quad (5)$$

$$M_{max} = \frac{U_{we_{nom}}}{U_{we_{min}}} \quad (6)$$

$$M_{min} = \frac{U_{we_{nom}}}{U_{we_{max}}} \quad (7)$$

2. Dobór wartości dobroci - Q obwodu rezonansowego oraz współczynnika krotności indukcyjności magnesującej – m. Standardowo dobiera się wartości odpowiednio $Q = 0,45$ i $m = 6$.

3. Wyznaczenie wartości rezystancji zastępczej dla schematu widzianej jako rezystancje dla schematu zastępczego:

$$R_o = \frac{8 * n^2}{\pi^2} * \frac{U_o}{I_o} \quad (8)$$

4. Wyznaczenie parametrów obwodu rezonansowego, wartości pojemności C_r , Indukcyjności L_r , częstotliwości rezonansowej:

$$C_r = \frac{1}{2 * \pi * f_r * R_o} \quad (9)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f)^2 * C_r} \quad (11)$$

$$m = \frac{L_m}{L_r} \quad (12)$$

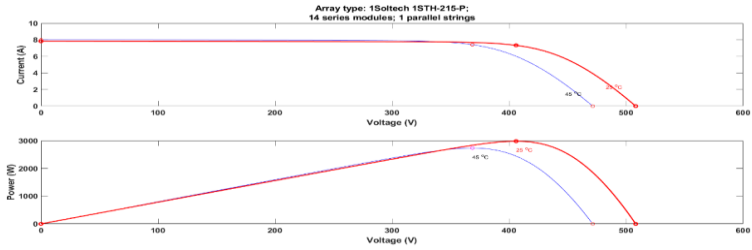
$$f_r = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L_r * C_r}} \quad (13)$$

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{(L_r + L_m) * C_r}} \quad (14)$$

3. Ogniowo PV

Instalacje fotowoltaiczne są jednymi z najczęściej pracujących instalacji odnawialnych źródeł energii z przetwornicami DC/DC. Pojedynczy panel PV dostarcza mocy znamionowej ok $P_p = 250$ W, przy parametrach napięcia $U_o = 35$ V i prądzie $I_o = 8$ A dla nasłonecznienia 1000 W/m². Instalacje sieci Smart Grid lub farmy fotowoltaiczne pracują na napięciach rzędu 400-450 VDC. Wymaga to szeregowego łączenia paneli fotowoltaicznych, natomiast w celu zwiększania prądu wyjściowego panele łączone są ze sobą równolegle. Zastosowanie przetwornic rezonansowych w tego typu aplikacjach pociąga

z sobą konkretne korzyści. Zastosowanie transformatora zapewnia pełną izolację galwaniczną instalacji od obwodu odbiorczego szyn DC, dzięki czemu w przypadku wystąpienia zakłócenia bądź niestabilności pracy po jednej ze stron nie wpływa to negatywnie na drugą stronę. Przekształtniki LLC DC/DC zasilane przez panele fotowoltaiczne mogą pracować w pełni elastycznie dopasowując napięcie na wyjściu filtra pojemnościowego do wymagań odbiornika. W zależności od wartości ustawienia przekładni transformatora mogą być to poziomy dowolne rzędu 12 V – 450 VDC. Do korzyści z zastosowania przekształtników LLC DC/DC w aplikacjach PV zaliczyć można również ich wysoką sprawność oraz redukcję zniekształceń harmoniczných po stronie wtórnej co korzystnie wpływa na współpracę z siecią energetyczną. W programie Matlab/Simulink zamodelowana została instalacja fotowoltaiczna, a na Rys 3.1 oraz Rys. 3.2 zostały przedstawione jej charakterystyki wyjściowe, natomiast w tabeli 1 znajdują się parametry paneli użytych w symulacji.



Rys. 3. Charakterystyki zamodelowanej instalacji fotowoltaicznej

Tab. 1. Parametry modelowanej instalacji PV dala radiacji 1000W/m²

Moc znamionowa instalacji PV P _{pv}	3kW
Napięcie wyjściowe w punkcie mocy maksymalnej U _m	400 VDC
Prąd wyjściowy w punkcie mocy maksymalnej I _m	7,35 A
Zastępcza rezystancja szeregową R _s	0, 39 Ω

4. Analiza symulacyjna przetwornicy DC/DC

Na potrzeby analizy symulacyjnej w oprogramowaniu Matlab/Simulink wykonany został model izolowanej przetwornicy rezonansowej z szeregowym obwodem LLC w topologii pełno – mostkowej (z ang. full bridge). Jako źródło zasilania posłużył skonfigurowany według informacji z rozdziału

3 i tabeli 1 układ szeregowo połączonych paneli fotowoltaicznych. Od strony wejściowej mostka tranzystorowego przekształtnika umieszczony został dodatkowo kondensator C_w , pełni on funkcję bufora napięcia zasilania dla paneli PV. Przetwornica w trakcie pracy pobiera prąd impulsowo co może destabilizować napięcie wejściowe, dzięki zastosowaniu dodatkowej pojemności energia pobierana bezpośrednio jest tak naprawdę z kondensatora a nie z paneli PV. Dzięki temu uzyskuje się wysoką stabilność napięcia wejściowego i unika się negatywnych dla paneli PV „szarpnięć” prądu co wpływało by negatywnie na pracę układu. Klucze półprzewodnikowe zostały zamodelowane jako tranzystory typu MOSFET o niskiej rezystancji kanału dren-źródło, w układach rzeczywistych zaczęto stosować tranzystory SiC Mosfet, które łączą w sobie zalety utrzymywania niskich strat moc z pracą przy wysokiej częstotliwości. Szeregowy obwód rezonansowy LLC sparametryzowano zgodnie z wytycznymi i procesem projektowania pokazanym w rozdziale 2, rozdzielając indukcyjność magnesującą transformatora na osobny dławik i modelując transformator jako idealny element. Po stronie wtórnej transformatora zaimplementowano diodowy prostownik niesterowany z filtrem pojemnościowym z odpowiednio dobraną pojemnością. W tym przypadku kondensator spełnia dwojaką rolę: jest buforem energii dla odbiornika oraz filtruje i stabilizuje napięcie wyjściowe redukując do minimum składową przemienną tego napięcia tzw. tętnienia (*z ang. voltage ripple*), umożliwiając również dostarczenie stałego nie-przerywanego prądu do odbiornika. Jako obciążenie posłużył model rezystora. W Tabeli 2 wyszczególnione zostały wszystkie ważniejsze parametry poszczególnych elementów użytych w symulacji, w tabeli 3 przedstawiono natomiast parametry elektryczne.

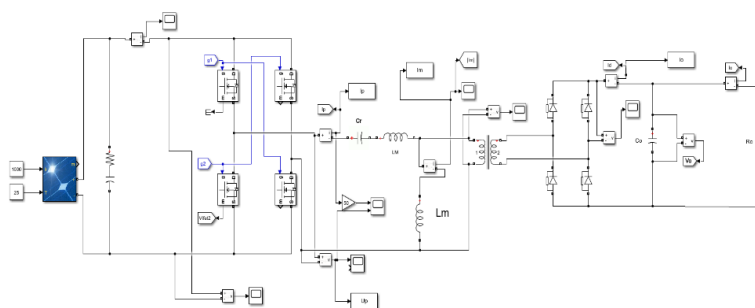
Tab. 2. Parametry modelu przetwornicy LLC

Dławik rezonansowy L_r	120 μH
Kondensator rezonansowy C_r	0,022 μF
Indukcyjność magnesująca transformatora L_m	516 μH
Przekładnia transformatora n	400/24
Rezystancja kanału tranzystora Mosfet R_{DS}	0,001 Ω

Częstotliwość rezonansowa f_r	92 kHz
Kondensator wejściowy C_{in}	1 μ F
Kondensator wyjściowy C_o	200 μ F

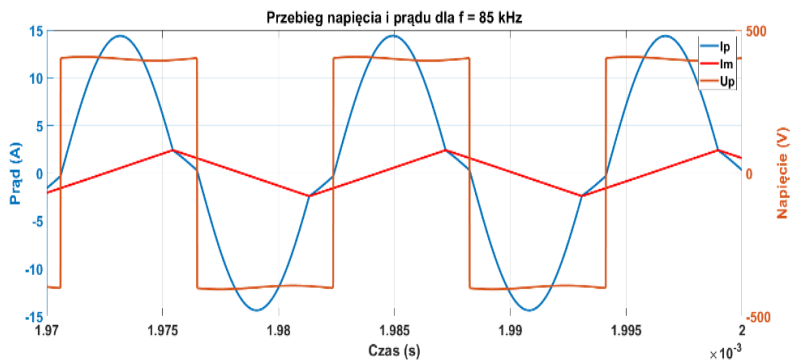
Tab. 3. Parametry elektryczne modelowanego układu

Napięcie wejściowe V_{in}	400 VDC
Napięcie wyjściowe V_{out}	24 VDC
Prąd wejściowy I_{in}	8 A
Prąd wyjściowy	120 A
Częstotliwości pracy	80-110 kHz

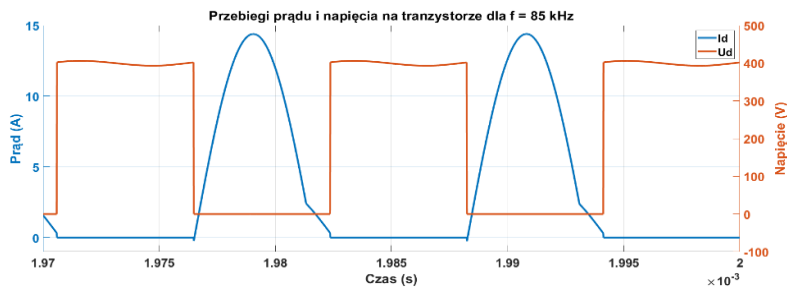


Rys. 4. Model symulacyjny przetwornicy rezonansowej LLC wykonany w programie Matlab/Simulink

W programie Matlab/Simulink zostały wykonane symulacje z krokiem $1e-08s$ przy zastosowaniu metody obliczeń Bogacki-Shampine. Wykonano analizy dla trzech wartości częstotliwości pracy przetwornicy DC/DC (85 kHz, 98kHz, 110 kHz).

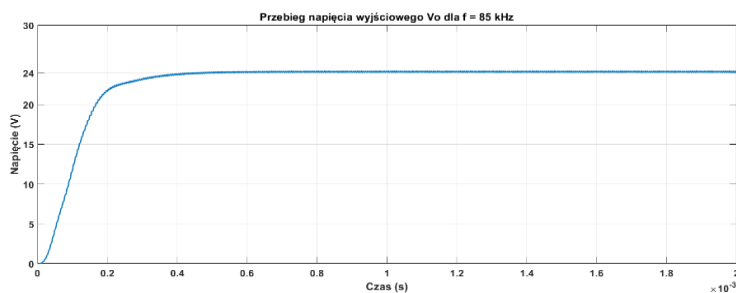


a)

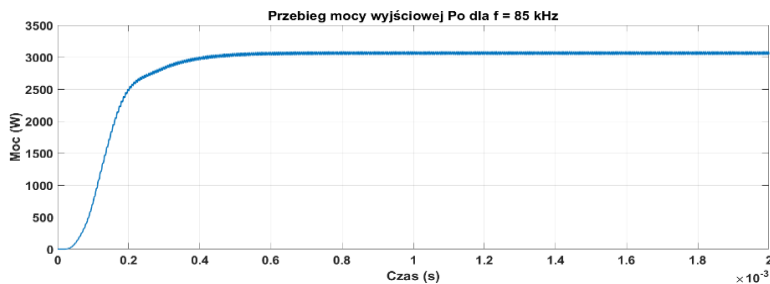


b)

Rys. 5. Przebiegi prądów i napięć dla $f = 85 \text{ kHz}$ a) I_p - prąd rezonansowy, I_m - składowa magnesująca prądu, U_p - napięcie na stronie pierwotnej transformatora; b) I_d - prąd na tranzystorze, U_d - napięcie na tranzystorze



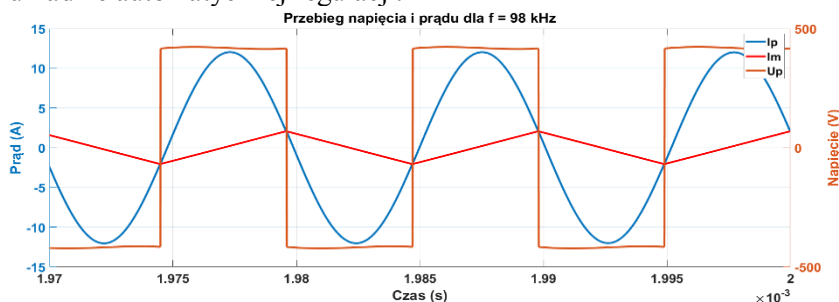
a)



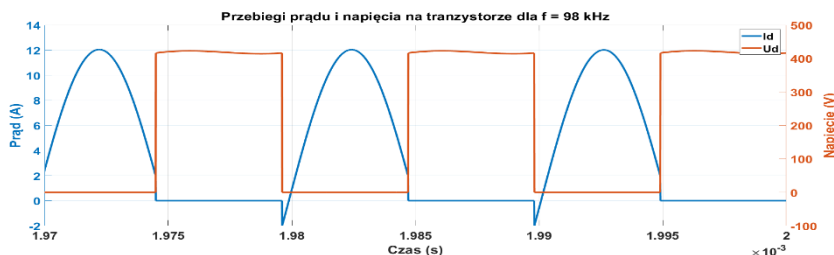
b)

Rys. 6. Przebiegi dla $f = 85 \text{ kHz}$; a) V_o – napięcia wyjściowego; b) P_o – mocy wyjściowej

Dokonując analizy otrzymanych wyników dla częstotliwości kluczowania $f = 85 \text{ kHz}$ otrzymuje się następujące wnioski. Przetwornica dla tej częstotliwości pracuje poniżej częstotliwości rezonansowej w regionie pojemnościowym, prąd w obwodzie rezonansowym wyprzedza napięcie (Rys. 4 a). W tym obszarze pracy uzyskują się również warunki dla miękkiej komutacji tranzystorów przy zerowym prądzie ZCS (Rys. 4 b). Po stronie wyjściowej przekształtnika uzyskano stabilne warunki pracy. Napięcie wyjściowe V_o jak i moc wyjściowa P_o (Rys. 5 a) i b) po rozruchowej inercji wynoszącej ok. $0,2 \text{ ms}$ uzyskują swoją nominalną wartość odpowiednio $V_o = 24 \text{ V}$ i $P_o = 3 \text{ kW}$. Warto również zaznaczyć, że napięcie wyjściowe jest bardzo stabilne, a składowa zmienna napięcia wynosi zaledwie kilka mV. Uzyskano to dzięki zastosowaniu odpowiedniej wielkości pojemności filtrującej (Tab. 2), co równocześnie wiąże się z czasem inercji układu (pojemność wejściowa również ma tu znaczenie). Zbyt duża pojemność w układzie wpływa na czasy inercji, co skutkuje pogorszeniem się dynamiki układu i może wpływać negatywnie na pracę regulatorów jeśli przetwornica pracuje w układzie automatycznej regulacji.

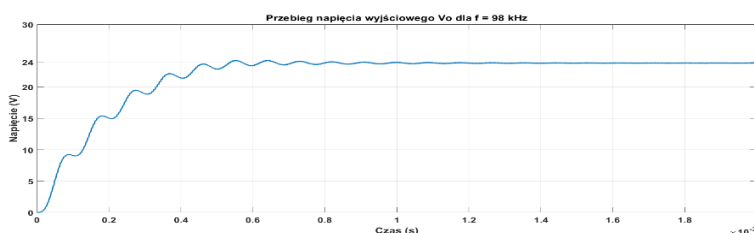


a)

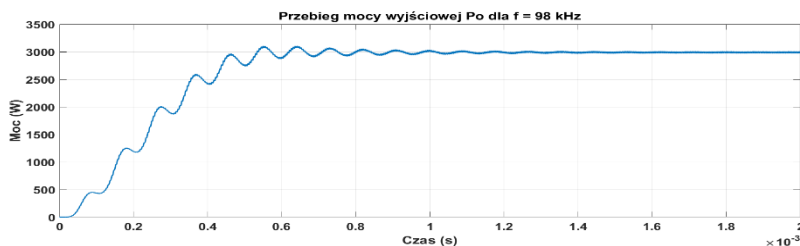


b)

Rys. 7. Przebiegi prądów i napięć dla częstotliwości rezonansowej $f = 98 \text{ kHz}$ a) I_p - prąd rezonansowy, I_m - składowa magnesująca prądu, U_p - napięcie na stronie pierwotnej transformatora; b) I_d - prąd na tranzystorze, U_d - napięcie na tranzystorze



a)

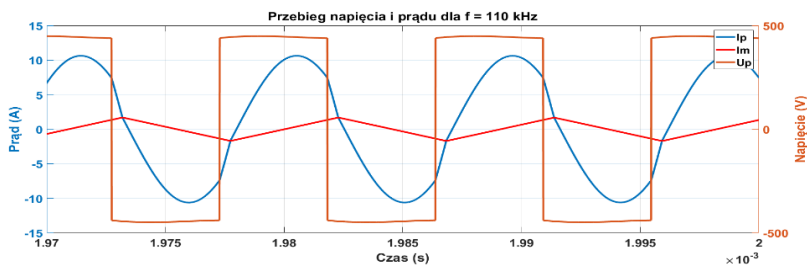


b)

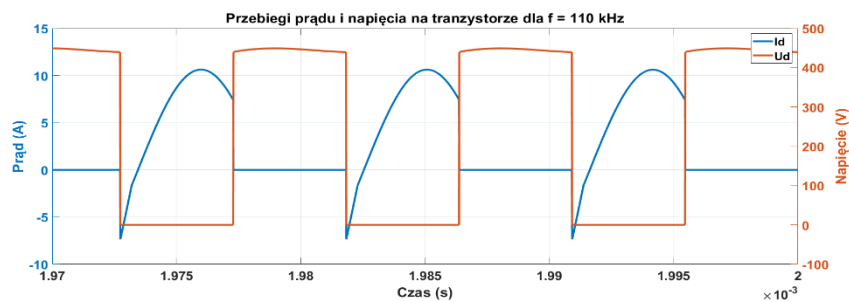
Rys. 8. Przebiegi dla częstotliwości rezonansowej $f = 98 \text{ kHz}$; a) V_o - napięcia wyjściowego; b) P_o - mocy wyjściowej

Kolejna analiza symulacyjna została przeprowadzona dla częstotliwości $f = 98 \text{ kHz}$. W pracy na częstotliwości rezonansowej w obwodzie LLC prąd rezonansowy ma kształt sinusoidalny i jest w fazie z napięciem, a składowa magnesująca nie wpływa znacznie na kształt prądu w obwodzie rezonansowym (Rys. 7 a). Dla obszaru pracy w rezonansie zachodzą warunki miękkiej komutacji tranzystorów przy zerowej wartości napięcia napięciu ZVS (Rys. 7b). Po stronie wyjściowej przekształtnika napięcie wyjściowe V_o jak i moc wyjściowa P_o (Rys. 8 a) i b) po czasie inercji układu ok. $0,4 \text{ ms}$ uzyskują nominalne wartości odpowiednio $V_o = 24 \text{ V}$ i $P_o = 3 \text{ kW}$. Z otrzymanych wyników można wywnioskować, że praca w częstotliwości rezonansowej polepsza warunki komutacji tranzystorów i pracę obwodu rezonansowego.

Przy pracy z częstotliwością rezonansową, wzmocnienie obwodu LLC wynosi 1, więc wartość napięcia wyjściowego zależy wyłącznie od napięcia wejściowego i przekładni transformatora.



a)

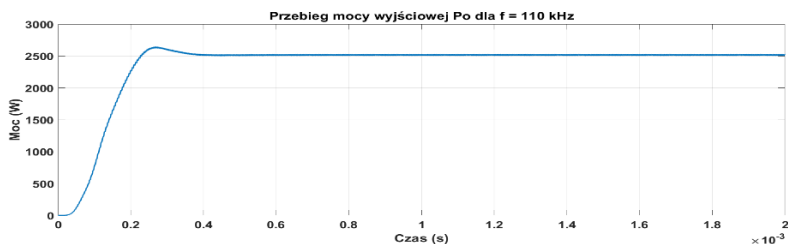


b)

Rys. 9. Przebiegi prądów i napięć dla częstotliwości $f = 110 \text{ kHz}$ a) I_p - prąd rezonansowy, I_m - składowa magnesująca prądu, U_p - napięcie na stronie pierwotnej transformatora; b) I_d - prąd na tranzystorze, U_d - napięcie na tranzystorze



a)



b)

Rys. 10. Przebiegi dla częstotliwości $f = 110$ kHz; a) V_o – napięcia wyjściowego; b) P_o – mocy wyjściowej

Następny proces analizy symulacyjnej został wykonany dla częstotliwości powyżej rezonansowej, dla $f = 110$ kHz. W tym przypadku prąd rezonansowy jest opóźniony w fazie w stosunku do napięcia na obwodzie LLC (Rys 9 a) , układ pracuje wtedy w obszarze indukcyjnym. Dla tego regionu pracy (jak dla całego zakresu indukcyjnego) zachodzą warunki dla miękkiej komutacji tranzystorów przy zerowym napięciu ZVS (Rys 10 b) . Napięcie i moc po stronie wyjściowej przekształtnika uzyskują swoje wartości nominalne po czasie opóźnienia ok. 0,4 ms i wynoszą odpowiednio $V_o = 22$ V i $P_o = 2,5$ kW. Mniejsza wartość uzyskanego napięcia i mocy w porównaniu do dwóch poprzednich przypadków wiąże się z charakterem pracy przekształtnika w obszarze indukcyjnym powyżej rezonansu. Przetwornica pracująca z częstotliwościami większymi od rezonansowej zachowuje się jak przekształtnik obniżający napięcie, a wzmocnienie obwodu LLC jest <1 . Zatem dla pracy w regionie indukcyjnym wartość napięcia wyjściowego przetwornicy V_o zależy nie tylko od napięcia na wejściu przekształtnika i przekładni transformatora ale również od częstotliwości.

5. Wnioski

W powyższej pracy została przeprowadzona analiza symulacyjna pracy izolowanej przetwornicy rezonansowej DC/DC typu LLC w topologii pełnego mostka zasilanej z instalacji fotowoltaicznej szeregowo połączonych paneli PV. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że za pomocą odpowiedniej regulacji częstotliwości kluczowania tranzystorów można wpływać na charakterystykę przekształtnika uzyskując warunki dla miękkiej komutacji tranzystorów ZVS, ZCS co znacząco wpływa na redukcję strat moc. Dodatkowo za pomocą regulacji częstotliwości uzyskiwać można różne wartości wzmocnienia obwodu LLC, dzięki czemu przetwornica może pracować jako podwyższająca napięcie (przy spadku napięcia zasilania) bądź obniżająca napięcie (przy wzroście napięcia zasilania). Jest to istotną zaletą, ponieważ możliwe jest uzyskiwanie stabilnego napięcia i mocy wyjściowej przetwornicy niezależnie od wartości napięcia zasilania, co może mieć kluczowe znaczenie przy instalacjach PV, gdzie kluczową rolę na kształtowanie charakterystyk

odgrywa wartość nasłonecznienia oraz temperatura paneli PV. Przekształtniki rezonansowe dzięki zastosowaniu transformatora oraz pracy w warunkach miękkiej komutacji dobrze sprawdzają się w aplikacjach fotowoltaicznych pracujących na napięciach rzędu 400 V i mocach od kilku kW nawet do kilku MW. Zachowując przy tym izolację galwaniczną układów ważną z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz zwarć w sieci przy wysokiej sprawności rzędu 98%. Kolejnym etapem badań będących kontynuacją analiz przeprowadzonych w powyższej pracy będzie wykonanie układu rzeczywistego oraz jego weryfikacja praktyczna. W planach również jest zaprojektowanie układu automatycznej regulacji (dyskretnego bądź predykcyjnego) w ramach regulatora MPPT PV celem zwiększenia sprawności całego układu i jego autonomii regulacji.

Literatura

- [1] Giovanna Oriti, Alexander L. Julian, Troy D. Bailey, *PV Power Conditioning System with LLC Resonant Converter in DCM*, IEEE Energy Conversion Congress And Exposition (ECCE), 2014.
- [2] Meghana M N, Mr. Naveenkumar S B, *MPPT Based LLC Resonant Converter For Pv Applications*, International Conference on Computation of Power, 2017.
- [3] Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh, Naoki Koike, Shinichiro Nagai, *Pv Micro-Inverter Topology Using LLC Resonant Converter*, MDPI, 2019.
- [4] Ahmed S. Ragab, Naggar H. Saad, Ahmed A. EL-Sattar, *LLC Resonant DC-DC Converter for Grid-Connected PV System*, 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), 2017.
- [5] Bo Yang, Fred C. Lee, Alpha J. Zhang, Guisong Huang, *LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion*, Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002.
- [6] Ray-Lee Lin, Chiao-Wen Lin, *Design Criteria for Resonant Tank of LLC DC-DC Resonant Converter*, 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010.
- [7] Kumar Bhajana, Pavel Drabek, Martin Jara, *Design and analysis of a full bridge LLC DC-DC converter for auxiliary power supplies in traction*, Sadhana, 2018.
- [8] Bing Lu, Wenduo Liu, Yan Liang, Fred C. Lee, Jacobus D. van Wyk, *Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter*, Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006.