



Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki, inżynierii biomedycznej i budownictwa

Prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Maria Grądz

M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Wybrane zagadnienia z zakresu
elektrotechniki, inżynierii biomedycznej
i budownictwa

Prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

WDWEI



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

Wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki, inżynierii biomedycznej i budownictwa

Prace doktorantów Politechniki Lubelskiej

redakcja
Róża Dzierżak
Żaklin Maria Grądz



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

Lublin 2019

XXI Warsztaty Doktoranckie WEiI PL

dr hab. Tomasz Zientarski, prof. PL – Przewodniczący Komitetu Naukowego
dr hab. inż. Jerzy Montusiewicz, prof. PL – Wiceprzewodniczący Komitetu
prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko – Rektor PL
dr hab. inż. Anna Halicka, prof. PL – Prorektor ds. współpracy z otoczeniem
społeczno-biznesowym
dr hab. inż. Paweł Drożdźiel, prof. PL – Prorektor ds. studenckich
prof. dr hab. inż. Henryka Stryczewska – Dziekan WEiI
dr hab. inż. Wojciech Jarzyna, prof. PL – Kierownik Studiów Doktoranckich
prof. dr hab. inż. O. Hotra
prof. dr hab. M. Kosmulski
prof. dr hab. inż. J. Sikora
prof. dr hab. inż. A. Wac–Włodarczyk
prof. dr hab. inż. W. Wójcik
dr hab. inż. H. Banach, prof. PL
dr hab. inż. D. Czerwiński, prof. PL
dr hab. inż. R. Goleman, prof. PL
dr hab. E. Jartych, prof. PL
dr hab. inż. P. Kisała, prof. PL
dr hab. inż. J. Kolano, prof. PL
dr hab. inż. P. Miller, prof. PL
dr hab. inż. J. Partyka, prof. PL
dr hab. inż. J. Pawłat, prof. PL
dr hab. inż. J. Sikora, prof. PL
dr hab. inż. P. Surdacki, prof. PL
dr hab. inż. P. Węgierek, prof. PL
dr hab. P. Żukowski, prof. PL

Recenzenci

prof. dr hab. inż. O. Hotra
dr hab. inż. T. Kołtunowicz, prof. PL
dr inż. W. Surtel
dr inż. Piotr Krupski
dr inż. Nataliya Dorosh
dr inż. Oksana Boyko
dr hab. inż. P. Miller, prof. PL
dr inż. Joanna Szulżyk-Cieplak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2019

ISBN: 978-83-7947-377-9

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

Spis treści

Damian Dobrzański, Łukasz Kwaśny

Poprawa sprawności rezonansowej przetwornicy DC/DC poprzez zastosowanie miękkiej komutacji7

Karol Fatyga

Metody sterowania izolowaną przetwornicą DC/DC w układzie podwójnego mostka aktywnego.....23

Bartosz Drzymała

Przekształtniki wielopoziomowe w aplikacjach przemysłowych.....41

Piotr Hołyszko

Ocena metod zapewnienia ciągłości pracy urządzeń pomocniczych trolejbusu.....55

Bartłomiej Mroczek

Sterowanie mocą przetwornic DC/DC pracujących w trybie kontroli prądu szczytowego68

Rafał Kwoka, Janusz Kozak, Michał Majka

Budowa i chłodzenie nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego86

Łukasz Zychowicz

Metody detekcji niejednorodności i defektów w materiałach stalowych100

Magdalena Michalska

Klasyfikacja zmian skórnych z obrazów dermatoskopowych.....109

Monika Mańko

Analiza fraktalna i jej parametry stosowane w dermatologii122

Magdalena Michalska

Detekcja i usuwanie artefaktów z obrazów dermatoskopowych135

Magdalena Michalska

Wykorzystanie segmentacji przez progowanie w wykrywaniu czerniaka skóry 149

<i>Dawid Zarzeczny</i>	
Kryteria doboru materiałów do zastosowania w urządzeniach biomedycznych.....	160
<i>Joanna Styczeń, Arkadiusz Urzędowski</i>	
Tynki renowacyjne z udziałem Zeolitów	168
<i>Joanna Styczeń, Rafał Ślusarski, Arkadiusz Urzędowski</i>	
Rodzaje wypełnień iniekcyjnych w konstrukcjach budowlanych	178

*Damian Dobrzański⁽¹⁾, Łukasz Kwaśny⁽¹⁾

Poprawa sprawności rezonansowej przetwornicy DC/DC poprzez zastosowanie miękkiej komutacji

Streszczenie: Przedstawiono i poddano analizie dwa główne rozwiązania wykorzystywane do budowy szybkich stacji ładowania pojazdów elektrycznych. Przeprowadzono dyskusję nt. wad i zalet przetwornicy rezonansowej a także możliwości zwiększenia jej sprawności. Celem pracy było określenie za pomocą symulacji, możliwości zwiększenia sprawności przetwornicy rezonansowej dzięki ZVS i ZVC. Dzięki jego zrealizowaniu zaproponowano najbardziej optymalne przedziały częstotliwości dla pracy przetwornicy w dwóch kierunkach.

Słowa kluczowe: Przetwornica rezonansowa, CLLC, transfer energii, ładowanie pojazdów elektrycznych, miękka komutacja, ZVS, ZVC

Improvement of the resonant DC/DC converter efficiency through the use of soft switching

Abstract: Two main solutions used in building electric vehicle rapid chargers are presented. Advantages and disadvantages of both of them are discussed. The goal of this paper is to derive, by means of simulation, a way to increase efficiency of a LLC resonant DC/DC converter. Thanks to the research optimal frequency ranges are proposed for converter operating in vehicle to grid and grid to vehicle modes.

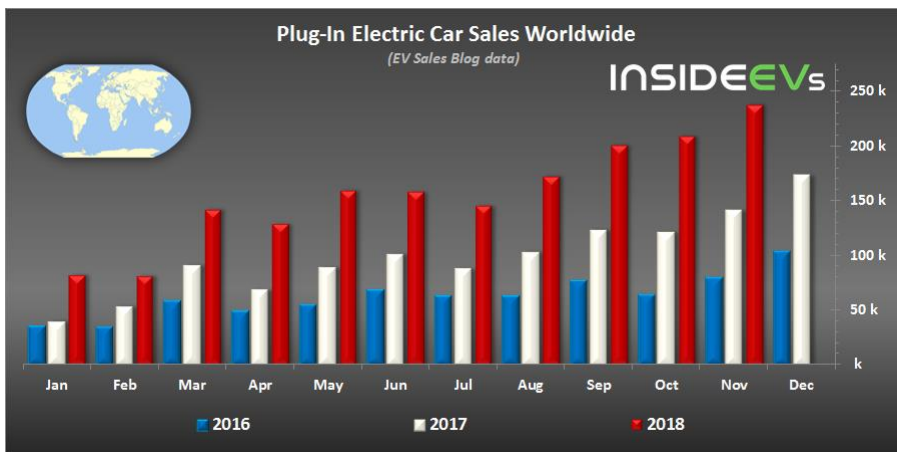
Keywords: DC/DC CLLC resonant converter, V2G, bidirectional energy transfer, EV charger, ZVS, ZVC

1. Wstęp

Dążenie do znaczącej redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery na całym świecie, polityka klimatyczna Unii Europejskiej, rządowe dotacje do zakupu pojazdów elektrycznych i hybrydowych przyczyniają się do znaczącego wzrostu zainteresowania tego rodzaju środkami transportu. Rysunek 1 prezentuje zwiększającą się rokrocznie ilość rejestrowanych pojazdów nisko lub zero emisyjnych. Porównując konkretne miesiące rok do roku począwszy od 2016 po 2018 zauważyć możemy roczny wzrost minimum o 1/3 w zależności od miesiąca. Trend ten stawia przed naukowcami oraz inżynierami z całego świata szereg wyzwań w tym między innymi sprostanie ciągle rosnącemu

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

zapotrzebowaniu na energię elektryczną, jej jak najsprawniejszy transfer, a także umożliwienie użytkownikom jak najszybszego bezpiecznego ładowania samochodów. Jednym z wytycznych dla urządzeń umożliwiających szybkie ładowanie pojazdów elektrycznych zawartych w wymaganiach normy IEC 62196 jest zapewnienie separacji galwanicznej pomiędzy stroną pierwotną a wtórną urządzenia [1]. To obostrzenie spowodowało dominację rozwiązań opartych o przetwornice prądu stałego w stacjach transferu energii umożliwiających szybkie ładowanie. W artykule tym zawarto informacje o założeniach dwukierunkowego przesyłu energii pomiędzy pojazdem a siecią (G2V–V2G Grid to Vehicle–Vehicle to Grid) oraz o różnicach pomiędzy przetwornicą prądu stałego sterowaną za pomocą przesunięcia fazowego (PSFB – Phase Shifted Full Bridge) a przetwornicą CLLC wykorzystującą rezonans magnetyczny zachodzący pomiędzy transformatorem a obwodami tranzystorów wraz z dodatkowymi elementami rezonansowymi zarówno po stronie pierwotnej jak i wtórnej transformatora izolującego [2, 3 ,4].



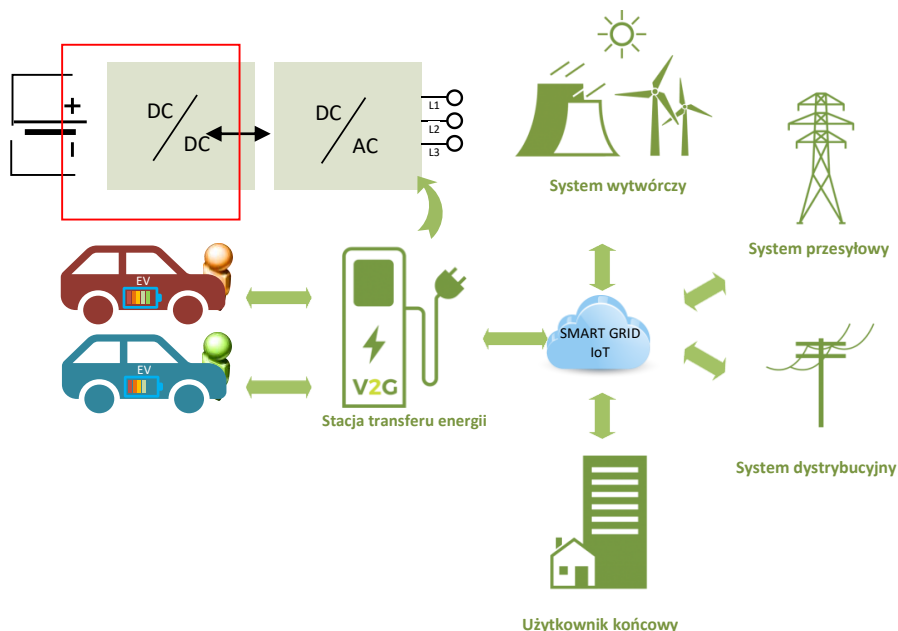
Rys. 1. Poziom wzrost sprzedaży nowych samochodów elektrycznych na świecie

Celem poniższej pracy było określenie za pomocą symulacji komputerowej, możliwości poprawy sprawności przetwornic rezonansowych prądu stałego. Na wstępie przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z dwukierunkowym transferem energii, następnie porównanie głównych różnic pomiędzy przetwornicami sterowanymi za pomocą przesunięcia fazowego oraz przetwornicami rezonansowymi. W rozdziale czwartym przystąpiono do opisu zaprojektowanego układu oraz parametrów jego pracy zarówno dla standardowego procesu ładowania akumulatora pojazdu bądź transferu w kierunku pojazd – sieć jak i dla pracy w przypadku wystąpienia stanów nieustalonych. Ostatni rozdział stanowi podsumowanie informacji uzyskanych

podczas wykonywanych prac symulacyjnych jak i analizy literaturowej oraz własne spostrzeżenia autorów.

2. Dwukierunkowy transfer energii

Jednym z rozwiązań umożliwiających zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego jest usługa dwukierunkowego transferu energii (G2V–V2G). Rozwiązanie to jest innowacyjnym podejściem do przesyłu energii między siecią a odbiornikiem – pojazdem, której wdrożenie przewidywane jest po wprowadzeniu powszechnie dostępnego Internetu rzeczy (IoT – Internet of Things). Dzięki stopniowemu przekształcaniu klasycznej sieci dystrybucyjnej w inteligentną sieć smart grid, operator jest w stanie zapewnić sobie jak i użytkownikowi optymalizację zapotrzebowania energii na poziomie odbiornika końcowego umożliwiającą obciążanie sieci w sposób nie zagrażający jej przeciążeniem lub uszkodzeniem a w skutek czego całkowitym odcięciem. Następną zaletą wykorzystania usługi V2G jest możliwość wykorzystania pojazdów jako magazynów energii które ładowane są gdy sieć nie jest znacznie obciążona natomiast umożliwiają wykorzystanie zgromadzonej energii przez dystrybutora gdy obciążenie sieci jest bardzo wysokie (Rys 2).

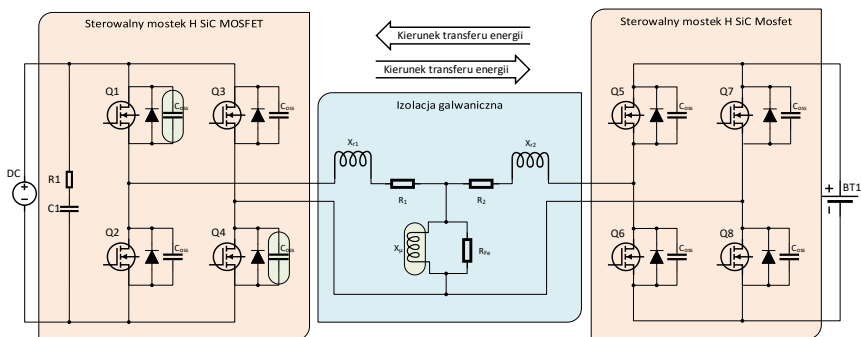


Rys. 2. Schemat poglądowy systemu przesyłu energii z wykorzystaniem usługi Smart-Grid

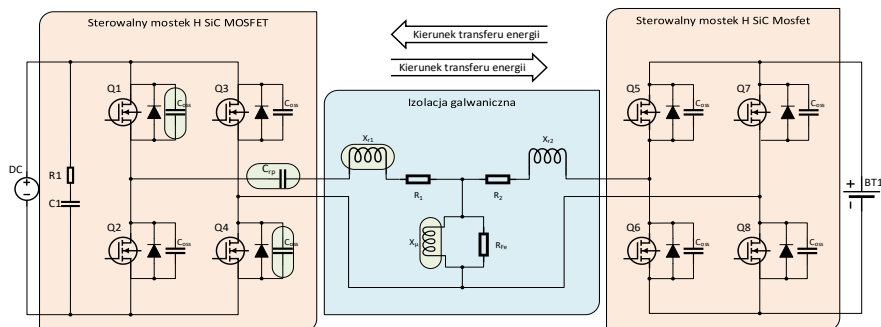
Wdrożenie tej technologii na szeroką skalę umożliwi zmniejszenie ograniczeń wynikających z możliwości elektrowni konwencjonalnych – trudności z chłodzeniem w upalne dni, jak i odnawialnych źródeł energii – magazynowanie energii wyprodukowanej przez OZE w pojazdach wykorzystywanych jako bufor, bez znaczących inwestycji ponoszonych przez producentów oraz dystrybutorów energii elektrycznej. Wnioskując z aktualnych trendów [5, 6], ilość niskoemisyjnych lub bez emisyjnych środków transportu będzie rokrocznie rosła. Zwiększająca się liczba pojazdów elektrycznych (EVs – Electrical Vehicles) oraz hybrydowych (PHEV – Plugged – in Hybrid Electric Vehicle, HEV – Hybrid Electric Vehicle) podłączanych losowo, bez zarządzania przepływem energii oraz jej mocą w systemie może doprowadzić do znaczących zaburzeń pracy sieci. Jest to jeden z głównych powodów dla którego prace badawcze nad dwukierunkowym transferem energii oraz wdrożeniem systemu monitoringu inteligentnej dystrybucji są tak ważne dla społeczeństwa oraz bezpieczeństwa energetycznego [7]. Wyliczenia oraz symulacje wykonane przez zespół Z. Guo, Z.Zhou oraz Y.Zhou wykazują opłacalność wykorzystania usługi V2G oraz kombinacji V2G+DNR/DDNR ((Dynamic) Distribution Network Reconfiguration) nawet przy wliczeniu kosztów szybszej degradacji baterii w pojeździe [8].

3. Najbardziej perspektywiczne w rozwiązaniach transferu energii rodzaje przetwornic DC/DC – CLLC oraz PSFB

Skupiając się na rodzajach przetwornic prądu stałego wyróżnić możemy dwa najbardziej perspektywiczne rozwiązania dla zastosowań w ładowarkach wysokomocowych, pierwsza PSFB (Rys. 3) oraz druga CLLC (Rys. 4) [9]. W Tabeli 1 przedstawiono podstawowe różnice pomiędzy jednym a drugim rozwiązaniem zbudowanym na tranzystorach SiC MOSFET [9]. W obu rysunkach 3 i 4, w zielonych blokach zaznaczono elementy między którymi zachodzi zjawisko rezonansu magnetycznego.



Rys. 3. Uproszczony schemat przetwornicy DC/DC – PSFB w układzie pełnego mostka H



Rys. 4. Uproszczony schemat przetwornicy DC/DC – CLLC w układzie pełnego mostka H

Tabela 1. Porównanie cech charakterystycznych przetwornicy PSFB oraz CLLC zbudowanych w układzie pełnego mostka H

<p>Przetwornica sterowana za pomocą przesunięcia fazowego w układzie pełnego mostka H (FB–PSFB):</p> <ul style="list-style-type: none"> • ZVS – Zero Voltage Switching – po odpowiednim sterowaniu umożliwia osiągnięcie miękkiej komutacji przy napięciu przełączania tranzystorów zbliżonym bądź równym 0V • Stała częstotliwość • Trudniejszy do osiągnięcia wysokosprawny transfer dwukierunkowy niż w przypadku przetwornicy rezonansowej • Sprawność w porównaniu do CLLC: <ul style="list-style-type: none"> ○ η (PSFB) > η (CLLC) – dla niskich obciążeń ○ η (PSFB) < η (CLLC) – dla wysokich obciążeń 	<p>Przetwornica rezonansowa w układzie pełnego mostka H (FB–CLLC):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elastyczna w szerokim zakresie pracy, ustępuje PSFB jedynie przy obciążeniu <15% • Większa gęstość mocy w porównaniu do przetwornicy PSFB • ZVS oraz ZCS–Zero Current Switching • Łatwiejszy do osiągnięcia wysokosprawny transfer dwukierunkowy niż w przypadku przetwornicy PSFB • Ograniczony zakres transferu, trudno osiągnąć stabilną pracę przy obciążeniu niższym niż 7% • Skomplikowana procedura synchronizacji
--	---

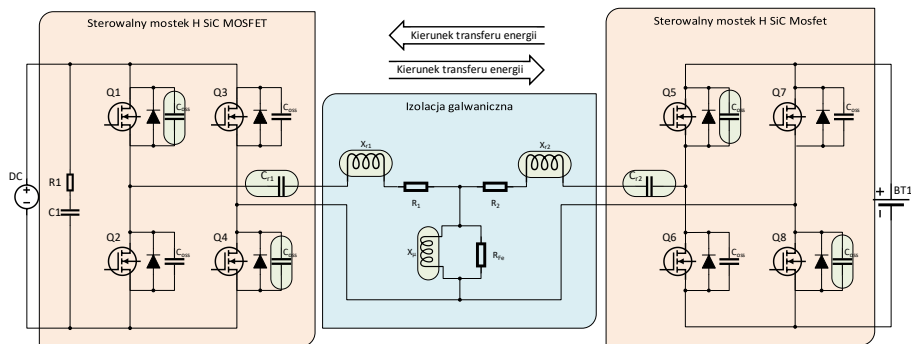
4. Przetwornica Full Bridge – CLLC

4.1. Praca w częstotliwościach około rezonansowych

Zakładając transfer energii w obu kierunkach, ze względów racjonalizatorskich przyjęto zasadę płynnej regulacji w kierunku G2V oraz stałego obciążenia w kierunku V2G. Spowodowane jest to faktem iż w kierunku stacja ładowania–pojazd, wymagana jest pełna regulacja prądu jak i napięcia ładowania ponieważ niezbędne jest zapewnienie możliwości ładowania pojazdu w całym zakresie SOC (State of Charge – poziom naładowania) akumulatora. Zważając na aspekty ekonomiczne użytkownika pojazdu w tym głównie na

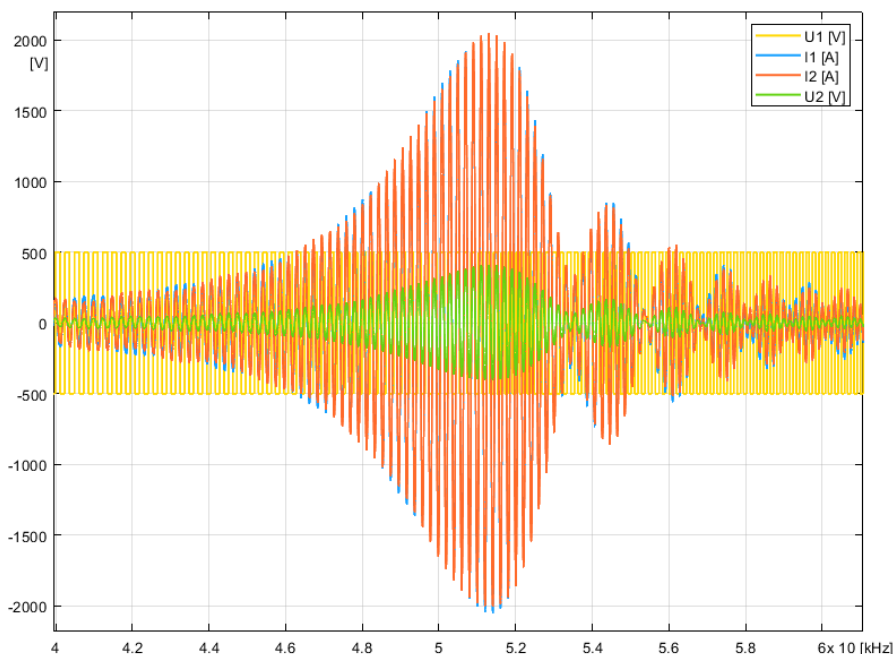
znacząco szybsze tempo zużywania się baterii przy głębokim rozładowaniu a także przy transferze dużej energii w krótkim czasie. W związku z tym przyjęto, że stacja ładowania nie będzie mogła rozładować akumulatora pojazdu do poziomu niższego niż 20%. Ponadto ograniczenie możliwości pobierania z pojazdu dużej energii w krótkim czasie umożliwia zastosowanie stałego obciążenia pojazdu przez sieć a zarazem brak konieczności płynnej regulacji w kierunku pojazd–stacja ładowania – sieć. Ze względu na charakterystykę sterowania przetwornic rezonansowych polegającą na dynamicznej zmianie częstotliwości pracy wykonano niezbędne obliczenia które pozwoliły na stworzenie modelu symulacyjnego konwertera FB–CLLC w środowisku Matlab. Zadaniem zaprojektowanego układu i procesu jego symulacji jest umożliwienie uzyskania odpowiedzi na pytania w jaki sposób system będzie pracował w możliwie szerokim paśmie częstotliwości oraz transfer energii w obydwu kierunkach przy zachowaniu jak najwyższej sprawności. Jednym z problemów który może wystąpić jest sposób reakcji układu na stany nieustalone, niektóre z nich, takie jak między innymi nagły wzrost lub spadek obciążenia bądź przerwa połączenia między stacją ładowania a pojazdem zostały również uwzględnione w algorytmie sterującym obciążeniem. Szczególną uwagę przy projektowaniu dwukierunkowych rezonansowych przetwornic prądu stałego należy zwrócić na to by parametry układu oraz transformatora umożliwiały również rezonans magnetyczny po stronie wtórnej dzięki czemu możliwe zostanie osiągnięcie miękkiej komutacji w obu kierunkach transferu energii przy zachowaniu odpowiednich wartości częstotliwości kluczowania. W tym celu model przetwornicy CLLC zaprezentowany w rozdziale 3 (Rys. 4) należałoby wzbogacić o dodatkowy zestaw elementów rezonansowych po stronie wtórnej transformatora (Rys. 5), pracujących przy stałej częstotliwości około a najlepiej precyzyjnie rezonansowej. Strona pierwotna natomiast ze względu na konieczność regulacji przesyłanej energii do pojazdu powinna pracować w możliwie szerokim zakresie częstotliwości około rezonansowych.

Na rysunku (Rys. 6) przedstawiono charakterystykę napięciowo częstotliwościową będącą wynikiem symulacji modułu rezonansowego zaprojektowanego układu a dokładnie wycinek jej przebiegu z przedziału od 0 do 100 kHz zawężony do zakresu od 40–60 kHz. Przedstawione przebiegi pozwalają w jasny sposób na zweryfikowanie poprawności wykonanych obliczeń oraz doboru komponentów rezonansowych na podstawie zależności pomiędzy sygnałami prądowymi oraz napięciowymi dla konkretnych częstotliwości.



Rys. 5. Uproszczony schemat przetwornicy DC/DC – CLLC w układzie pełnego mostka H umożliwiającej transfer dwukierunkowy; Q1–Q8 – tranzystory, C_{Tp} , C_{Ts} – wprowadzone pojemności dodatkowe dla układu CLLC; R_{Fe} – straty moc czynnej w rdzeniu; R_1 , R_2 – straty mocy czynnej w uzwojeniach, X_{r1} , X_{r2} – indukcyjność rozproszenia; X_{μ} – indukcyjność magnesowania transformatora; r_1 – (primary), r_2 – (secondary) – odpowiednio strona pierwotna oraz wtórna transformatora.

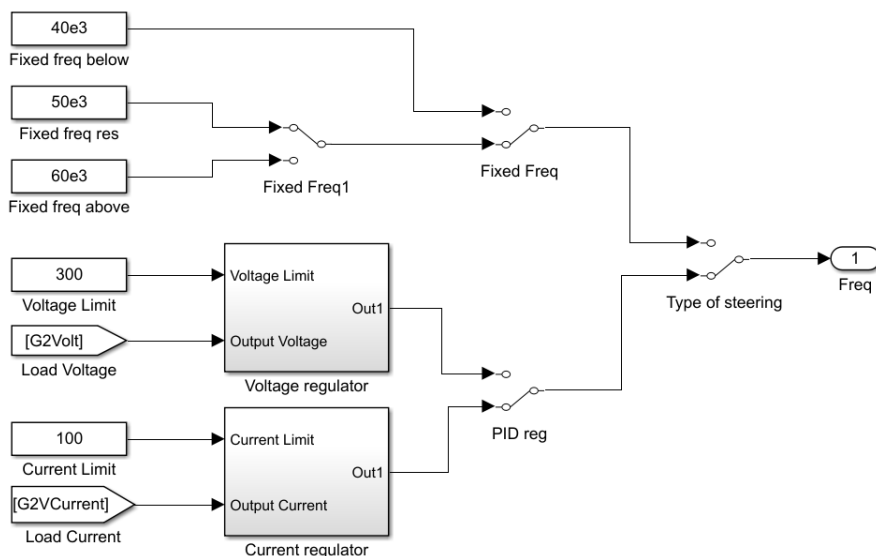
Zaprezentowany przebieg odnosi się do modułu rezonansowego uwzględniającego parametry RLC oraz jego maksymalnych teoretycznych możliwości transferu energii bez uwzględnienia sterowania całym urządzeniem i ograniczeń prądowo napięciowych, stąd tak znaczny wzrost prądu i napięcia w częstotliwości rezonansowej. Dzięki temu możemy określić zakres w którym przekształtnik będzie pracował najbardziej optymalnie [5]. Jest to szczególnie cenna informacja dla układu automatycznej regulacji transferu energii w kierunku pojazd–sieć. Z przedstawionego przebiegu możemy wywnioskować ponadto znaczący spadek sprawności przy częstotliwościach poniżej 45 kHz jak również powyżej 53 kHz, spowodowane jest to ograniczeniami tej technologii i brakiem możliwości płynnej zmiany parametrów rezonansowych w układzie rzeczywistym. Dla zaprojektowanego układu o mocy 75kW pracującego przy napięciu 500V DC oraz częstotliwości 50kHz najwyższą transferowaną moc uzyskano przy częstotliwości pracy przetwornicy oscylującej w okolicy 51,5 kHz $\pm 2,5\%$. Częstotliwość ta pozwala na osiągnięcie pełnego rezonansu LC układu, jednak w rzeczywistych układach częstotliwość precyzyjnie rezonansowa wykorzystywana jest jedynie w ułamku całej charakterystyki pracy przetwornicy ze względu na ciągłą zmianę obciążenia– stanu naładowania akumulatora. Nawigując do założeń przyjętych dla urządzenia przy transferze w kierunku pojazd – stacja ładowania, częstotliwość rezonansowa wydaje się być idealnym rozwiązaniem, pozwalającym na osiągnięcie maksymalnie efektywnego przesyłu energii niezależnie od tego jaką mocą możliwą do przekazania dysponuje pojazd.



Rys. 6. Charakterystyka napięciowo częstotliwościowa modułu rezonansowego przetwornicy, U1 – Napięcie zasilające; I1 – Prąd CLLprim; I2 – prąd dostarczany do obciążenia; U2 – napięcie na zaciskach obciążenia

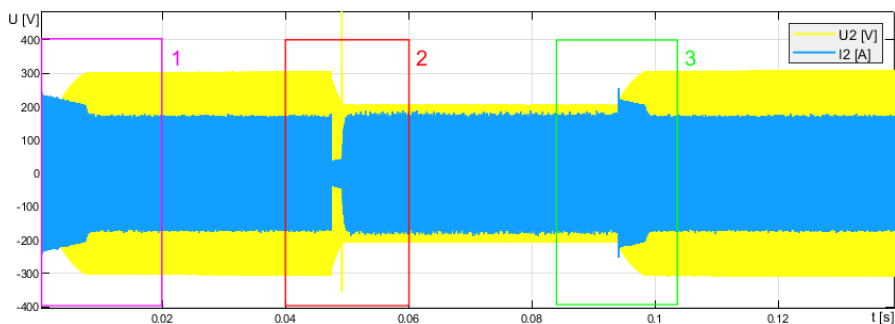
4.2. Praca z wykorzystaniem miękkiej komutacji oraz testy układu na wypadek wystąpienia stanów nieustalonych

W celu umożliwienia płynnej regulacji częstotliwości stworzono sterowanie oparte o dwa regulatory PID (Rys. 7) sterujące mocą transferowaną w układzie a w zakresie następujących przeregulowań mogą wspomnianą moc ograniczać w zależności od zadanych wartości prądowych jak bądź napięciowych. Dodatkowo w celu uproszczenia testów dla konkretnych częstotliwości układ wyposażono w przełączniki umożliwiające dynamiczną zmianę częstotliwości. Ponadto układ przystosowany został do zmiany sposobu sterowania od płynnej ograniczonej przez wartość prądu lub napięcia na zaciskach obciążenia po ustaloną częstotliwość na stałe odpowiednio opisane na rysunku (Rys. 7) jako Current Limit, Voltage Limit oraz Fixed freq.

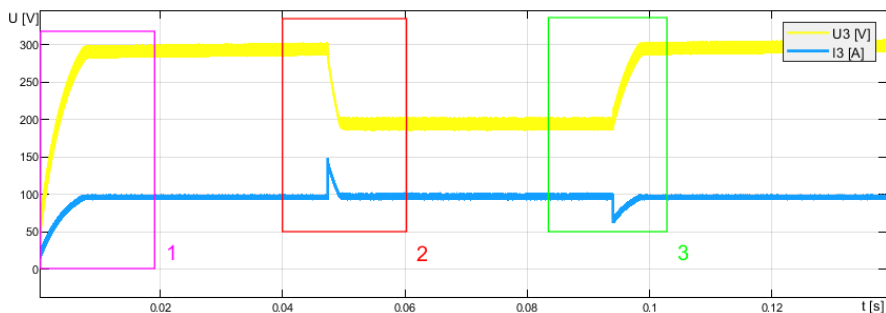


Rys. 7. Schemat uproszczony struktury nastaw częstotliwości, Current regulator-regulator porównujący prąd dostarczany do obciążenia i doregulowujący jego wartość do wartości w bloku Current Limit, Voltage regulator – analogicznie jak w przypadku regulatora prądowego, Fixed freq-przełącznik umożliwiający dynamiczną zmianę częstotliwości pracy podczas trwania symulacji. Type of steering – przełącznik służący do zmiany sposobu sterowania (za pomocą regulatorów PID lub dla stałej częstotliwości)

Poprawność pracy zaprojektowanego układu sterującego sprawdzono dla stanów nagłych zmian obciążenia sięgających dwudziestokrotności wartości początkowej jak również przerwy i zwarcia w zachodzącego po stronie wtórnej transformatora. Na rysunkach 8 oraz 9 zaprezentowany został przesył energii w kierunku G2V, wraz z wyszczególnieniem poszczególnych faz. Faza pierwsza oznaczona kolorem fioletowym oznacza uruchomienie procesu ładowania pojazdu, na podstawie przebiegu można odczytać chwilowy wzrost prądu przy uruchomieniu jednak nie przekracza on 0,01s po czym regulator stabilizuje napięcie jak i prąd do wartości zadanej 100A. Faza druga prezentuje moment zmniejszenia rezystancji obciążenia z 22Ω na 2Ω , w związku z czym po czasie mniejszym niż 0,01s regulator stabilizuje wartość transferowanego prądu efektem czego jest spadek napięcia na szynie DC. W fazie trzeciej sytuacja się odwraca i rezystancja obciążenia zostaje skokowo zwiększona jedenastokrotnie do 22Ω w związku z czym UAR (układ automatycznej regulacji) podnosi wartość napięcia do maksymalnej wartości zadanej w drugim warunku (300V) w czasie mniejszym od 0,01s układ ponownie pracuje stabilnie.

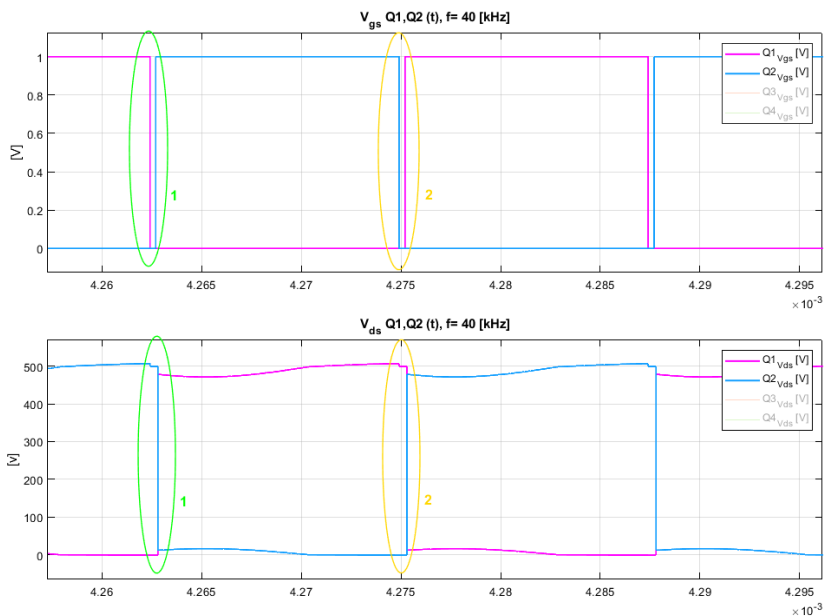


Rys. 8. 1–Przebieg procesu transferu energii w kierunku G2V; 2 – Nagła zmiana obciążenia z $22\Omega \rightarrow 2\Omega$; 3 – Nagła zmiana obciążenia z $2\Omega \rightarrow 22\Omega$; U2 – Napięcie mierzone na zaciskach strony wtórnej transformatora, I2 – Prąd strony mierzony w obwodzie po stronie wtórnej transformatora przed wyprostowaniem

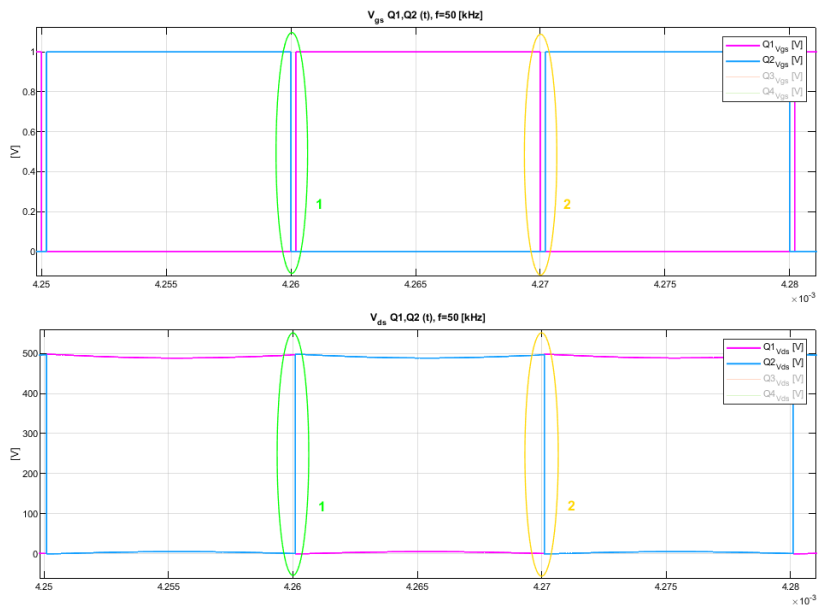


Rys. 9. 1 – Przebieg procesu transferu energii w kierunku G2V; 2 – Nagła zmiana obciążenia z $22\Omega \rightarrow 2\Omega$; 3 – Nagła zmiana obciążenia z $2\Omega \rightarrow 22\Omega$; U2 – Napięcie mierzone na zaciskach obciążenia, I2 – Prąd strony mierzony w obwodzie obciążenia

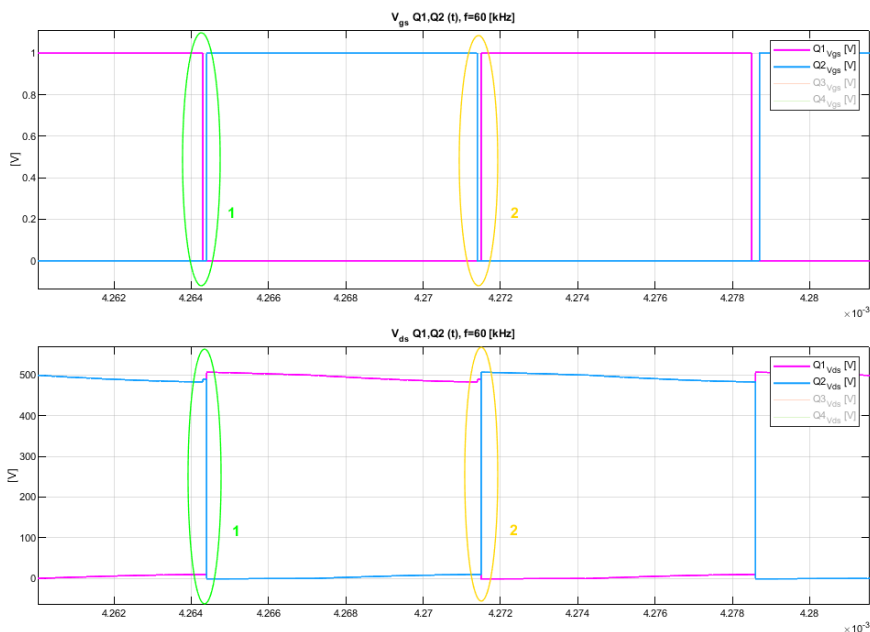
Podczas przeprowadzonych symulacji zwrócono uwagę na znaczące różnice w sposobie kluczowania tranzystorów w zależności od częstotliwości pracy. Przebieg sygnałów sterowania oraz napięć przewodzenia tranzystorów dla poszczególnych częstotliwości prezentują poniższe sygnały (Rys. 10–12). Wyraźna jest różnica pomiędzy sygnałem przewodzenia i kształtem narastającego napięcia V_{ds} . Blokami zielonym oraz żółtym oznaczono punkty przełączania par tranzystorów na przykładzie tranzystora Q1 oraz Q2 aby jak najbardziej czytelnie przedstawić punkt przełączania. Zaobserwowano zjawisko przełączania się tranzystorów przy zerowym napięciu przewodzenia –ZVS (Zero Voltage Switching). Osiągnięcie ZVS znacząco redukuje straty przełączania się tranzystorów jak i całego urządzenia zwłaszcza przy pracy wysokoprądowej.



Rys. 10. Częstotliwość podrezonansowa $f=40 [kHz]$, przebieg $V_{gs}(t)$ oraz $V_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1

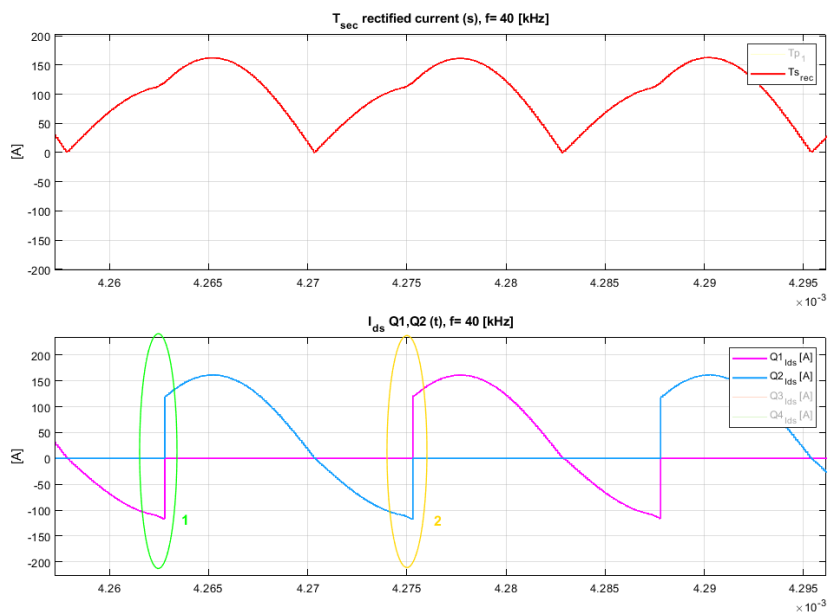


Rys. 11 Częstotliwość rezonansowa $f=50 [kHz]$, przebieg $V_{gs}(t)$ oraz $V_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1

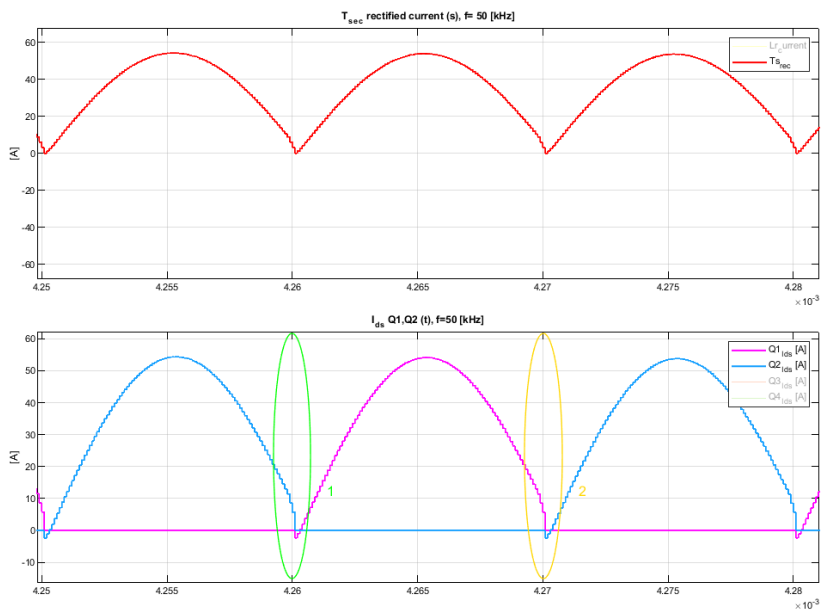


Rys. 11. Częstotliwość nadrezonansowa $f = 60$ [kHz], przebieg $V_{gs}(t)$ oraz $V_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1

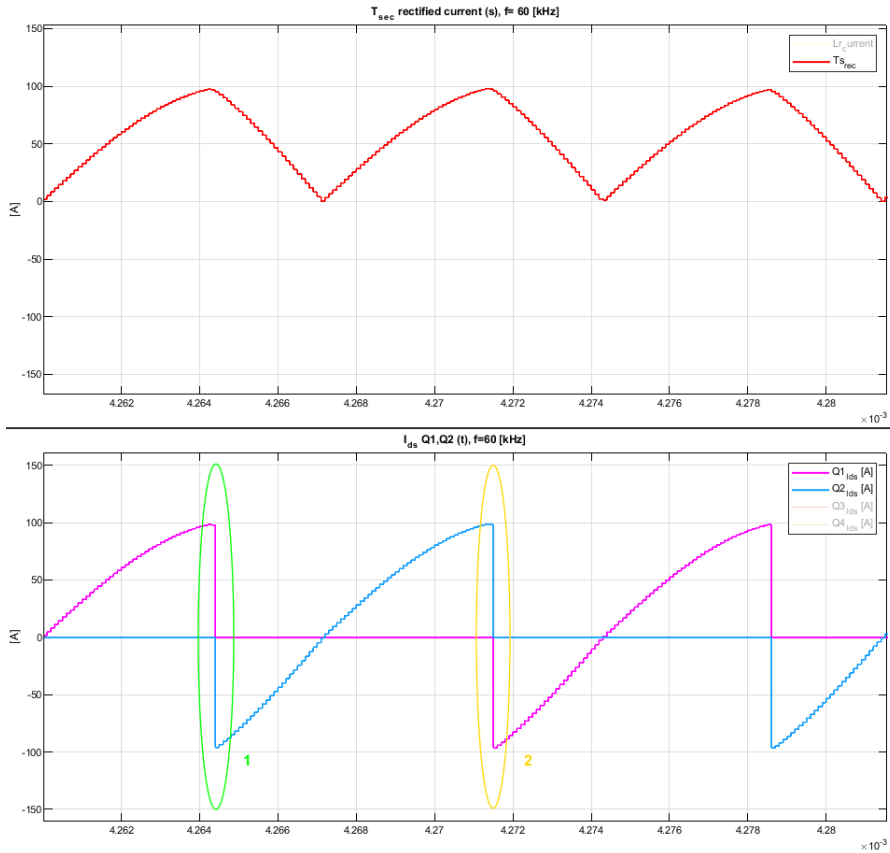
Wyprostowany sygnał prądowy strony wtórnej transformatora T_{Srec} jak i prąd przewodzenia tranzystorów I_{ds} prezentują odpowiednio poniższe przebiegi (Rys. 13–15). Znaczne różnice pomiędzy pracą w różnych częstotliwościach zaobserwowano zarówno w przebiegu sygnału prądu przewodzenia tranzystorów jak i sygnale prądowym strony wtórnej transformatora. W celu analizy pracy tranzystorów znajdujących się po stronie wtórnej transformatora wykorzystano wyprostowany sygnał prądowy – T_{Srec} . Dokonany wybór wraz z obserwacją pozostałych parametrów umożliwił obserwację efektów pracy wszystkich par kluczy tranzystorów strony pierwotnej oraz określenie dla której częstotliwości następuje również przełączanie przy prądzie przewodzenia bliskim 0A, ZCS (Zero Current Switching). Największą różnicę zaobserwowano dla przebiegów prądowych dla częstotliwości pracy w zakresie pomiędzy od 50 do 53 [kHz] dla których sygnał T_{Srec} osiąga najbardziej sinusoidalny kształt. Praca układu przy parametrach podrezonansowych wyraźnie zakłóca kształt przebiegu prądowy dostarczany do obciążenia powodując spadek wartości prądowej następujący przy każdym przełączeniu tranzystorów, (Rys. 13). Przechodzenie do taktowania nadrezonansowego skutkuje natomiast odkształceniem sygnału w sygnał piłokształtny z coraz bardziej (wraz ze wzrostem częstotliwości) stromym zboczem spowodowanym twardym przełączaniem kluczy strony wtórnej (pracujących jako prostownik) (Rys. 15).



Rys. 12. Częstotliwość podrezonansowa $f = 40$ [kHz], przebieg $T_{srec}(t)$ oraz $I_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1



Rys. 13 Częstotliwość rezonansowa $f = 50$ [kHz], przebieg $T_{srec}(t)$ oraz $I_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1



Rys. 14. Częstotliwość nadrezonansowa $f = 60$ [kHz], przebieg $T_{srec}(t)$ oraz $I_{ds}(t)$ dla Q1 oraz Q2, 1 – załączenie Q1, 2 – wyłączenie Q1

Znaczną różnicę można również zaobserwować w wartościach prądu transferowanego poprzez prostownik jak i tranzystory strony pierwotnej w tym samym czasie symulacji dla częstotliwości pod, nadrezonansowej oraz rezonansowej. Różnice te wynikają ze zmniejszonych strat transferu energii a co w skutek tego wynika szybszego ładowania się baterii przyjętej jako obciążenie układu—zgodnie z zależnością wyższy SOC—niższy prąd ładowania. Zależność ta wykorzystywana jest w celu ochrony ogniów akumulatora przed nadmiernym wzrostem temperatury oraz zużyciem podczas procesu ładowania oraz implementowana jest zazwyczaj (w zależności od typu ogniów) dla baterii litowo-jonowych od 80% SOC.

5. Wnioski

Uzyskane przebiegi jednoznacznie wskazują na możliwość osiągnięcia miękkiej komutacji przez zamodelowany układ dzięki ZVS w szerokim zakresie częstotliwości oraz ZVS i ZCS przy pracy w okolicach częstotliwości rezonansowej 51,5 [kHz]. Potwierdza to poprawny dobór parametrów pracy jak i poszczególnych komponentów urządzenia. Wykorzystanie przełączania przy zerowym napięciu dla tranzystorów strony pierwotnej umożliwia płynną pracę przetwornicy w szerokim zakresie częstotliwości a w skutek czego z dużą rozpiętością napięć i obciążeń strony wtórnej, odpowiadając na rzeczywisty charakter pracy stacji transferu energii. Zaobserwowane zjawisko występowania ZVS jak i ZCS dla pracy przy częstotliwości rezonansowej umożliwia adaptację algorytmu sterowania wszystkimi mostkami tranzystorowymi, strony pierwotnej jak i wtórnej urządzenia w celu odwracania ich roli. Następuje wtedy transfer energii w kierunku V2G, tj. klucze MOSFET strony wtórnej pracują wtedy jako mostek aktywny natomiast tranzystory jako prostownik dostarczający energię do szyny DC pierwotnego źródła zasilania przy zachowaniu miękkiej komutacji.

Wykorzystanie ZVS oraz ZVC w kierunku V2 możliwe jest dla stałej wartości obciążenia – energii pobieranej przez sieć zasilającą. Znając jednak stan naładowania pojazdu (informacja dostępna dla stacji transferu energii dzięki ustandaryzowanej komunikacji) algorytm urządzenia pozwala na pobranie odpowiedniej mocy w określonym czasie. Umożliwia to dopasowanie parametrów transferu w sposób usztywniający pracę V2G do częstotliwości rezonansowej. W artykule przedstawiono zalety wykorzystania technologii G2V–V2G oraz możliwość poprawy sprawności przetwornicy rezonansowych DC/DC dzięki wykorzystaniu miękkiej komutacji dla transferu w obu kierunkach. Jak również wyniki przeprowadzonych symulacji zaprojektowanego układu prezentujące zjawisko ZVS i ZVC.

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), IEEE, 2015.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] J.P. Morgan regional auto equity analysis, <https://www.jpmorgan.com> data pozyskania 07.2019.
- [6] Dobrzański D. *Overview of currently used wireless electrical vehicle charging solutions*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 3, 2018.
- [7] Mroczek B., Fatyga K. *Proposal for managing electric energy quality in the LV grid using on-load tap changer with a static synchronous compensator*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2, 2018.
- [8] 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.
- [8] Fatyga K., Kwaśny Ł., Stefańczak B. *A comparison study of the features of DC/DC systems with Si IGBT and SiC MOSFET transistors*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 2, 2018.
- [9] Zieliński D., Tokovarov M. *Simulation and comparison of selected fast charger topologies*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 3, 2017.

Podziękowania

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

*Karol Fatyga

Metody sterowania izolowaną przetwornicą DC/DC w układzie podwójnego mostka aktywnego

Streszczenie: W izolowanych przetwornicach DC/DC stosuje się techniki sterowania fazowego, częstotliwościowego lub PWM. Ze względu na swoją dynamikę oraz dwukierunkowość transferu energii, techniki sterowania fazowego są coraz częściej stosowane. W artykule opisane oraz porównane są: technika sterowania pojedynczą fazą (single phase shift – SPS), rozszerzone sterowanie fazowe (extended phase shift – EPS), podwójne sterowanie fazowe (dual phase shift – DPS) oraz potrójne sterowanie fazowe (triple phase shift – TPS). Zaprezentowane są ich wady i zalety oraz dokonana ocena pod kątem implementacji w układach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: podwójny mostek aktywny, sterowanie przesunięciem fazowym, izolowana przetwornica DC/DC, dwukierunkowy transfer energii

Control methods overview for isolated DC/DC converters in dual active bridge topology

Abstract: There are several control methods used in isolated DC/DC converters: phase-shift modulation, frequency modulation or pulse width modulation. Because of their dynamics as well as ability to transfer energy in both directions, phase-shift modulation becomes more popular. In this paper, there are described and compared: single phase shift (SPS), extended phase shift (EPS), dual phase shift (DPS) and triple phase shift (TPS). Advantages and disadvantages of each control method are presented. These control methods are also evaluated for potential implementation in laboratory system.

Keywords: dual active bridge, phase shift control, isolated dc/dc converter, bidirectional energy transfer

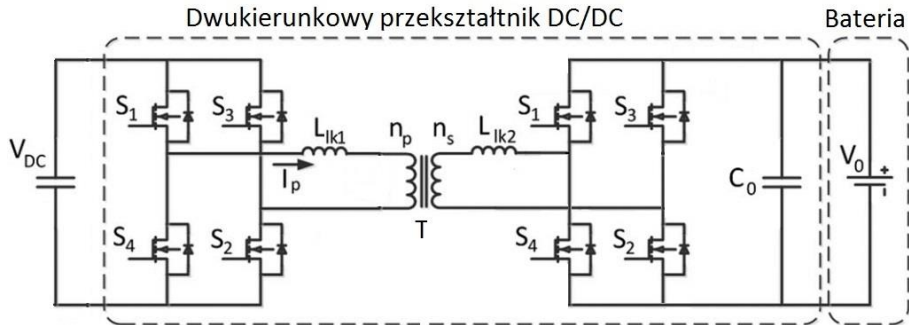
1. Wstęp

Przetwornice DC/DC średniej częstotliwości są niezbędnym elementem stacji ładowania pojazdów elektrycznych. W zależności od konfiguracji [1] pełnią one rolę stopnia końcowego, odpowiedzialnego za regulację prądu oraz napięcia dostarczanego do baterii pojazdu elektrycznego, lub pełnią dodatkową funkcję izolacyjną. Ze względu na konieczność stosowania izolacji galwanicznej pomiędzy baterią pojazdu elektrycznego a siecią elektroenergetyczną w torze przekształtnik AC/DC – przetwornica DC/DC – bateria pojazdu elektrycznego

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

musi znajdować się transformator. Stosowanie transformatora częstotliwości sieciowej wiąże się z dużymi jego rozmiarami w przypadku budowy stacji pracujących w standardzie 3 ładowania (moc wyjściowa 50 kW) [1]. Korzystniejszym rozwiązaniem jest stosowanie transformatora średniej częstotliwości stanowiącego element izolowanej przetwornicy DC/DC [2]. Znane są rozwiązania przetwornic opartych o układ falownik jednofazowy – transformator – prostownik pracujące w zakresie średnich częstotliwości, jednak coraz popularniejsze stają się przetwornice w układzie podwójnego mostka aktywnego (DAB – Dual Active Bridge), pozwalające na płynne sterowanie kierunkiem przepływu mocy z i do sieci elektroenergetycznej. Rośnie zainteresowanie tego rodzaju przetwornicami w gałęziach elektroenergetyki związanymi z mikrosieciami, czy sieciami HVDC.

Przetwornice w układzie podwójnego mostka aktywnego zbudowane są z dwóch mostków H połączonych poprzez transformator (Rys. 1).

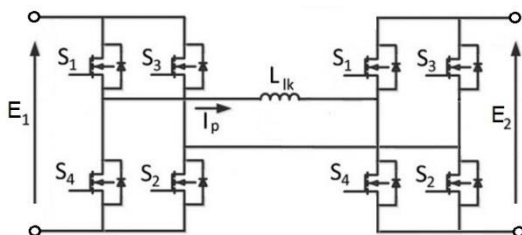


Rys. 1. Izolowany przekształtnik DC/DC

Stosuje się kilka technik sterowania takiego układu, np. sterowanie szerokością impulsu (PWM) [3]. Sterowanie rezonansowe LLC [4], bardzo często jest stosowane w układach bezstykowego transferu energii. Sterowanie napięciowe [5] znajduje zastosowanie w transformatorach energoelektronicznych SST (Solid State Transformer). Najbardziej rozpowszechnione jest sterowanie przesunięciem fazowym (Rys. 2) stosowane w dwukierunkowych układach transferu energii – przykładowo jako interfejsy pomiędzy zasobnikami energii a siecią elektroenergetyczną, lub jako stopnie końcowe układów ładowania pojazdów elektrycznych. Niniejszy rozdział skupia się na grupie sposobów sterowania opartych na przesunięciu fazowym, jego celem jest dokonanie analizy oraz ocena możliwości poszczególnych sposobów sterowania fazowego przetwornic DC/DC znanych w literaturze. Opisane są kolejno sterowanie pojedynczą fazą, rozszerzone sterowanie fazowe, podwójne oraz potrójne sterowanie fazowe. Wszystkie algorytmy są porównane i wybrany jest najlepszy zdaniem autora algorytm.

2. Sterowanie fazowe izolowanej przetwornicy DC/DC

Schemat zastępczy transformatora rysuje się zazwyczaj w postaci czwórnika typu T. W przypadku, gdy indukcyjność gałęzi poprzecznej (indukcyjność magnesowania) jest wielokrotnie większa od indukcyjności rozproszenia, dopuszcza się pominięcie gałęzi poprzecznej w analizie. Taki warunek spełnia analizowany układ (Rys. 2).



Rys. 2. Uproszczony schemat izolowanej przetwornicy DC/DC w układzie podwójnego mostka aktywnego

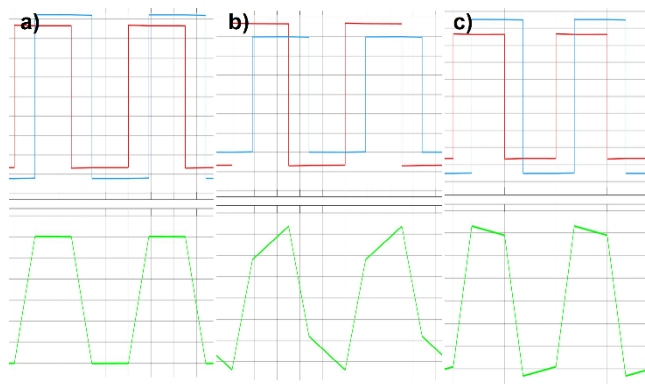
Jedynymi elementami reprezentującymi parametry transformatora w tym układzie są L_{lk} – sumaryczna indukcyjność rozproszenia oraz przekładnia zwojowa n , którą należy uwzględniać w obliczeniach. Równanie 1 prezentuje prąd płynący w indukcyjności L_{lk} .

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{E_1(t) - nE_2(t)}{L_{lk}} \quad (1)$$

gdzie przekładnię n określa się poprzez iloraz liczby zwojów strony górnej do dolnej transformatora.

Jak wspomniano we wstępie, układ ten może być sterowany napięciowo. Dla układu, w którym mostki H po obu stronach transformatora, reprezentowanego przez sumaryczną indukcyjność rozproszenia, generują przebiegi prostokątne przemienne o amplitudach $+/-E_1$ oraz $+/-E_2$, pozostające ze sobą w fazie, wielkością sterującą staje się różnica potencjałów E_1 oraz E_2 . W ten sposób, gdy $E_1 > nE_2$ następuje przepływ energii ze źródła E_1 do źródła E_2 , zaś w sytuacji, gdy $E_1 < nE_2$ następuje przepływ energii w stronę przeciwną. Stan, w którym $E_1 = nE_2$ jest stanem równowagi, w którym nie zachodzi przepływ energii pomiędzy źródłami. Zależności te mają również wpływ na pracę układu przy sterowaniu

fazowym, decydując o kształcie prądu w czasie gdy napięcia po obu stronach transformatora skierowane są w tę samą stronę (Rys 3).



Rys. 3. Przebiegi napięć i prądów dla przetwornicy sterowanej fazowo a) $E_1 = nE_2$, b) $E_1 < nE_2$, c) $E_1 > nE_2$

Moc wyjściową podwójnego mostka aktywnego określa się zgodnie z regułą (2) [6, 7]:

$$P_{out} = \frac{nE_1E_2}{\omega L_{lk}} \left(\varphi - \frac{\varphi^2}{\pi} \right) \quad (2)$$

Gdzie: P_{out} – moc wyjściowa układu, $\omega = 2\pi f_s, f_s$ – częstotliwość przełączania tranzystorów, φ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy mostkami

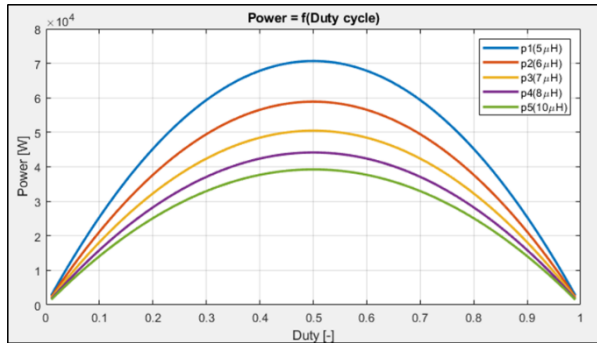
Alternatywnie, kąt przesunięcia fazowego φ zastępuje się współczynnikiem wypełnienia $D = \frac{\varphi}{\pi}$, uzyskując w ten sposób równanie (3):

$$P_{out} = \frac{nE_1E_2}{2f_s L_{lk}} D(1 - D) \quad (3)$$

W niniejszym rozdziale przyjmuje się formę drugą równania (3) i jeśli mowa jest o przesunięciu fazowym, rozumie się przez to współczynnik wypełnienia D , z wartościami 0 odpowiadającymi 0° oraz 1 odpowiadającemu 180° .

Na podstawie analizy równania (3) można stwierdzić, że transferowana moc zależy odwrotnie proporcjonalnie do indukcyjności rozproszenia L_{lk} . Ponadto, swoje maksimum mocy układ osiąga przy współczynniku wypełnienia $D = 0,5$.

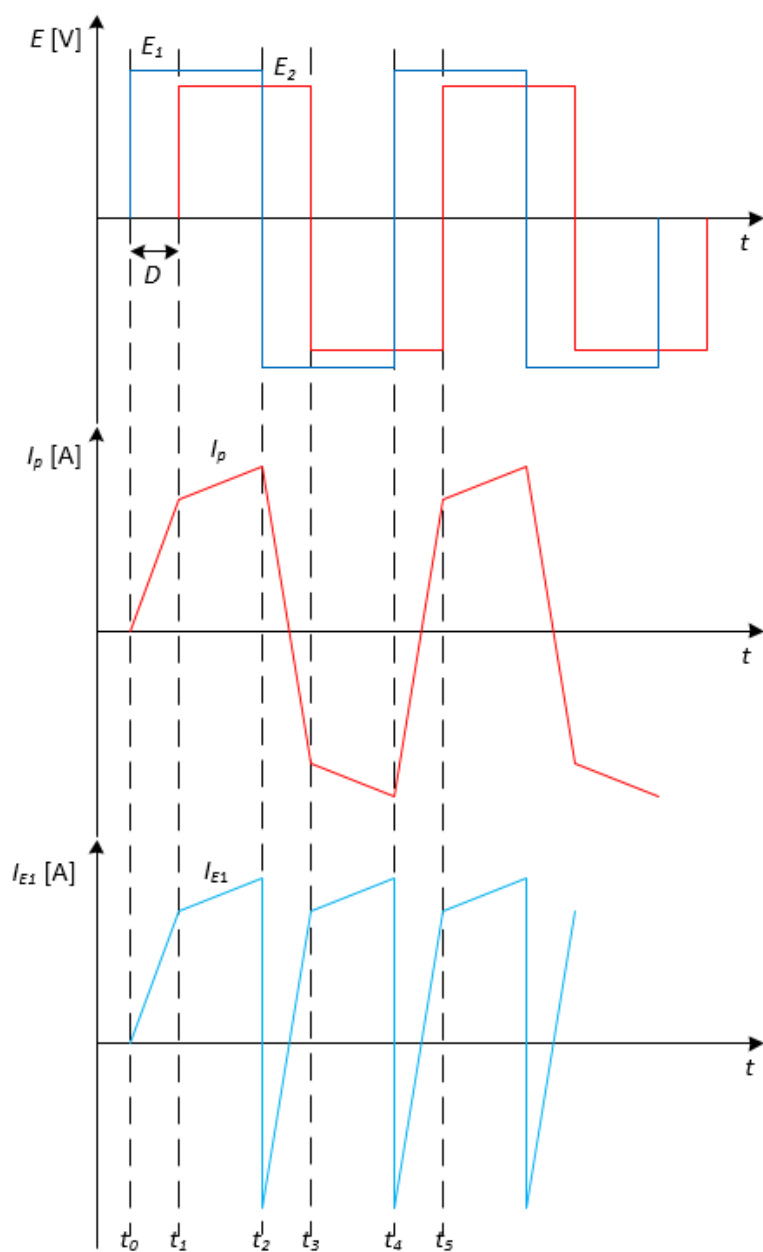
Wykres mocy wyjściowej w funkcji współczynnika wypełnienia D zaprezentowany jest na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres mocy wyjściowej w funkcji współczynnika wypełnienia D dla różnych indukcyjności L_{lk}

3. Sterowanie pojedynczym przesunięciem fazowym (SPS)

Sterowanie pojedynczym przesunięciem fazowym jest, pomijając metodę sterowania napięciowego, najprostszym sposobem sterowania przetwornicy w układzie podwójnego mostka aktywnego. Jest ono realizowane poprzez generację dwóch przebiegów prostokątnych o amplitudach $\pm E_1$ oraz $\pm E_2$ przez mostek H strony pierwotnej oraz strony wtórnej o stałej częstotliwości f_s , identycznej dla obu przebiegów napięcia. Wielkością sterującą w takim układzie staje się przesunięcie fazowe D . Przebiegi napięć oraz prądu dla takiego sterowania zaprezentowane są na rysunku 6. Rozważany przypadek jest sytuacją, gdy $E_1 > nE_2$. Kolejne założenia to prąd I_{p0} w chwili $t = t_0$ równa się zero (start układu), wartości napięć E_1 oraz E_2 pozostają niezmiennie w czasie. Pomijane są również straty w elementach półprzewodnikowych.



Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć oraz prądów podwójnego mostka aktywnego

W przedziale czasowym $t_0 - t_1$ otwarte są tranzystory S_1 i S_2 strony pierwotnej transformatora podając na uzwojenie napięcie E_1 , zaś prąd I_p w obwodzie transformatora wynosi:

$$I_{p1} = \frac{E_1}{L_{lk}}(t_1 - t_0) + I_{p0} \quad (4)$$

W przedziale czasowym $t_1 - t_2$ poprzez tranzystory S_1 i S_2 strony wtórnej transformatora na uzwojenie podane jest napięcie E_2 . Napięcie na indukcyjności w obwodzie zastępczym jest mniejsze, przez co zmienia się krzywa narastania prądu.

$$I_{p2} = \frac{E_1 - nE_2}{L_{lk}}(t_2 - t_1) + I_{p1} \quad (5)$$

W przedziale czasowym $t_2 - t_3$ zostają wyłączone tranzystory S_1 i S_2 strony pierwotnej, a zostają załączone tranzystory S_3 i S_4 zmieniając polaryzację napięcia z $+E_1$ na $-E_1$. Innymi słowy, źródło strony wtórnej zostaje dołączone odwrotnie do źródła strony pierwotnej.

$$I_{p3} = \frac{-E_1 - nE_2}{L_{lk}}(t_3 - t_2) + I_{p2} \quad (6)$$

W przedziale czasowym $t_3 - t_4$ zostają wyłączone tranzystory S_1 i S_2 strony wtórnej, a zostają załączone tranzystory S_3 i S_4 zmieniając polaryzację napięcia z $+E_2$ na $-E_2$, powodując ponowne połączenie źródeł w zgodnej polaryzacji.

$$I_{p4} = \frac{-E_1 + nE_2}{L_{lk}}(t_4 - t_3) + I_{p3} \quad (7)$$

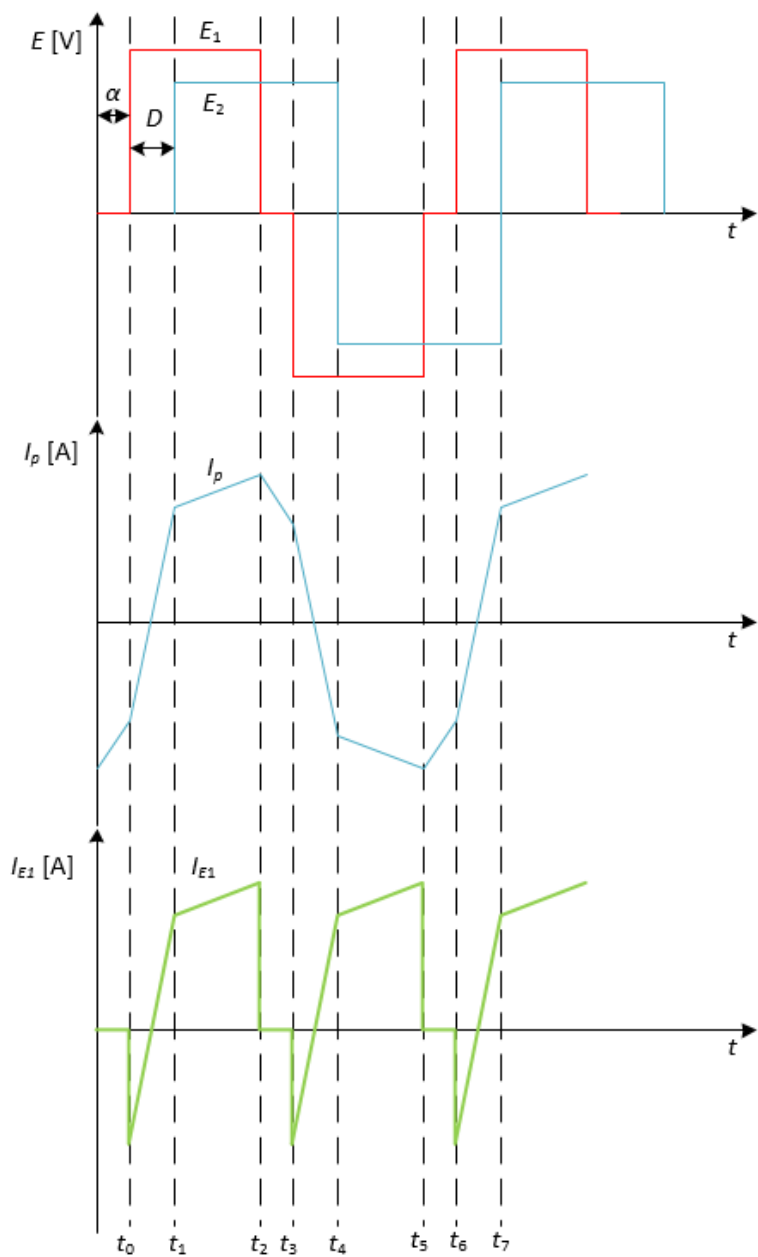
Przedział czasowy $t_4 - t_5$ odpowiada przedziałowi $t_0 - t_1$, a więc obowiązuje w tym przypadku równanie (4), przy czym tranzystory S_1 i S_2 strony pierwotnej są załączone w czasie, gdy załączone są tranzystory S_3 i S_4 strony wtórnej, powodując sytuację jak w przedziale czasowym $t_2 - t_3$ dołączając potencjał $-E_2$ do potencjału $+E_1$.

$$I_{p3} = \frac{E_1 + nE_2}{L_{lk}}(t_5 - t_4) + I_{p4} \quad (8)$$

W przedziałach $t_2 \div t_3$ i $t_4 \div t_5$ następuje zmiana polaryzacji prądu płynącego przez transformator. Zjawisku temu towarzyszy prąd powracający do źródła I_{E1} (rysunek 6). Prąd ten nie bierze aktywnego udziału w transferze energii, jedynie obciąża elementy półprzewodnikowe. W literaturze znany jest jako *backflow current* i jego eliminacja lub minimalizacja często jest problematyką badań [8, 9].

4. Sterowanie rozszerzonym przesunięciem fazowym (EPS)

Rozszerzone przesunięcie fazowe jest sposobem sterowania, w którym do podstawowego przesunięcia fazowego D pomiędzy przebiegami napięcia generowanymi przez mostki strony pierwotnej i wtórnej dodaje się przesunięcie fazowe α w obrębie jednego mostka. W ten sposób, po jednej stronie transformatora uzyskuje się trójpoziomowy przebieg napięcia w miejsce dotychczasowego dwupoziomowego przebiegu (Rysunek 6).



Rys. 6. Przebiegi napięć i prądów dla sterowania rozszerzonym przesunięciem fazowym

W przedziałach czasowych $t_0 - t_1$, $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$, $t_4 - t_5$ układ zachowuje się jak podczas sterowania pojedynczą fazą. Ze względu na trójpoziomowy charakter napięcia E_1 pojawiły się dwa nowe przedziały czasowe: $t_2 - t_3$, podczas których prąd opisany jest następującymi równaniami (9, 10).

$$I_{p3} = \frac{-nE_2}{L_{lk}}(t_3 - t_2) + I_{p2} \quad (9)$$

$$I_{p6} = \frac{nE_2}{L_{lk}}(t_3 - t_2) + I_{p5} \quad (10)$$

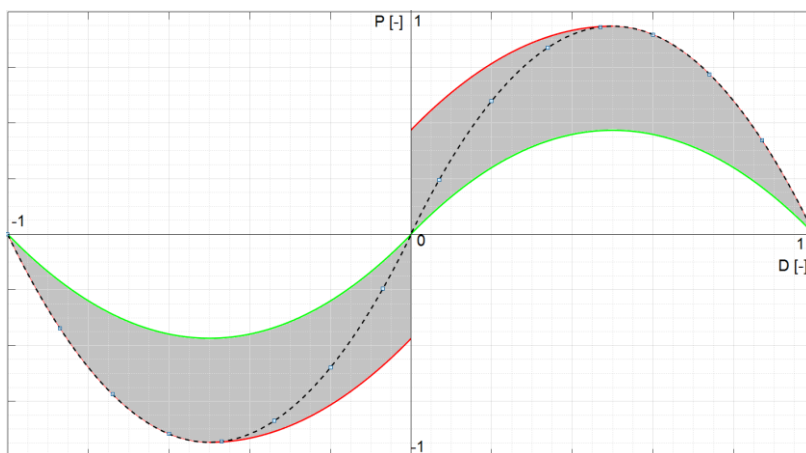
Podczas tych przedziałów czasowych do uzwojenia transformatora przyłożone jest tylko napięcie strony wtórnej. Wyłączenie tranzystorów w tym czasie pozwala na zapobieganie przepływowi energii z powrotem do źródła E_1 . Rozszerzenie tego przedziału do momentu, gdy indukcyjność będzie całkowicie rozładowana spowoduje całkowity zanik prądu wstecznego. W artykule [8] zaprezentowany jest warunek wyeliminowania prądu wstecznego:

$$k \leq \frac{1-2D}{1-\alpha} \quad (11)$$

Moc wyjściowa takiego układu określona jest równaniem (12) [8]:

$$P_{out} = \frac{E_1 n E_2}{2 f_s L_{lk}} [D(1 - D) + \frac{1}{2} \alpha (1 - \alpha - 2D)] \quad (12)$$

Wobec powyższego, przy rozszerzonym sterowaniu fazowym dwie wielkości mają wpływ na moc wyjściową układu: przesunięcie fazowe między mostkami D oraz przesunięcie fazowe w obrębie jednego mostka α . Rysunek 8 pokazuje wpływ dwóch przesunięć fazowych D i α na moc wyjściową. Zakres sterowania mocą w takim układzie dla przesunięć fazowych D w zakresie $\langle 0; 0,5 \rangle$ jest dodatkowo rozszerzony. Przy zmianie kierunku przepływu energii konieczna jest zmiana zachowania układu, aby to napięcie wiodące było trójpoziomowe, stąd to tranzystory strony wtórnej muszą zapewniać trójpoziomowość napięcia.

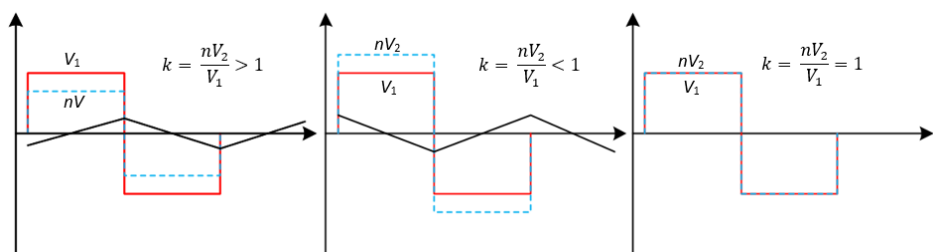


Rys. 7. Sterowanie mocą wyjściową w zależności od przesunięć fazowych D i α . Linia przerywaną zaznaczone sterowanie SPS (zmiana D), obszar zacieniowany to możliwości doregulowania poprzez zmianę kąta α

4.1. Sterowanie podwójnym przesunięciem fazowym (DPS)

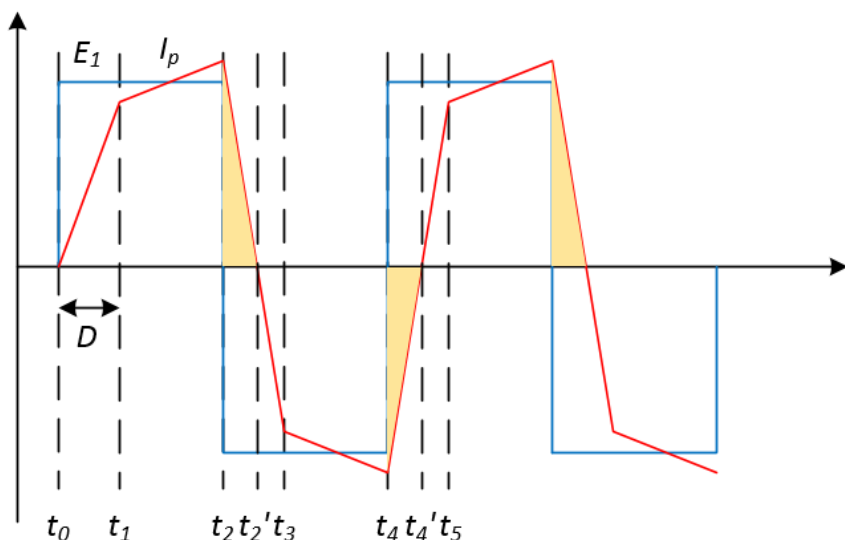
Sterowanie podwójnym przesunięciem fazowym zostało zaproponowane przez H. Bai jako rozwiązanie pozwalające wyeliminować przepływ mocy biernej w układzie przetwornicy DC/DC [10]. Rozwiązanie to różni się względem rozszerzonego sterowania fazowego dodaniem przesunięcia fazowego w obrębie mostka H uzwojenia wtórnego transformatora. W ten sposób układ uzyskuje dwa stopnie swobody: przesunięcie fazowe pomiędzy mostkami D oraz przesunięcie w obrębie pojedynczych mostków α . Sterowanie pojedynczą fazą kontroluje wyłącznie moc czynną, zaś sterowanie rozszerzone pozwala kontrolować prąd wracający do źródła.

Zgodnie z równaniem (3), dla zerowego przesunięcia fazowego D moc wyjściowa układu wynosi zero. Ze względu na brak dopasowania napięć i przekładni transformatora może dochodzić do sytuacji, że mimo zerowej przesyłanej mocy w układzie będzie przepływał prąd (Rys. 8).



Rys. 8. Przepływ prądu jałowego dla zerowego przesunięcia fazowego D w sterowaniu pojedynczą fazą (SPS) dla różnych przypadków dopasowania napięć

Kolejnym nieuniknionym zjawiskiem jest przesunięcie fazowe pomiędzy prądem a napięciem. Dla dużych obciążeń dochodzić będzie do opóźnienia prądu względem napięcia (Rys. 9).



Rys. 9. Opóźnienie prądu względem napięcia w układzie sterowanym pojedynczym przesunięciem fazowym (SPS)

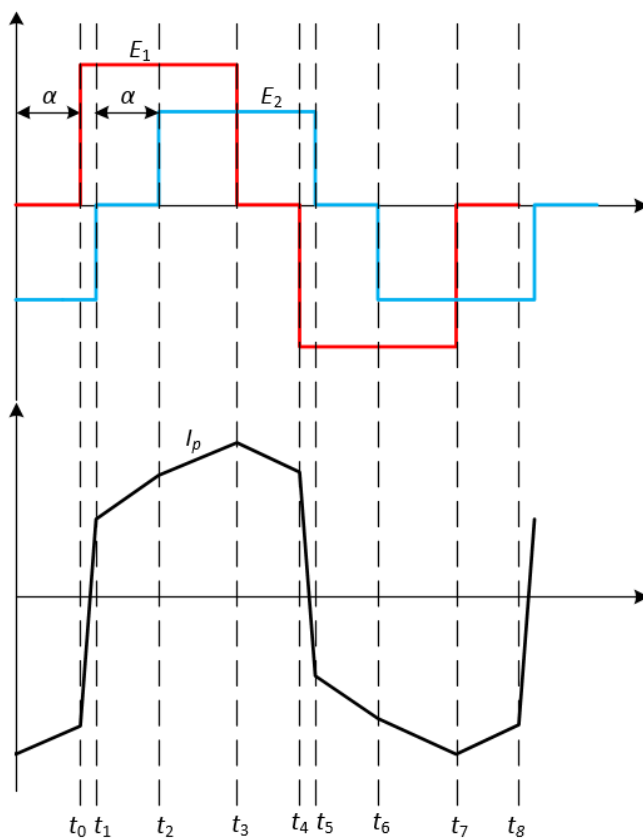
Zacieniowane obszary w przedziałach $t_2 - t_2'$ oraz $t_4 - t_4'$ są miejscami w których prąd jest spolaryzowany przeciwnie do napięcia. H. Bai definiuje te obszary jako obszar przepływu prądu zwrotnego, moc określając równaniem (13) [10].

$$Q = \frac{1}{T_s} V_1 \int_{t_2}^{t_3} i(t) dt \quad (13)$$

W zależności od prądu początkowego I_0 moc bierna jest określana

$$Q = V_1 \frac{[(1-2D)nV_2 - V_1]^2}{16f_s L_s} \times \begin{cases} \frac{1}{V_1 + nV_2}, I_0 < 0 \\ 0, I_0 = 0 \\ \frac{1}{V_1 - nV_2}, I_0 > 0 \end{cases} \quad (14)$$

Sterowanie podwójnym przesunięciem fazowym odbywa się poprzez zmianę przesunięcia fazowego D oraz przesunięć fazowych α , odnoszących się do poszczególnych mostków H (Rys. 10)



Rys. 10. Przebiegi napięć oraz prądu w układzie sterowanym podwójnym przesunięciem fazowym

Dla przypadku określonego na rysunku 11 prąd transformatora wyznaczany jest następującymi równaniami (15–22):

W przedziale t_0-t_1 :

$$I_{p1} = \frac{E_1+nE_2}{L_{lk}}(t_1 - t_0) + I_{p0} \quad (15)$$

W przedziale t_1-t_2 :

$$I_{p2} = \frac{E_1}{L_{lk}}(t_2 - t_1) + I_{p1} \quad (16)$$

W przedziale t_2-t_3 :

$$I_{p3} = \frac{E_1-nE_2}{L_{lk}}(t_3 - t_2) + I_{p2} \quad (17)$$

W przedziale t_3-t_4 :

$$I_{p4} = \frac{-nE_2}{L_{lk}}(t_4 - t_3) + I_{p3} \quad (18)$$

W przedziale t_4-t_5 :

$$I_{p5} = \frac{-E_1-nE_2}{L_{lk}}(t_5 - t_4) + I_{p4} \quad (19)$$

W przedziale t_5-t_6 :

$$I_{p6} = \frac{-E_1}{L_{lk}}(t_5 - t_4) + I_{p5} \quad (20)$$

W przedziale t_6-t_7 :

$$I_{p7} = \frac{-E_1+nE_2}{L_{lk}}(t_5 - t_4) + I_{p6} \quad (21)$$

W przedziale t_7-t_8 :

$$I_{p5} = \frac{nE_2}{L_{lk}}(t_5 - t_4) + I_{p4} \quad (22)$$

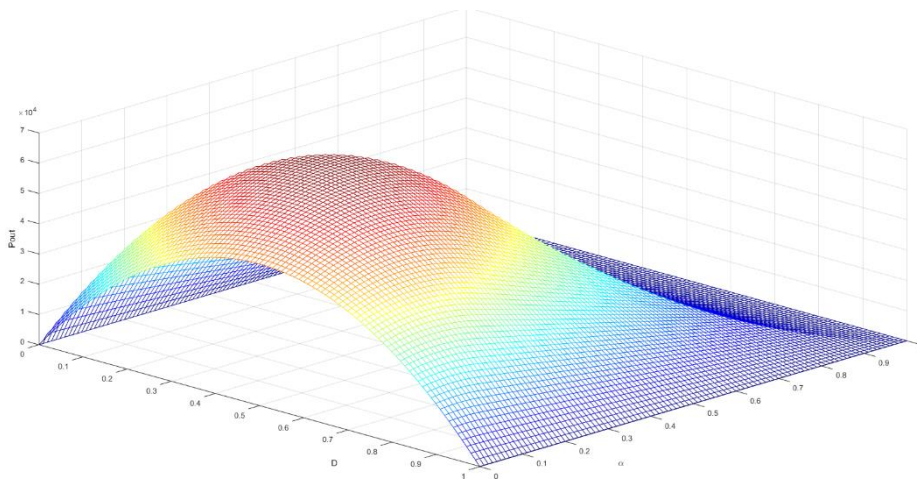
Względem sterowania pojedynczą fazą pojawiają się cztery nowe przedziały (16,18,20,22), podczas których zasilone jest tylko jedno z uzwojeń. Prądy będące przeciwnie spolaryzowanymi do napięć zawierają się w przedziałach $t_0 - t_1$ oraz $t_4 - t_5$. Minimalizacja tych obszarów powoduje zanik przepływu mocy biernej w układzie. Należy zaznaczyć, że powyższe równania są prawdziwe dla sytuacji, kiedy $D > 2\alpha$. Kształt prądu transformatora będzie się zmieniał w zależności od stosunku D i α . Moc podczas sterowania podwójnym przesunięciem fazowym opisana jest równaniami (23,24). Dla $\alpha \leq 0.5$

$$P_{out} = \frac{nV_1V_2}{2f_sL_s} \times \begin{cases} D(2 - 2\alpha - D), & 0 \leq D \leq \alpha \\ D(1 - \alpha - D) + \alpha - \alpha^2, & \alpha \leq D \leq 1 - \alpha \\ (1 - \alpha)(1 - D), & 1 - \alpha \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

Zaś dla $\alpha > 0.5$

$$P_{out} = \frac{nV_1V_2}{2f_sL_s} \times \begin{cases} D(2 - 2\alpha - D), & 0 \leq D \leq 1 - \alpha \\ (1 - \alpha)^2, & 1 - \alpha \leq D \leq \alpha \\ (1 - \alpha)(1 - D), & \alpha \leq D \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

Wykres mocy wyjściowej przedstawiony jest na rysunku 12. Widać, że istnieje nieskończenie wiele kombinacji α i D dla osiągnięcia danego poziomu mocy P_{out} .



Rys. 11. Wykres mocy w funkcji D , α

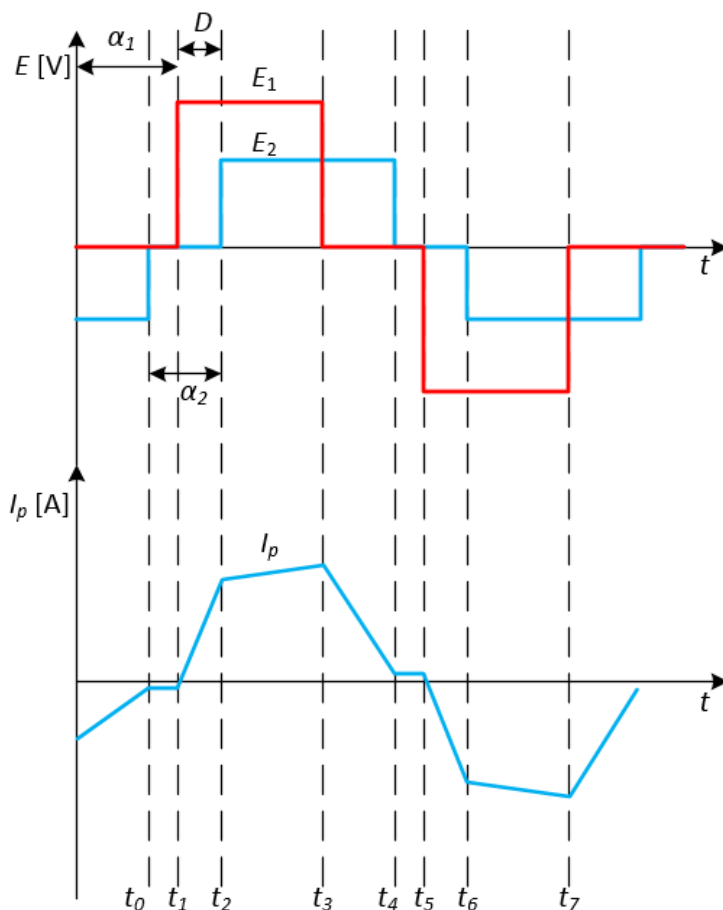
Sterowanie w pętli zamkniętej realizowane jest przez oddzielne regulatory PI dla D i α . Jeżeli zapotrzebowanie na moc spada, przesunięcie α jest zwiększone zaś D jest ograniczone [11]. Stąd dwa regulatory PI pracujące niezależnie nie są optymalnym rozwiązaniem.

Zakładając, że spełniony jest warunek $1 - \alpha < D < \alpha$, sterowanie to można sprowadzić od sterowania pojedynczym przesunięciem α . Wtedy, zgodnie z równaniem (24) moc wyjściowa sterowana jest jedynie przez α . Należy jednak zauważyć, że takie rozwiązanie wymaga, aby przesunięcie fazowe α wynosiło co najmniej 0,5, a więc realnie transformator zasilany jest przez maksymalnie połowę okresu kluczowania. Sterowanie podwójnym przesunięciem fazowym ograniczone jest krzywą mocy sterowania pojedynczym przesunięciem. Nie jest możliwe osiągnięcie mocy wyższej [11]. Rozwiązanie oferuje jednak możliwość wyeliminowania przepływu mocy biernej. Stan tej jest osiągalny tylko w przypadku, gdy $V_1 = nV_2$, czyli w stanie dopasowania źródeł, gdy nie ma przepływu prądu jałowego.

5. Sterowanie potrójnym przesunięciem fazowym (TPS)

Układ sterowany potrójnym przesunięciem fazowym jest naturalnym rozwinięciem układu sterowania DPS, przy czym przesunięcia fazowe α_1 α_2 w obrębie mostków H regulowane są niezależnie od siebie. Przy czym sterowanie przesunięciem fazowym pomiędzy mostkami D pozostaje bez zmian. Możliwe jest uzyskanie różnych trybów pracy w zależności od przesunięć. W poniższym podrozdziale zostanie omówiony przypadek o najmniejszym możliwym przepływie mocy biernej. Pełna analiza przeprowadzona jest w artykułach

[12, 13]. Założeniem tego trybu jest, że $D < \alpha_2 < \alpha_1$. Przebiegi napięć sterujących oraz prądu transformatora zaprezentowane są na rysunku 13.



Rys. 12. Przebiegi napięć oraz prądu transformatora przy potrójnym sterowaniu fazowym

Względem sterowania podwójnym przesunięciem fazowym pojawiły się przedziały $t_0 - t_1$ oraz $t_4 - t_5$ w których na żadne z uzwojeń nie jest podane napięcie. W sytuacji dopasowania źródeł tj. $E_1 = nE_2$ w tym czasie nie płynie żaden prąd, całkowicie eliminując przepływ mocy wstecznej, ponieważ nigdy nie dojdzie do sytuacji, gdy płynie prąd spolaryzowany przeciwnie do napięcia. Należy zauważyć, że taki stan jest również osiągalny przy sterowaniu DPS, ale w przypadku potrójnego przesunięcia fazowego, nie jest ograniczony do sytuacji, gdy główne przesunięcie D jest mniejsze od przesunięcia α . Moc wyjściowa układu przy sterowaniu TPS jest ograniczona z góry przez krzywą sterowania SPS. Układ nie jest w stanie osiągnąć mocy wyższej niż w przypadku sterowania

pojedynczą fazą. Zyskuje za to eliminację przepływu mocy wstecznej. Moc układu dla analizowanego trybu określona jest wzorem (25). Pełna analiza mocy dla różnych trybów pracy przeprowadzona jest w artykule [14].

$$P_{out} = \frac{V_1 n V_2}{2 f_s L_{lk}} (-\alpha_1^2 - D^2 + \alpha_2 \alpha_1 + 2 \alpha_1 D) \quad (25)$$

Sterowanie układem z potrójnym przesunięciem fazowym wymaga złożonego układu modulacji, ponieważ trzy zmienne odpowiadają za moc wyjściową. W artykule [15] zaproponowany jest algorytm modulacji nazywany Unified Triple-Phase-Shift Control. Algorytm ten nastawiony jest na minimalizację obciążenia prądowego (prądu szczytowego transformatora). Opiera się na pojedynczej pętli sprzężenia zwrotnego (pomiar napięcia wyjściowego) oraz na pojedynczym regulatorze PI. Regulator PI oblicza przesunięcie fazowe D_f , służące jedynie do obliczeń. Na podstawie wartości D_f oraz tablicy zmiennych dobierane są przesunięcia α_1 oraz α_2 . Następnie obliczane jest główne przesunięcie D . Na podstawie trzech sygnałów: α_1 , α_2 , D generowane są sygnały sterujące bramkami poszczególnych tranzystorów. Ze względu na konieczność przechowywania w pamięci wartości sygnałów α_1 , α_2 dla różnych trybów oraz różnych parametrów obwodu, rozwiązanie takie potrzebuje procesora z dużą ilością pamięci.

6. Porównanie SPS, EPS, DPS, TPS

W Tabeli 1 przedstawione jest porównanie czterech sposobów sterowania podwójnym mostkiem aktywnym.

Tabela 1. Porównanie sterowania SPS, EPS, DPS oraz TPS

	SPS	EPS	DPS	TPS
LICZBA STOPNI SWOBODY	1	2	2	3
KSZTAŁT NAPIĘĆ STERUJĄCYCH	prostokątny	Prostokątny, trójpoziomowy prostokątny po stronie pierwotnej	Prostokątny trójpoziomowy po obu stronach, identyczne przesunięcie fazowe obu napięć	Prostokątny trójpoziomowy po obu stronach, różne przesunięcie fazowe napięć
CECHY SZCZEGÓLNE	Wysoki prąd szczytowy Proste sterowanie	Proste sterowanie Możliwość doregulowania mocy Redukcja prądu wstecznego	Redukcja mocy biernej Powstawanie trybów pracy zależnych od przesunięć	Redukcja mocy biernej Możliwość ograniczania prądu rozruchowego Skomplikowana modulacja

Sterowanie pojedynczym przesunięciem fazowym jest przede wszystkim łatwe do zrealizowania. Jego główną wadą jest wysoki prąd szczytowy, występujący ze względu na charakter prostokątnej napięć sterujących i brak przedziałów czasowych w których indukcyjność mogłaby się swobodnie rozładowywać. Funkcjonalność ta zapewniona jest w rozwinięciach tego sterowania: sterowanie rozszerzone pozwala rozładować się indukcyjności i częściowo zredukować prąd wsteczny źródła. Dodatkowo pozwala ono na doregulowywanie mocy w zakresie przesunięć od $D = 0$ do $D = 0.5$. Kolejne sterowania powodują powstawanie różnych trybów pracy, zależnych od zastosowanych przesunięć fazowych. Powoduje to drastyczne różnice w kształcie prądu transformatora i komplikację sterowania, która musi te różnice przewidywać. Korzystnym efektem jest możliwość wyeliminowania przepływu mocy biernej w układzie (poprzez eliminację przepływu prądu wstecznego), czy możliwość ograniczenia prądu rozruchowego, poprzez płynny przyrost współczynnika wypełnienia.

7. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale monografii dokonana została prezentacja oraz opracowano porównanie różnych sposobów sterowania przesunięciem fazowym: pojedynczym, rozszerzonym, podwójnym oraz potrójnym. Zaobserwowano, że stopniowe rozszerzanie sterowania powoduje pojawienie się nowych funkcjonalności jak np. kontrola rozruchu. Niestety, wiąże się to ze wzrostem stopni swobody układu i co za tym idzie – komplikacji sterowania. Aplikacje o topologii podwójnego mostka aktywnego często są projektowane dla częstotliwości kluczowania od kilku do kilkuset kHz, co przy skomplikowanym sterowaniu jest dużym wymaganiem dla implementacji na mikrokontrolerze. Bardzo często konieczne jest zaprojektowanie dedykowanego sterownika w technologii FPGA. Z tego względu najbardziej atrakcyjne wydaje się rozszerzone sterowanie przesunięciem fazowym – które wykorzystuje pojedyncze przesunięcie fazowe D jako wielkość sterującą, a przesunięcie fazowe α jedynie do minimalizacji przepływu prądu wstecznego.

Literatura

- [1] PN-EN 61851-23 *System przewodowego ładowania pojazdów elektrycznych, Część 23: Stacja ładowania pojazdów elektrycznych prądu stałego*, Warszawa, Polski Komitet Normalizacyjny, 2014.
- [2] Inoue S., Akagi H., *A Bidirectional DC-DC Converter for an Energy Storage System With Galvanic Isolation*, IEEE Transactions on Power Electronics 6(22), IEEE, 2007.
- [3] Jain A. K., Ayyanar R., *PWM control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification*, IEEE Transactions on Power Electronics 6(22), IEEE, 2011.

- [4] Yang B., Lee F. C., Zhang A. J., Huang G. *LLC resonant converter for front end DC/DC conversion*, APEC, Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, USA, IEEE, 2002.
- [5] Zhao T., Wang G., Bhattacharya S., Huang A. Q., *Voltage and Power Balance Control for a Cascaded H-Bridge Converter-Based Solid-State Transformer*, IEEE Transactions on Power Electronics 4(28), IEEE, 2013.
- [6] Barlik, R., Nowak M., Grzejszczak P. *Power transfer analysis in a single phase dual active bridge*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 61(4), Warszawa, 2013.
- [7] Zhao B., Song Q., Liu W., Sun Y., *Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System*, IEEE Transactions on Power Electronics 8(29), IEEE, 2014.
- [8] Zhao B., Yu Q., Sun W., *Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC-DC Converter for Power Distribution in Microgrid*, IEEE Transactions on Power Electronics 11(27), IEEE, 2012.
- [9] Shi H., Wen H., Chen J., Hu Y., Jiang L., Chen G., *Minimum-Reactive-Power Scheme of Dual-Active-Bridge DC-DC Converter With Three-Level Modulated Phase-Shift Control*, IEEE Transactions on Industry Applications 6(53), IEEE, 2017.
- [10] Hua B., Mi C., *Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC-DC converters using novel dual-phase-shift control*, IEEE Transactions on Power Electronics 6(23.6), IEEE, 2008.
- [11] Zhao B., Song Q., Liu W., *Power Characterization of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC-DC Converter with Dual-Phase-Shift Control*, IEEE Transactions on Power Electronics 9(27), IEEE, 2012.
- [12] Wu K., de Silva C. W., Dunford W. G., *Stability Analysis of Isolated Bidirectional Dual Active Full-Bridge DC-DC Converter with Triple Phase-Shift Control*, IEEE Transactions on Power Electronics 4(27), IEEE, 2012.
- [13] Wen H., Xiao W., *Bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter with triple-phase-shift control*, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, USA, IEEE, 2013.
- [14] Harrye Y. A., Ahmed K. H., Adam G. P., Aboushady A. A., *Comprehensive steady state analysis of bidirectional dual active bridge DC/DC converter using triple phase shift control*, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, IEEE, 2014.
- [15] Huang J., Wang Y., Li Z., Lei W., *Unified Triple-Phase-Shift Control to Minimize Current Stress and Achieve Full Soft-Switching of Isolated Bidirectional DC-DC Converter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 7(63), IEEE, 2016.

Podziękowania

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

*Bartosz Drzymala

Przekształtniki wielopoziomowe w aplikacjach przemysłowych

***Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono przemysłowe zastosowania przekształtników wielopoziomowych tzw. MLC. Opisano zasadę działania trzech podstawowych topologii NPC, FC i CHB. Dokonano przeglądu aplikacji, w których znajdują zastosowanie wielopoziomowe układy przekształtnikowe m.in. napędy trakcyjne, elektromobilność, energetyka (HVDC, FACTS/STATCOM) oraz odnawialne źródła energii. Przedstawione zostały również zalety i korzyści ekonomiczne płynące z zastosowania układów MLC w podanych aplikacjach.*

***Słowa kluczowe:** przekształtniki wielopoziomowe, napędy trakcyjne, elektromobilność*

Multilevel converters in industrial application

***Abstract:** This paper discusses present industrial usage of multilevel converters MLC. The article is described principle of three basic topologies NPC, FC and CHB. The applications in which multilevel converter systems are used have been reviewed i.e. traction electric drives, electromobility, energetics (HVDC, FACTS/STATCOM) and renewable energy. Article also describes advantages and economic benefits of using multilevel converters.*

***Keywords:** multilevel converter, traction electric drives, electromobility*

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój energoelektroniki oraz techniki mikroprocesorowej w ostatnich dekadach zaowocował, zwiększoną możliwością zastosowania zaawansowanych układów przekształtników energii w aplikacjach przemysłowych. Do najpopularniejszych zastosowań można zaliczyć m.in. układy napędów elektrycznych, systemy przetwarzania i transmisji energii oraz stacje ładowania pojazdów elektrycznych. Znaczący wzrost mocy urządzeń sięgających kilku MW wymaga bezpośredniego łączenia układów z siecią napięć rzędu do kilku kV. Jednocześnie wysoka sprawność oraz niezawodność wymagana przez dzisiejsze aplikacje przemysłowe stawia przed układami energoelektronicznymi coraz to większe wyzwania [1, 2]. Inżynierowie na całym świecie starają się projektować układy tak aby spełniały rynkowe oczekiwania. Rozwój ten odbywa się dwukierunkowo, efektem czego jest stosowanie nowoczesnych technologii półprzewodnikowych np. tranzystory IGBT, SiCMOSFET oraz rozwijanie tradycyjnych topologii [3]. Rozwiązaniem spełniającymi oczekiwania okazują się być tzw. przekształtniki wielopoziomowe MLC/MLI (ang. multilevel converter/inverter). W porównaniu do tradycyjnych

*bartosz.drzymala@pollub.edu.pl, afiliacja: Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

konfiguracji dwupoziomowych, można dzięki nim uzyskać dowolną liczbę poziomów wyjściowych napięcia z zachowaniem niskich kosztów eksploatacji oraz redundancji. Rozwiązanie to spełnia oczekiwania wielu aplikacji średnich i dużych mocy m.in. napędów trakcyjnych, sieci przesyłowych HVDC, kompensatorów FACTS/STATCO oraz stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych [4]. Zastosowanie tego typu przekształtników wiąże się z uzyskaniem licznych korzyści podczas użytkowania. Zalicza się do nich m.in. redukcję zniekształceń harmoniczných THD wpływających na jakość zasilania, zmniejszenie stromości narastania napięcia dv/dt przy kluczeniu tranzystorów (redukcja zakłóceń EMI), kształt prądu bliski sinusoidalnemu. Do zalet rozwiązań wielopoziomowych zalicza się również zmniejszenie wymiarów oraz kosztów filtrów wejściowych i wyjściowych oraz wydajniejszą optymalizację układu chłodzenia [5]. W tym artykule przedstawiono nowoczesne układy przekształtników wielopoziomowych ich zalety oraz wady. Specjalną uwagę poświęcono przemysłowemu zastosowaniu tych układów, ich implementacji i rozwojowi.

2. Topologie wielopoziomowych układów przekształtnikowych

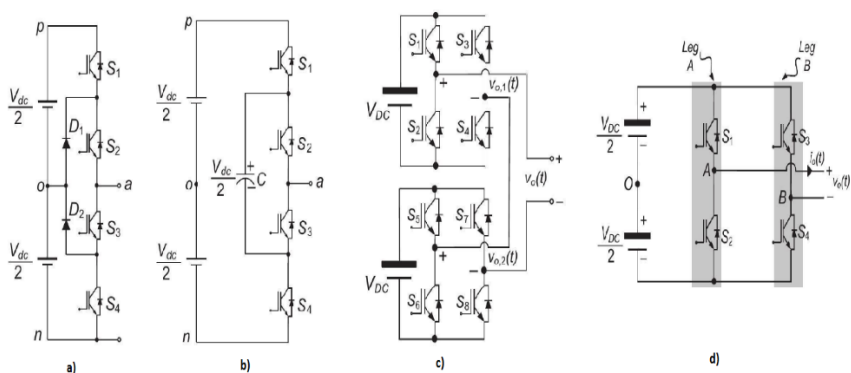
W celu lepszego zrozumienia korzyści, jakie daje zastosowanie przekształtników wielopoziomowych w aplikacjach przemysłowych, należy najpierw zapoznać się z ich podstawowymi topologiami. Wybór odpowiedniej struktury do konkretnej aplikacji, wiąże się z rozpatrzeniem kilku istotnych czynników inżynierskich oraz ekonomicznych [6, 7]. Z fizycznego punktu widzenia istotnymi cechami są masa, wymiary, możliwość odprowadzenia ciepła. Z ekonomicznej strony istotnym aspektem jest zasadność zastosowania (zwrot inwestycji) oraz koszt takiego przekształtnika, który determinują zastosowane klucze tranzystorowe diody prostowniczych czy kondensatorów. Tak jak w przypadku przekształtników dwupoziomowych sterowanie następuje za pomocą modulacji szerokością impulsu PWM (ang. Pulse Width Modulation) wykorzystując bardziej rozbudowane i skomplikowane metody modulacji sinusoidalnej z sygnałem nośnym SPWM (Multicarrier PWM) oraz modulacji wektora przestrzennego tzw. SVPWM (ang. Space Vector Modulation PWM) [8,9,10,11,12].

Do najpopularniejszych topologii zaliczają się:

- a) Przekształtniki z diodą poziomującą NPC (ang. Natural Point Clamped) Jest najczęściej używaną konfiguracją w aplikacjach rzędu kilku MW[6, 7]. Na rysunku (Rys. 1a) przedstawiono gałąź trójpoziomowego przekształtnika. Szyna DC jest tu rozdzielona, za pomocą dwóch źródeł napięcia (lub kondensatorów). Punkt połączenia źródeł jest punktem neutralnym napięcia.

Kluczową rolę w tym obwodzie pełnią dwie diody D1, D2. Wyrównują one napięcia przekształtnika do odpowiedniej wartości wyjściowej. W danym przypadku poziom $V_{dc}/2$ uzyskuje się w podczas aktywowania tranzystorów S1 i S2, w momencie załączenia kluczy S2 i S3 napięcie wynosi 0, natomiast stan $-V_{dc}/2$ występuje przy zamknięciu tranzystorów S3 i S4.

- b) Przekształtniki z kondensatorami poziomującymi FC (ang. Flying Capacitor) nie posiadają diod, elementami poziomującymi w tej topologii są natomiast kondensatory. W przedstawionej na rysunku (Rys 1 b) jednej gałęzi trójpoziomowego przekształtnika widać jeden kondensator poziomujący, oraz brak połączenia punktu neutralnego z elementem wyrównującym (kondensatorem). Odpowiednie napięcia wyjściowe uzyskuje się sterując kluczami tranzystorowymi identycznie jak w topologii NPC.
- c) Przekształtniki kaskadowe pełnomostkowe CHB (ang. Cascade H Bridge) są układami różniącym się od dwóch poprzednich. Nie potrzebują one elementów poziomujących (diod, kondensatorów). W tej topologii konieczne jest natomiast posiadanie kilku izolowanych źródeł napięcia stałego w zależności od ilości zadanych poziomów napięcia wyjściowego (1 źródło dla trójpoziomowego, 2 dla pięciopoziomowego, 3 dla siedmiopoziomowego). Na rysunku (Rys 1 d oraz Rys. 1 c) przedstawiono odpowiednio po jednej gałęzi przekształtnika trójpoziomowego i pięciopoziomowego. Rozpatrując wersję trójpoziomową (Rys 1 d) stan $V_{dc}/2$ napięcia wyjściowego uzyskuje się podczas załączenia kluczy S1 i S4, stan 0 dla aktywnych S1 i S3 lub S2 i S4, natomiast napięcie $-V_{dc}/2$ uzyskane zostanie po załączeniu tranzystorów S3 i S2 [9, 11].



Rys. 1. Różne topologie przekształtników trójpoziomowych i pięciopoziomowych: a) NPC z diodami poziomującymi b) z kondensatorami poziomującymi FC c) kaskadowa mostkowa CHB pięciopoziomowa d) kaskadowa mostkowa trójpoziomowa [12].

Tabela 1. Zestawienie poszczególnych elementów w zależności od konfiguracji przekształtników trójpoziomowych oraz pięciopoziomowych(w nawiasie) dla jednej fazy napięcia wyjściowego.

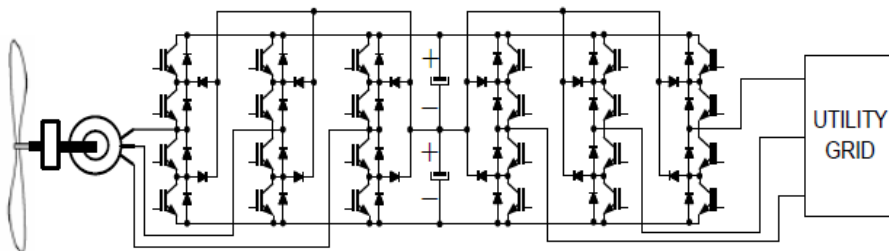
Ilość elementów	Topologie Przekształtników		
	NPC	FC	CHB
Tranzystory	4 (8)	4(8)	4 (8)
Kondensatory	0	1 (3)	0
Diody	2 (6)	0	0

Każda z powyższych konfiguracji ma swoje wady i zalety. Zgodnie z Tabelą 1 najmniej elementów do prawidłowego działania potrzebuje przekształtnik kaskadowy CHB, co znacznie minimalizuje koszt takiego urządzenia. Minusem tego rozwiązania natomiast jest osiągnięcie wyższego współczynnika zawartości harmonicznych THD w porównaniu do NPC i FC, większe straty mocy oraz konieczność zastosowania stabilnych izolowanych źródeł napięcia stałego[12].

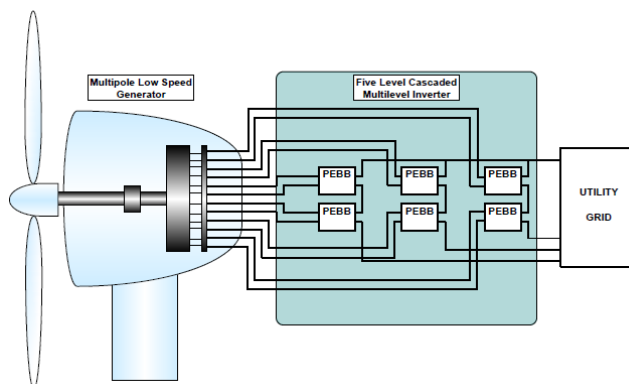
3. Przekształtniki wielopoziomowe w aplikacjach przemysłowych

3.1. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych, systemy PV, turbiny wiatrowe

Konieczność redukcji emisji CO₂ oraz większy koszt energii pozyskiwanej z tradycyjnych elektrowni węglowych związany z licznymi sankcjami, przyczynia się stale do rozwoju alternatywnej gałęzi produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych m.in. elektrowni wiatrowych oraz słonecznych. Aktualnie panująca tendencja zwiększania mocy elektrowni (do kilku MW), a co za tym idzie napięć oraz prądów znamionowych wymaga od układów przekształtnikowych odpowiednich parametrów. Idealne do tego zadania są przekształtniki wielopoziomowe[13,14]. Dzięki nim możliwe jest bezpośrednie przyłączenie generatora do sieci, bez stosowania transformatora np. w tzw. Konfiguracji Back to back (Rys. 2). Zastosowane wolnoobrotowych generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi, o dużej liczbie par biegunów, pozwala na uzyskanie stabilnego źródła napięcia stałego z każdego uzwojenia maszyny. Zwiększenie sprawności tego rozwiązania i jego opłacalności można uzyskać stosując topologię kaskadową przekształtnika wielopoziomowego. W literaturze [13] zaproponowano różne topologie pracy przekształtników wielopoziomowych, jednak tak jak wcześniej wspomniano najbardziej optymalną i efektywną konfiguracją do pracy z turbinami wiatrowymi jest topologia kaskadowa CHB (Rys. 3).



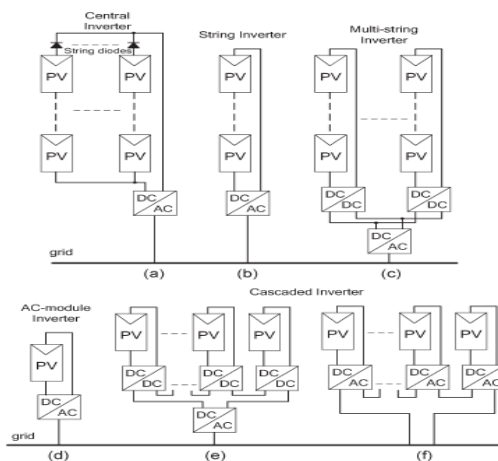
Rys. 2. Konfiguracja wielopoziomowa typu Back-to-back [13]



Rys. 3. Pięciopoziomowy przekształtnik w topologii kaskadowej do wielobiegunowej turbiny [13]

Inną istotną gałęzią sektora energii odnawialnej są elektrownie słoneczne. W systemach PV istotnym celem jest zapewnienie przekształcenia energii na wysokim poziomie sprawności z zachowaniem optymalności systemu, co wymaga od układów przekształtnikowych bardzo dobrych parametrów pracy. Przekształtniki kaskadowe są najbardziej optymalnym rozwiązaniem wielopoziomowym w systemach PV [15]. Przedstawiony na rysunku (Rys. 4 e) sposób łączenia pojedynczego modułu PV z jednym przekształtnikiem DC/DC. Następnie układy te łączy się szeregowo w tzw. string w celu uzyskania wyższego napięcia i łączy z centralnym falownikiem, który jest podłączony do sieci elektrycznej. Takie rozwiązanie łączy aspekty przetwornic podwyższających DC/DC i falowników AC, co oferuje możliwość indywidualnego śledzenia pracy każdego modułu za pomocą odpowiednich algorytmów np. MPPT (ang. Maximu Power Point Tracking). Inny sposób łączenia przekształtników kaskadowych przedstawiono na (Rys. 4f), gdzie każdy panel PV jest połączony z własnym falownikiem, które później są skonfigurowane w szereg, co pozwala na

osiągnięcie wysokiego poziomu napięcia [16]. Zaletą tego sposobu łączenia źródeł oraz zachowanie redundancji systemu. Ponadto falownik kaskadowy eliminuje konieczność użycia oddzielnej szyny DC oraz centralnego falownika, przez co zwiększa się ogólną wydajność. Moduł kaskadowy przekształtnika wielopoziomowego CHB wymaga użycia izolowanych źródeł napięcia. Oddzielne źródła napięcia zapewniają możliwość indywidualnego sterowania modułu PV oraz zmaksymalizowania uzyskiwanej energii z systemu fotowoltaicznego. Modułowość i niski koszt przekształtników wielopoziomowych sprawiają, że stają się one idealnym kandydatem dla przyszłych, solidnych i niezawodnych połączeń systemu fotowoltaicznego z siecią energetyczną [17].

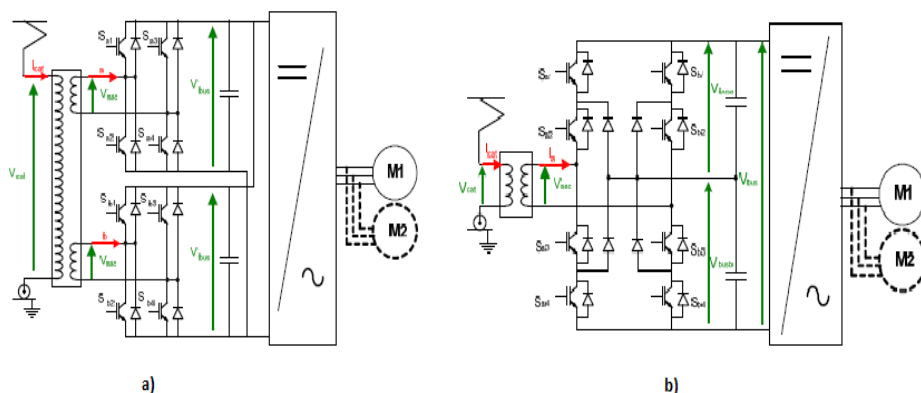


Rys. 4. Konfiguracje systemów PV z zastosowaniem przekształtników kaskadowych. a) falownik centralny, b) falownik szeregowy, c) falownik typu multistring, d) moduł PV z jednym falownikiem e) układ kaskadowy przekształtników DC/DC f) układ kaskadowy modułów PV z falownikami [16]

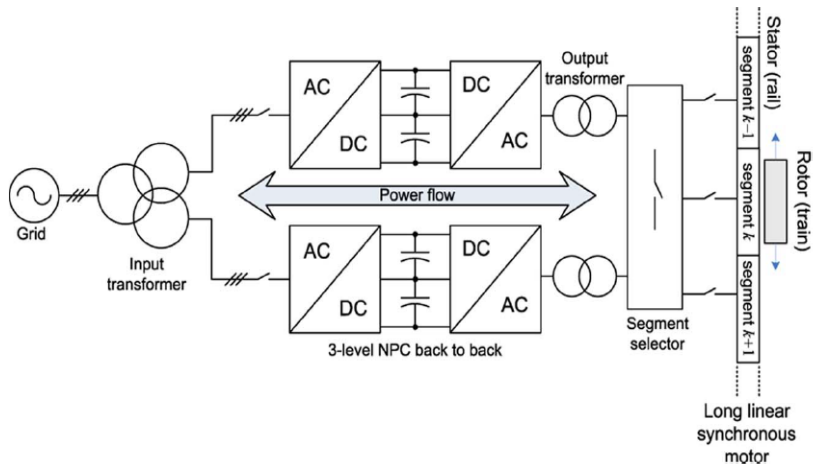
4. Elektryczne napędy trakcyjne

Napędy trakcyjne są kolejnymi układami w których sprawdzają się przekształtniki wielopoziomowe. Większość europejskich tras kolejowych wyposażona jest w system zasilania trakcji napięciem przemiennym 25 kV 50 Hz lub 15 kV (16 i 2/3 Hz). W Polsce natomiast występuje system zasilania napięciem stałym o wartości znamionowej 3 kV. Napędy trakcyjne zazwyczaj pracują przy napięciach rzędu od 0,75 kV do 3kV oraz z mocą od kilkudziesięciu kW do kilku MW w zależności od konfiguracji.

Praca napędu trakcyjnego odbywa się w szerokim zakresie prędkości obrotowych silnika oraz z zachowaniem odpowiedniej dynamiki, wymaga to pracy przy podwyższonych częstotliwościach (do 400 Hz), co niestety wiąże się z zwiększonym wpływem przekształtników na zniekształcenia sieci oraz zwiększ strat mocy wynikające z wyższych częstotliwości przełączania. W klasycznych rozwiązaniach z przekształtnikami dwupoziomowymi stosuje się odpowiednie układy filtrujące (dławiki i kondensatory), minusem czego jest znaczące zwiększenie kosztów takiego urządzenia, wymiarów, wagi oraz skomplikowanie układu chłodzenia. Rozwiązania w postaci falowników trójpoziomowych 3–NPC oraz kaskadowych CHB przedstawione na (Rys. 5 a i b) są najczęściej stosowane. Pozwalają ograniczyć koszty, uzyskując zadowalające parametry [18, 21]. Jedno z podanych rozwiązań (Rys. 6) zastosowano do zasilania silników synchronicznych liniowych w zespołach trakcyjnych kolei wysokich prędkości typu MAGLEV.

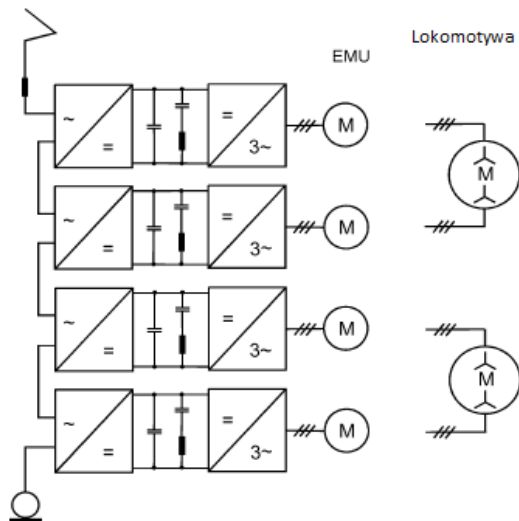


Rys. 5. Topologie falowników w napędach trakcyjnych, a) przekształtnik kaskadowy CHB, b) przekształtnik NPC [19]



Rys. 6. Schemat układu zasilania napędu w zespołach trakcyjnych typu MAGLEV[1]

Innym rozwiązaniem stosowanym w aplikacjach trakcyjnych jest zaproponowane w [20], beztransformatorowe połączenie sieci trakcyjnej z układami napędowymi lokomotywy (Rys. 7). Pozwala to zrezygnować z mało sprawnego oraz ciężkiego transformatora na rzecz przekształtników wielopoziomowych wykonanych w technologii IGBT.

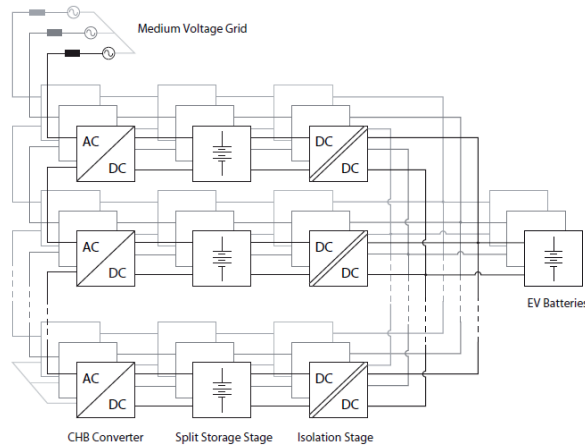


Rys. 7. Beztransfornatorowe system zasilania silników trakcyjnych lokomotywy [20]

5. Elektromobilność

Dynamicznie rozwijający się w ostatnich latach sektor elektromobilności, wymusił na producentach opracowanie szeregu innowacyjnych rozwiązań z zakresu energoelektroniki. Stale rosnąca liczba samochodów elektrycznych zwiększa zapotrzebowanie na nowoczesne układy ładowania baterii pojazdów. Od domowych ładowarek AC o mocy rzędu kilkunastu kW do super ładowarek DC o mocach do 200 kW pozwalających naładować samochód w kilkanaście minut. Szczególnym wyzwaniem dla inżynierów są właśnie stacje tzw. szybkiego ładowania (ang. fast charging station). Przed układami przekształtnikowymi stoją następujące wyzwania m.in. możliwość precyzyjnej regulacji napięcia i prądu ładowania, izolacja galwaniczna oraz uzyskanie niskiej pulsacji prądu ładowania. W spełnianiu tych wymagań pomaga zastosowanie przekształtników kaskadowych CHB [21–28]. Dają one możliwość znacznego zredukowania zniekształceń prądów fazowych bez konieczności stosowania kosztownych i zajmujących przestrzeń filtrów sieciowych. Kolejną zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zastosowania mniejszego i tańszego transformatora, co w znaczący sposób wpłynie na ekonomiczny aspekt inwestycji. Istnieje wiele sposobów wykorzystania przekształtników wielopoziomowych. Jednym z nich jest szeregowe łączenie w moduły przekształtników CHB, pozwala to odpowiednio rozbudowywać systemy ładowarek pod konkretne napięcia baterii.

Ważną zaletą takiego układu jest możliwość szeregowego łączenia kaskad, proporcjonalnie do liczby cel baterii. Pozwala znacząco zredukować zniekształcenia i uzyskać na wyjściu niemal idealny przebieg sinusoidalny. Uzyskanie takich parametrów wpływa na poprawę parametrów pracy silnika elektrycznego oraz jego dłuższą żywotność (prądy wirowe, łożyskowe). Na rysunku (Rys. 8) przedstawiono schemat takiego połączenia.



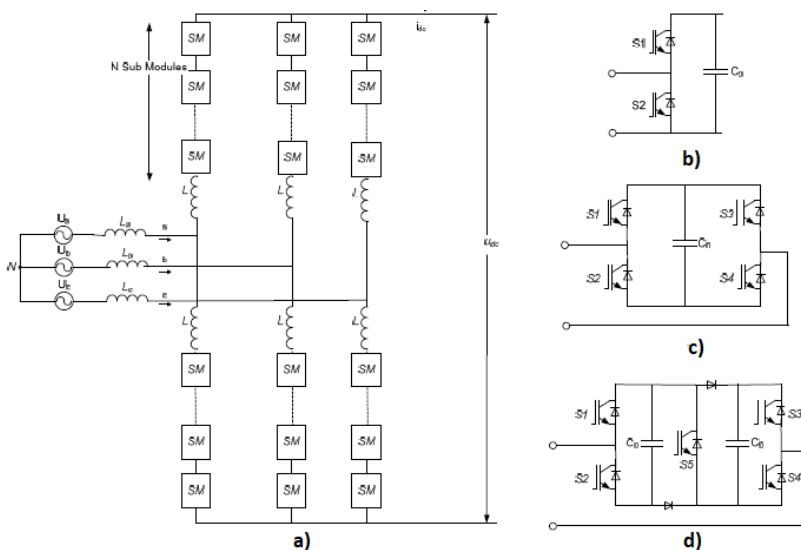
Rys. 8. Kaskadowy układ ładowania baterii pojazdu elektrycznego [25]

6. Linie przesyłowe HVDC, FACTS, STATCOM i inne

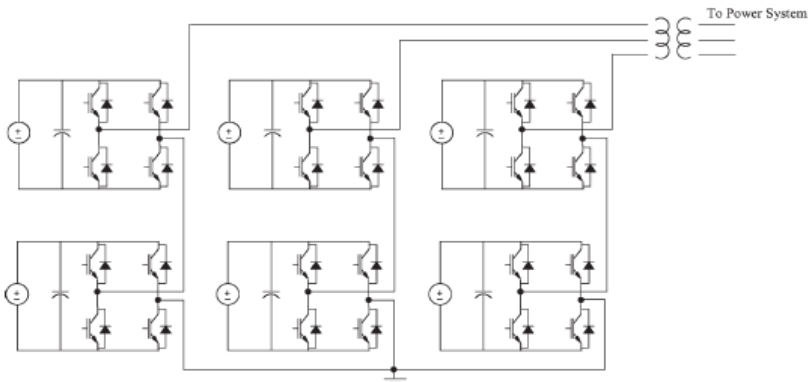
Przekształtniki wielopoziomowe znalazły również szerokie zastosowanie w dziedzinie energetyki w szczególności w liniach przesyłowych wysokiego napięcia prądu stałego HVDC (ang. high voltage direct current). Oparte o technologię tranzystorów IGBT, wielopoziomowe przemienniki napięcia VSC (ang. voltage source converter) stosowane w liniach HVDC, osiągają sprawność ok 99%. Mniejsze starty mocy w porównaniu do klasycznych dwupoziomowych rozwiązań są istotnym aspektem w układach transmisji energii. Pozwala to na zastosowanie znacznie mniejszego układu chłodzenia, co przy tak kosztownych inwestycjach ma zasadnicze znaczenie. Kolejnym plusem ich zastosowania jest również wysoka niezawodność, możliwość sprawnego serwisowania jak i rozwiązanie problemów wynikających z konieczności stosowania drogich filtrów oraz ciężkich transformatorów[29–34]. Przedstawione w [29] modułowe przekształtniki wielopoziomowe zyskują coraz większą popularność ze względu na ich zalety i topologię, która jest w pełni skalowalna. Tak jak w przypadku wcześniej omawianych przekształtników w pojazdach elektrycznych, można łączyć kaskady w moduły zależnie od zadanej ilości poziomów napięcia wyjściowego. Zaproponowane konfiguracje, moduły pół mostkowe (HBSM),

modułu pełnego mostka (FBSM) oraz wyrównawczego podwójnego modułu (CDSM) zostały przedstawione na (Rys. 9)

Następnym interesującym miejscem zastosowania przekształtników wielopoziomowych w sektorze energetyki są elastyczne systemy przesyłowe prądu przemiennego FACTS (ang. flexiable AC transmission line). Korzyści jakie niosą za sobą regulatory FACTS to m.in. precyzyjna kontrola mocy czynnej i biernej, poprawa współczynnika mocy, redukcja zniekształceń harmonicznych oraz oscylacji, redukcja kosztów, wagi oraz rozmiarów. Jedną z najbardziej znanych konfiguracji jest statyczny synchroniczny kompensator STATCOM. Do zalet tego rozwiązania można również zaliczyć: poprawę parametrów pracy sieci w stanach ustalonych oraz dynamicznych, płynną regulację współczynnika mocy oraz redukcję strat mocy. W literaturze zaproponowano kilka różnych konfiguracji przekształtników wielopoziomowych dla kompensatora. Najczęściej spotykaną topologią przekształtników wielopoziomowych w układach STATCOM jest konfiguracja kaskadowa [33, 34].



Rys. 9. a) modułowy przekształtnik MLC, b) moduł pół-mostka, c) moduł pełnego mostka, d) moduł podwójny z diodą z elementami poziomującymi[30]



Rys. 10. Pięciopoziomowy przekształtnik kaskadowy w technologii STATCOM [34]

7. Podsumowanie

W tym artykule przedstawiono aktualne rozwiązania układów przekształtników wielopoziomowych w aplikacjach przemysłowych. W międzyczasie trwają również prace nad udoskonalaniem i opracowywaniem jeszcze bardziej wydajnych układów przekształtnikowych do komercyjnego zastosowania. Przemysł energoelektroniki stale ewoluje, a wysokie wymagania oraz ciągły wzrost mocy aplikacji przemysłowych. Zalety jakie niesie ze sobą zastosowanie przekształtników wielopoziomowych MLC z jednoczesną możliwością optymalizacji kosztów urządzenia, wskazuje na to, że układy przekształtników wielopoziomowych będą cieszyć się coraz większą popularnością.

Literatura

- [1] Rodri'guez J., Franquelo L. G., Kouro S., Leo'n J. I., Portillo R. C., Prats M., Pe'rez M. A. *Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications*, Proceedings of the IEEE 97, Spain, 2009
- [2] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., BinWu, Rodriguez J., Pérez M. A., Leon J. I. *Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 57(8), 2010.
- [3] Pefitsis D., Tolstoy G., Antonopoulos A., Rabkowski J., Jang-Kwon L., Bakowski M., Lennart A., Hans-Peter N. *High-Power Modular Multilevel Converters With SiC JFETs*, IEEE Transactions On Power Electronics 27(1), 2012.

- [4] Abu–Rub H., Holtz J., Rodriguez J., Baoming G. *Medium–Voltage Multilevel Converters—State of the Art, Challenges, and Requirements in Industrial Applications*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 57(8), 2010.
- [5] Franquelo L. G., Rodríguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M. M. *The Age of Multilevel Converters Arrives*, , IEEE Industrial Electronics Magazine On Power Electronics 2(12), 2008.
- [6] Rodríguez J., Jih–Sheng L., Fang Zheng P. *Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 49(4), 2002.
- [7] Perez M. A., Bernet S., Rodriguez J., Kouro S., Lizana R. *Circuit Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters*, IEEE Transactions On Power Electronics 30(1), 2015.
- [8] Celanovic N., Boroyevich D. *A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three–phase Converters*, IEEE Transactions On Industry Applications 37(2), 2001.
- [9] Sirisha B., Satish Kumar P. *A Simplified Space Vector PWM for Cascaded H–Bridge Inverter including Over Modulation Operation*, IEEE Annual India Conference (INDICON), 2016.
- [10] Venkatraman T., Periasamy S. *Multilevel Inverter Topology with Modified Pulse Width Modulation and Reduced Switch Count*, 2008.
- [11] Leon J. I., Vazquez S., Kouro S., Franquelo L. G., Carrasco J. M., Rodriguez J. *Unidimensional Modulation Technique for Cascaded Multilevel Converters*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 56(8), 2009.
- [12] Kumar Gupta K., Bhatnagar P. *Multilevel Inverters 1st Edition Conventional and Emerging Topologies and Their Control*, Elsevier, 2007.
- [13] Carrasco J. M., Franquelo L. G., Bialasiewicz J.T., Galvan E., Portillo R., Prats M. M., León J. I., Moreno N. *Power Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: a Survey*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 53(4), 2006.
- [14] Chong H. Ng, Parker M., Ran L. Tavner P. J., Bumby J. R., Spooner E. *A Multilevel Modular Converter for a Large, Light Weight Wind Turbine Generato*, IEEE Transactions On Power Electronics 23(3), 2008.
- [15] Morya A. K., Shukla A. *Space Vector Modulated Cascaded H–Bridge Multilevel Converter for Grid Integration Of Large Scale Photovoltaic Power Plants*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 53(4), 2006.
- [16] Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L. M., Ozpineci B. *Modular Cascaded H–Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid–Connected Applications*, IEEE Transactions On Industry Applications 51(2), 2015.
- [17] Sagar M., Ranjana B., SreeramulaReddy N., Kusala Pavan Kumar R. *Non–Isolated Dual Output Hybrid DC–DC Multilevel Converter for Photovoltaic Applications*, 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 2014.
- [18] Tolbert L. M., Peng F. Z., *Multilevel Converters for Large Electric Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications 35, 1999.
- [19] Lopez–de–Heredia A., Gaztañaga H., Viscarret U., Etxeberria–Otañui I., Aldasoro L., Nieva T., *Comparison of H–NPC and parallel–H topologies for AC Traction Front–End Converters*, 13th European Conference on Power Electronics and Applications 2009.
- [20] Dieckerhoff S., Bernet S., Krug D., *Power Loss–Oriented Evaluation of High Voltage IGBTs and Multilevel Converters in Transformerless Traction Applications*, IEEE Transactions On Power Electronics 20(6), 2005.

- [21] Foyazur Rahman M., Niknejad P., Barzegaran M. R. *Comparing the Performance of Si IGBT and SiC MOSFET Switches in Modular Multilevel Converters for Medium Voltage PMSM Speed Control*, IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2018.
- [22] Rodríguez J., Bernet S., BinWu, Pontt J. O., Kouro S. *Multilevel Voltage–Source–Converter Topologies for Industrial Medium–Voltage Drives*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 54(6), 2007.
- [23] Tolbert L. M., Zheng Peng F., Cunyngham T., Chiasson J. N. *Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Transactions On Industrial Electronics 49(5), 2002.
- [24] Aggeler D., Canales F., Zelaya –De La Parra H., Coccia A., Butcher N., Apeldoorn O. *Ultra–Fast DC–Charge Infrastructures for EV–Mobility and Future Smart Grids*, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010.
- [25] Vasiliadis M., Rufer A., B’eguín A. *Modular Converter Architecture for Medium Voltage Ultra Fast EV Charging Stations: Global System Considerations*, IEEE International Electric Vehicle Conference 2012.
- [26] Ciccarella F., DeI Pizzo A., Iannuzzi D., *An Ultra–Fast Charging Architecture Based on Modular Multilevel Converters Integrated With Energy Storage Buffers*, Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013.
- [27] Zheng Z., Wang K., Xu L., Li Y. *A Hybrid Cascaded Multilevel Converter for Battery Energy Management Applied in Electric Vehicles*, IEEE Transactions On Power Electronics 29(7), 2014.
- [28] Quraan M., Tricoli P., D’Arco S., Piegari L. *Efficiency Assessment of Modular Multilevel Converters for Battery Electric Vehicles*, IEEE Transactions On Power Electronics 32(3), 2017.
- [29] Allebrod S., Hamerski R., Marquardt R., *New Transformerless, Scalable Modular Multilevel Converters for HVDC–Transmission*, IEEE Power Electronics Specialists Conference 2008.
- [30] Ahmed N., Haider A., Van Hertem D., Zhang L., Hans–Peter N. *Prospects and Challenges of Future HVDC SuperGrids with Modular Multilevel Converters*, Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.
- [31] Ahmed N. , Norrga S. , Nee H., Haider A., Hertem D. V. , Zhang L. , Harnfors L. *HVDC SuperGrids with Modular Multilevel Converters – the Power Transmission Backbone of the Future*, International Multi–Conference on Systems, Signals and Devices 2012.
- [32] Sirisukprasert S., Qin Huang A., Lai J. *Senior Member. IEEE, Modeling, Analysis and Control of Cascaded–Multilevel Converter–Based STATCOM*, IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003.
- [33] Kah Hawa L., Dahidaha M., Mariun N. *Cascaded Multilevel Inverter based STATCOM with Power Factor Correction Feature*, IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology 2011.
- [34] Cheng Y., Qian C., Crow M., Pekarek S., *A Comparison of Diode–Clamped and Cascaded Multilevel Converters for a STATCOM with Energy Storage*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 53, 2010.

*Piotr Hołyszko

Ocena metod zapewnienia ciągłości pracy urządzeń pomocniczych trolejbusu

Streszczenie: Podczas przejazdu trolejbusu zasilanego z sieci trakcyjnej, występują chwilowe zaniki zasilania. Zaniki te wpływają niekorzystnie na pomocnicze podzespoły pojazdu. Do ograniczenia tych negatywnych efektów stosowanych jest kilka rozwiązań. Ich ocena ze względu na ciągłość zasilania, skuteczność i niezawodność jest celem artykułu. Uzyskane wyniki pozwalają wybrać najlepsze metody zasilania urządzeń pomocniczych, w zależności od rodzaju oraz liczby urządzeń zainstalowanych w trolejbusie.

Słowa kluczowe: zasilanie trolejbusu, przerwy w zasilaniu, urządzenia pomocnicze, ciągłość zasilania

Evaluation of methods for ensuring the continuity of work of trolleybus auxiliary

Abstract: While a trolleybus supplied by traction lines pass crossroads, temporary power outages occur. These outages adversely affect on auxiliary vehicle devices. Several solutions are applied to reduce these negative effects. Their assessment due to power supply continuity, efficiency and reliability is the aim of the paper. The obtained results allow to choose the best methods of powering auxiliary devices, depending on the type and number of devices installed in the trolleybus.

Keywords: trolleybus power supply, power interruptions, auxiliary devices, continuity of power supply

1. Wstęp

Zagadnienia związane z elektromobilnością miejską oraz poprawą dostępności ludności do elektrycznego transportu zbiorowego są obecnie bardzo promowane przez Unię Europejską [1]. Zbiegło się to w czasie z rozwojem urządzeń zapewniających komfort pasażerski, większymi potrzebami pasażerów oraz kierowców w tym zakresie oraz intensywnym rozwojem technologii baterii trakcyjnych, superkondensatorów, generatorów spalinowych i innych źródeł energii.

*pholyszko@mpk.lublin.pl, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Podczas przejazdu trolejbusu, przy zasilaniu sieciowym, wszystkie jego podzespoły zasilane są przez sieć trakcyjną. Ze względu na konieczność sekcjonowania sieci trakcyjnej, a także zamontowane na niej zwrotnice, skrzyżowania i zjazdy, trolejbus traci chwilowo zasilanie. Powoduje to wyłączenia układów zasilających obwody pomocnicze, a następnie w krótkim czasie ponowne ich załączenie. Jest to zjawisko bardzo niepożądane ze względu na generowanie procesów załączania powodujących duże przeciążenia elektryczne i mechaniczne, które wpływają negatywnie na żywotność podzespołów pojazdu. Ponadto występują prądy udarowe, wynikające z ponownego ładowania kondensatorów na szynach DC przetwornicy statycznej trolejbusu, które również wpływają negatywnie na żywotność komponentów pojazdu.

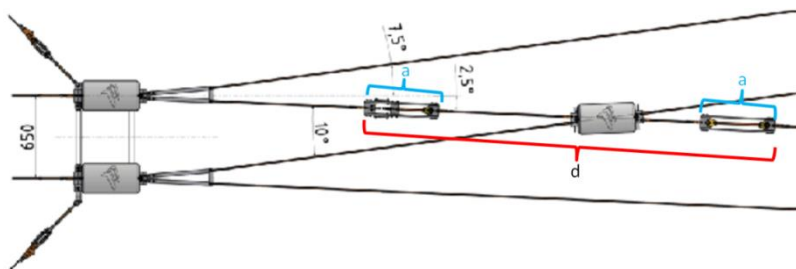
Istnieje kilka możliwości zapewnienia ciągłości zasilania urządzeń pomocniczych zainstalowanych w trolejbusach. Jedną z nich jest hamowanie rekuperacyjne silnikiem trakcyjnym. Niestety takie rozwiązanie przy małych prędkościach skutkuje dyskomfortem odczuwalnym przez pasażerów. Innym sposobem jest zastosowanie zasobników superkondensatorowych wraz z przekształtnikami w obwodzie pośredniczącym przetwornicy statycznej, odpowiedzialnej za zasilanie obwodów pomocniczych trolejbusu [2]. Kolejną opcją jest stosowanie dodatkowych pomp hydraulicznych montowanych na wale silnika trakcyjnego, które wspomagają pracę systemów hydraulicznych.

Istnieje zatem problem badawczy oceny konkurencyjności rozwiązań zapewniających ciągłość zasilania. Problem ten w niniejszym artykule analizowany jest na podstawie krytycznego przeglądu istniejących metod zasilania urządzeń pomocniczych trolejbusu w trakcie przejazdu przez niezasilone odcinki sieci trakcyjnej. Celem badawczym jest natomiast analiza skuteczności i niezawodności prezentowanych w pracy rozwiązań.

Praca podzielona jest na 5 merytorycznych rozdziałów, w których kolejno scharakteryzowano zjawisko, określono wymagania funkcjonalno prawne oraz analizowano dostępne rozwiązania. Końcowym efektem artykułu jest sformułowanie oceny pozwalającej sklasyfikować porównywane rozwiązania.

2. Zasilanie trolejbusu z sieci trakcyjnej

Przejazd trolejbusu przy zasilaniu z sieci trakcyjnej charakteryzuje się tym, że wszystkie jego podzespoły zasila sieć trakcyjna. Ze względu na konieczność jej sekcjonowania, a także zamontowane na sieci trakcyjnej zwrotnice, skrzyżowania i zjazdy, trolejbus traci zasilanie na czas przekraczający nawet 3 s [3]. Ponadto napięcie zasilania trolejbusu może wahać się w granicach od 400 do 800 V.

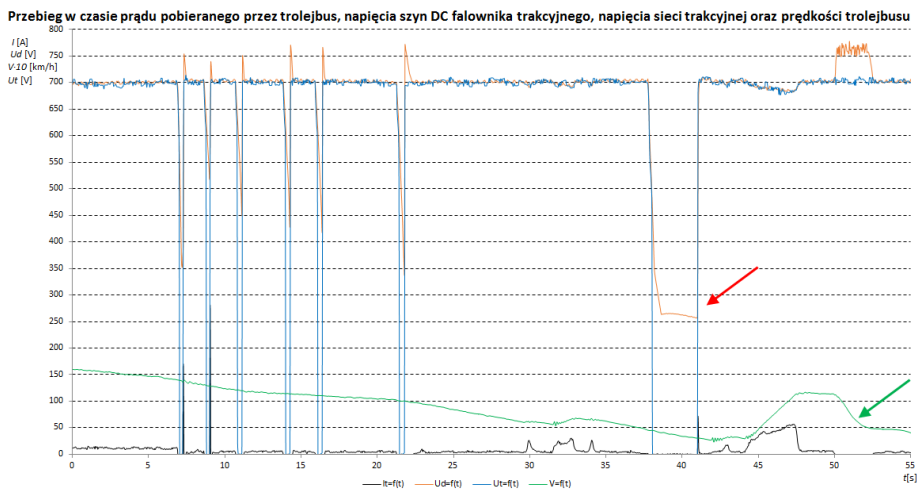


Rys. 1. Rzut zwrotnicy trolejbusowej sieci trakcyjnej ilustrujący obszar sieci bez zasilania, gdzie: d – obszar beznapięciowy, a – obszary obejmujące izolatory

Na rysunku 1 przedstawiono rzut zwrotnicy zainstalowanej na sieci trakcyjnej. Im mniejsze są kąty przedstawione na rysunku, tym dłużej trwa przerwa w zasilaniu. Długość odcinka d pozbawionego zasilania może sięgać 4 m. Czas przejazdu trolejbusu bez zasilania zależy od prędkości przejazdu zgodnie z tabelą 1 i może wynosić około 3 s, jak zaznaczono czerwoną strzałką na rysunku 2.

Tab. 1. Czas przejazdu przez izolator o długości 4 [m] w zależności od prędkości trolejbusu

Prędkość trolejbusu V [km/h]	Czas przejazdu przez izolator sieci trakcyjnej o długości 4 [m] t [s]
5	2,88
10	1,44
15	0,96
20	0,72

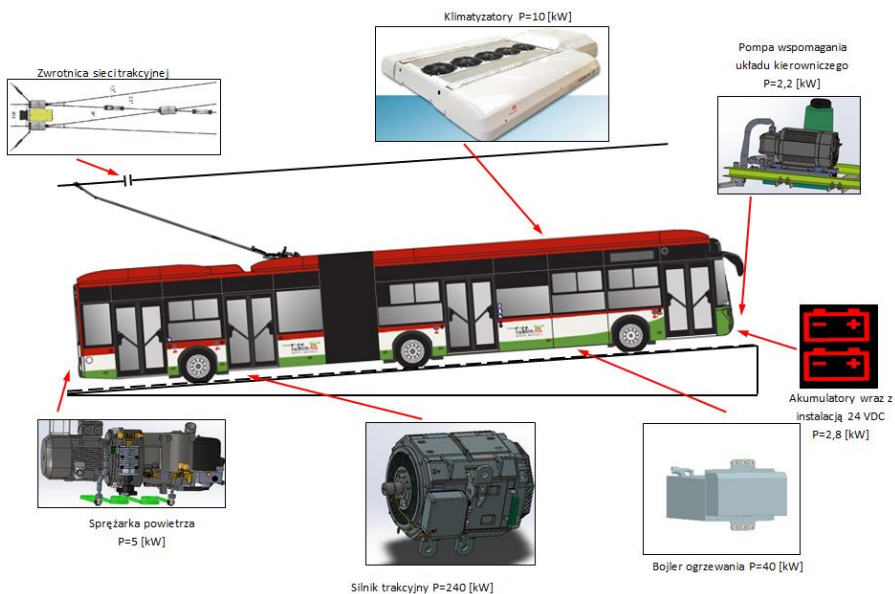


Rys. 2. Przebieg w czasie prądu trakcji I [A] (linia czarna), napięci sieci trakcyjnej U_t [V] (linia niebieska), prędkości trolejbusu (skala $\times 0,1$) V [km/h] (linia zielona), napięcia na szynach DC falownika trakcyjnego U_d [V], podczas przejazdu przez serię izolatorów sekcyjnych

Przedstawia on przejazd trolejbusu przez serię izolatorów sieci trakcyjnej. Ze względu na mnogość urządzeń zainstalowanych na sieci trakcyjnej na zajezdni, zaniki napięcia zasilania pojawiają się bardzo często. Omawiany rysunek pokazuje również sposób działania falownika trakcyjnego podczas przejazdu przez izolowane sektory sieci trakcyjnej. W 38 s układ trakcyjny przechodzi do rekuperacji utrzymując napięcie na szynach DC falownika na poziomie 250 V. Wyłączane są wszystkie urządzenia pomocnicze aby rekuperacja silnikiem trakcyjnym nie była odczuwalna dla pasażerów i kierowcy, jednocześnie aby możliwe było podjęcie hamowania rekuperacyjnego w czasie przejazdu przez izolator.

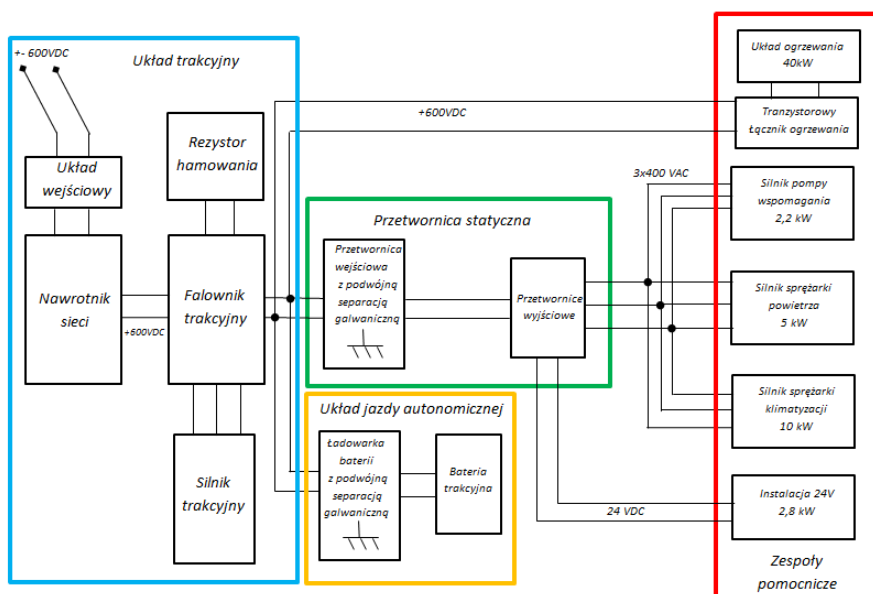
3. Wymagania funkcjonalne oraz formalno-prawne dotyczące urządzeń pomocniczych w trolejbusach

Oprócz trakcyjnego układu napędowego, każdy trolejbus jest wyposażony w urządzenia pomocnicze [4]. Są to elementy wyposażenia, które zapewniają funkcjonalność wszystkich układów zainstalowanych w trolejbusie oraz spełniają funkcję urządzeń komfortu pasażerskiego. Przedstawia je rysunku 3.



Rys. 3. Elementy wyposażenia trolejbusu, w skład układów pomocniczych wchodzi: klimatyzatory, akumulatory 24 [V] wraz z instalacją sterującą, pompa wspomagania układu kierowniczego, bojler ogrzewania, sprężarka powietrza

Wszystkie układy pomocnicze zasilane są przez przetwornicę statyczną oraz inne urządzenia energoelektroniczne, które zapewniają szereg funkcjonalności oraz spełniają wymagania w zakresie ochrony przeciwporażeniowej. Urządzenia pomocnicze w trolejbusie mogą być zasilane bezpośrednio z sieci trakcyjnej lub z szyn DC falownika napędu trakcyjnego [5]. Przy zasilaniu z sieci trakcyjnej urządzenia pomocnicze, niezależnie od tego w jakim trybie pracy jest napęd, podczas przejazdu trolejbusu przez izolator sieci, zawsze tracą zasilanie. Zasilając urządzenia z szyn DC falownika trakcyjnego, zwiększa się efektywność trolejbusu[6]. Wynika to z faktu, iż podczas hamowania rekuperacyjnego, gdy napięcie sieci trakcyjnej wzrośnie do wartości 780 V, układ falownika przełączy odzysk energii z sieci trakcyjnej do rezystora hamowania. W tej sytuacji energia wytwarzana przez silnik trakcyjny będzie również zasilać urządzenia pomocnicze [7], jak zaznaczono zieloną strzałką na rysunku 2. Schemat takiego układu przedstawia rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy zasilania urządzeń zamontowanych w trolejbusie zawierający układ trakcyjny, przetwornicę statyczną, układ jazdy autonomicznej oraz zespoły pomocnicze

Ze względu na funkcjonalność poszczególnych elementów, schemat blokowy podzielono na cztery części. Jako układ trakcyjny wyróżniono elementy związane bezpośrednio z napędem trakcyjnym. Zawiera on urządzenia wejściowe takie jak dławik sieciowy, bezpieczniki, styczniki główne, stycznik wstępnego ładowania kondensatorów falownika trakcyjnego oraz filtr sieciowy. W skład układu trakcyjnego wchodzi również falownik trakcyjny, rezystor hamowania wraz z czoperem oraz silnik trakcyjny. Z szyn DC falownika trakcyjnego zasilany jest układ jazdy autonomicznej, wyróżniony jako część układu, która odpowiedzialna jest za dostarczenie energii podczas przejazdów trolejbusu przy odłączonych od sieci trakcyjnej odbierakach prądu. Szyny DC falownika trakcyjnego zasilają również układ ogrzewania oraz przetwornicę statyczną, która jest układem zasilającym wszystkie, poza układem ogrzewania, zespoły pomocnicze.

4. Wymagania funkcjonalne

Normy prawne mówią o konieczności zapewnienia działania układu wspomaganie układu kierowniczego. Podczas przejazdu przez izolatory zamontowane na sieci trakcyjnej działanie układu wspomaganie układu kierowniczego musi być zapewnione zawsze przy prędkości powyżej 5 km/h przez 10 s. Dużym problemem jest zapewnienie ciągłości działania instalacji 24 V nawet przy krótkotrwałych zanikach zasilania. Przetwornica, która ładuje

akumulatory pokładowe 24 V, traci zasilanie na czas przejazdu trolejbusu przez izolator sieci trakcyjnej. W tym czasie całość instalacji 24 V zasilana jest energią zgromadzoną w akumulatorach pokładowych. Powoduje to konieczność utrzymania akumulatorów 24 V w bardzo dobrej kondycji. Wymagania norm dotyczące funkcjonowania urządzeń pomocniczych przy przejazdach przez izolatory sekcyjne sieci trakcyjnej zamieszczono w tabeli 2. Jako funkcjonalność wymagana zaznaczono, działanie urządzeń, które jest konieczne dla spełnienia obowiązujących norm. Funkcjonalność dodatkowa obejmuje działanie układów, podczas przejazdów przez izolatory sieci trakcyjnej, które nie jest wymuszone przez akty prawne, lecz ze względu na uwarunkowania konstrukcyjne urządzeń, brak przerw w zasilaniu wydłuża ich żywotność oraz zwiększa komfort pasażerów i kierowcy. Gdy nie zachodzi potrzeba zasilenia urządzeń podczas przejazdu przez izolatory funkcjonalność określono jako niewymagana. Zgodnie z normą PN-EN 13452-1 podczas hamowania serwisowego wartość opóźnienia musi być mniejsza od $2[m/s^2]$, natomiast wartość narastania opóźnienia nie może przekraczać $1,5 m/s^3$. Zgodnie z normą PN-EN 50163:2006 napięcie zasilania trolejbusu musi mieścić się w granicach 400–800 V, natomiast znamionowe napięcie trakcji U wynosi 600 V.

Tab. 2. Moce urządzeń pomocniczych zamontowanych w trolejbusie oraz wymagania podtrzymania zasilania podczas przejazdów przez izolatory sieci trakcyjnej.

Urządzenia pomocnicze	Moc [kW]	Funkcjonalność wymagana normami / funkcjonalność dodatkowa	Moc [kW]
Wspomaganie układu kierowniczego	2,2	Wymagana	2,2
Zasilanie instalacji 24 V	2,8	Dodatkowa	17,8
Układ sprężonego powietrza	5	Dodatkowa	
Zasilanie sprężarki układu klimatyzacji	10	Dodatkowa	
Suma:			20
Zasilanie układu ogrzewania	40	Niewymagana	40

5. Wymagania dla zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej

Napięcie zasilania instalacji sterującej prądu stałego nie powinno przekraczać 60 V, natomiast wartość przewodowa napięcia znamionowego instalacji pomocniczej trójfazowej nie może być większa od 400 V. Przetwornica ładująca akumulatory 24 V powinna zapewniać dwustopniową separację galwaniczną od obwodów sieciowych. Pierwszy stopień izolacji musi posiadać wytrzymałość

izolacji $2,5 U + 1500 \text{ V}$, czyli dla napięcia znamionowego sieci trakcyjnej 600 VDC wynosi ona 3000 V przez czas 1 min. Drugi stopień izolacji musi wytrzymać test napięciem przemiennym 2300 V przez czas 1 min.

Wytrzymałość napięciowa instalacji trójfazowej trolejbusu względem obwodów sieciowych musi wytrzymać test określony pierwszym stopniem izolacji, natomiast względem masy trolejbusu musi spełniać test określony drugim stopniem izolacji. Rezystancja izolacji każdego ze stopni izolacji nie może być mniejsza odpowiednio od 1,5 M Ω , 6 M Ω przed pierwszym wprowadzeniem do eksploatacji. Ze względu na standardy wytrzymałości izolacji dla silników o małej mocy wynoszących 1800 V w czasie 1 min, drugi stopień izolacji nie może być zapewniony przez izolację uzwojeń silników pomocniczych. Dlatego jednym ze stosowanych rozwiązań zapewnienia drugiego stopnia izolacji jest umieszczenie silników na izolatorach. W takim przypadku należy zapewnić odizolowanie silnika od urządzenia jakie on napędza lub odizolowanie od masy pojazdu zespołu silników wraz z ich urządzeniami. Praktycznie takie rozwiązania nie sprawdzają się ze względu na problemy eksploatacyjne z utrzymaniem wartości rezystancji na poziomie 1,5 M Ω . Dlatego stosuje się dodatkową przetwornicę separującą z izolacją dwustopniową tzw. obwód pośredniczący przetwornicy statycznej, który zapewnia podwójną separację już dla przetwornic wyjściowych zasilających układy pomocnicze oraz dla ładowarki baterii pokładowych 24 V.

Układ jazdy autonomicznej może być załączony po odłączeniu trolejbusu przez styczniki główne od odbieraków prądu. Instalacja obejmująca autonomiczne źródło energii może mieć jednostopniową izolację o parametrach jak drugi stopień izolacji pod warunkiem, że jest ona w trakcie jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej odseparowana przez ładowarkę zapewniającą pierwszy stopień izolacji. Ze względu na problemy z utrzymaniem parametrów izolacji baterii trakcyjnej, a także na bardzo skomplikowaną procedurę badania jej wytrzymałości izolacji, stosuje się ładowarki, które zapewniają podwójną separację galwaniczną baterii od obwodów sieciowych. Wówczas wykonywany jest test rezystancji izolacji baterii w stosunku do masy trolejbusu, a wartość tej rezystancji musi wynosić min. 100 Ω/V .

6. Sposoby poprawy warunków pracy urządzeń pomocniczych oraz ich ocena

Podczas przejazdu przez izolatory sieci trakcyjnej następuje zanik ładowania akumulatorów pokładowych o napięciu 24 V. Aby zapewnić funkcjonowanie układów niezbędnych dla bezpieczeństwa pasażerów i kierowcy, jak chociażby układ hamulcowy czy oświetlenie pojazdu, wszystkie układy zasilane z akumulatorów 24 V, a chwilowo zbędne, muszą zostać wyłączone. Fakt występowania przerw w ładowaniu akumulatorów 24 V jest szczególnie uciążliwy podczas porannych wyjazdów z zajezdni na linię komunikacyjną.

Często pojazdy znajdujące się na zajezdni, muszą komunikować się z SIP (System Informacji Pasażerskiej) oraz CNR (Centrum Nadzoru Ruchu) celem pobierania oraz przekazywania danych niezbędnych dla funkcjonowania tych systemów. Są one zasilane z akumulatorów 24 V pojazdu, które niedoładowane przez czas przestoju trolejbusu na zajezdni, nie są w stanie zapewnić pracy podzespołów trolejbusu, szczególnie przy częstych zanikach ładowania jak przy wyjeździe z zajezdni. Aby temu zapobiec, przy wystąpieniu rozładowania akumulatorów, trolejbus po podłączeniu do sieci trakcyjnej, musi oczekiwać na zajezdni w celu doładowania akumulatorów lub muszą one zostać wymienione na naładowane.

Przerwy w zasilaniu silnika sprężarki powietrza w trolejbusie nie stanowią problemu podczas najechania trolejbusu na izolator sieci trakcyjnej. Zapas powietrza dla wszystkich układów zasilanych sprężonym powietrzem jest zgromadzony w zbiornikach powietrza. Natomiast częste przerwy w zasilaniu silnika sprężarki zmniejszają żywotność zarówno silnika jak i sprężarki zwłaszcza, jeżeli przerwa w pracy układu nie jest wymuszona przez presostat lecz przez przerwę w zasilaniu przy wysokim ciśnieniu na wyjściu układu sprężonego powietrza ze sprężarki.

Istnieje kilka metod zapewnienia zasilania dla układu wspomaganie układu kierowniczego. Jedną z nich jest zastosowanie dodatkowej pompy hydraulicznej na wale silnika trakcyjnego, która przy prędkości trolejbusu powyżej 5 km/h zapewnia wystarczające ciśnienie oleju dla układu wspomaganie układu kierowniczego. Rozwiązanie to komplikuje i podraża w znacznym stopniu układ hydrauliczny trolejbusu. Inną metodą jest zastosowanie silnika napędzającego pompę wspomaganie zasilanego z napięcia pokładowego 24 V. Niestety przy wystąpieniu zaników ładowania akumulatorów 24 V, podczas przejazdów przez izolatory sieci trakcyjnej, przy niedoładowanych akumulatorach wyłącza to trolejbus z eksploatacji. Stosowane są również rozwiązania, w których podczas zaników zasilania układu wspomaganie przetwornica trójfazowa wyjściowa zasilana jest przez dodatkową przetwornicę 24 VDC/650 VDC z akumulatorów pokładowych. Powoduje to również awarie trolejbusu przy niedoładowanych akumulatorach instalacji pokładowej oraz znacznie komplikuje i podraża układ przetwornicy statycznej.

Standardowo układy ogrzewania i klimatyzacji są również wyłączane na czas przejazdu trolejbusu przez izolatory. O ile dla układu ogrzewania, ze względu na dużą bezwładność cieplną nagrzewnic nie stanowi to problemu, o tyle producenci systemów klimatyzacji starają się chronić sprężarki układów klimatyzacji przed częstymi i ciężkimi rozruchami. Stosowane są w tym celu dodatkowe akumulatory w klimatyzatorze, jeżeli silniki sprężarki są zasilane z 24 V, lub bypassy w układzie czynnika gazu chłodniczego, co w również w znacznym stopniu komplikuje układy klimatyzacji i ich sterowanie.

Zespoły pomocnicze	Metoda zapewnienia ciągłości działania	Efekty	Wady
Instalacja 24 V	Wymiana akumulatorów	Zapewniona ciągłość zasilania 24 V	Czas jaki jest potrzebny na doładowanie akumulatorów lub ich wymianę, koszt wymiany
	Postój celem doładowania		
Pompa wspomaganie układu kierowniczego	Zasilanie silnika pompy wspomagania z 24 V	Zapewniona ciągłość działania układu wspomagania	Duży pobór prądu z instalacji 24V, możliwość wyłączenia trolejbusu z eksploatacji po przejeździe przez izolator, rozbudowana przetwornica statyczna
	Zasilanie przetwornicy wyjściowej 3 x 400 V przez przetwornicę 24VDC/650 VDC		
Sprężarka powietrza	Zastosowanie dodatkowej pompy na wale silnika trakcyjnego	Zapewniona ciągłość działania układu wspomagania przy prędkości powyżej 5 km/h	Brak wspomagania przy prędkości poniżej 5 km/h, rozbudowany układ hydrauliczny
	Odpowiednia do potrzeb ilość zbiorników	Zapewniona ciągłość zasilania układów pneumatycznych	Brak ciągłości zasilania silnika sprężarki powietrza, prądy uderowe
Klimatyzatory	Zasilanie z instalacji 24V	Zapewniona ciągłość zasilania układów klimatyzacji	Duży pobór prądu z instalacji 24 V, możliwość wyłączenia trolejbusu z eksploatacji po przejeździe przez izolator, rozbudowana przetwornica statyczna
	Dodatkowe akumulatory 24 V		
	Bypass w układzie czynnika gazu chłodniczego	Lżejszy rozruch silnika klimatyzacji	Komplikacje w układzie klimatyzacji i sterowania, Brak ciągłości zasilania silnika sprężarki powietrza, prądy uderowe

Superkondensatory

Autonomiczne źródła energii

Rekuperacja silnikiem trakcyjnym

Rys. 5. Ocena metod zapewnienia ciągłości działania urządzeń pomocniczych w trolejbusie podczas przejazdów przez izolowane odcinki sieci trakcyjnej

Podczas przejazdu przez wyizolowane odcinki sieci trakcyjnej ładowarki baterii trakcyjnych są wyłączane. Są to układy, w zależności od zamontowanej baterii trakcyjnej, o mocach dochodzących do 60 kW. O ile kierowca widząc zbliżający się izolator zdejmuje nogę z pedału przyspieszenia, o tyle prąd pobierany przez ładowarkę baterii trakcyjnych i inne urządzenia pomocnicze pobierany jest nadal. Wiąże się to ze zmniejszeniem żywotności osprzętu sieci trakcyjnej.

Wykorzystanie autonomicznych źródeł energii zamontowanych w trolejbusach, do podtrzymania pracy urządzeń pomocniczych stanowi ogromny problem. Wymagane jest zapewnienie separacji galwanicznej baterii superkondensatorów lub baterii trakcyjnych od sieci trakcyjnej podczas zasilania sieciowego [8]. Ponadto załączenie układu jazdy autonomicznej możliwe jest dopiero po wyłączeniu styczników głównych, które odłączają obwód główny trolejbusu od odbieraków prądu. Ze względu na pojemności zainstalowane na szynie DC falownika trakcyjnego, z którego najczęściej zasilane są urządzenia pomocnicze trolejbusu, przełączenie zasilania urządzeń pomocniczych na zasilanie z układu jazdy autonomicznej musiało by odbywać się w czasie rzędu kilku milisekund w zależności od pojemności szyn DC falownika trakcyjnego. Niestety nie umożliwiają tego sekwencje załączenia styczników głównych i styczników układu jazdy autonomicznej.

Wykorzystując rekuperację silnikiem trakcyjnym, do zasilania urządzeń pomocniczych [9], podczas przejazdów przez izolowane odcinki sieci trakcyjnej, dużym problemem jest potrzeba zwiększenia pojemności szyn DC falownika trakcyjnego oraz zapewnienie warunków komfortu pasażerskiego tak, aby hamowanie nie było odczuwane przez pasażerów.

Jak przedstawiono na rys. 5 istnieje wiele metod poprawy parametrów zasilania oraz warunków pracy poszczególnych urządzeń pomocniczych zainstalowanych w trolejbusie. Z przeprowadzonej analizy wynika, że poprawa warunków pracy jednego z układów może wpływać negatywnie na pracę innych urządzeń a wybór odpowiedniej metody zwiększenia pewności zasilania urządzeń pomocniczych zależy od ich komplekacji w danym trolejbusie. Dlatego konieczne jest poszukiwanie rozwiązań systemowych dotyczących poprawy jakości zasilania wszystkich urządzeń pomocniczych [10].

Ciekawymi alternatywami są możliwości wykorzystania autonomicznych źródeł energii [11], w postaci superkondensatorów [12] oraz baterii trakcyjnych [13]. Jednak ze względu na uwarunkowania prawne jest to utrudnione i wymaga nakładów finansowych oraz w znacznym stopniu komplikuje układy energoelektroniczne.

Poruszający się trolejbus posiada energię kinetyczną, która może być wykorzystana poprzez rekuperację silnikiem trakcyjnym do zasilania urządzeń pomocniczych. Jednak ze uwagi na konieczność zapewnienia warunków komfortu dla pasażerów wymaga to opracowania skomplikowanych algorytmów sterowania dla układu napędowego trolejbusu.

7. Wnioski

Zapewnienie zasilania wszystkich urządzeń pomocniczych zainstalowanych w trolejbusie podczas przejazdów przez izolowane odcinki sieci trakcyjnej znacząco komplikuje układy energoelektroniczne oraz podraża ich koszt. Z tego

powodu, producenci tych urządzeń zapewniają najczęściej tylko zasilanie urządzeń wymaganych normami prawnymi tj. układu wspomagania układu kierowniczego oraz instalacji 24 V trolejbusu. W związku z tym koniecznym wydaje się prowadzenie badań w zakresie:

- możliwości wykorzystania energii rekuperacji silnikiem trakcyjnym w czasie przejazdów przez niezasilone odcinki sieci trakcyjnej do zasilenia urządzeń pomocniczych trolejbusu,
- zmian w topologii układów napędowych tj. falownika trakcyjnego, przetwornicy statycznej oraz ładowarki baterii trakcyjnej, tak aby możliwe było wykorzystanie w tym celu akumulatorów trakcyjnych,
- wykorzystania baterii superkondensatorów i układów energoelektronicznych, zarówno w obwodzie głównym trolejbusu jak również w obwodzie pośredniczącym przetwornicy statycznej.

Literatura

- [1] Połom M., Piasecki A., Bartłomiejczyk M. *Charakterystyka autonomiczności trolejbusów – nowe doświadczenia w elektromobilności miejskiej*, Logistyka 4/2015, Poznań, Sieć Badawcza ŁUKASIEWICZ, Instytut Logistyki i Magazynowania, 2015.
- [2] Gizinski Z., Gasiewski M., Mascibrodzki I., Zych M., Zymmer K., Zulaunik M. *Hybrid – type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous moto*, 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznań, IEEE, 2008.
- [3] Bartłomiejczyk M., Holyszko P., Filipek P., *Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport*, Journal of Ecological Engineering 5(17), PTIE, 2016.
- [4] Ringdorfer M., Horn M., *Development of a wheel slip actuator controller for electric vehicles using energy recuperation and hydraulic brake control*, Paper presented at the IEEE International Conference on Control Applications (CCA), Denver, USA, 2011.
- [5] Dziubinski M., Siemionek E., Adamiec M., Drozd A., Kołodziej S., *Energy Consumption of the Trolleybuses*, 2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (Elmeco & Aos) (2017), IEEE, 2017.
- [6] Siemionek E., Dziubinski M., *Testing Energy Consumption in the Trolleybus and the Bus on a Chosen Public Transport Line in Lublin*, Advances in Science and Technology–Research Journal 26(9), PTIE, 2015.
- [7] Hamacek, Š., Bartłomiejczyk, M., Hrbáč, R., Mišák, S., Stýskala, V. 2014. *Energy recovery effectiveness in trolleybus transport*, Electric Power Systems Research 112, Elsevier BV, 2014.

- [8] Thounthonga P., Rael S., Davat B., *Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications*, Journal of Power Sources 193, Elsevier BV, 2009.
- [9] Tazerart F., Mokrani Z., Rekioua D., Rekioua T. *Direct torque control implementation with losses minimization of induction motor for electric vehicle applications with high operating life of the battery*, International Journal of Hydrogen Energy 39(40), Elsevier BV, 2015.
- [10] Radulescu V., Strainescu I., Moroiianu L. C., Serbu V., Tudor E., Gheorghe S., Goia C., et al. *Driving Equipments Made by Icp Saerp for Urban Electric Transport Vehicles*, Urban Transport XIV: Urban Transport and the Environment in the 21st Century, Wit Transactions on the Built Environment 101, WITPress, 2008.
- [11] Jiang, Y., Liu J., Tian W., Shahidehpour M., Krishnamurthy M., *Energy harvesting for the electrification of railway stations: getting a charge from the regenerative braking of trains*, IEEE Electrification Magazine 3(2), IEEE, 2014.
- [12] Jarzyna W., Zielinski D., Holyszko P., *Battery-Supported Trolleybus Traction Network—a Component of the Municipal Smart Grid*, Environmental Engineering V, Leiden, CRC Press/Balkema, 2017.
- [13] Holyszko P., Filipek P. Z., *Estimation of the Running Costs of Autonomous Energy Sources in Trolleybuses*, Journal of Ecological Engineering 5(17), PTIE, 2016.

*Bartłomiej Mroczek

Sterowanie mocą przetwornic DC/DC pracujących w trybie kontroli prądu szczytowego

***Streszczenie:** W przypadku łączenia przetwornic statycznych DC/DC równolegle z warunkiem utrzymywania stałej dowolnej wartości mocy na wyjściu układu, zachodzi potrzeba niezależnego sterowania ich pracą. Stabilna regulacja każdej z przetwornic pozwala na pełne bilansowanie mocy źródeł w obrębie wspólnej szyny DC. W artykule zaproponowano sposób sterowania mocą przetwornicy DC/DC typu Buck–Boost poprzez zamknięte trzy pętle. Potwierdzono matematycznie stabilność zaproponowanego sterownia. Przeprowadzono badania symulacyjne statyczne i dynamiczne z wykorzystaniem środowiska Matlab/SIMULINK.*

Słowa kluczowe: Sterowanie prądem szczytowym tranzystora i napięciem na wyjściu przetwornicy DC/DC, podział mocy

Peak Current Mode Control Technique for DC/DC converters controlled by the power level

***Abstract:** When connecting static converters DC/DC in parallel with the condition of keeping constant the values of any output power of the system, it is necessary to independently control of their operation. Stable control of each of the inverters, allows full balancing power sources within the common DC bus. The paper proposes a method of power control of DC/DC Buck–Boost by three closed loops. Mathematically confirmed the stability of the proposed control. Studies were performed static and dynamic simulation using Matlab / SIMULINK.*

Keywords: Peak Current Mode Control (PCMC), Voltage Mode Control (VMC), Power Sharing

1. Wstęp

Aktualnie promowany jest trend przez gospodarki światowe polegający na przesunięciu w bilansie systemu wytwarzanej energii z jednostek konwencjonalnych zlokalizowanych centralnie na rzecz lokalnej generacji energii, co upowszechnia i wzmacnia zastosowanie odnawialnych źródeł energii pracujących w formie prosumenckiej. W związku z tym, zastosowanie w gospodarstwach domowych technologii paneli fotowoltaicznych (PV) staje się coraz bardziej popularne, a ich ilość wciąż rośnie. Mając na uwadze również, potrzeby bilansowania energii lokalnie w miejscu jej wytworzenia, dodatkowo instalacje te doposaża się w zasobniki energii niskiego napięcia pracujące jako „Storage-to-Home” (S2H) [1]. W tym samym czasie ma miejsce powolne

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

odejście technologiczne od wykorzystania paliw kopalnianych w transporcie. Zastosowanie samochodu elektrycznego (EV) pozwala odbiorcy końcowemu na magazynowanie energii elektrycznej z własnych źródeł wytwórczych i/lub wpływ na lokalne przesuwanie szczytu obciążenia [2]. Mechanizm ten można odwrócić w zakresie transferu energii i EV może posłużyć do zasilania instalacji gospodarstw domowych pracujących w trybie „*Vehicle-to-Home*” (V2H) [3].

Mając to na uwadze, z punktu widzenia odbiorcy końcowego istnieje techniczna możliwość częściowego pokrywania zapotrzebowania dobowego przez własne instalacje wytwórcze oraz zgromadzoną energię elektryczną. Jednakże ograniczenia w postaci niedoboru energii elektrycznej wytworzonej lokalnie w dalszym ciągu łączy odbiorców końcowych z siecią elektroenergetyczną, gdzie bilansowany jest profil prosumencko – odbiorczy. Zaobserwowany postęp zmian nowych i istniejących technologii w obszarze gospodarstwa domowego uwalnia potrzebę zarządzania źródłami PV, zasobnikami energii, EV. Zarządzanie sprowadza się do konieczności sterowania bilansem mocy w obrębie wspólnej szyny prądu stałego pomiędzy dostępnymi źródłami energii w obszarze gospodarstwa domowego.

W elektroenergetyce stosowane są cztery podstawowe topologie układów przekształtnikowych DC/DC i ich modyfikacje:

- Obniżające napięcie
- Jest to jednokierunkowy sposób konwersji napięcia stałego z wartości wyższej do niższej równej nawet zero. Brak jest izolacji galwanicznej pomiędzy wejściem a wyjściem. Podstawowa budowa tego typu układów to tranzystor sterowany przez układ regulacji napięcia na wyjściu połączony szeregowo, diodę, dławik i kondensator. Poprzez sterowanie załącz/wyłącz pracą tranzystora, średnia wartość napięcia na wyjściu jest proporcjonalna do wartości napięcia na wejściu i czasu załączenia. Wykorzystuje się dwa typy regulacji. Pierwsza to modulacja szerokości impulsu, gdzie steruje się czasem przewodzenia zaś częstotliwość przewodzenia jest stała. Druga to modulacja częstotliwości impulsu, gdzie odwrotnie do metody poprzedniej steruje się częstotliwością przewodzenia a czas przewodzenia jest stały.
- Jak wyżej jest to jednokierunkowy sposób konwersji napięcia stałego tym razem z wartości niższej do wyższej. Podstawowa budowa tego typu układów to tranzystor sterowany przez układ regulacji napięcia na wyjściu połączony równolegle, diodę, dławik i kondensator. Indukcyjność pełni rolę magazynu energii. Sposób sterowania identyczny jak dla przetwornic obniżających.
- Ten rodzaj topologii łączy cechy dwóch poprzednich układów. Poprzez możliwość regulacji napięcia powyżej i poniżej wartości wejściowej napięcia umożliwia transfer energii w obu kierunkach. Podstawowa budowa tego typu układów to dwa tranzystory (połączony szeregowo i równolegle) sterowane przez układ regulacji napięcia na wyjściu, kondensatory wejście i wyjście, dławik [4].

- Podwyższające napięcie
- Podwyższające i obniżające napięcie
- Zaporowe
- Podstawową różnicą w stosunku do przedstawionych powyżej układów konwersji napięcia jest zachowana galwaniczna izolacja pomiędzy wejściem a wyjściem układu. Realizowana jest poprzez zastosowanie dodatkowego uzwojenia – dławika. W praktyce jest to transformator albo niskiej, albo wysokiej częstotliwości. Działanie układu polega na gromadzeniu w transformatorze energii w szczelinie powietrznej poprzez zasilanie go napięciem DC ze strony pierwotnej i zaś po stronie wtórnej tranzystor znajduje się w pozycji zamkniętej. Zgromadzona energia jest uwalniania poprzez zmianę stanu pracy tranzystora na załącz. Sterowanie odbywa się poprzez modulację szerokości impulsu lub częstotliwości [5].

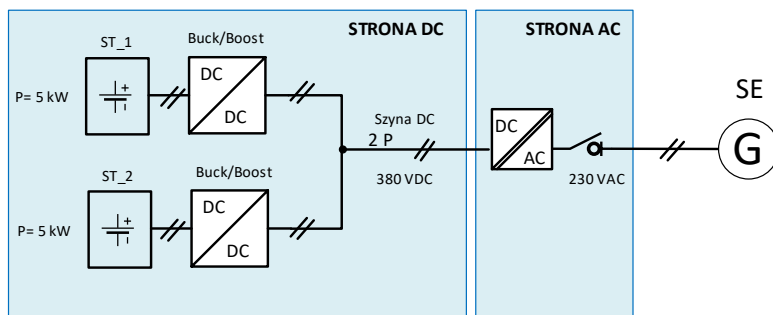
Motyacją do prowadzenia badań była potrzeba weryfikacji możliwości zastosowania prostych topologii układów przekształtnikowych podwyższająco-obniżających napięcie do zasilania jednofazowych układów odbiorczych AC przez źródła DC w obrębie gospodarstwa domowego z możliwością stabilnej regulacji.

Problem badawczy jaki pojawia się w kontekście regulacji mocy na szynie DC to utrzymanie jej wartości zadanej stabilnie. Celem badawczym jest weryfikacja układu sterowania przetwornicą statyczną DC/DC typu Buck–Boost w układzie sterowania mocą. Ponadto, poszukiwanie zakresów dopuszczalnej mocy możliwej do transferu z szyny DC w sposób stabilny dla stanów dynamicznych pracy układu.

Artykuł zawiera sześć rozdziałów. Pierwszy z nich opisuje celowość i zasadność poszukiwania możliwości sterowania mocą przetwornic statycznych DC/DC w kontekście powszechnego zastosowania rozwiązania oraz definiuje problem badawczy. Kolejny rozdział prezentuje przykładową ogólną topologię dla pracy równoległej dwóch przetwornic statycznych DC/DC oraz szczegółową topologię przetwornicy typu Buck-Boost. Rozdział trzeci przedstawia mechanizm zaproponowanego układu sterowania mocą za pomocą trzech zamkniętych pętli. Kolejny rozdział został poświęcony dla modelu matematycznego, gdzie każda z trzech pętli została opisana w postaci transmitancji operatorowej. Wyznaczono charakterystyki amplitudowo-fazowe dla pracy przetwornicy statycznej wraz z zaproponowanym mechanizmem sterowania i potwierdzono stabilność pracy układu. Rozdział piąty przedstawia wyniki pracy badawczej w zakresie wpływu parametrów bloku mocy na stabilność układu pracy oraz przebiegi napięcia i mocy na wyjściu układu uzyskane w środowisku Matlab/SIMULINK. Ostatni rozdział to ocena uzyskanych wyników wraz z wnioskami.

2. Topologia układu

Zaproponowano topologię układu dla całej koncepcji, której celem jest poszukiwanie możliwości bilansowania mocy na szynie DC. Została ona zbudowana w oparciu o technologię S2G i V2H i została zaprezentowana na Rys. 1.



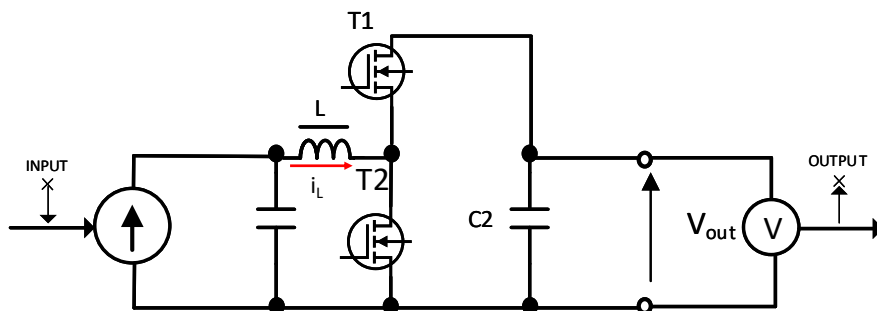
Rys.1. Propozycja ogólnej topologii połączenia technologii V2G i S2H oraz sterowania mocą pomiędzy źródłami DC

Ogólna topologia układu połączeń po stronie DC sprowadza się do dwóch niezależnie pracujących źródeł energii DC na wspólną szynę [6] poprzez dwie przetwornice statyczne typu Buck–Boost (ST_1 i ST_2) [7]. Właściwe sterowanie przetwornicami powinno umożliwiać utrzymanie zadanej wartości napięcia na szynie DC oraz wymaganej mocy. Utrzymanie tych wartości umożliwi transfer energii w kierunku AC tj. do sieci elektroenergetycznej lub wydzielonego obwodu niskiego napięcia akuprosumenta. Strona AC to przetwornica izolowana AC/DC, która połączona jest od strony DC z szyną DC zaś od strony AC z siecią elektroenergetyczną (SE).

Silnymi stronami przedstawionej topologii układu pracy są wysoka sprawność całości układu przy warunku zastosowania przetwornicy DC/DC wysokiej częstotliwości pracy $20 - 50 \text{ kHz}$ ($f_{sDC/DC}$) dla strony DC, zaś dla przetwornicy DC/AC $100 - 200 \text{ kHz}$ ($f_{sDC/AC}$). Ponadto, układ umożliwia transfer energii w obu kierunkach tj. ze strony DC w kierunku AC i odwrotnie. Należy zwrócić uwagę na wysoką gęstość mocy i brak efektów akustycznych pracy układu ze względu na brak zastosowania transformatora niskiej częstotliwości pracy. Słabą stroną zaproponowanej topologii jest niższa sprawność w stosunku do topologii bez przetwornic statycznych (ST_1 i ST_2) w wyniku zastosowania podwójnej konwersji mocy po stronie DC [8]. Nie mniej jednak wymuszałyby to zastosowanie innego typu regulacji mocą obu źródeł energii DC niż zaproponowany w dalszej części artykułu.

Celem naukowym jest poznanie istoty działania przetwornicy statycznej DC/DC typu Buck-Boost pracującej w układzie regulacji mocy na wyjściu układu oraz weryfikacja zakresów funkcjonowania rozwiązania.

W oparciu o ogólną topologię zaprezentowaną na Rys. 1 dokonano wyboru szczegółowej topologii dla przetwornicy statycznej typu Buck-Boost obniżająco-podwyższającej. Wybrano rozwiązanie niez izolowanego pół-mostka H ze względu na ograniczoną ilość komponentów układu, co w przyszłości może przekładać się na niższe koszty rozwiązania. Jednakże, układ dwóch tranzystorów musi obsługiwać znamionowo dwa razy większe prądy dopuszczalne niż w układzie pełnego mostka tj. Full H-Bridge. Znaczący postęp technologiczny aktualnie umożliwia spełnienie tego warunku, gdzie prąd I_D tranzystora może wynosić 300 A.



Rys. 2. Topologia przetwornicy statycznej DC/DC typu Buck-Boost

Istotą pracy wskazanej wyżej topologii jest możliwość szybkiej zmiany prądu dzięki reluktancji obwodu magnetycznego cewki L w bloku mocy. Kondensatory C_1 i C_2 spełniają rolę „wygładzania” na wyjściu sygnału w zależności od pełnionej roli układu. Praca poszczególnych tranzystorów $T1$ i $T2$ determinuje rodzaj pracy topologii tj. albo podwyższa, albo obniża napięcie. Sterowanie pracą kluczy tranzystorów realizowane jest poprzez blok sterujący układem. I tak gdy, klucze sterujące regulują stan włączenia/wyłączenia tranzystora $T2$ podczas gdy $T1$ pracuje jako dioda w obwodzie, przetwornica statyczna pracuje w trybie podwyższającym – Boost, zaś gdy zamienimy sterowanie pomiędzy tranzystory układ będzie pracował jako przetwornica obniżająca – Buck [9]. Daje to możliwość dwukierunkowego przepływu energii. Należy zaznaczyć, iż wskazana topologia posiada ograniczenia w zakresie konwersji wartości napięcia z niższego na wyższe i odwrotnie przy spełnieniu warunku stabilności układu pracy [10]. Dodatkowym celem pracy badawczej jest weryfikacja możliwości konwersji napięcia z poziomu 61,5 V (maksymalne napięcie na wyjściu zasobnika energii np. firmy BMZ model ESS X).

Dobór optymalnych wartości dla indukcyjność cewki L , pojemności wejściowej C_1 i wyjściowej C_2 , oraz ich rezystancji wewnętrznej ESR dla przetwornicy statycznej DC/DC został wykonany w oparciu o następujące wzory [11]:

$$L = \frac{V_{wejciowe}(V_{wyjciowe} - V_{wejciowe})}{\Delta I_L \cdot f_s \cdot V_{wyjciowe}} \quad (1)$$

$$\Delta I_L = 0,2 - 0,4 \cdot I_{wyjciowe} \cdot \frac{V_{wyjciowe}}{V_{wejciowe}} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{V_{wejciowe} \cdot n}{V_{wyjciowe}} \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{I_{wyjciowe} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{wyjciowe}} \quad (4)$$

$$C_1 = (0,5 - 1) \cdot C_2 \quad (5)$$

Tabela 1. Parametry techniczne przetwornicy statycznej DC/DC

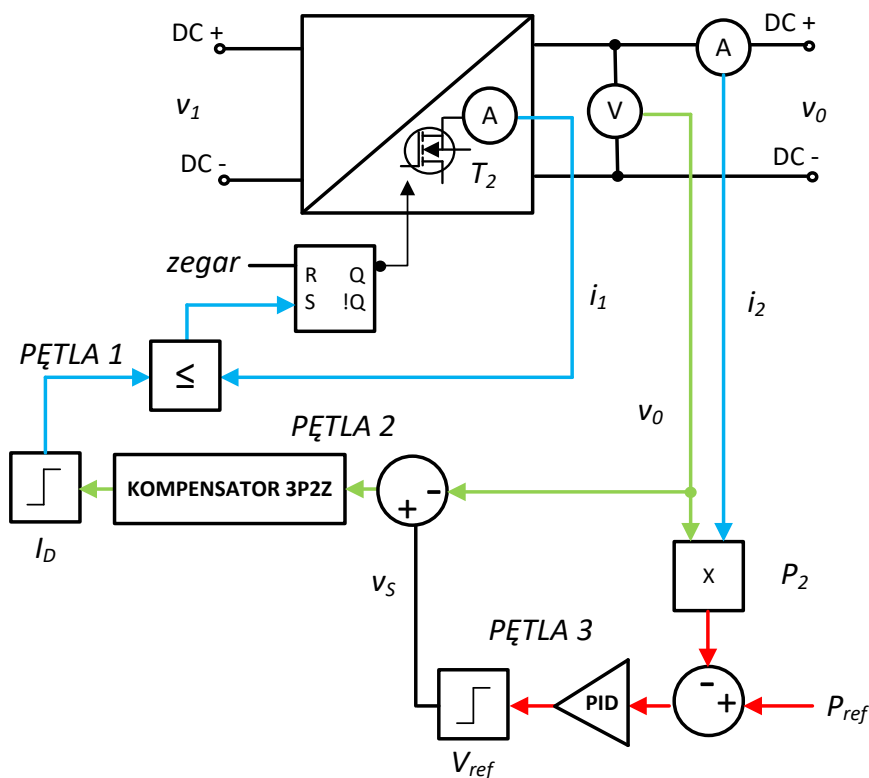
Parametry techniczne przetwornicy ST_1 i ST_2	Wartość
$V_{wejciowe}$ (Vwe)	do 61,5V
$V_{wyjciowe}$ (Vwy)	do 380 V
C_1 i C_2	750 μ F
ESR, dla C_1 i C_2 (r_c) i L (r_L)	0,03 Ω
L	150 μ H
$f_{sDC/DC}$	50 kHz

3. Układ sterowania przetwornicą DC/DC

Oprócz bloku mocy opisanego w poprzednim rozdziale istotne z punktu widzenia możliwości zarządzania mocą na szynie DC połączonych niezależnych źródeł DC jest układ sterownia. W tym celu zaproponowano sterowanie w układzie trzech pętli zwrotnych:

- Pętla pierwsza: sterowanie prądem szczytowym tranzystora – *Peak Current Mode Control* (PCMC) [12],
- Pętla druga: sterowanie wartością napięcia na wyjściu układu – *Voltage Mode Control* (VMC) [13],
- Pętla trzecia: sterowanie wartością mocy zadanej na wyjściu układu – *Power Mode Control* (PMC).

Wartością dodaną zaprezentowanego na Rys.3 układu sterowania jest utworzenie trzeciej pętli PMC umożliwiającej regulację mocy.



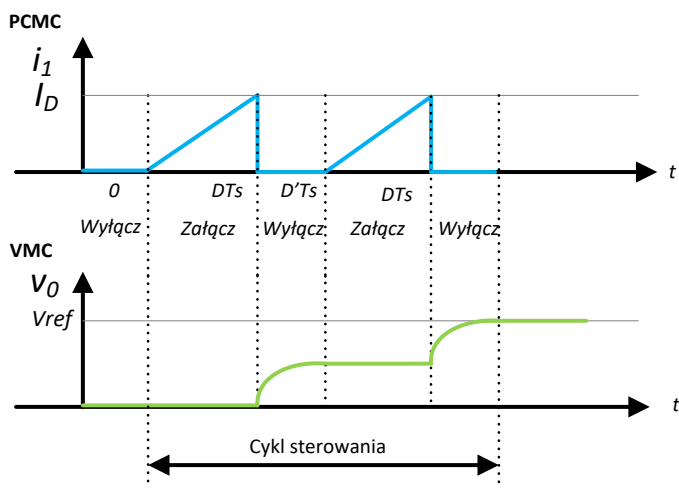
Rys. 3. Układ sterowania przetwornicą statyczną DC/DC typu Buck–Boost

- i_1 – wartość natężenia prądu na tranzystorze T2 [A],
- i_2 – wartość natężenia prądu na wyjściu układu [A],
- I_D – wartość max natężenia prądu dla danego typu tranzystora [A],
- v_0 – wartość chwilowa napięcia na wyjściu układu [V],
- v_s – wartość chwilowa napięcia błędnie dla pętli sterowania mocą [V],
- V_{ref} – wartość referencyjna napięcia na wyjściu układu [V],
- V_1 – wartość napięcia na wejściu układu [V],

Wybrana topologia układu przetwornicy DC/DC narzuca potrzebę sterowania sygnałem prądowym dla realizacji celu. Ze względu na wybrany układ pół mostka H dla przetwornicy statycznej, na uwagę należy mieć nadzór i kontrolę nad wartością szczytową prądu tranzystora. W tym celu wybrano metodę sterowania prądem szczytowym PCMC w pętli zamkniętej.

W zaproponowanym układzie sterowania przetwornicą DC/DC, natężenia prądu cewki indukcyjnej i_L (Rys. 2) jest zmienną programującą i jego chwilowa wartość jest porównywana z referencyjnym prądem odniesienia. W celu realizacji

tego zadania mierzy się chwilową wartość prądu tranzystora i_1 i porównuje z wartością chwilową prądu błędu uzyskaną z dwóch pozostałych pętli odpowiedzialnych za sterowanie napięciem i mocą na wyjściu przetwornicy statycznej DC/DC. Wartość referencyjną stanowi chwilowa wartość błędu, zaś poprzez wartość saturacji definiuje się wartość maksymalną natężenia prądu tranzystora. W momencie, kiedy wartość szczytowa prądu osiąga wartość maksymalną dla danego typu tranzystora – I_D , tranzystor zostaje chwilowo wyłączony. Na rysunku 4 zaprezentowano przebieg sygnału prądu tranzystora dla czasu t [14].



Rys. 4. Przebieg sygnału prądu tranzystora dla PCMC

Zgodnie z rysunku 4 można to opisać zależnością, gdy błąd natężenia prądu równy jest 0 A, wówczas tranzystor jest wyłączony dla czasu $D'Ts$. Wówczas, gdy błąd natężenia prądu jest większy od 0 A, tranzystor zostaje załączony i pracuje do momentu odcięcia pracy dla poziomu I_D w czasie DTs [15].

Wewnętrzną pętlą zaproponowanego sterowania jest pętla VMC odpowiedzialna za kontrolę wartości napięcia na wyjściu v_0 . Napięcie na sprzężeniu zwrotnym v_0 jest porównywane z wartością napięcia V_{ref} uzyskanego z pętli PMC, której maksymalna wartość jest ograniczona saturacją. Poprzez porównanie v_0 i V_{ref} obliczany jest uchyb natężenia prądu przekazywany do pętli pierwszej bezpośredniego sterowania [16]. W tak przedstawionej strukturze pętli VMC i PMC budują wartość referencyjną prądu dla zarządzania pracą pętli PCMC.

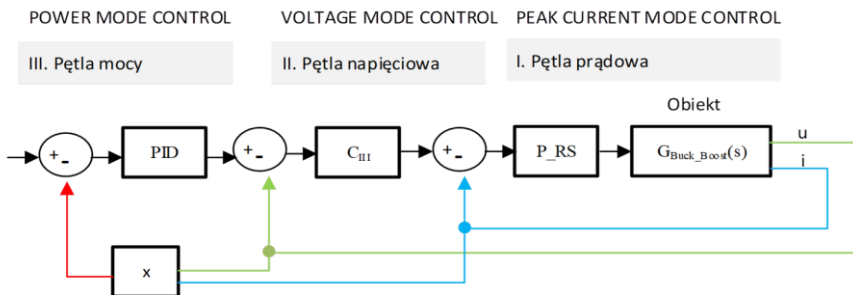
Aby zrealizować postawiony cel badawczy tj. możliwość zweryfikowana możliwości sterowania mocą przetwornicy statycznej DC/DC w układzie regulacji rysunek 3 utworzono trzecią pętlę PMC. Zadana wartość referencyjna

P_{ref} porównywana jest z wartością chwilową na wyjściu przekształtnika, zaś błąd stanowi wartość chwilową referencyjną napięcia dla pętli drugiej VMC.

4. Model matematyczny układu regulacji przetwornicą DC/DC

W przypadku zastosowania przetwornicy DC/DC z punktu widzenia realizacji celu urządzenia, niezmiernie ważne jest utrzymanie stałej i zadanej wartości mocy na wyjściu układu. Realizacja tego zadania jest utrudniona, ponieważ w trakcie procesu sterowania obiektem dochodzi do zakłóceń wartości mierzonych służących jako dane wejściowe do wyznaczenia wartości kluczy tranzystorów [9]. Ponadto, wzajemne oddziaływanie elementów RLC (tabela nr 1.) przyczynia się do niestabilności układu w momencie wytrącenia go ze stanu równowagi np. zmiana zadanej mocy na potrzeby bilansu na szynie DC. Zastosowanie dodatkowo regulatorów PID w dwóch pętlach sprzężenia zwrotnego oddziałujących na siebie tj. zwolnienie, przyspieszenie sygnału uchybu będzie prowadziło do niestabilności pracy obiektu. W tym przypadku model matematyczny musi pozwolić na ocenę i weryfikację stabilności układu nieasymptotycznie. Zatem, niezbędne staje się opracowanie dynamicznego modelu matematycznego odwzorowującego obiekt bloku mocy wraz z jego sterowaniem dla potwierdzenia możliwości regulacyjnych mocą przetwornicy DC/DC [17].

Na rysunku 5 został zaprezentowany układ sterowania przetwornicą DC/DC jako blokowy diagram reprezentujący trzy pętle sterowania opisane w poprzednim rozdziale oraz ich matematyczne zależności (sumy węzłowe sygnałów) [18,19]. Korzystając z zasady superpozycji pętle I, II, III wpływające na stabilność układu można złożyć jako jeden element sumy matematycznej. Ponadto, należy zauważyć, iż postać różniczkowa równania n -tego rzędu (trzy pętle sterowania oraz obiekt) przebiegu charakterystyki pracy układu można zapisać w postaci transmitancji operatorowej [20]. Wspólna transmitancja operatorowa $G_{układ\ DC/DC}$ a dokładnie jej charakterystyka częstotliwościowa potwierdzi czy sterowanie mocą na szynie DC przetwornicy statycznej w takiej topologii może być stabilne.



Rys. 5. Układ sterowania przetwornicą statyczną DC/DC typu Buck-Boost

W tym celu, każda z pętli została oddzielnie opisana matematycznie w postaci transmitancji operatorowej. Poniżej zestawienie wzorów w oparciu, o które powstała wspólna transmitancja operatorowa bloku mocy i bloku sterowania $G_{układ\ DC/DC}$.

I. Pętla PCMC składa się z dwóch elementów:

- Obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ [21]:

$$G_{Buck_Boost}(s) = G_0 \left(\frac{(1 + \frac{s}{\omega_{z_ESR}})(1 - \frac{s}{\omega_{z_RHP}})}{1 + \frac{s}{\omega_0 Q} + \frac{s^2}{\omega_0^2}} \right) \quad (6)$$

gdzie:

$$G_0 = \frac{V_{wejscowe}}{(1-D)^2} \quad (7)$$

$$\omega_{z_ESR} = \frac{1}{r_c C_1} \quad (8)$$

$$\omega_0 = \frac{(1-D)}{\sqrt{LC_1}} \quad (9)$$

$$\omega_{z_RHP} = \frac{(1-D)^2 (R - r_L)}{DL} \quad (10)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\frac{r_L}{L} + \frac{1}{C_1(R+r_c)}} \quad (11)$$

R – rezystancja odbioru [Ω]

s – zmienna zespolona w przekształceniu Laplace'a.

- Przerzutnika $P_{RS}(s)$ [22]:

$$P_{RS}(s) = \frac{Kdc}{(1,5 - 0,5)T_s s + 1} \quad (12)$$

Kdc – wzmacnienie sygnału V_{we}/V_{wy}

II. Pętla VMC

- Kompensator rzędu III $C_{III}(s)$ [23]

$$C_{III}(s) = \frac{\omega_{p0}}{s} \frac{(\frac{s}{\omega_{z1}} + 1)(\frac{s}{\omega_{z2}} + 1)}{(\frac{s}{\omega_{p1}} + 1)(\frac{s}{\omega_{p2}} + 1)} \quad (13)$$

$\omega_{p0}, \omega_{p1}, \omega_{p2} \neq 0$ – pola

$\omega_{z1}, \omega_{z2} \neq 0$ – zera

dla transmitancji operatorowej kompensatora III rzędu

III. Pętla trzecia PMC

- Regulator $PID(s)$

$$PID(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (14)$$

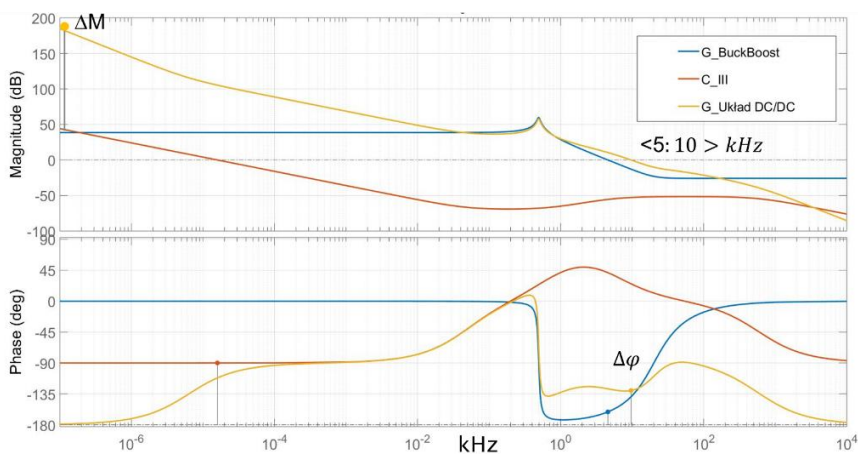
k_p – współczynnik wzmocnienia,

T_i – czas zdwojenia,

T_d – czas wyprzedzenia.

Na bazie wyżej wymienionych wzorów od 1 do 13 w środowisku Matlab wyznaczona została charakterystyka amplitudowo – fazowa dla:

- $G_{Buck_Boost}(s)$ – kolor niebieski,
 - $C_{III}(s)$ – kolor czerwony,
 - $G_{układ\ DC/DC}$ – kolor żółty
- i przedstawiona na Rys.6.



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-fazowa

Zapis transmitancji operatorowej dla obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ wskazuje na cechy elementu oscylacyjnego w przypadku wystąpienia odpowiedzi impulsowej i skokowej. Charakterystyka Bodego zaprezentowana na rysunku 6 – kolor niebieski potwierdza, że w zakresie częstotliwości 0,5–11 kHz obiekt jest niestabilny. W związku z powyższym zasadne staje się wymuszenie korekcji niepożądanego przebiegu charakterystyki częstotliwościowej bez znacznej zmiany charakterystyki amplitudowej. W tym celu zaproponowano zastosowanie kompensatora fazy 3P2Z. Kompensator 3P2Z został wprowadzony na wyjście z pętli VMC rysunek 5 i 3. Charakterystyka amplitudowo – fazowa kompensatora III rzędu została również zaprezentowana na rysunku 6. W efekcie zastosowana kombinacja kompensatora 3P2Z oraz regulatora PID dla obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ utworzyła stabilną charakterystykę – kolor żółty (Rys. 6). Stosując graficzne kryteria *Nyquista* warunki zapasu stabilności zostały spełnione [24]:

- Układ ze sprzężeniem zwrotnym jest stabilny, jeżeli jego charakterystyka amplitudowa przecina oś częstotliwości pod nachyleniem mniejszym od 40 dB/dek. Obiekt przed regulacją jak i po zastosowaniu kompensacji spełnia warunek.
- Marginesem fazy $\Delta\varphi$ tj. przesunięcie fazowe układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego jest mniejszy od 180° , gdy moduł wzmocnienia jest równy 0 dB.

$$\Delta\varphi = \pi - \varphi(\omega) \quad (15)$$

Obiekt przed regulacją $\Delta\varphi \approx 180^\circ$ warunek niespełniony, po zastosowaniu regulacji $\Delta\varphi = 50^\circ$ warunek spełniony.

- Marginesem wzmocnienia ΔM tj. wartość modułu jest większe od 0 dB przy częstotliwości, dla której przesunięcie fazy jest równe -180° .

$$\Delta M = M(\omega_{-\pi}) \quad (16)$$

Obiekt przed regulacją $\Delta M = 40 \text{ dB}$ warunek spełniony, po zastosowaniu regulacji $\Delta M = 141 \text{ dB}$ warunek spełniony.

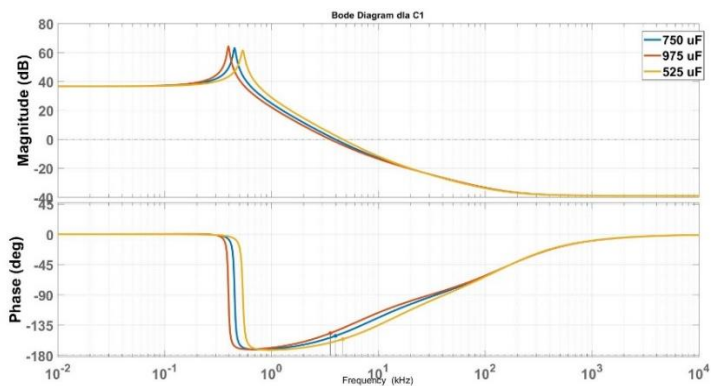
Zamodelowany układ pracy przetwornicy statycznej DC/DC w topologii Buck–Boost spełnia kryteria *Nyquista* zapasu stabilności dla regulacji mocą [24].

5. Badania symulacyjne w programie Matlab/SIMULINK

Praca badawcza w zakresie symulacji została podzielona na dwa etapy. Pierwszy z nich to analiza wpływu parametrów bloku mocy (C_l , L , ESR , C_l) na stabilność układu pracy z wykorzystaniem środowiska Matlab, zaś drugi etap to

modelowanie układu przetwornicy statycznej DC/DC z wykorzystaniem środowiska SIMULINK.

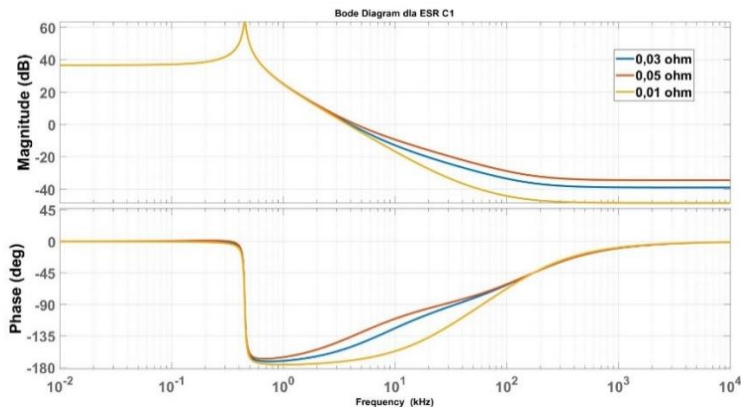
W etapie pierwszym korzystając z zapisów matematycznych 6–12, na rysunku 7–9 zaprezentowano charakterystyki amplitudowo-fazowe ww. elementów pasywnych. Na rysunku 7 porównane są trzy przebiegi zachowania się obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ dla trzech różnych wartości pojemności elementu C_1 .



Rys. 7. Charakterystyka amplitudowo-fazowa dla doboru C_1

Margines fazy obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ zwiększa się wraz z wzrostem pojemności. W związku z czym, im większa pojemność C_1 tym układ bardziej stabilny. Zatem: $\Delta M (975\mu F) > \Delta M (750\mu F) > \Delta M (525\mu F)$. Dodatkowo, wzrost pojemności rozszerza pasmo sterowania obiektem, przesuując w lewo charakterystykę częstotliwościową.

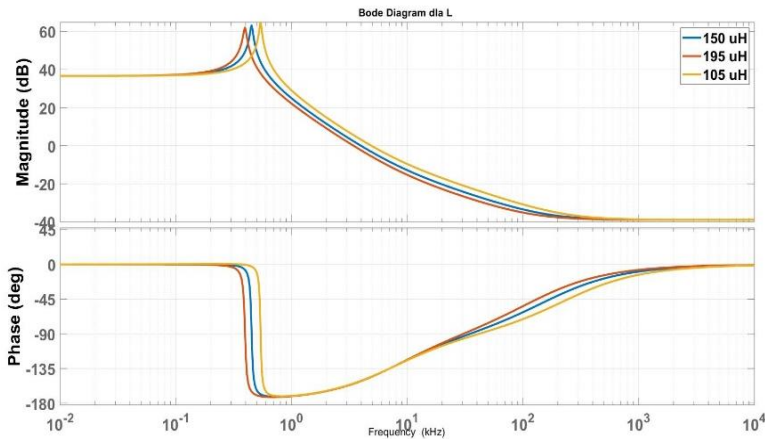
Na rysunku 8 porównane są trzy przebiegi zachowania się obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ dla trzech różnych wartości rezystancji wewnętrznej kondensatora C_1 .



Rys. 8. Charakterystyka amplitudowo-fazowa dla doboru ESR C_1 .

Wzrost rezystancji wewnętrznej kondensatora C_1 poprawia i zwiększa zapas stabilności obiektu. Jednocześnie należy mieć na uwadze, że rezystancja wewnętrzna kondensatora jest odwrotnie proporcjonalna do pojemności. Zatem sterowanie doborem elementu C_1 na potrzeby zwiększenia zakresu stabilności układu jest balansem pomiędzy pojemnością i rezystancją wewnętrzną. Również dlatego, że duża wartość ESR w układzie rzeczywistym będzie wpływać na szybkie nagrzewanie się oraz tętnienia prądów.

Na rysunku 9 porównane są trzy przebiegi zachowania się obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ dla trzech różnych wartości indukcyjności L .

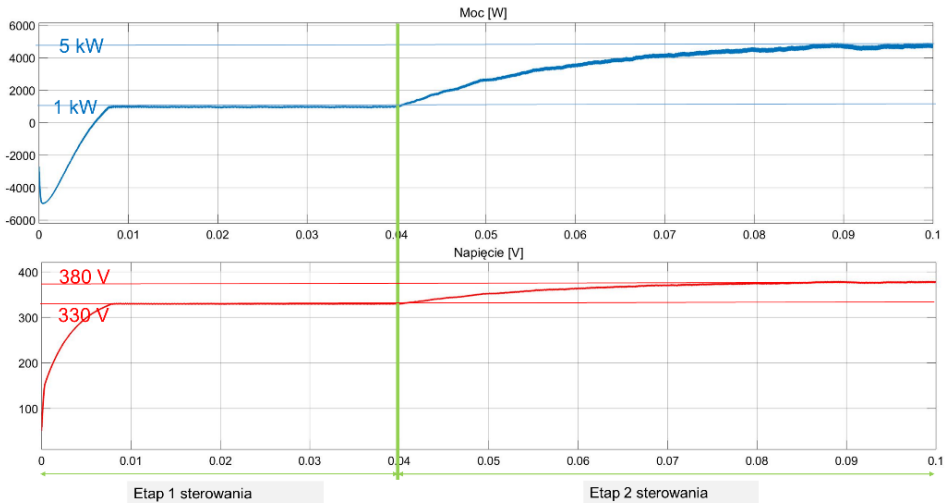


Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-fazowa dla doboru L .

W przypadku regulacji poziomem indukcyjności obiektu $G_{Buck_Boost}(s)$ jest odwrotne, im większa wartość tym zakres stabilności mniejszy. Zatem: $\Delta M(105\mu F) > \Delta M(150\mu F) > \Delta M(195\mu F)$. Wzrost indukcyjności rozszerza pasmo sterowania obiektem, przesuwając w lewo charakterystykę częstotliwościową podobnie jak kondensator C_1 . W ramach drugiego etapu prac w oparciu o zaproponowany model regulacji trzech pętli sterowania (Rys. 3) oraz parametry opisane w tabeli 1 i na bazie topologii układu (Rys. 2), przeprowadzono badania statyczne i dynamiczne pracy. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki symulacji.

Dla odzwierciedlenia dynamiki, symulacja została podzielona na dwie fazy. Pierwsza faza to sterowanie przetwornicą na poziomie mocy wyjściowej 1 kW, druga faza to sterowanie mocą wyjściową dla 5 kW. Kolorem niebieskim zaznaczono przebieg mocy, kolorem czerwonym, przebieg napięcia na wyjściu przetwornicy. Stan dynamiczny pracy przetwornicy statycznej DC/DC uzyskano poprzez skokową zmianę mocy z wartości 1 kW w ramach 1 etapu sterowania na wartość 5 kW – drugi etap sterowania. Skokowa zmiana mocy została wymuszona poprzez pętlę sterowania PMC w $t=0,04s$. Stan statyczny został potwierdzony

poprzez stabilność punktu pracy mocy. W przypadku sterowania dla 1 kW stabilność mocy na wyjściu można uzyskać w czasie $t = 0.01s$. W przypadku sterowania dla 5 kW stabilność mocy została uzyskana w czasie $t = 0,06s$.



Rys. 10. Przebieg napięcia i mocy na wyjściu przetwornicy DC/DC

6. Wnioski

W przedstawionym artykule zaproponowano topologię układu pracy, którą można wykorzystać do łączenia niezależnych źródeł DC (Rys. 1). Dla realizacji celu badawczego zaproponowano układ sterowania (Rys. 3) dla nieizolowanej przetwornicy DC/DC. W oparciu o model matematyczny dla przetwornicy w topologii Buck–Boost wraz z układem sterowania zostały potwierdzone kryteria zapasu stabilności dla regulacji mocą 0–5 kW. Badania symulacyjne z wykorzystaniem środowiska SIMULINK pozwoliły na weryfikację dynamiczną pracy układu podczas skokowej zmiany mocy, zatem cel badawczy został zrealizowany.

W przypadku celu naukowego, przeprowadzone badania symulacyjne w zakresie charakterystyki amplitudowo–częstotliwościowej dla obiektu typu Buck–Boost pokazują, że przy zastosowaniu co najmniej dwóch pętli sterowania wymagane jest zastosowanie kompensatora 3P2Z. Ponadto, istotne jest dobranie świadomie elementów pasywnych bloku mocy, tak aby wpływały korzystnie na stabilność układu pracy. Badania wykazały, że sterowanie mocą przetwornicy DC/DC towarzyszy kompromis w zakresie regulacji napięciem na wyjściu (Rys.10).

Analizowany w artykule przypadek układu pracy wskazuje na potrzebę przeprowadzenia dalszych badań, które obejmowałyby wybór innej topologii pozwalającej uzyskać sterowanie większymi wartościami mocy na wyjściu przetwornicy DC/DC. Pomimo to, artykuł pokazuje, że dla topologii półmostka H, możliwe jest stabilne sterowanie mocą na wyjściu przetwornic DC/DC dla potrzeb podziału mocy na szynie DC.

Literatura

- [1] Gong H., Akeyo O., Rallabandi V., Ionel D. M., Real Time Operation of Smart Homes with PV and Battery Systems under Variable Electricity Rate Schedules and Transactive Power Flow, 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), DOI: 10.1109/ICRERA.2018.8566895.
- [2] Dobrzański D., *Overview of currently used wireless electrical vehicle charging solutions*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 8(3) 47–50, 2018.
- [3] Wang H., Jia X., Li J., Guo X., Wang B., Wang X., *New single-stage EV charger for V2H applications*, 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC–ECCE Asia), DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512724.
- [4] Borecki J., Stosur M., Szkółka S., *Energoelektronika*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [5] Fatyga K., Kwaśny Ł., Stefańczak B., *A comparison study of the features of DC/DC systems with Si IGBT and SiC MOSFET transistors*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 8(2), 68–71, 2018.
- [6] Zhang Z., Zhang Z.; Xie S., Yang C., *A control strategy for paralleled bi-directional DC–DC converters used in energy storage systems*, 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854668.
- [7] Li Y., Zheng T. Q., Zhao C., Du R., Wang Q., *A novel buck/boost/buck–boost three-input DC/DC converter*, IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON.2011.6119460.
- [8] Soheli S. N., Sarowar G., Hoque Md. A., Hasan Md. S., *Design and Analysis of a DC–DC Buck Boost Converter to Achieve High Efficiency and Low Voltage Gain by using Buck Boost Topology into Buck Topology*, 2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE), DOI: 10.1109/ICAEEE.2018.8643001.
- [9] Erickson R. W., Maksimović D., *Fundamentals of Power Electronics*, Wydanie drugie, Kluwer Academic publishers, 2004.
- [10] Gerekial W. G. *Bi-directional power converters for smart grids*, Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, 2014.
- [11] *Basic Calculation of an Inverting Buck–Boost Power Stage*, Texas Instruments, Application Report, 2017.

- [12] Ke Y., Zhou Y., Chen J., *Control Bifurcation in PFC Boost Converter under Peak Current–Mode Control*, 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, DOI: 10.1109/IPEMC.2006.4778218.
- [13] Goyal S., Barai M., *Design and implementation of high gain boost converter with voltage–mode control*, 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), DOI: 10.1109/ICPCSI.2017.8392035.
- [14] Bryant B., Kazimierczuk M.K., *Modeling the closed–current loop of PWM boost DC–DC converters operating in CCM with peak current–mode control*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 52(11), 2005, DOI: 10.1109/TCSI.2005.853904.
- [15] Bryant B., Kazimierczuk M.K., *Voltage loop of boost PWM DC–DC converters with peak current–mode control*, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53(1), 2006, DOI: 10.1109/TCSI.2005.854611.
- [16] Sreekumar C., Agarwal V., *A Hybrid Control Algorithm for Voltage Regulation in DC–DC Boost Converter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 55(6), 2008, DOI: 10.1109/TIE.2008.918640.
- [17] Ng D. C. W., Wong W. Y. T., Wong N., Wan K. W. H., Kwong D. K. K., *An Efficient Transfer–Function–Based Approach for the Fast Tuning and Design of DC–DC Converters*, 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318493.
- [18] Dębowski A., *Automatyka. Podstawy teorii.*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.
- [19] Dębowski A., *Automatyka. Technika regulacji.*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.
- [20] Duzinkiewicz K., Grochowski M., Piotrowski R., Rutkowski T., *Podstawy Automatyki. Transmitancja operatorowa i widmowa.* Politechnika Gdańska, 2009.
- [21] Rana N., A Ghosh., Banerjee S., *Development of an Improved Tristate Buck–Boost Converter With Optimized Type–3 Controller*, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 6(1), 2018, DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2724847.
- [22] Macia N.F., Blackledge V. O., *A Method for Obtaining the Transfer Function of Inverting and Non–inverting Op–amp Circuits Based on Classical Feedback Theory*, 2001 ASEE Annual Conference and Exposition: Peppers, Papers, Pueblos and Professors – Albuquerque, NM, United States, 2001.
- [23] Kovatchev E., Evstatieva N., *Design of a Digitally Controlled Boost Converter for Automotive Headlamp Applications*, 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), DOI: 10.1109/ET.2017.8124359.
- [24] Soman S., Sangeetha T.S., Bindu S., *Development of Digital Controller for synchronous Buck Converter*, 2015 International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC), DOI: 10.1109/ISPCC.2015.7374993.

*Rafał Kwoka⁽¹⁾, Janusz Kozak⁽²⁾, Michał Majka⁽³⁾

Budowa i chłodzenie nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego

Streszczenie: W artykule zaprezentowano proces budowy modeli fizycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego typu rezystancyjnego. Przedstawiono stanowisko do badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego. Opisano rodzaje izolacji termicznych i kriostatów. Zaprezentowano sposoby chłodzenia ogranicznika: kontaktowego z wykorzystaniem kriochłodziarki oraz w kąpieli ciekłego azotu.

Słowa kluczowe: nadprzewodnictwo, taśma nadprzewodnikowa, uzwojenia nadprzewodnikowe, nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego, kriostat.

Construction and cooling of superconducting fault current limiters

Abstract: The article presents the process of building physical models of resistive type superconducting fault current limiters. The test stand of superconducting fault current limiters was presented. Types of thermal insulation and types of cryostats were described. The methods of cooling of the fault current limiter: contact cooling by cryocooler and cooling in liquid nitrogen bath were presented.

Keywords: superconductivity, superconducting tape, superconducting windings, superconducting fault current limiter, cryostat.

1. Wstęp

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego mogą zwiększyć wydajność sieci i zapewnić jej elastyczne rozszerzenie bez kosztownej wymiany dotychczas stosowanych urządzeń i aparatury łączeniowej. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu może przynieść duże korzyści ekonomiczne, ponieważ wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną nie będzie konieczności dostosowywania transformatorów, aparatury łączeniowej i zabezpieczeń do wzrastających poziomów prądów zwarciovych [3].

⁽¹⁾rafal.kwoka@pollub.edu.pl, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

⁽²⁾j.kozak@iel.waw.pl, Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych, Zakład Wielkich Mocy, Instytut Elektrotechniki

⁽³⁾m.majka@pollub.pl, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

Budowa nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego jest procesem bardzo złożonym. Wymaga uprzedniego przeprowadzenia analizy numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz zaprojektowania i doboru odpowiednich elementów i materiałów [1, 2, 4, 5, 6].

Elementy nadprzewodnikowe urządzeń elektroenergetycznych wymagają chłodzenia kriogenicznego we wszystkich stanach jego pracy. Najtrudniejszym do utrzymania parametrem, który decyduje o nadprzewodnictwie, jest temperatura. Utrzymanie temperatury urządzeń na poziomie umożliwiającym pracę w stanie nadprzewodzącym można otrzymać stosując układ chłodzenia o odpowiednio dużej wydajności i zastosowaniu izolacji termicznej. Urządzenia nadprzewodnikowe są izolowane termicznie od otoczenia, co realizowane jest przez umieszczenie ich w specjalnych kriostatach wyposażonych w złożoną izolację termiczną, która minimalizuje dopływ ciepła z zewnątrz drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego można chłodzić stosując technikę kontaktową z wykorzystaniem kriochołdziarek. Próżnia izoluje termicznie urządzenie w kriostacie. Kriochołdziarki pozwalają na całkowite wyeliminowanie cieczy kriogenicznych z układu chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. W przypadku chłodzenia kontaktowego przy użyciu kriochołdziarki przyjmuje się, że przepływ ciepła w urządzeniu zbudowanym z nadprzewodnika HTS zachodzi poprzez przewodzenie i promieniowanie [2, 3].

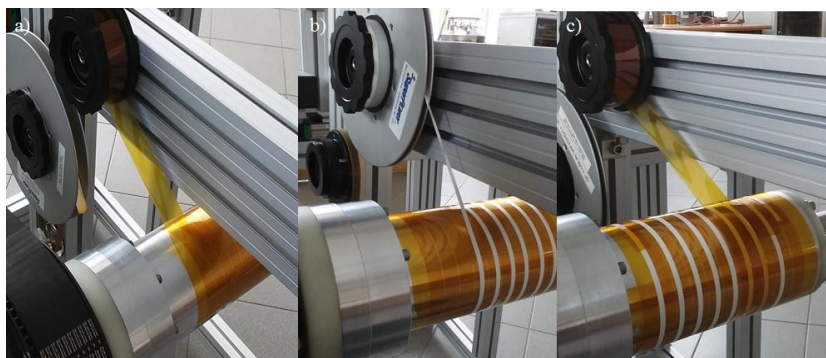
2. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego

2.1. Budowa modeli fizycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego typu rezystancyjnego

Do wykonania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego wykorzystano karkas ze stopu aluminium, którego oznaczenie wg PN-79/4-82160 jest PA38.

Uzwojenia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego SFCL-2 zostały wykonane na nawijarce, która została zaprojektowana i wykonana w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych Instytutu Elektrotechniki (rysunek 1).

Przed przystąpieniem do nawijania uzwojeń, nawinięto warstwę taśmy kaptonowej (rysunek 1a) w celu odizolowania uzwojeń ogranicznika od karkasu. Drugim krokiem było nawinięcie uzwojeń ogranicznika z taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G typu SF 4050 (Rys.1b) produkcji SuperPower o szerokości 4 mm i grubości 0,055 mm z warstwą srebra 2 μm . Po nawinięciu uzwojeń ogranicznika nawinięto warstwę taśmy kaptonowej w celu odizolowania uzwojeń od siebie.



Rys. 1. a) wykonanie izolacji karkasu z zastosowaniem taśmy kaptonowej, b) nawinięcie uzwojeń ogranicznika z wykorzystaniem taśmy HTS 2G typu SF 4050, c) wykonanie izolacji uzwojeń ogranicznika z zastosowaniem taśmy kaptonowej

Źródło: Opracowanie własne

Do nawinięcia izolacji karkasu, uzwojeń nadprzewodnikowych i izolacji uzwojeń wykorzystano nawijarkę, która jest sterowana komputerowo za pomocą oprogramowania CNC Mach 3. Nawijarka posiada możliwość regulowania prędkości nawijania i przesuwu. Ustawiając odpowiednią prędkość nawijania i przesuwu uzyskujemy fizyczny model ogranicznika w postaci nawiniętych i zaizolowanych obustronnie uzwojeń nadprzewodnikowych.

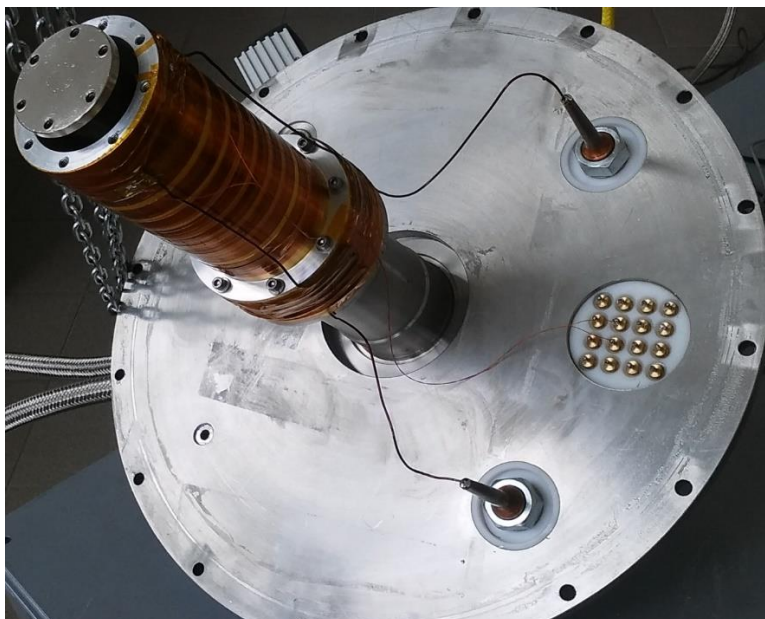
Łączenie taśm nadprzewodnikowych jest niezbędną czynnością do wykonania w każdym urządzeniu nadprzewodnikowym. W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu zwarciovego konieczne jest wykonanie połączenia taśmy nadprzewodnikowej z miedzianymi przepustami prądowymi, bardzo często zachodzi również konieczność wykonania połączenia lutowanego o niskiej rezystancji między cewkami występującymi w urządzeniu. Jakość wykonanych połączeń taśm jest bardzo istotna dla poprawnego funkcjonowania urządzenia. W niepoprawnie wykonanym połączeniu lutowanym występują stałe straty Joule'a, które mogą spowodować lokalne podgrzanie nadprzewodnika powyżej jego temperatury krytycznej, wyjście ze stanu nadprzewodzenia, co z kolei może doprowadzić do wydzielania się dużej energii w tym miejscu i trwale uszkodzenie taśmy nadprzewodnikowej. Wadliwe połączenie taśmy HTS z miedzianym przepustem prądowym może być przyczyną awarii całego urządzenia. Występowanie strat na połączeniach lutowanych w urządzeniu nadprzewodnikowym powoduje również konieczność zastosowania wydajniejszego układu chłodzenia.

W zaprezentowanym nadprzewodnikowym ograniczniku prądu zwarciovego typu rezystancyjnego oprócz łączenia dwóch uzwojeń występują połączenia:

- uzwojenie 1 – przepust prądowy 1 (A),
- uzwojenie 2 – przepust prądowy 2 (B),

- uzwojenie 1 – wyprowadzenie napięciowe 1 (a),
- uzwojenie 2 – wyprowadzenie napięciowe 2 (b).

Na rysunku 2.2 zaprezentowano laboratoryjny model nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciego typu rezystancyjnego zamocowany do pierwszego stopnia głowicy kriołodziarki RDK-408D. Elektrycznie podłączony do przepustów prądowych A i B umieszczonych na pokrywie kriostatu. Zostały również wykonane doprowadzenia napięciowe a i b łączące uzwojenia ogranicznika z panelem pomiarowym, dzięki którym będzie możliwe zmierzenia napięcia na uzwojeniach.



Rys. 2. Laboratoryjny model SFCL zamocowany do pierwszego stopnia głowicy kriołodziarki RDK-408D, elektrycznie podłączony do przepustów prądowych umieszczonych na pokrywie kriostatu

Źródło: Opracowanie własne

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry zbudowanych ograniczników prądu zwarciego typu rezystancyjnego.

Tabela 1. Parametry modeli SFCL

Parametr	Wartość dla SFCL-1	Wartość dla SFCL-2
Prąd krytyczny taśmy nadprzewodnikowej SF4050	$I_C = 105 \text{ A}$	$I_C = 105 \text{ A}$
Napięcie znamionowe	$U_n = 24 \text{ V}$	$U_n = 230 \text{ V}$
Skuteczna wartość prądu znamionowego	$I_n = 50 \text{ A}$	$I_n = 50 \text{ A}$
Długość taśmy	$l = 45 \text{ mm}$	$l = 4,77 \text{ m}$
Liczba zwojów uzwojenia 1	45mm	$n_1 = 8 \text{ zwojów}$
Liczba zwojów uzwojenia 2	–	$n_2 = 8 \text{ zwojów}$
Średnica karkasu	$D = 95 \text{ mm}$	$D = 95 \text{ mm}$
Materiał karkasu wg PN-79/4-82160	PA38	PA38

Na rysunku 3 zaprezentowano dwie konstrukcje nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego SFCL-1 i SFCL-2, w których zastosowano taśmę nadprzewodnikową HTS 2G typu SF4050 o prądzie krytycznym 105 A.



Rys. 3. Laboratoryjne modele nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciego typu rezystancyjnego a) SFCL – 1, b) SFCL – 2

Źródło: Opracowanie własne

2.2. Stanowisko do badań eksperymentalnych modeli fizycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego typu rezystancyjnego

Do przeprowadzenia badań modeli fizycznych nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego zostało wykonane stanowisko pomiarowe. Stanowisko pomiarowe do badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego (Rys. 4) składa się z kriostatu próżniowego, którego zadaniem jest zapewnienie izolacji cieplnej ogranicznika. W kriostacie umieszczony jest ogranicznik chłodzony głowicą kriochłodziarki zasilanej kompresorem helowym. Próżnię w kriostacie uzyskujemy przez odpompowanie powietrza pompami próżniowymi do wartości 10^{-5} mbar. W skład stanowiska pomiarowego wchodzi miernik próżni, miernik temperatury podłączony do kriogenicznego czujnika temperatury ogranicznika, laboratoryjny układ zwarciový, sonda różnicowa, multimetr, układ zasilania i rejestracji danych.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe do badania nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego

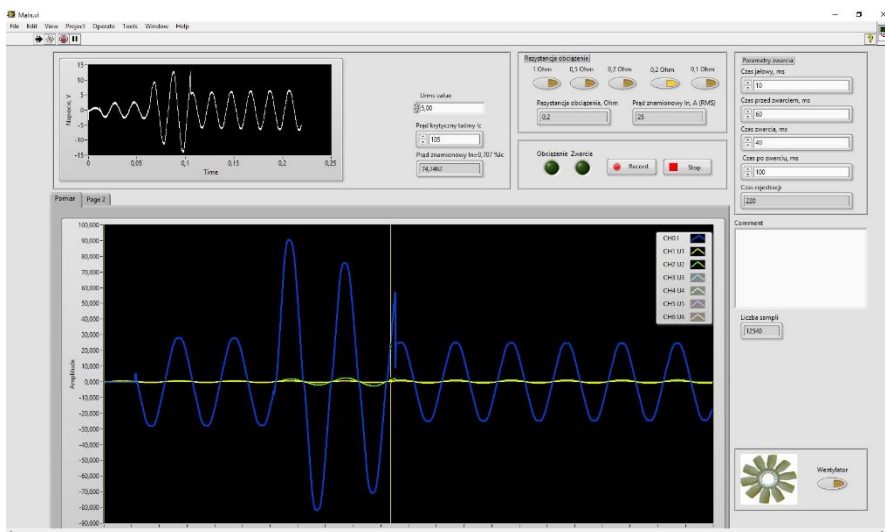
Źródło: Opracowanie własne

Laboratoryjny układ zwarciový jest włączony do sieci zasilającej poprzez transformator separacyjny typu ET2o–30 o mocy 30kVA. W obwodzie

zwarciovym moŹliwa jest regulacja napięcia poprzez zastosowany autotransformator regulacyjny typu ESS1520 – 20A oraz poprzez zmianę układu połączeń ośmiu transformatorów toroidalnych o łącznej mocy znamionowej 4800 W.

Proces odpompowania kriostatu i uzyskania odpowiedniej próżni oraz chłodzenia ogranicznika trwa około dwóch godzin. Przejście nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego mierzone w ms. Dlatego wykorzystuje się urządzenia o odpowiednio szybkiej rejestracji wyników. Kontrola parametrów ogranicznika wymaga odpowiednich urządzeń i czujników działających w szerokim zakresie temperatur od 3,8K do 400K.

Do obserwacji i rejestracji przebiegów prądu w obwodzie zwarciovym oraz napięcia na ograniczniku wykorzystano komputer pomiarowy wraz z oprogramowaniem napisanym w środowisku LabView (Rys. 5) skomunikowany z karta pomiarową NI USB–6212. Pomiar prądu w obwodzie realizowany poprzez pomiar na boczniku o rezystancji 0,001 Ω . Pomiar napięcia na badanym ograniczniku prądu zwarciovego był wykonany przez sondę różnicową HZ 109.



Rys. 5. Obserwacja i rejestracja przebiegów prądu w obwodzie zwarciovym oraz napięcia na ograniczniku

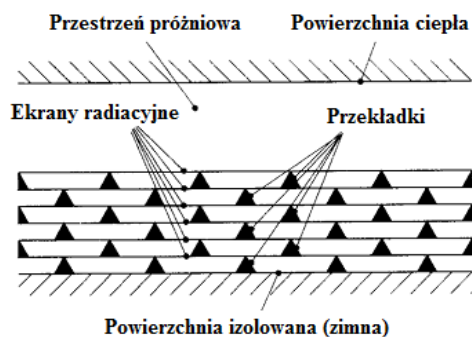
Źródło: Kozak J., Majka M., Pracownia Technologii Nadprzewodnikowych, Instytut Elektrotechniki

3. Chłodzenie nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcowego

3.1. Izolacje termiczne i kriostaty

Przy chłodzeniu urządzeń nadprzewodnikowych w tym nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcowego wykorzystujemy izolację charakteryzującą się możliwie najmniejszym współczynnikiem przewodności cieplnej λ . W kriogenice wyróżniamy trzy rodzaje stosowanych izolacji termicznych [7, 8]:

- próżniową, której istotą jest zastosowanie naczyń o podwójnych ściankach, pomiędzy którymi wytworzona zostaje próżnia rzędu 10–2 Pa. Całkowicie eliminując dopływ ciepła na drodze przewodnictwa i konwekcji przez pozostały jeszcze gaz, przy jednoczesnym zmniejszeniu do minimum przekazywania ciepła przez promieniowanie.
- wielowarstwową próżniową (superizolacja), która składa się z wielu na przemian leżących warstw folii metalowych, o możliwie najmniejszych wartościach współczynnika emisji ϵ oraz warstw materiałów o minimalnym współczynniku przewodzenia ciepła. Polega ona na umieszczeniu w przestrzeni próżniowej od kilku do kilkudziesięciu biernych ekranów radiacyjnych o niskiej emisyjności powierzchni (Rys. 6).



Rys. 6. Schemat ideowy wielowarstwowej izolacji próżniowej

Źródło: Chorowski M.: Kriogenika. Podstawy i zastosowania. IPPU MASTA, Gdańsk, 2007

Ekran radiacyjny dzieli się na przekładki wykonane z materiałów o małej przewodności cieplnej, natomiast powierzchnie materiałów stosowanych jako ekrany radiacyjne powinny cechować się niską emisyjnością. Doskonale nadaje się folia aluminiowa. Poprzekładane są one cienkimi warstwami włókien mineralnych o grubości mniejszej od jednego mikrometra, bardzo drobnoproszkiem lub papierem szklanym. Bardzo dobre wyniki otrzymuje się stosując warstwy folii aluminiowej o grubości 0,006–0,013 mm i

papier szklany o grubości 0,12–0,20mm. Na rysunku 7 przedstawiono zastosowanie izolacji termicznej nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego typu rezystancyjnego poprzez zastosowanie superizolacji.



Rys. 7. Wykonanie izolacji termicznej SFCL poprzez zastosowanie superizolacji

Źródło: Opracowanie własne

System chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych odbiera ciepło dopływające do wnętrza kriostatu z zewnątrz przez izolację termiczną, ścianki kriostatu, przepusty prądowe i pomiarowe oraz ciepło wydzielane podczas pracy w stanach przejściowych (załączanie i wyłączenie urządzenia oraz zmiany prądu roboczego), ciepło wydzielane w skutek zakłóceń oraz ciepło wynikające ze strat przemienno prądowych w nadprzewodnikach [9, 10, 11, 12].

Ciecze kriogeniczne (ciekły azot, hel, wodór) są źródłem niskiej temperatury klasycznych kriostatów stosowanych przy chłodzeniu w kąpeli. Zmniejszając ciśnienie pary nad wlaną do kriostatu cieczą, można obniżyć temperaturę krytyczną cieczy kriogenicznej.

3.2. Chłodzenie w ciekłym azocie

Wyróżniamy cztery podstawowe techniki chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych: chłodzenie w kąpeli, chłodzenie wymuszone, chłodzenie kontaktowe (przy wykorzystaniu kriochłodziarki) oraz chłodzenie w kąpeli ze wspomaganie [9, 15]. W artykule przedstawiono dwie techniki chłodzenia nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovogo: kontaktowe i w kąpeli ciekłego azotu.

Jedną z technik chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych jest kąpiel w ciekłym azocie (metoda zanurzeniowa). System chłodzenia ciekłym azotem nie jest skomplikowany i pozwala osiągnąć temperaturę 77 K. W tym celu wykorzystuje się naczynie izolacyjne – kriostat, którego przykład został przedstawiony na rysunku 8. Koszt całkowity urządzenia chłodzonego w kąpeli ciekłego azotu jest mały, a urządzenie jest proste i niezawodne, ponieważ nie stosuje się dodatkowych chłodziarek [7, 15].

Do głównych zalet tej techniki chłodzenia należą dobre zdolności chłodzenia i stała temperatura w całym urządzeniu.



Rys. 8. Przykładowy kriostat do chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych i dewar z ciekłym azotem

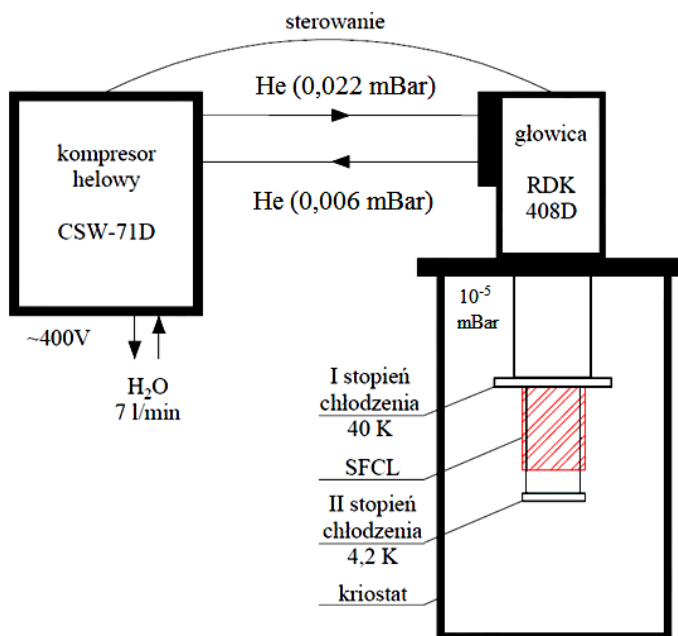
Źródło: Majka M., Kozak J., Janowski T., Kozak S.: Analiza skuteczności działania bezrdzeniowych indukcyjnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykonanych z taśmy nadprzewodnikowej pierwszej i drugiej generacji, Przegląd Elektrotechniczny 88 (8), 2012.

4. Chłodzenie kontaktowe

Urządzenia nadprzewodnikowe można chłodzić stosując technikę kontaktową z wykorzystaniem kriochłodziarek. Na całej przestrzeni kriostatu utrzymywana jest próżnia rzędu 10^{-2} – 10^{-4} mbar. Kriochłodziarki pozwalają na całkowite wyeliminowanie cieczy kriogenicznych z układu chłodzenia urządzeń nadprzewodnikowych. Umożliwia to tworzenie autonomicznych systemów nadprzewodnikowych, w których wyeliminowana została konieczność okresowego uzupełniania kriogenicznych czynników chłodzących [10]. Większość kriochłodziarek pracuje zgodnie z cyklem Gifforda–McMachona.

Charakteryzują je stosunkowo duża moc chłodnicza, szeroki zakres temperatur pracy i niskie zużycie energii. W przypadku chłodzenia kontaktowego przy użyciu kriochłodziarki przyjmuje się, że przepływ ciepła w urządzeniu zbudowanym z nadprzewodnika HTS zachodzi poprzez przewodzenie i promieniowanie [10, 14].

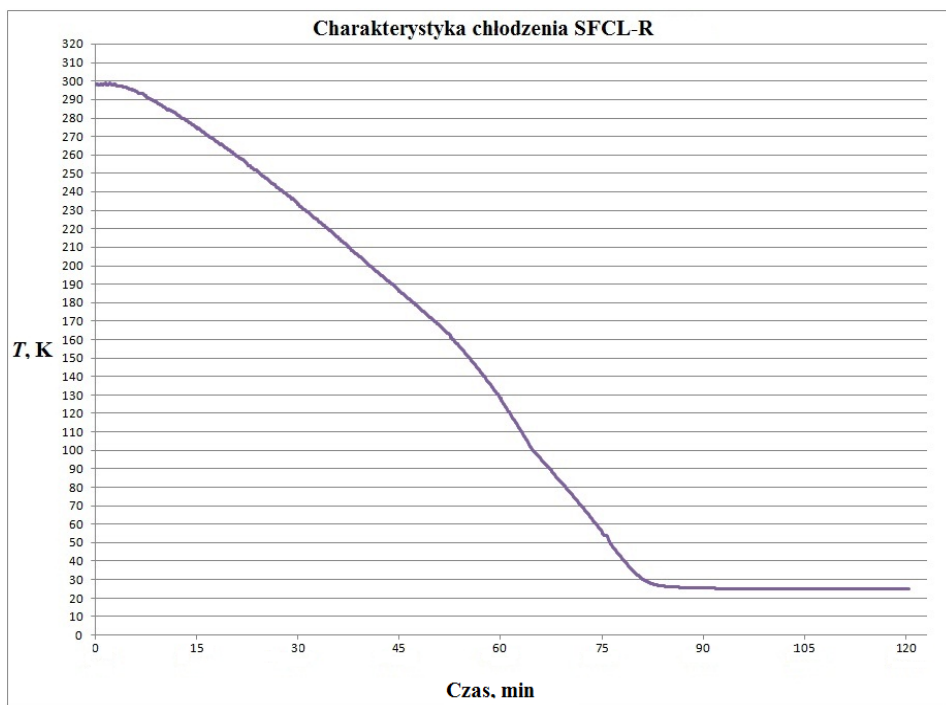
Schemat układu chłodzenia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego techniką kontaktową przedstawia rysunek 9 Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego połączony z II stopniem głowicy kriochłodziarki umieszczony jest w kriostatcie próżniowym.



Rys. 9. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego chłodzony kontaktowo

Źródło: Opracowanie własne

Chłodzenie ogranicznika przeprowadzono po wcześniejszym odpompowaniu kriostatatu do ciśnienia 10⁻⁵ mbar trwającym około 2 godzin. Osiągnięcie temperatury ogranicznika 26 K trwało około 2 godzin. Charakterystykę chłodzenia ogranicznika przedstawiono na rysunku 3.6.



Rys. 10. Charakterystyka chłodzenia nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego SFCL-2

Źródło: Opracowanie własne

5. Wnioski

Budowa nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego jest procesem bardzo złożonym wymagającym zastosowania chłodzenia kriogenicznego we wszystkich stanach jego pracy. Temperatura jest najtrudniejszym do utrzymania parametrem, który decyduje o nadprzewodnictwie. Utrzymanie temperatury urządzeń na poziomie umożliwiającym pracę w stanie nadprzewodzącym można otrzymać stosując odpowiedni układ chłodzenia z zastosowaniem izolacji termicznej. W tym celu stosuje się kriostaty, które minimalizują dopływ ciepła z zewnątrz drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania.

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciovego można chłodzić stosując technikę kontaktową z wykorzystaniem kriochłodziarek, a także w kąpielach w cieczach kriogenicznych.

Prąd zwarciovowy w sieci jest wielokrotnie większy od prądu występującego w czasie zwykłej pracy i powoduje szkodliwe dynamiczne i cieplne skutki w pracy

urządzeń elektroenergetycznych. Stosowane obecnie w sieciach elektroenergetycznych ograniczanie prądów zwarciovych za pomocą dławików i transformatorów o odpowiednio dużej reaktancji znacząco wpływa na wzrost kosztów budowy i eksploatacji systemu elektroenergetycznego, a także i na ostateczną cenę energii elektrycznej. Konieczne jest zatem ograniczenie prądów zwarciovych do bezpiecznego poziomu przez zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego. Docelowymi grupami odbiorców dla nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarciovego są operatorzy sieci dystrybucyjnej.

Literatura

- [1] Ruiz H. S., Zhang X., Coombs T. A., Resistive-Type Superconducting Fault Current Limiters: Concepts, Materials, and Numerical Modeling, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, 2015.
- [2] Martino E., Bocchi M., Angeli G., Ascade M., Rossi V., Valzasina A., Li Bassi A., Casari C. S., Martini L., Assembly and Soldering Procedure of Nonstabilized YBCO Coils for 1000 A SFCL, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 1, 2018.
- [3] Janowski T., Stryczewska H. D., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, Lublin, LIBER, 2002.
- [4] Kwoka R., Kozak J., Majka M., Tests of HTS 2G Superconducting Tapes Using the Labview Environment, *Applied Computer Science*, nr Vol. 14, 2018.
- [5] Kwoka R., Kozak J., Majka M., Badania rezystancji połączeń taśm HTS 2G stosowanych w nadprzewodnikowych ogranicznikach prądów zwarciovych, *Prace doktorantów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej: wybrane zagadnienia z zakresu elektrotechniki i inżynierii biomedycznej*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2018.
- [6] Kwoka R., Kozak J., Majka M., Wyznaczanie charakterystyk $R=f(T)$ taśma nadprzewodnikowych pierwszej i drugiej generacji, Lublin, IAPGOŚ, 1/2018, 2018.
- [7] Chorowski M., *Kriogenika. Podstawy i zastosowania*, Gdańsk, IPPU MASTA, 2007.
- [8] Bodio E., *Skraplarki i chłodziarki kriogeniczne*, Wrocław, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 1987.
- [9] Lech W., *Metody chłodzenia elektromagnesów nadprzewodnikowych*, Warszawa, Instytut Elektrotechniki, 1983.
- [10] Kang H., Kim H.J., Bae D.K., Ahn M. C., Chang H., Ko T.K., Sub-cooled nitrogen cryogenic cooling system for superconducting fault current limiter by using GM-cryocooler, *Cryogenics* 45, 2005.
- [11] Hayakawa N., Ishida K., Mambu M., Kojima H., Isojima S., Kuwata M., Volume Effect of Dynamic Breakdown Strength In LN2 for Insulation Design of Resistive Superconducting Fault Current Limiters, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 4, 2018.

- [12] Kar S., Rao V. V., Step-by-step design of a single phase 3.3 kV/200 A resistive type superconducting fault current limiter (R-SFCL) and cryostat, *Physica C: Superconductivity and its application*, 2018.
- [13] Materiały informacyjne – Technical instruction RDK-408D 4K cold head, Sumitomo Heavy Industries, Ltd., 2003.
- [14] Dondapati R.S., Kumar A., Kumar G. R., Usurumarti P.R., Dondapati S., Superconducting magnetic energy storage (SMES) devices integrated with resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) for fast recovery time, *Journal of Energy Storage* 13, 2017.
- [15] Janowski T., Stryczewska H. D., Wac-Włodarczyk A., *Technologie nadprzewodnikowe i plazmowe w energetyce*, Lublin, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2009.
- [16] Materiały informacyjne – <http://www.cryomech.com>, 2019.
- [17] Majka M., Kozak J., Janowski T., Kozak S.: Analiza skuteczności działania bezrdzeniowych indukcyjnych nadprzewodnikowych ograniczników prądu wykonanych z taśmy nadprzewodnikowej pierwszej i drugiej generacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 88, nr 8/2012, 2012.

*Łukasz Zychowicz

Metody detekcji niejednorodności i defektów w materiałach stalowych

Streszczenie: W artykule dokonano przeglądu istniejących metod detekcji niejednorodności i defektów materiałów stalowych oraz przedstawiono sposób detekcji takich uszkodzeń za pomocą światłowodowych siatek Bragga.

Słowa kluczowe: detekcja niejednorodności, detekcja uszkodzeń stali, czujnik FBG

Methods for detecting inhomogeneities and defects in steel materials

Abstract: The article reviews the existing methods for detecting inhomogeneities and defects in steel materials and presents a method for detecting such damages using fiber Bragg gratings.

Keywords: heterogeneity detection, steel damage detection, FBG sensor.

1. Wstęp

Materiały stalowe mogą ulegać korozji, uszkodzeniom, mechanicznym i zmęczeniowym. Niewidoczne uszkodzenia konstrukcyjne infrastruktury komunikacyjnej oraz budynkowej mogą doprowadzić do katastrofy, dlatego wiele otaczających konstrukcji stalowych poddaje się stałym lub okresowym badaniom czy przeglądom. Przedstawiono istniejące systemy służące do badań takich elementów, a także opracowaną metodę wykrywania defektów za pomocą czujnika wykorzystującego światłowodową siatkę Bragga (FBG).

2. Istniejące systemy

Najprostszym, a jednocześnie obciążonym dużą niepewnością, sposobem wykrywania takich uszkodzeń są metody wizualne. Można zastosować tu dodatkowe przyrządy optyczne, takie jak mikroskop, lupa. W metodach wizualnych wykrywa się zazwyczaj duże wady materiałowe. Stosuje się ją najczęściej do badań części statków i samolotów, wymienników powietrza, wirników, rurociągów [1]. Metody wizualne często sprowadzają się do metod niszczących, czyli rozcinaniu elementu lub próbom zmęczeniowym – działanie

*lukas.zychowicz@gmail.com, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

odpowiednio dużą siłą w celu zmęczenia materiału i analiza jego sieci krystalicznej, co ma znaczenie bardziej przy dochodzeniu przyczyn uszkodzenia danego urządzenia, niż profilaktycznym kontrolowaniu jego stanu. W poniższych rozdziałach omówiono szerzej bardziej zaawansowane metody, którymi są: sygnały akustyczne, techniki ultradźwiękowe, wibrometria laserowa, metoda cyfrowej korelacji obrazu, metody prądów wirowych, metody radiograficzne i magnetyczno–proszkowe.

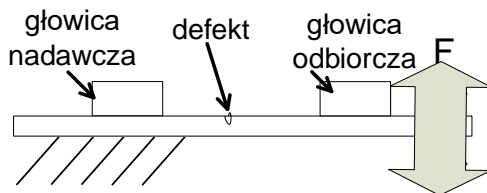
3. Metoda emisji sygnałów akustycznych

Badania emisji akustycznej są nieniszczącą metodą, lokalizującą wady konstrukcji (uszkodzenia mechaniczne, korozja, nieszczelności [2]), również w trakcie eksploatacji oraz z dużej odległości [3]. Stosuje się ją również dla dużych urządzeń, instalacjach hydraulicznych, zbiornikach z cieczami lub gazami [4, 5]. Badania polegają zazwyczaj na emisji sygnałów akustycznych na interesujący element i przetwarzanie ich na sygnał za pomocą czujników, które uprzednio rozmieszcza się na badanej konstrukcji. Następnie dochodzi do zapisu zarejestrowanego sygnału. Emisja akustyczna zostaje wygenerowana w postaci fal za przyczyną nieciągłości materiałowych.

Metoda ta jest skomplikowana za sprawą konieczności analizowania plików chmur punktów oraz bywa wrażliwa na zakłócenia oraz hałas od zewnętrznych źródeł. W celu osiągnięcia odpowiedniej dokładności należy dokonać wielu cykli obciążeń próbki. W publikacji [6] przedstawiono możliwość zastosowania sygnału akustycznego emitowanego przez pracujący silnik do wykrywania pękniętych prętów wirnika i uszkodzenia łożysk silnika indukcyjnego.

4. Metoda technik ultradźwiękowych

Rysunek 1 przedstawia sposób pomiaru metodą ultradźwiękową: stalową próbkę należy z jednej strony usztywnić, zaś z drugiej obciążać zmienną siłą, wywołującą zginanie próbki. Z lewej strony od pęknięcia umocowuje się nadawczą głowicę szerokopasmową, a z prawej odbiorczą fal powierzchniowych o zadanej częstotliwości.



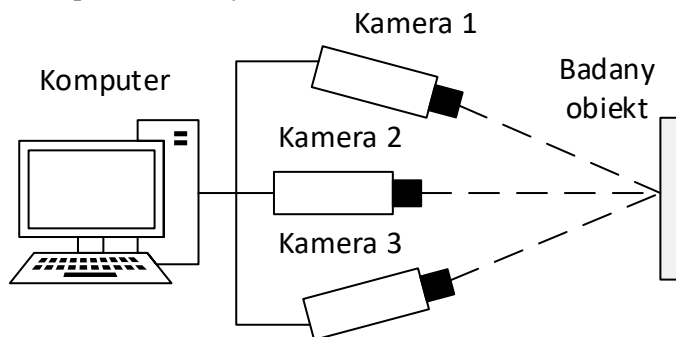
Rys. 1. Układ pomiarowy do wykrywania defektów z zastosowaniem techniki ultradźwiękowej

Technikę ultradźwiękową cechuje mała inwazyjność, duża dokładność, ale można stosować ją zazwyczaj dla konstrukcji wielkogabarytowych. Dopiero niedawno zaczęto badać nieliniową technikę ultradźwiękową, która wykorzystuje nieliniowe zachowanie ultradźwiękowe (takie jak generowanie wyższych harmonicznych i subharmonicznych), co szerzej opisuje praca [7].

Badania przedstawione w [8, 9] wykazały, że zastosowanie FBG do technik ultradźwiękowych może znacznie polepszyć dokładność lokalizacji defektów zlokalizowanych w stalowych elementach.

5. Metoda wibrometrii laserowej

Metoda wibrometrii laserowej jest metodą globalną, więc charakteryzuje się mniejszą czułością, ale umożliwia zbadanie dużej konstrukcji podczas jednego pomiaru [10]. Dokonuje się tu precyzyjnego pomiaru ruchu punktów na płaszczyźnie, na której są zlokalizowane, za pomocą zestawu trzech głowic (kamer), a specjalistyczne oprogramowanie na komputerze, do którego przesyłane są dane, pozwala dokonać obróbki sygnału pomiarowego (np. transformata Fouriera) [11], co przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Układ pomiarowy do wykrywania defektów z zastosowaniem wibrometrii laserowej

Synchronizacja wszystkich głowic bywa trudna i czasochłonna, dlatego metodę tę udoskonalono, poprzez zredukowanie kamer do jednej sztuki. Nową metodę o nazwie Cyfrowa Korelacja Obrazu omówiono w kolejnym punkcie.

Wibrometry umożliwiają analizę i wizualizację wszystkich rodzajów drgań strukturalnych [12].

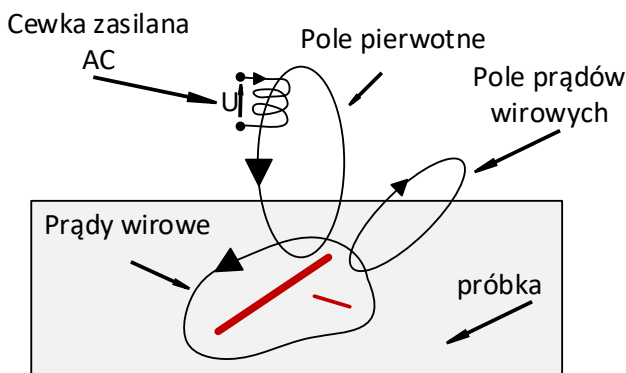
6. Metoda Cyfrowej Korelacji Obrazu

Metoda Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC) jest kolejną bezkontaktową metodą do wykrywania uszkodzeń stali. Działa na dwu lub trójwymiarowych układach

współrzędnych. Badanie polega na odpowiednim naświetleniu próbki i analizowaniu intensywności wiązki światła odbitego od jej powierzchni przed obciążeniem i po przyłożeniu siły. Pozwala wcześniej zidentyfikować defekty, gdyż działa na poziomie mikroskali [13]. Publikacja [14] opisuje możliwość zastosowania DIC w problemie związanym z drganiem konstrukcji budowlanych. Analiza w specjalistycznym oprogramowaniu przemieszczenia chmury punktów w kierunku x i y z łatwością uwidoczniła przypadek stalowej ramy uszkodzonej.

7. Metody prądów wirowych

W metodzie prądów wirowych (z ang. Eddy-Current Testing – ECT), wykorzystywane jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej. W analizowanym materiale dokonuje się pomiaru pola magnetycznego prądów wirowych. Istotne są zmiany pola magnetycznego, które można zaobserwować w momencie natrafienia na defekt (Rys. 3). Konieczny jest pomiar rozkładu indukcji magnetycznej.



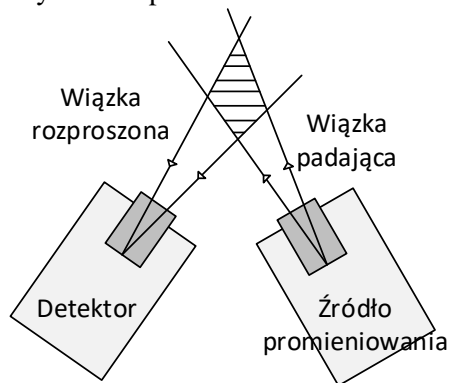
Rys. 3. Badanie materiału metodą ECT

Metoda ta jest bezkontaktowa, wykrywa pęknięcia rzędu μm oraz niemetaliczne wtrącenia, erozję, korozję. Można wykorzystać ją przy badaniach materiałów, przewodzących prąd elektryczny [1]. Publikacja [15] ukazuje użycie cewki typu 'Pancake' do znalezienia uszkodzenia zmęczeniowego stali nierdzewnej.

ECT nie jest jedyną metodą elektromagnetyczną, bowiem stosuje się również: metodę potencjałową (impedancyjną), metodę strumienia rozproszenia, metodę szumów Barkhausena, metodę terahercową, radiografię komputerową i cyfrową [17].

8. Metoda radiograficzna

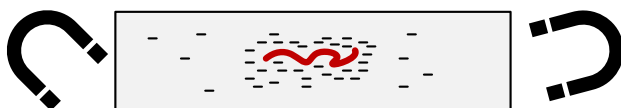
Metodę radiograficzną polega na naświetlaniu materiału promieniowaniem jonizującym (rentgenowskie lub gamma) i rejestracji prześwietlonego obrazu tego materiału. Powszechnie stosowana do wykrywania nieprawidłowości spawalniczych i zgrzewanych oraz uszkodzeń rur [1]. Publikacja [17] pokazuje szczególnie wykorzystanie tej metody do detekcji korozji w stali miękkiej, gdzie wykorzystano urządzenie rentgenowskie 150 kV do wykonywania zdjęć o rozdzielczości 50 μm . rysunek 4 przedstawia schemat takiego badania.



Rys. 4. Badanie materiału z wykorzystaniem promieniowania gamma

9. Metoda magnetyczno-proszkowa

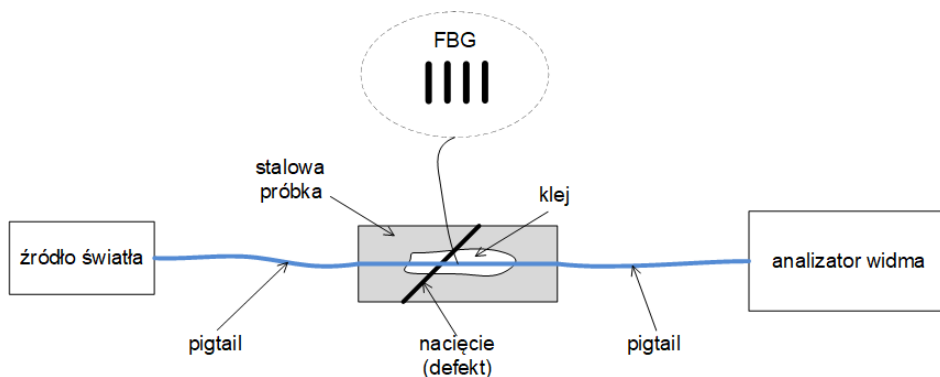
Kolejnymi metodami nieniszczącymi, wartymi opisaniami są badania magnetyczno-proszkowe, stosowane w przypadku materiałów ferromagnetycznych. Zasada wykorzystania tej metody polega na rozsypaniu elementu drobinami ferromagnetyku (lub cieczy z tymi drobinami). Kolejno przez przedmiot przepuszczany jest prąd elektryczny lub stosuje się dwa bieguny elektromagnesu [18]. Cząstki drobin skupiają się będą przy uszkodzeniu, jak na rysunku 5.



Rys. 5. Badanie materiału z wykorzystaniem drobinek ferromagnetycznych i dwóch biegunów magnesu

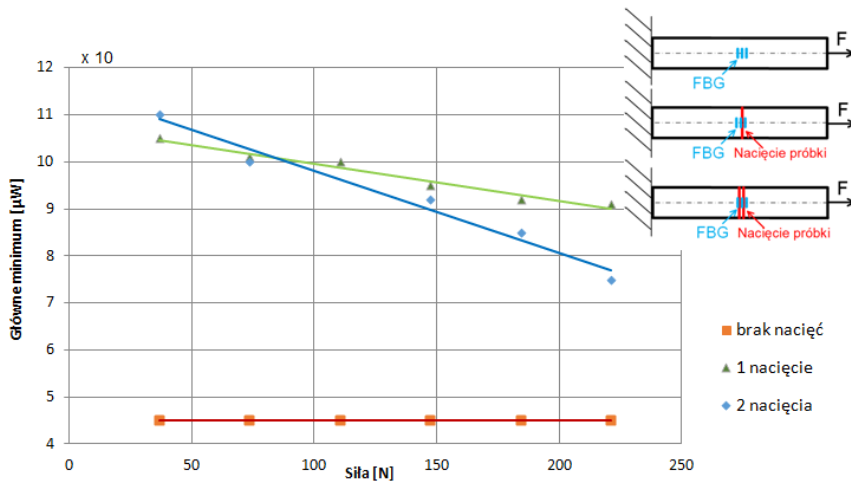
10. Metoda z wykorzystaniem FBG

Na możliwość pomiaru defektów z zastosowaniem FBG wewnątrz stalowych rurociągów, w których płynie ciecz pod ciśnieniem natrafiano w publikacji [19], co było jednocześnie inspiracją do przeprowadzenia poniższych badań. W niniejszym rozdziale przedstawiono system do wykrywania niejednorodności stali za pomocą światłowodowej siatki Bragga, która pozwala na wykrywanie defektów materiałowych poprzez jej naklejenie na badany materiał i wywołaniu jego wydłużeniu. Siatkę przykleja się w miejscu, gdzie podejrzewa się uszkodzenie materiału, ale z drugiej strony, czyli na tej, do której jest łatwy dostęp. Zaleca się stosowanie kleju epoksydowego, gdyż jego moduł Younga jest zbliżony do modułu Younga stali ($E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa). Jednorodna, prosta siatka o długości fali Bragga 1534 nm zostaje uprzednio wspawana między dwa pigtaile, zgodnie z rysunkiem 6. Jeden z nich jest doprowadzony do źródła światła (laser), zaś drugi do analizatora widma, na którym dokonuje się rejestracji widm. Nie powinno się wykorzystywać ponownie tej samej siatki do wykrywania defektu w innym miejscu, ponieważ klej wpłynąć może niekorzystnie na właściwości mechaniczne siatki, ściskając ją lub rozciągając, co obserwuje się na widmie jako wiele wstęg bocznych przy modzie głównym.

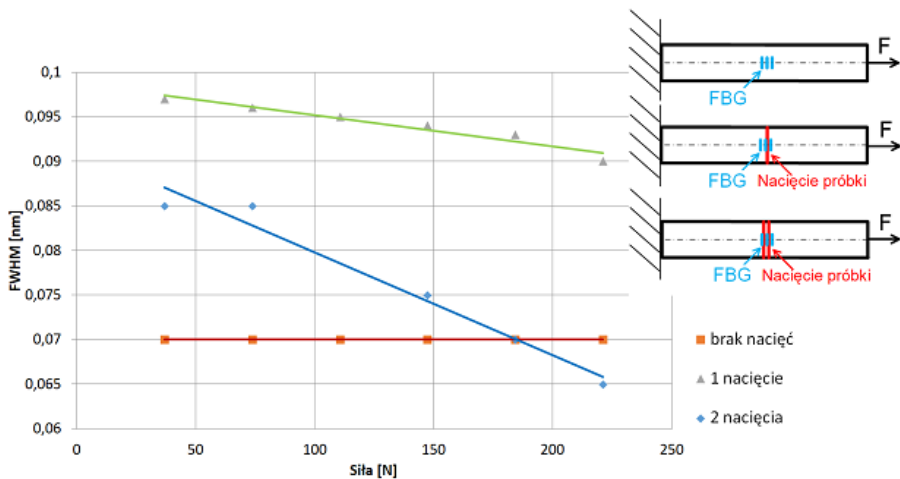


Rys. 6. Układ pomiarowy do wykrywania defektów z zastosowaną FBG

Badania polegały na przyklejeniu siatek do trzech próbek: jedna wzorcowa, druga miała jeden defekt w postaci rysy, a trzecia miała dwa takie defekty. Otrzymane widma, ukazujące przesunięcia długości fali wraz ze wzrostem przyłożonej siły, posłużyły wyznaczeniu charakterystyk przetwarzania: główne minimum i FWHM w zależności od przyłożonej siły (Rys. 7 i 8). W obu przypadkach otrzymuje się tą samą zależność, mianowicie dla próbki wzorcowej główne minimum i FWHM jest stałe, natomiast im więcej jest nacięć na metalowej próbce, tym główne minimum na charakterystyce transmisyjnej i FWHM od przyłożonej siły zmienia się znacznie.



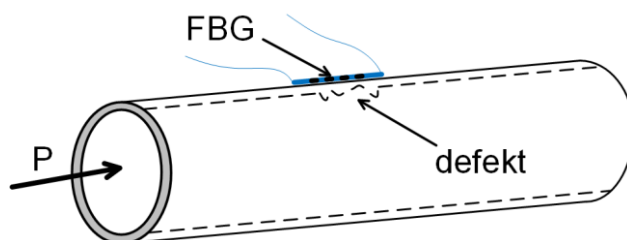
Rys. 7. Charakterystyka przetwarzania głównego minimum na charakterystyce transmisyjnej w miarę wydłużania (przykładania siły)



Rys. 8. Charakterystyka przetwarzania FWHM od przyłożonej siły

11. Zastosowanie

Prezentowany system można zastosować we wszelkiego rodzaju instalacjach ciśnieniowych, tj.: ropociągi, rurociągi, chłodnicze (HVAC), wodne, gazowe (Rys. 9). Zewnętrzna siła (np. ciśnienie wody) jest tu niezbędne, aby uzyskiwać zmiany na widmie. Jest to zaletą systemu, gdyż nie trzeba (a nawet nie można) wyłączać go z użycia podczas badań.



Rys. 9. Zastosowanie: FBG przymocowana do rury z defektem

12. Wnioski

Przeprowadzona analiza istniejących metod pozwala na stwierdzenie, iż nie istnieją metody do szybkiego wykrywania uszkodzeń stali w warunkach zakłóceń magnetycznych, elektrycznych, łatwopalnych i agresywnych chemicznie. Większość przedstawionych metod jest nieskuteczna do badania parametrów materiału w czasie rzeczywistym, bez wyłączenia z działania całego systemu. Zastosowanie światłowodu eliminuje powyższe problemy. Komercjalizacja FBG sprawi, że opracowana metoda będzie szybka, prosta i tania w zastosowaniu. Niewątpliwą wadą takiego systemu jest konieczność naklejenia siatki w miejscu lub poblizu uszkodzenia, a poprawne znalezienie miejsca uszkodzenia np. na wewnętrznej stronie rury jest trudnym zadaniem.

Literatura

- [1] Zientek P. *Non-destructive testing methods for selected elements of small power turbogenerators*, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problematyczne* 3, 115–120, 2016.
- [2] Oltra R., Chapey B., Renaud, L., *Abrasion–corrosion studies of passive stainless steels in acidic media: combination of acoustic emission and electrochemical techniques*, *Wear*, 533–541, 1995.
- [3] Ennaceur C., Laksimi A., Herve C., Cherfaoui M. *Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83, 197–204, 2006.
- [4] Bayray M. *Acoustic emission due to cyclic pressurisation of vessels with partially penetrated longitudinal seams*, EWGAE, 24th European conference on acoustic emission testing 175–181, 2000.
- [5] Ohtsuka N. Nakano M., Ueyama H., *Acoustic emission monitoring during rupture test of pressure vessels and laboratory fracture test*, *J. Pressure Vessel Technol.* 2, 191–199, 1981.
- [6] Pawlak M. *Zastosowanie analizy sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych*, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* 92, 199–204, 2011.

- [7] Jhang K. Y. *Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 10 (1), 23–135, 2009.
- [8] Tsuda H., Lee J. –R., Guan Y., Takatsubo J. *Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor*, Optical Fiber Technology 13(3), 209–214, 2007.
- [9] Tsuda H., Lee J. –R., Guan Y. *Fatigue crack propagation monitoring of stainless steel using fiber Bragg grating ultrasound sensors*, Smart Materials and Structures 15(5), 1429–1437, 2006.
- [10] Radziński M., Doliński Ł., Palacz M., Krawczuk M. *Lokalizacja uszkodzeń konstrukcji z wykorzystaniem skaningowego wibrometru laserowego*, PAK 56, 1059–1062, 2010.
- [11] Ćwikła A., Jurek M. *Zastosowanie bezdotykowych technik pomiarowych w analizie drgań*, Scientific Bulletin of Chełm Section of Mathematics and Computer Science 1, 2009.
- [12] Ehrhardt D. A., Allen M. S., Yang S., Beberniss T. J. *Full-field linear and nonlinear measurements using Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometry and high speed Three-Dimensional Digital Image Correlation*, Mechanical Systems and Signal Processing 86, 82–97, 2017.
- [13] Kowalewski Z., Dietrich L., Kopeć M., Szymczak T., Grzywna P. *Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych – budowa, działanie, zastosowania*, XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów: Zakopane, Poland, 2016.
- [14] Turoń B., Ziaja D., Miller B. *Wykrywanie uszkodzeń węzłów ramy stalowej z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu*, JCEEA 64, 185–195, 2017.
- [15] Oka M., Tsuchida Y., Yakushiji T., Enokizon M., *Fatigue Evaluation for a Ferritic Stainless Steel (SUS430) by the Eddy Current Method Using the Pancake-Type Coil*, IEEE Transactions on Magnetics 46 (2), 540–543, 2010.
- [16] Sikora R., Chady T., *Badania Nieniszczące Metodami Elektromagnetycznymi*, Przegląd Elektrotechniczny 92(9), 2016.
- [17] Priyada P., Margret M., Ramar R., Shivaramu, Menaka M., Thilagam L., Venkataraman B., Raj B. *Intercomparison of gamma scattering, gammatography, and radiography techniques for mild steel nonuniform corrosion detection*, Review of Scientific Instruments 82, 2011.
- [18] Onoszko K., *Metody stosowane w badaniach nieniszczących*, Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska 4a, 11–14, 2012.
- [19] Ciężczyk S., Kisała P., *Inverse problem of determining periodic surface profile oscillation defects of steel materials with a fiber Bragg grating sensor*, Applied Optics 55(6), 1412, 2016.

*Magdalena Michalska

Klasyfikacja zmian skórnych z obrazów dermatoskopowych

Streszczenie: Klasyfikacja wzorcowa obrazów dermatoskopowych polega na znalezieniu sposobu różnicowania między badanymi zmianami skórnymi. Za pomocą dermatoskopii cyfrowej jest diagnozowany czerniak złośliwy. Celem monografii jest przegląd wybranych dostępnych klasyfikatorów obrazów zmian skórnych. Monografia zawiera krótki opis klasycznych metod oceny zmian skórnych. Opisano również dostępne metody klasyfikacji za pomocą sztucznych sieci neuronowych. W podsumowaniu porównano skuteczność wybranych klasyfikatorów.

Słowa kluczowe: dermatoskopia, klasyfikatory, zmiany skórne

Classification of skin lesions from dermatoscopic images

Abstract: The standard classification of dermoscopic images consists in finding a way of differentiating between the examined skin lesions. Using digital dermatoscopy malignant melanoma is diagnosed. The aim of the monograph is to review selected available classifiers of skin lesions images. The monograph contains a short description of the classic methods for assessing skin lesions. The available classification methods are also described using artificial neural networks. The summary compares the effectiveness of selected classifiers.

Keywords: dermatoscopy, classifiers, skin lesions

1. Wstęp

Wielu dermatologów ocenia obrazy dermatoskopowe używając znanych metod klasyfikacji zmian skórnych. Należy do nich między innymi: metoda ABCD, metoda Menzies, skala 7–punktowa i klasyczna analiza wzorca i wiele innych. Jednak nie są to wystarczające metody do diagnozowania nowotwora. W związku z tym w ostatnim czasie, aby wspomóc lekarzy w procesie diagnostyki opracowano systemy CAD. Program CAD ma zautomatyzowany system, który może zapewnić niezawodność doświadczonym dermatologom. Użyte w programie obrazy poddawane są zazwyczaj 4 procesom [1–3]: usuwaniu artefaktów, segmentacji, użyciu skali ABCD, ekstrakcji i optymalizacji, a ostatecznie klasyfikacji zmiany skórnej. Najczęściej zmianą jest

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

charakteryzowana przez typ uszkodzenia, morfologię zmiany, kolor, rozmieszczenie, kształt, teksturę i nieregularność jej obramowania.





Obecnie do klasyfikacji zmian skórnych wykorzystuje się automatyczne rozpoznawanie zmian. Czerniak skóry klasyfikowany jest dzięki klasyfikatorowi *k*-najbliżsi sąsiedzi „*kNN*” [4]. Metody mają na celu zaklasyfikowanie danego znamienia do wzoru np. z teksturą barwną. Jako wzorec komponentów opracowano algorytm (ang. *anadaptive boosting multi-label learning algorithm*) używany w narzędziu AdaBoost.MC [5]. AdaBoost.MC uważana jest za rozwiniętą metodą dzięki maksymalnej optymalności i niezawodności. Zostały stworzone zautomatyzowane systemy anomalii masowych. Najbardziej aktualne metody w dziedzinie klasyfikacji czerniaka wykorzystują sztuczną inteligencję – sztuczne sieci neuronowe. Do najczęściej używanych należą sztuczne sieci neuronowe (ANN), regresja logistyczna, podjęcie decyzji przy użyciu drzew i maszyn wektorów pomocniczych (SVM).

2. Klasyczne zestawy wzorców i diagnostyczne

Do najbardziej znanych opracowanych przez lekarzy metod (skal) charakteryzujących badane znamiona dermatologiczne zaliczana jest klasyczna analiza wzorca, skala ABCD [6] (A (asymmetry) – asymetria; B (borders) – brzegi nierówne i postrzępione; C (color) – kolor różnorodny) czasem rozszerzana do postaci ABCDE (D (diameter) – średnica > 5 mm lub (dynamics) dynamika zmian morfologicznych w guzie; E (elevate) – uwypuklenie się zmiany ponad otaczający naskórek).

Na Rys.1 przedstawiony został przykład wykorzystania metody ABCD na obrazach dermatoskopowych. Pod uwagę zostały wzięte wszelkie ważne cechy zmiany. Zostały im przyznane odpowiednie ilości punktów według wzoru TDS. W zależności od ilości punktów przyznanej danej zmianie kwalifikuje się ją, jako łagodną czy zagrożoną występowaniem czerniaka skóry.

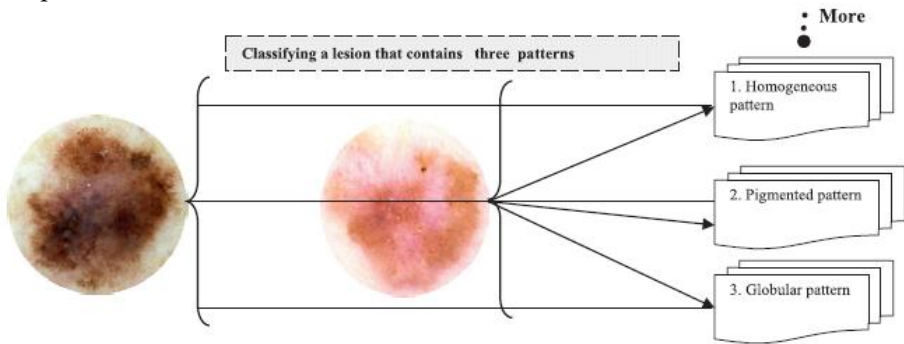
Dermatolodzy stosują również algorytm CASH. Zastosowanie automatycznego modelu CASH zostało przedstawione w [7–9]. Do pozostałych metod należy skala Huntera, skala Clarka i Breslowa, skala TNM, lista 3 punktów, lista 7 punktów, metoda Menzies. Jako klasyfikatorów używano również analizy dyskryminacyjnej [10] i drzew decyzyjnych [11].

Reguła	Obraz dermoskopowy	Cecha	Opis	Punktacja
A		Asymetria (kształt, kolor, struktury)	względem żadnej, jednej lub obu osi	0–2
B		Odgraniczenie	ostre lub nieostre w segmentach	0–8
C		Kolor	różne (biały, czerwony, jasno- i ciemnobrązowy, czarny, szaro-niebieski)	1–6
D		Struktury różnicujące	siatka, zatarcia struktury, kropki, ciałka barwnikowe, wypustki promieniste lub pseudopodia	1–5
Całkowita punktacja podsumowująca poszczególne cechy (TDS):		Interpretacja wyniku TDS (Total Dermoscopy Score)		
A = asymetria (asymmetry):	0–2×1,3	1,0–4,75: zmiana łagodna		
B = brzegi (border):	0–8×0,1	4,8–5,45: zmiana podejrzana, wymaga kontroli dermoskopowej		
C = barwy (colours):	1–6×0,5	co 3 miesiące lub wycięć chirurgicznie w całości		
D = struktury różnicujące (different):	1–5×0,5	5,46–8,9: zmiana wysoce podejrzana w kierunku czerniaka		

Rys. 1. Przykładowa skala ABCD zdiagnozowanych zmian skórnych

Źródło: Kamińska-Winciorek G., Śpiewak R., Podstawy dermoskopii zmian melanocytowych dla początkujących, Postępy Hig Med Dosw (online) 65, 501–508, 2011.

Na rysunku 2 przedstawiony został model klasyfikacji w oparciu o zautomatyzowany system [5]. Zawiera on klasyczne wzorce znane przez dermatologów dotyczące 3 wzorów tekstury. Na podstawie wielu danych wejściowych tworzone są klasy wzorców. Lekarze są bardziej przystosowani do systemu wizualnego (HVS) i rozpoznawania obiektów przy pomocy modeli decyzyjnych opartych na logicznych algorytmach rozpoznawania i znakowania detektorów. Algorytmy te zapewniają integralność etykiet z etykietami klasy, uszeregowane zgodnie z poziomem podobieństwa z największym prawdopodobieństwem.



Rys. 2. Automatyczna klasyfikacja wieloskładnikowego wzorca według klasycznych zestawów wzorcowych i diagnostycznych

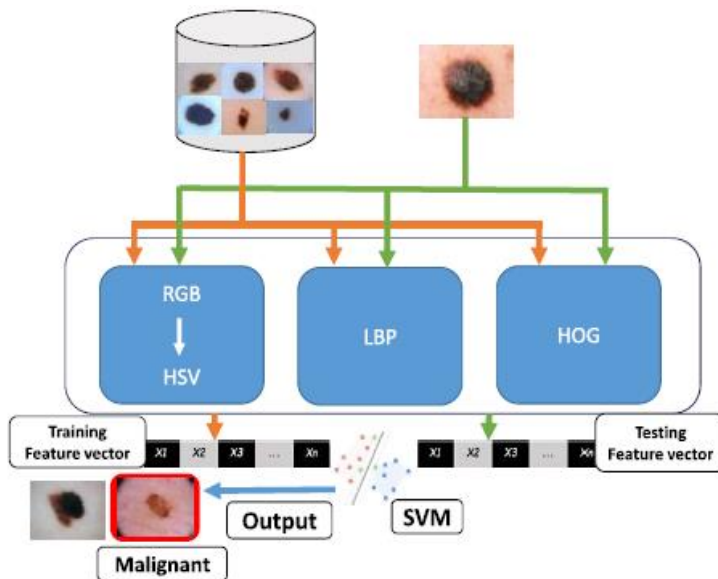
Źródło: Abbas Q., Celebi M. E., Serrano C., Fondo'n Garcí' I., Maa G., Pattern classification of dermoscopy images: A perceptually uniform model, Pattern Recognition 46, 86–97, 2013.

3. Nadzorowany algorytm uczenia maszynowego w klasyfikacji (SVM)

SVM (Support Vector Machine) to nadzorowany algorytm uczenia maszynowego, który może być używany zarówno w wyzwaniach klasyfikacji, jak i regresji. Jest jednak najczęściej używany w problemach z klasyfikacją. W tym algorytmie kreślimy każdy element danych, jako punkt w n -wymiarowej przestrzeni (gdzie n jest liczbą posiadanych cech), a wartość każdej cechy jest wartością konkretnej współrzędnej. Następnie wykonujemy klasyfikację, znajdując hiperpłaszczyznę, która najlepiej różnicuje dwie klasy.

W [11] metoda klasyfikacji została oparta na cechach koloru, tekstury i kształtu czerniaka. Proponowany model wykorzystuje HSV, LBP i funkcje HOG, takie jak: kolor, tekstura i kształt. Te funkcje są podawane do klasyfikatora SVM w celu klasyfikacji. Proces ekstrakcji funkcji został podzielony na trzy części: cechy kolorów, cechy tekstury i funkcji kształtu. Następnie wektor cech wszystkich tych trzech cech został złączony w celu uzyskania złożonego wektora

cech. Proces powtarza się dla wszystkich obrazów w zbiorze danych i cechy wektora są oznaczone zgodnie z ich przyjętymi klasami. Oznakowane wektory cech są podawane do klasyfikatora SVM, aby efektywnie trenować maszynę. W testach wszystkie funkcje są wyodrębniane z nowego obrazu i wektor cech jest podawany do SVM by przewidzieć klasę. Schemat opisanych działań przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat działań przy wykorzystaniu SVM w klasyfikacji obrazów dermatoskopowych.

Źródło: Shahid M., Khan S., Dermoscopy images classification based on color, texture and shape features using SVM, The 3rd International Conference on Next Generation Computing (INC GC2017b), 243–245, 2017.

Wyodrębniono trzy rodzaje funkcji: funkcję koloru, tekstury i kształtu. Kolor może odgrywać znaczącą rolę w rozpoznawaniu i klasyfikacji raka skóry czerniaka. Wyróżnia się liczne przestrzenie kolorów, każdy model kolorów ma swoje własne cechy. Z dermatoskopu dostajemy obrazy modelu RGB, który to model wynika z właściwości odbiorczych ludzkiego oka, wrażenie widzenia dowolnej barwy można wywołać przez zmieszanie wiązek światła o barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej. W części prac model koloru RGB zamieniany jest na HSV. Model kolorów HSV daje odporność na światło w zmianach, gdyż odnosi się do odcienia jaki ma dany kolor, a nasycenie jest mieszaniną bieli z tym kolorem.

Cechy tekstury odgrywają ważną rolę, dzięki czemu powstało wiele algorytmów klasyfikacji i dopasowania. Operator LBP (lokalny wzór binarny) obliczany jest w lokalnym obszarze kołowym, przyjmując różnicę pomiędzy centralnym pikselem a sąsiednimi. LBP sprawdza każdy piksel sąsiada z szacunkiem centralnego piksela. Jeśli wartość sąsiedniego piksela jest większa lub równa wartości piksela centralnego to należy umieścić 1 w porównywanej lokalizacji okna maski. Jeśli natomiast wartość sąsiadującego piksela nie jest tak duża jak wartość piksela centralnego umieszczane jest 0 w porównywanym obszarze maski okna. W tym momencie mnożymy wartości w masce okna z odpowiednimi wartościami wag okna. Następnie histogram wszystkich tych danych podano, jako funkcje tekstury.

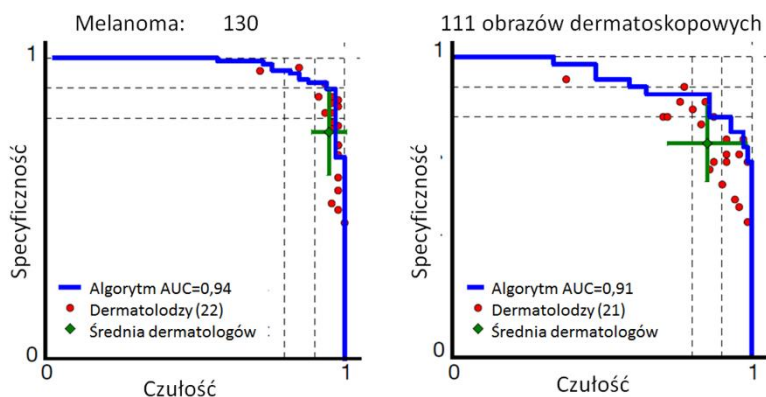
Kolejnymi realizowanymi funkcjami są funkcje odpowiedzialne za rozpoznanie i określenie kształtu zmiany. Dostępne są funkcje gradientów zorientowanych na histogramie (HOG) używanych, jako element kształtu. HOG to popularny globalny deskryptor używany do wykrywania obiektów. W ocenie eksperymentalnej liczne warianty HOG są badane z różnymi powiązaniem przestrzennymi, obliczeniami gradientowymi i różnymi technikami normalizacji. HOG to solidna technika, która pozwala na ekstrakcję cech opisujących każdy piksel w ROI obrazu bazowego. Kryteria wdrożenia HOG można osiągnąć przez podzielenie obrazu na jego mały przestrzenny wycinek. Oblicza się gradient i wielkość wszystkich komórek rozpatrywanych, jako cechy kształtu. Po wyodrębnieniu wszystkich kolorów, tekstur i kształtów łączy się je w jeden wektor cech. W [12] również wykorzystano klasyfikację SVM. Schemat działań obejmował wybór bazy danych, detekcję krawędzi, ekstrakcję cech, model selekcji i model klasyfikacji.

Nadzorowany algorytm uczenia maszynowego w klasyfikacji (SVM) ma bardzo szerokie zastosowanie dzięki solidnym podstawom teoretycznym i wynikom praktycznym [13]. Maszyny SVM mają kilka zalet w porównaniu z bardziej klasycznymi klasyfikatorami, takimi jak drzewa decyzyjne i sieci neuronowe. Wsparcie szkolenia wektorowego polega głównie na optymalizacji, dlatego nie ma ryzyka utknięcia w lokalnym minimum, jak w przypadku propagacji wstecznej sieci neuronowych. Algorytmy uczenia się implementują empiryczną minimalizację ryzyka (ERM), która minimalizuje błąd w danych treningowych. SVM opierają się na strukturalnej zasadzie minimalizacji ryzyka (SRM), która minimalizuje górną granicę na błąd generalizacji. Dlatego maszyny SVM są mniej podatne na przeładowanie w porównaniu z algorytmami, które implementują zasadę ERM, taką jak sieci neuronowe propagacji wstecznej. Kolejną zaletą maszyn SVM jest to, że zapewniają ujednoczoną strukturę.

4. Klasyfikatory oparte o sztuczne sieci neuronowe

4.1. Splotowa sieć neuronowa (CNN)

Klasyfikacja zmian skórnych umożliwiającą identyfikację najczęstszych nowotworów za pomocą sieci neuronowej CNN (ang. convolutional neural network) została użyta w [14]. Sieć została trenowana bezpośrednio z zestawu danych 129 450 obrazów klinicznych, używając tylko pikseli i etykiet chorób jako danych wejściowych. Efekty zostały zestawione z diagnozami certyfikowanych dermatologów, potwierdzonych biopsją zmiany. Użyto w tym celu obrazów klinicznych z dwiema krytycznymi klasyfikacjami, a diagnozowanymi przypadkami były raki keratynocytów, łagodne łojotoki, rogowacenia, czerniaki złośliwe i łagodne znamiona skórne. CNN osiąga wydajność na równi ze wszystkimi sprawdzonymi ekspertami w obu zadaniach. Wykorzystany algorytm demonstruje możliwości sztucznej inteligencji w klasyfikacji raka skóry na poziomie kompetencji porównywalnym z dermatologami (Rys. 4).



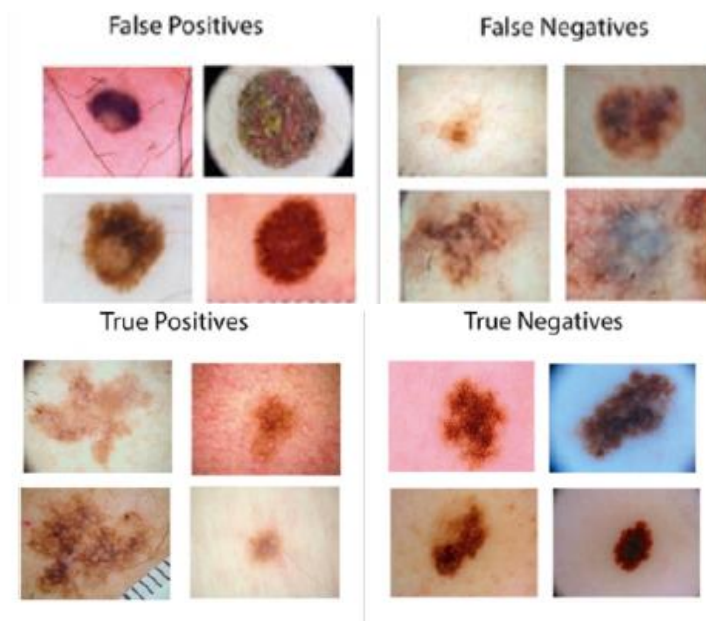
Rys. 4. Skuteczność klasyfikacji sieci neuronowych CNN i lekarzy dermatologów

Źródło: Esteva A., Kuprel B., Novo R. A., Ko J., Swetter S. M., Bla H. M, Thrun S., Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks, NATURE 542, 115-118, 2017.

Dla każdego testu obrazy zostały potwierdzone przez biopsję, została określona wrażliwość, czułość i specyficzność. Podczas testów dermatolog wydawał pojedynczą diagnozę, co jest reprezentowane przez pojedynczy czerwony punkt. Na Rys. 5 zielone punkty to średnia dermatologów dla każdego zadania. AUC (wrażliwość) jest miarą wydajności, z maksymalną wartością równą 1. CNN osiąga lepsze wyniki wydajności niż dermatolog, wynik średni dermatologów znajduje się poniżej niebieskiej krzywej. Nieznaczny spadek

wydajności odzwierciedla różnice w stopniu trudności badanych obrazów, a nie dokładność badania wzrokowego i dermoskopowego.

W analizowano także skuteczność, wrażliwość i specyficzność uczenia się CNN, wykazuje on wiarygodną klasyfikację nowotworów, gdy jest testowany na większym zestawie danych. CNN przetestowany został na większej liczbie obrazów, aby wykazać się solidnością i niezawodnością w klasyfikacji raka. Krzywe CNN są gładze dzięki większemu zestawowi danych testowych. Na rysunku 5 przedstawione zostały przykłady obrazów zakwalifikowanych przez klasyfikator jako: *true positive*, *false positive*, *true negative*, *false negative* [15].



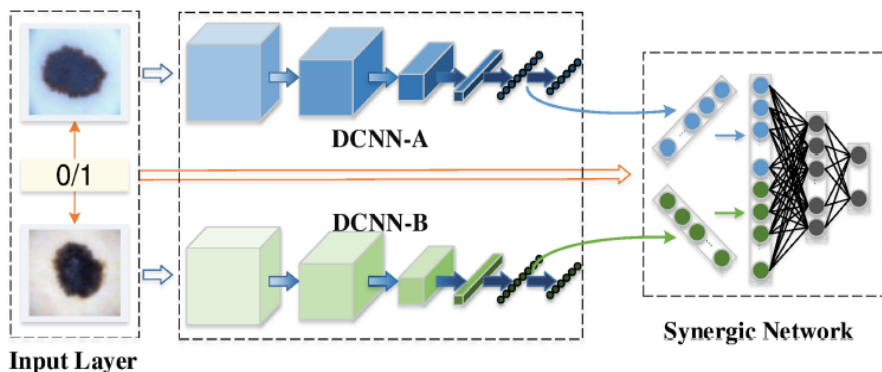
Rys. 5. Przykłady zdiagnozowanych zmian skórnych.

Źródło: Lopez A. R, Giro-i-Nieto X., Burdick J., Marques O., Skin lesion classification from dermoscopic images using deep learning techniques, Proceedings of the IASTED International Conference Biomedical Engineering (BioMed 2017), 20 – 21, 2017.

4.2. Głęboka splotowa sieć neuronowa (DCNN)

W [16] zaproponowany został synergiczny model głębokiego uczenia się (SDL), który wykorzystuje podwójne głębokie splotowe sieci neuronowe (DCNN), ale także umożliwia im wzajemne uczenie się od siebie. DCNN (ang. deep convolutional neural network) składa się z wielu warstw sieci neuronowej. Zwykle występują dwa różne typy warstw: splotowy i łączący. Proponowany model SDL (Rys. 6) składa się z trzech modułów: warstwy

wejściowej, podwójnych komponentów DCNN (DCNN-A / B) i sieci synergicznej. Warstwa wejściowa pobiera parę obrazów jako dane wejściowe. Każdy komponent DCNN służy do samodzielnej nauki pod nadzorem etykiet klasy. Sieć synergiczna sprawdza, czy para obrazów wejściowych należy do tej samej kategorii i przekazuje informacje zwrotne.



Rys. 6. Architektura proponowanego modelu SDL, który ma warstwę wejściową, podwójny DCNN komponenty (DCNN-A/B) i sieć synergiczna.

Źródło: Zhang J., Xie Y., Wu Q., Xia Y., Skin lesion classification in dermoscopy images using synergic deep learning, Springer Nature LNCS 11071,12–20, 2018.

5. Skuteczność klasyfikatorów

Wartościami opisującymi zdolność testu do poprawnego wykrycia badanej cechy jest czułość testu diagnostycznego, natomiast wykrycia jej braku nazywana jest swoistością tego testu. Czułość określana jest jako stosunek wyników prawdziwie dodatnich (Ntp) do sumy prawdziwie dodatnich (Ntp) i fałszywie ujemnych (Nfn). Czułość (SE) równa 100% oznacza, że wszystkie zmiany charakterystyczne dla stanu choroby zostały rozpoznane. Swoistość (SP) testu to stosunek wyników prawdziwie ujemnych (Ntn) do sumy prawdziwie ujemnych i fałszywie dodatnich (Nfn). Wynik dla testu swoistości równy 100% oznaczałby, że wszyscy ludzie zdrowi w wykonanym teście diagnostycznym zostali rozpoznani, jako zdrowi. Oblicza się również dokładność (AC) testu diagnostycznego.

$$E = \frac{Ntp}{Ntp+Nfn} \quad (1)$$

$$SP = \frac{Ntn}{Ntn+Nfp} \quad (2)$$

$$AC = \frac{Ntp+Ntn}{Ntp+Nfp+Nfn+Ntn} \quad (3)$$

gdzie: N to liczba występujących w teście diagnostycznym przypadków;
true positive (Ntp) liczba prawidłowo przewidywanych zmian złośliwych;
false positive (Nfp) liczba nieprawidłowo przewidywanych zmian złośliwych;
true negative (Ntn) liczba prawidłowo przewidywanych zmian łagodnych;
false negative (Nfn) liczba nieprawidłowo przewidywanych zmian łagodnych.

Wielu naukowców [17] testuje na różnych danych skuteczność dostępnych lub zmodyfikowanych przez siebie klasyfikatorów. Wyniki klasyfikacji z wykorzystaniem różnych klasyfikatorów opartych o model Xanthous i model Caucasians przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Wyniki klasyfikacji z wykorzystaniem różnych klasyfikatorów opartych o model Xanthous i model Caucasians

Klasyfikator	Czułość		Specyficzność		Dokładność	
	CAUCASI ANS	XANTH OUS	CAUCASI ANS	XANTHO US	CAUCAS IANS	XANTH OUS
Random forests	73,33	80,00	95,83	96,25	88,33	90,83
KNN	51,67	77,50	97,50	96,25	82,22	90,00
Adaboost	71,67	80,00	95,83	92,50	87,78	88,33
RBF SVM	75,00	87,50	94,17	93,50	87,78	91,67
S – SVM	75,00	85,00	93,33	91,25	87,22	89,17
[18]	63,33	65,00	84,17	95,00	77,22	85,00
[19]	73,33	70,00	89,17	96,25	83,89	87,50
[17]	83,33	95,00	95,00	93,75	91,11	94,17

Źródło: Xie F., Fan H., Li Y., Jiang Z., Meng R., Bovik A., Melanoma classification on dermoscopy images using a neural network ensemble model, IEEE Transactions on Medical Imaging, 36(3), 849–858, 2017.

Na skuteczność klasyfikatora ma wpływ wybór segmentacji obrazów wejściowych. Również duże znaczenie ma ilość obrazów wejściowych, na których klasyfikator może pracować. W [12] porównano wyniki segmentacji i skuteczności klasyfikatorów medycznych. Tabela 2 przedstawia podsumowanie prac dotyczących segmentacji i klasyfikacji obrazów dermatoskopowych.

Tabela 2. Podsumowanie prac dotyczących segmentacji i klasyfikacji obrazów dermatoskopowych

Źródło	Rodzaj segmentacji	Klasyfikator	Ilość obrazów	Czułość	Specyficzność
[20]	Progowanie	NR	246	100	84
[21]	Progowanie+klastery kolorów	kNN	5363	73	89
[22]	Progowanie	ANN	58	77	75
[23]	Detekcja krawędzi	CART	147	93	93
[24]	NONE	Kilka klasyfikatorów	40	100	91
[25]	NR	S – SVM	152	81	74
[26]	Progowanie+rozrost reginów	ANN	319	87	90
[27]	NR	Regresja logiczna	837	88	83
[28]	Półautomatyczna +manualna	Regresja logiczna	2430	91	65

Źródło: Celebi M.E., Kingravi H.A., Uddin B., A methodological approach to the classification of dermoscopy images, *Computerized Medical Imaging and Graphics* 31(6), 362–373, 2007.

6. Podsumowanie

Metody klasyfikacji skóry opierają się o złośliwe lub łagodne zmiany skórne. Klasyfikację rozpoczyna się od identyfikacji funkcji opisowych, w tym kolorów i tekstur, nawet cech granicy uszkodzenia. W praktyce klinicznej występują obrazy zawierające duże i niekompletne obrazy zmian skórnych. Większym niepowodzeniem kończą się systemy klasyfikacji oparte na wspólnych cechach kształtu. W metodach klasyfikacji istotne jest by nie były nadwrażliwe na uszkodzenia zmiany, wykorzystane były do wyeliminowania mniej istotnych lub zaszumionych funkcji, zmniejszały wymiar funkcji i wybierały optymalny zestaw funkcji.

By jeszcze bardziej zwiększyć wydajność klasyfikacji można zastosować sztuczny zespół sieci neuronowych. W eksperymentach weryfikacja ekstrakcji, redukcji cech, klasyfikacja i wydajność została przetestowana przy użyciu FNN, Random forest, KNN, Gentle Adaboost, dwóch metod SVM. Wymienione metody testuje się na różnych zestawach danych pochodzących z całego świata. Wyniki eksperymentalne zdecydowanie sugerują, że proponowane cechy granicy uszkodzenia są szczególnie korzystne dla odróżnienia złośliwych od łagodnych zmiany skórnych. Wyposażone w oprogramowanie z klasyfikatorami, urządzenia mobilne mogą potencjalnie rozszerzyć zasięg dermatologów poza kliniką.

Przewiduje się, że powstanie wiele aplikacji na smartfony do 2021 r. [29], co może potencjalnie zapewniać tani i uniwersalny dostęp do niezbędnej opieki diagnostycznej. Wyniki klasyfikacji dostarczone przez testowane modele z biegiem lat okazują się bardziej dokładne w procesie diagnostyki zmian skórnych.

Literatura

- [1] Capdehourat G., Corez A., Bazzano A., Alonso R., Muse P. *Toward a combined tool to assist dermatologists in melanoma detection from dermoscopic images of pigmented skin lesions*, Pattern Recognition Letters 32 (16), 2187–2196, 2011.
- [2] Celebi M. E., Kingravi H. A., Uddin B. *A methodological approach to the classification of dermoscopy images*, Computerized Medical Imaging and Graphics 31(6), 362–373, 2007.
- [3] Safi A., Baust M., Pauly O., Castaneda V., Lasser T., Mateus D. *Computer – aided diagnosis of pigmented skin dermoscopic images, medical content – based retrieval for clinical decision support*, Lecture Notes in Computer Science 7075, 105–115, 2012.
- [4] Burrioni M., Corona R., Dell’Eva G., Sera F., *Melanoma computer –aided diagnosis reliability and feasibility study*, Clinical Cancer Research 10(6) 1881–1886, 2004.
- [5] Abbas Q. , Celebi M. E., Serrano C., Fondo’n Garcí’ I., Maa G. *Pattern classification of dermoscopy images: A perceptually uniform model*, Pattern Recognition 46, 86–97, 2013.
- [6] Kamińska-Winciorek G., Śpiewak R. *Podstawy dermoskopii zmian melanocytowych dla początkujących*, Postepy Hig Med Dosw 65, 501–508, 2011.
- [7] Sadeghi M., Razmara M., Lee T.K. *Atkins M.S., A novel method for detection of pigment network in dermoscopic images using graphs*, Computerized Medical Imaging and Graphics 3, 5137–143, 2011.
- [8] Serrano C., Acha B., *Pattern analysis of dermoscopic images based on markov random fields*, Pattern Recognition 42, 1052–1057, 2009.
- [9] A. Green, N. Martin, G. McKenzie, J. Pfitzner, F. Quintarelli, B. W. Thomas, M. O’Rourke, N. Knight, *Computer image analysis of pigmented skin lesions*, Melanoma Research 1(4), 231–236, 1991.
- [10] P. Kahofer, R. Hofmann–Wellenhof , J. Smolle, *Tissue counter analysis of dermatoscopic images of melanocytic skin tumours: preliminary findings*, Melanoma research 12 (1), 71–75, 2002.
- [11] Shahid M., Khan S., *Dermoscopy Images classification based on color, texture and shape features using SVM*, The 3rd International Conference on Next Generation Computing (INC GC2017b), 243–245, 2017.
- [12] Celebi M. E., Kingravi H. A., Uddina B., Iyatomi H., Alp Aslandogana Y., Stoecker W. V., Moss R. H. *A methodological approach to the classification of dermoscopy images*, Comput Med Imaging Graph. 31 (6), 362–373, 2007.
- [13] Codella N., Cai J., Abedini M., Garnavi R., Halpern A., Smith J. R. *Deep Learning, Sparse Coding, and SVM for Melanoma Recognition in Dermoscopy Images*, Machine Learning in Medical Imaging, Munich, Springer, 118–126, 2015.

- [14] Esteval A., Kuprel B., Novo R. A., Ko J., Swetter S. M., Bla H. M., Thrun S., *Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks*, Nature 542, 115–118, 2017.
- [15] Lopez A. R., Giro-i-Nieto X., Burdick J., Marques O. *Skin lesion classification from dermoscope images using deep learning techniques*, Proceedings of the IASTED International Conference Biomedical Engineering (BioMed 2017), 20 – 21, 2017.
- [16] Zhang J., Xie Y., Wu Q., Xia Y., *Skin lesion classification in dermoscopy images Using Synergic Deep Learning*, Springer Nature LNCS 11071,12–20, 2018.
- [17] Xie F., Fan H., Li Y., Jiang Z., Meng R., Bovik A., *Melanoma classification on dermoscopy images using a neural network ensemble model*, IEEE Transactions on Medical Imaging 36 (3), 849–858, 2017.
- [18] 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 Syst. J. 8 (3), 965–979, 2014.
- [19] Barata C., Celebi M. E., Marques J. S., *Improving dermoscopy image classification using color constancy*, IEEE J. Biomed. Health Inform. 19 (3), 1146–1152, 2015.
- [20] Elbaum M., Kopf A. W., Rabinovitz H. S., Langley R. G., Kamino H., Mihm Jr M. C. *Automatic differentiation of melanoma from melanocytic nevi with multispectral digital dermoscopy: A feasibility study*, J Am Acad Dermatol. 44(2), 207–18, 2001.
- [21] Ganster H., Pinz A., Rohrer R., Wildling E., Binder M., Kittler H., *Automated melanoma recognition*, IEEE Trans Med Imaging 20(3), 233–239, 2001.
- [22] Hintz-Madsen M., Hansen L. K., Larsen J., Drzewiecki K. T., *A probabilistic neural network framework for detection of malignant melanoma*, Artificial neural networks in cancer diagnosis, prognosis, and patient management, Boca Raton CRC Press 141–83, 2001.
- [23] Rubegni P., Burrioni M., Cevenini G., Perotti R., Dell’Eva G., Barbini P. *Digital dermoscopy. Analysis and artificial neural network for the differentiation of clinically atypical pigmented skin lesions: A retrospective stud*, J Invest Dermatol 119(2), 471–474, 2002.
- [24] Kahofer P. Hofmann-Wellenhof R., Smolle J., *Tissue counter analysis of dermoscopic images of melanocytic skin tumors: Preliminary findings*, Melanoma Res 12(1), 71–75, 2002.
- [25] Sboner A., Eccher C., Blanzieri E., Bauer P., Cristofolini M., Zumiani G., *A multiple classifier system for early melanoma diagnosis*, Artif Intell Med 27(1), 29–44, 2003.
- [26] Iyatomi H., Oka H., Saito M., *Quantitative assessment of tumour extraction from dermoscopy images and evaluation of computer-based extraction methods for an automatic melanoma diagnostic system*, Melanoma Res, 16(2), 183–190, 2006.
- [27] Blum A., Luedtke H., Ellwanger U., Schwabe R., Rassner G., Garbe C. *Digital image analysis for diagnosis of cutaneous melanoma. development of a highly effective computer algorithm based on analysis of 837 melanocytic lesions*, Br J Dermatol. 151(5), 1029–1038, 2004.
- [28] Menzies S. W., Bischof L., Talbot H., Gutenev A., Avramidis M., Wong L., *The performance of SolarScan: An automated dermoscopy image analysis instrument for the diagnosis of primary melanoma*, Arch Dermatol 141(11), 1388–1396, 2005.
- [29] Cerwall, P., E. M. Ericssons *mobility report* <https://www.ericsson.com/res/docs/2016/ericsson-mobility-report-2016.pdf>, 2016.

*Monika Mańko

Analiza fraktalna i jej parametry stosowane w dermatologii

***Streszczenie:** W artykule podjęta została tematyka analizy fraktalnej w diagnostyce dermatologicznej. Przedstawiono także skróconą charakterystykę parametrów fraktalnych, metody ich oznaczania.*

Słowa kluczowe: fraktal, analiza fraktalna, dermatologia

Fractal analysis and its parameters used in dermatology

***Abstract:** In the paperwork the fractal analysis in the dermatology diagnosis has been studied. The abbreviated characteristics of the fractal parameters, methods of its determination was also presented.*

Keywords: fractal, fractal analysis, dermatology

1. Wstęp

Powszechnie przyjęta definicja fraktali określa je jako obiekty samopodobne w każdej skali. Ze względu na różnorodność przyjmowanych form, nie formułuje się definicji jednoznacznie wyrażającej pojęcie fraktali. Fraktale w kojarzeniu potocznym zwykle łączą postrzeganie obrazu jako obiektu o chaotycznej i ogólnie uporządkowanej strukturze. Wiadomo również, że do zbioru tego zalicza się obiekty o skomplikowanej strukturze, trudnej do opisanego za pomocą równań geometrii euklidesowej.

Termin fraktal (z łac. fractus – połamany) został wprowadzony przez Benoit Mandelbrota jako określenie służące do opisanego obiektów o nieregularnych kształtach. Już w XIX wieku Cantor podejmował próby analizy obiektów wymykających się klasycznej geometrii.

Większość ze znamion dermatologicznych posiada nieregularny kształt, który jest wręcz niemożliwy do przeanalizowania gołym okiem, dlatego analiza fraktalna wydaje się być odpowiednim narzędziem do mierzenia nieregularności powierzchni.

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

2. Parametry analizy fraktalnej

Wprowadzenie matematycznej definicji wymiaru fraktalnego udało się w 1919 roku Felixowi Hausdorffowi oraz Abramowi Besicovitchowi [1]. Jak wynika z definicji Mandelbrota, fraktal to zbiór, którego wymiar Hausdorffa–Besicovitcha znacznie przewyższa wymiar topologiczny [2].

Z matematycznego punktu widzenia wymiar topologiczny D_t zawsze przyjmuje wartości całkowite. Do dalszej analizy należy przyjąć uproszczenie, iż zbiór punktów tworzących linię posiada wymiar topologiczny równy 1, natomiast wymiar topologiczny powierzchni zawsze wynosi 2. Należy jednak zwrócić uwagę, że posługiwanie się wyłącznie wymiarem topologicznym nie umożliwia precyzyjnego rozróżniania figur geometrycznych. Stopień złożoności różnego rodzaju obiektów i procesów można określić za pomocą wymiaru fraktalnego D_H [3].

Jednym ze sposobów uzyskania przybliżonej wartości wymiaru fraktalnego, zwanego inaczej wymiarem Hausdorffa, jest wymiar samopodobieństwa, definiowany następującym wzorem:

$$D_s = \frac{\log N(F)}{\log \frac{1}{\varepsilon}},$$

gdzie:

$N(F)$ – minimalna liczba obiektów wymaganych do pokrycia danej struktury geometrycznej,

ε – średnica obiektów pokrywających tę strukturę [4].

Należy również przyjąć założenie, że dla figur pokrywających o wielkości ε istnieje pewna minimalna liczba figur potrzebnych do pokrycia struktury F , oznaczona jako:

$$N_\varepsilon(F) = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{-D_s}$$

Im mniejsza jest średnica ε obiektów pokrywających daną strukturę, tym dokładniejsza jest wartość wymiaru d .

Obliczanie wartości wymiaru fraktalnego dla małych ε jest możliwe poprzez wymiar pojemnościowy, zwany również wymiarem Kołmogorowa [5]. Jest to szczególny przypadek wymiaru pudełkowego, definiowanego wzorem:

$$D_p = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N_\varepsilon(F)}{\log \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}$$

W rzeczywistości obiekty fraktalne definiowane są poprzez swoje właściwości strukturalne, głównie przez chropowatość. Równie istotny jest wymiar fraktalny oraz samopodobieństwo.

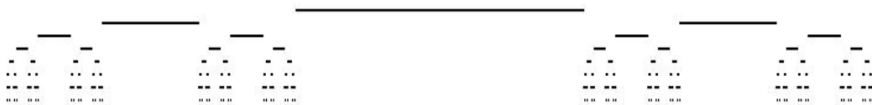
Pierwszy opis samopodobieństwa zaprezentowany został przez Mandelbrota w pracy [2]. Naukowiec zauważył, że istnieją obiekty, które składają się z kopii samych siebie. Niezależnie od powiększenia, dany fragment obiektu jest podobny do jego nieco większej części. Mandelbrot nazwał te obiekty fraktalami, a niecałkowite wymiary Hausdorffa tych obiektów przekraczają wartości wymiarów topologicznych. Do najbardziej znanych przykładów obiektów fraktalnych należy zbiór Cantora, krzywa Kocha oraz trójkąt Sierpińskiego.

Zbiór Cantora jest deterministycznym obiektem fraktalnym, skonstruowanym najwcześniej, jako zbiór wszystkich liczb rzeczywistych z przedziału $[0, 1]$ przyjmujących postać:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{3^i}$$

gdzie $a_i \in \{0, 2\}$.

W ujęciu klasycznym zbiór Cantora jest podzbiorem domkniętego przedziału: $C_0 := [0, 1]$ liczb rzeczywistych. Konstrukcja tego zbioru wygląda następująco: odcinek $[0, 1]$ dzieli się na 3 równe części i usuwa część środkową, (bez końców). Następnie 2 pozostałe odcinki dzieli się na 3 równe części i znów usuwana jest z nich część środkowa. W klasycznej konstrukcji zbioru Cantora wybiera się zbiory C_n w taki sposób [2], że każdy z nich jest sumą $2n$ rozłącznych domkniętych odcinków o długości $\left(\frac{1}{3}\right)^n$. Możliwa jest także modyfikacja tej konstrukcji poprzez wybór zbiorów C_{n+1} , a następnie wyrzucenie środkowych części odcinków tworzących C_n . W takim przypadku długość odcinków wyrzuconych może być różna od $1/3$ długości odcinków dzielonych. Nie jest możliwe dokładne narysowanie zbioru Cantora, ponieważ całkowita długość odcinków zmierza do zera, gdy rośnie n [6, 7].



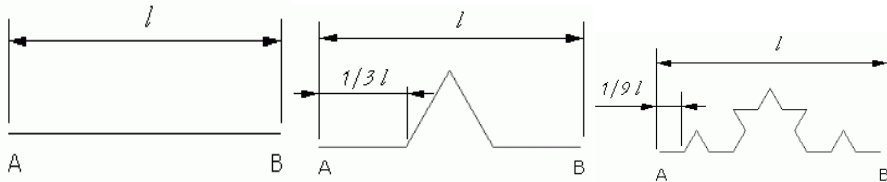
Rys. 1. Etapy alternatywnej konstrukcji zbioru Cantora [8]

Wymiar fraktalny klasycznego zbioru Cantora wynosi:

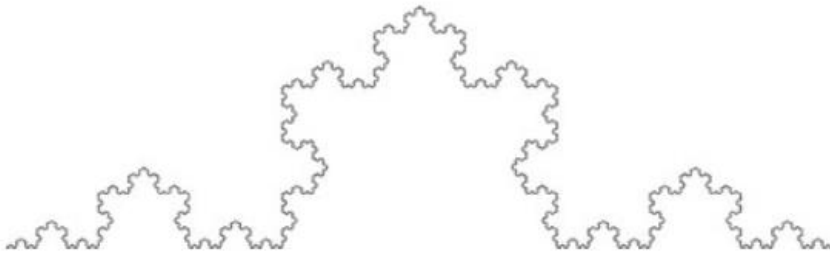
$$\frac{\ln 2}{\ln 3} = 0,630929754$$

Krzywa Kocha, podobnie jak omówiony w poprzednim rozdziale zbiór Cantora, również posiada cechę samopodobieństwa. Twórca krzywej wykazał za jej pomocą, że funkcje, które nie są różniczkowalne, mogą jednocześnie istnieć w ujęciu geometrycznym [6]. Krzywa Kocha to granica ciągu linii łamanych, jest nieskończenie długa, ale mieści się na skończonej powierzchni. Powstaje w wyniku operacji wykonywanych początkowo na tzw. inicjatorze. Rysunek 2 przedstawia sposób tworzenia krzywej.

Inicjator dzielony jest na 3 równe części, po czym w miejsce części środkowej jest wstawiany trójkąt równoboczny o boku równym długości jednej części. Potem usuwana jest jego podstawa, w konsekwencji czego powstaje figura składająca się z 4 odcinków – generator (krok 1). Krzywa Kocha w kroku drugim zawiera 16 odcinków, w trzecim – 64, i tak dalej [8].



Rys. 2. Poszczególne etapy tworzenia krzywej Kocha: krok 0, krok 1, krok 2 [8]



Rys. 3. Finalna wersja krzywej Kocha [8]

W przypadku chęci obliczenia wymiaru pojemnościowego krzywej Kocha, należy rozpatrzyć k -ty krok konstrukcji. Wartość wymiaru pojemnościowego krzywej Kocha wynosi:

$$d = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\log(4^k)}{\log\left(\frac{1}{3^{-k}}\right)} = \frac{\log(4)}{\log(3)} \approx 1,26186$$

Długość zbioru Cantora, jak wspomniano w poprzednim podrozdziale, dąży do zera, natomiast długość krzywej Kocha ma granicę w nieskończoności, przy

czym wymiar krzywej Kocha jest aż dwukrotnie większy od wymiaru zbioru Cantora. W obu tych przypadkach wymiar jest liczbą niewymierną i niecałkowitą [6, 8, 9].

Warto w tym miejscu podkreślić, że wymiar topologiczny nie zawsze pokrywa się z wymiarem Hausdorffa. Dla przykładu, wymiar topologiczny zbioru Cantora wynosi zero, a krzywej Kocha wynosi 1 [7].

2.1. Charakterystyka funkcji bazowych oraz metody wyznaczania wymiaru fraktalnego.

Jak wspomniano wcześniej, fraktalem można nazwać zbiór, którego wymiar topologiczny jest mniejszy od wymiaru Hausdorffa [2].

Benoit Mandelbrot zdefiniował fraktale jako obiekty posiadające następujące cechy:

- są obiektami samopodobnymi,
- ich wymiar nie jest liczbą całkowitą,
- określone są zależnością rekurencyjną.

Z uwagi na fakt, iż numeryczne obliczenie wymiaru Hausdorffa jest niemożliwe, konieczne jest oszacowanie jego przybliżonej wartości. Można tego dokonać za pomocą obliczenia przybliżonej wartości wymiaru pudełkowego.

Obliczenie wartości wymiaru pudełkowego prowadzi do określenia stopnia nieregularności analizowanych struktur geometrycznych widocznych na obrazie. Inna wartość, określana jako lakunarność, pozwala na oszacowanie stopnia „podziurawienia” obrazu, a więc jaśniejszego obszaru otoczonego wokół obszarami ciemniejszymi [10].

Koncepcja lakunarności (ang. lacunarity) powstała z potrzeby naukowej analizy tekstur i wzorów w przyrodzie jako możliwość kojarzenia wzorców przestrzennych, głównie w badaniach medycznych i biologicznych.

Lakunarność jest więc miarą przestrzennej niejednorodności, bezpośrednio związanej ze skalą, gęstością i wariancją. Parametr ten pozwala rozróżniać wzorce przestrzenne poprzez analizę dystrybucji luk znajdujących się w obrazie w różnych skalach. Luki w obrazie są niczym innym jak pikselami o określonej wartości lub z określonego przedziału wartości (w skali szarości). Im wyższy stopień „podziurawienia” obrazu, tym wyższa wartość lakunarności [10].

Istnieje kilka algorytmów służących do obliczania wartości lakunarności obrazu. Wśród nich najczęściej używane są: gliding-box i differential box-counting.

Pierwszy z nich, algorytm gliding-box, został zdefiniowany przez Allaina i Cloitrea w 1991 roku, w zastosowaniu do obrazów binarnych. Polega na zliczaniu pikseli znajdujące się na pierwszym planie obrazu. W przypadku obrazów w skali szarości, algorytm mierzy zatem średnią intensywność pikseli w polu, które stanowi różnicę pomiędzy maksymalną i minimalną wartością

intensywności w każdym polu o rozmiarze r [10]. Matematyczny zapis przedstawia równanie:

$$M_r = \sum_{i,j} n_r(i, j)$$

Lakunarność opisywana jest jako kwadrat współczynnika zmienności, wyrażanego za pomocą wzoru:

$$\lambda_\varepsilon = CV^2 = \frac{\sigma_\varepsilon}{\mu_\varepsilon},$$

gdzie:

CV – współczynnik zmienności,

ε – długości krawędzi,

σ_ε – odchylenie standardowe pudełek,

μ_ε – liczba pikseli w pudełku.

Aby skrócić czas wykonywanych obliczeń, wartość obu zmiennych jest określana w trakcie wyliczania wartości wymiaru pudełkowego.

Wartość lakunarności można także obliczyć ze wzoru:

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{N}$$

dla $i = 1, \dots, N$, gdzie N to liczba długości krawędzi pudełek.

Wartość lakunarności jest zatem średnią arytmetyczną z obliczonych wcześniej cząstkowych wartości dla każdej długości krawędzi pudełka λ_ε [5].

Wymiar pudełkowy (ang. Box-counting dimension), w literaturze zwany inaczej wymiarem Minkowskiego lub Minkowskiego–Bouliganda, pozwala określić nieregularność struktury geometrycznej. Jego wartość obliczana jest na podstawie obserwacji pokrycia struktury geometrycznej znajdującej się na analizowanym obrazie w stosunku do długości krawędzi pudełek. W celu określenia wymiaru pudełkowego, badany obraz binarny umieszcza się na kwadratowej siatce a następnie zlicza się liczbę krutek (pudełek) zajmowanych przez fragment obrazu. Czynność tę należy powtórzyć dla różnych rozmiarów siatki [11].

Pierwszy etap obliczania wartości wymiaru pudełkowego stanowi wyliczenie długości krawędzi każdego pudełka. Odbywa się to w identyczny sposób jak wyliczanie wymiaru samopodobieństwa:

$$D_c = \frac{\log N(F)}{\log \frac{1}{\varepsilon}},$$

gdzie: D – wymiar fraktalny.

Wartością wymiaru jest nic innego jak nachylenie linii prostej otrzymanej na podstawie wartości dla poszczególnych krawędzi długości pudełka. Punkty odpowiadające kolejnym pomiarom zwykle układają się wzdłuż tej prostej, a jej współczynnik nachylenia równy jest wymiarowi fraktalnemu. Niestety, linia ta nie przechodzi jednak idealnie przez wszystkie punkty. Jest zatem wyznaczana na podstawie regresji liniowej, którą opisuje się wzorem:

$$D_p = \frac{n \sum \log \varepsilon \log N(F) - \sum \log \varepsilon \sum \log N(F)}{n \sum (\log \varepsilon)^2 - (\sum \log \varepsilon)^2},$$

gdzie: n – liczba wykorzystanych długości krawędzi pudełek [5].

Istnieje możliwość obliczenia statystyk podstawowych dla wyznaczonej prostej: korelacji oraz błędu standardowego. Biorąc pod uwagę wartość błędu standardowego można stwierdzić, na ile wiarygodna jest obliczona wartość. Im mniejszy błąd standardowy, tym większa dokładność wyniku. Błąd ten oblicza się na podstawie wzoru [5]:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum \log N(F)^2 - b \sum \log N(F) - D_p \sum \log \varepsilon \log N(F)}{n - 2}}$$

$$b = \frac{\sum \log N(F) - D_p \sum \log \varepsilon \log N(F)}{n}$$

Odpowiednio dobierając pudełka (elementy dyskretyzacji) o różnych długościach krawędzi, możliwy jest wybór takiej wartości wymiaru pudełkowego, dla której błąd statystyczny będzie najmniejszy.

Obok błędu statystycznego równie istotny w analizie fraktalnej jest drugi wskaźnik, świadczący o jakości otrzymanych wyników obliczania wymiaru pudełkowego. Wskaźnikiem tym jest korelacja wartości do otrzymanej linii, którą można wyliczyć ze wzoru:

$$r^2 = \left(\frac{(n \sum \log \varepsilon \log N(F) - \sum \log \varepsilon \sum \log N(F))}{\sqrt{(n \sum S^2 - (\sum \log \varepsilon)^2)(n \sum \log N(F)^2 - (\sum \log N(F))^2)}} \right)^2.$$

Wartość korelacji zawierająca się w granicach 1 świadczy o dobrym dopasowaniu. Przy wartości mniejszej niż 0,7 przyjmuje się, że jakość otrzymanych wyników jest niska. Z kolei silna korelacja mieści się w granicach 0,7 i 0,9. Powyżej wartości 0,9 można już mówić o wysokiej jakości [5].

2.2. Metody określania wymiaru fraktalnego

Metoda masa – promień (z ang. mass – radius method) jest jedną z metod obliczania wymiaru fraktalnego, w której w pierwszej kolejności obliczana jest

średnia wartość współrzędnych x i y wszystkich pikseli, reprezentujących badany obiekt. Można również użyć stwierdzenia, że określany jest środek ciężkości obiektu, a następnie jest ustalany promień wirowania. Centrum siatki złożonej z koncentrycznych okręgów stanowi każdy piksel znajdujący się wewnątrz okręgu, wyznaczany przez promień wirowania i środek ciężkości.

W metodzie tej wykorzystuje się związek pomiędzy powierzchnią M obiektu, znajdującą się w okręgu o promieniu r , a wielkością tego promienia.

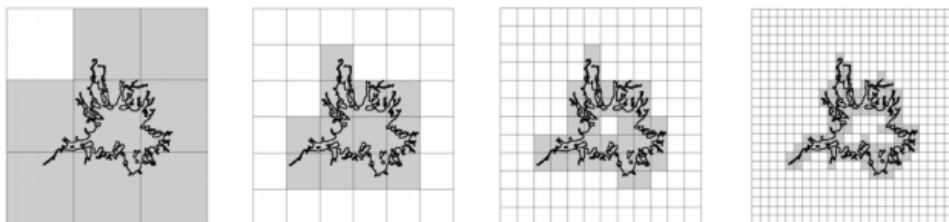
Powierzchnia analizowanego obiektu rośnie wraz ze wzrostem długości promienia według następującej zależności [12]:

$$\log(M(r)) = CD_H \log(r)$$

Wartość wymiaru fraktalnego określanego metodą masa – promień zależy więc przede wszystkim od szybkości, z jaką zwiększa się powierzchnia obiektu w miarę jednoczesnego zwiększania promienia okręgu. Określenie współczynnika nachylenia prostej regresji znajdującej się na wykresie prowadzi do otrzymania szacunkowej wartości wymiaru fraktalnego [12].

Metoda pudełkowa (z ang. box-counting method) jest ściśle związana z pomiarem pudełkowym i służy do obliczania ogólnego wymiaru fraktalnego.

Analizowany obraz umieszczany jest na regularnej siatce składającej się z wielu elementów w kształcie kwadratów. Następnie zlicza się ilość niepustych kwadratów, czyli pudełek. Rysunek przedstawia ideę metody pudełkowej.



Rys. 4. Idea metody pudełkowej [12]

W przypadku tej metody, na kontur analizowanego obiektu nakłada się kolejno siatki zbudowane z coraz mniejszych kwadratów. Za każdym razem zliczane są te kwadraty (pudełka), które zawierają fragment badanego obiektu. Idea metody pudełkowej zakłada, że im mniejsze są pudełka, tym liczba pudełek jest większa, czas obliczeń jest dłuższy, a wynik dokładniejszy.

3. Fraktale w obrazach medycznych i problematyka klasyfikacji

Liczne publikacje potwierdzają zasadność wspomagania diagnostyki medycznej metodą analizy fraktalnej. W diagnostyce medycznej

(a w szczególności w dermatologii), użyteczność fraktali opisane zostało w wielu pracach [1, 3, 13]. Zastosowanie tej metody analizy do sformułowania rozpoznania rodzaju zmian barwnikowych skóry zaproponowano również w rozprawie doktorskiej [5].

Powierzchnie zawsze charakteryzowane są pewnym stopniem nieregularności mimo, że wyglądają na bardzo gładkie. Kiedy stopniowo się je powiększa, zauważalne stają się pewne nierówności struktury wynikające z natury materiału lub procesu obróbki.

Chropowatości powierzchni to właśnie nieprawidłowości z pozostawionych śladów na różnych obiektach przez narzędzia (tnące lub polerujące), blizny na skórze, zmiany barwnikowe. Powierzchnia określana jako chropowata składa się z dużej liczby nałożonych chropowatości o parametrach w różnych skalach, które ogólnie charakteryzuje się odchyleniem standardowym punktów osobliwych powierzchni. Opisując strukturę topografii powierzchni zazwyczaj stosuje się trzy parametry: strukturę, falistość oraz chropowatość.

Analiza fraktalna może zatem stanowić odpowiedź na szereg trudności, jakie pojawiają się przy interpretacji powierzchni. W odróżnieniu od stosowanych konwencjonalnych metod oceny powierzchni fakt, że chociaż zawiera ona bardzo dużą liczbę niejednorodności, parametry, które ją charakteryzują, zależą przede wszystkim od przyjętej skali. Logicznym rozwiązaniem jest zatem zastosowanie wielkości niezmiennych przy różnych skalach. W tym właśnie kontekście, do opisanie chropowatości powierzchni idealnym wydaje się stosowanie pojęcia fraktali.

W pracy [14] już na wstępie zaakcentowano, że organizacja fraktalna pojawia się właściwie we wszystkich strukturach ludzkiego ciała. Autorzy skupili się jednak na konkretnym problemie, jakim jest rozpoznanie retinopatii cukrzycowej. Retinopatia cukrzycowa powoduje zmiany w strukturze morfologicznej naczyń krwionośnych w chorej siatkówce [15]. Z uwagi na fakt, że powierzchnia naczyń krwionośnych w siatkówce oka jest zawarta w niewielkiej objętości, obiektywne oszacowanie średnicy i architektury naczyń krwionośnych w siatkówce oka jest praktycznie niemożliwe. W innych pracach [16–20] również zauważono, że naczynia krwionośne w gałęzi siatkówki posiadają cechy fraktali. W badaniach, jakie przeprowadzili Uahabi i Atounti, obliczone zostały wymiary fraktalne obiektów w obrazach zawierających zdjęcia siatkówki pacjentów (chorujących na cukrzycę oraz zdrowych). Na podstawie otrzymanych wyników pochodzących z analizy fraktalnej, możliwe było rozróżnienie obrazów, na których pojawiły się zmiany patologiczne siatkówki oka. Biorąc pod uwagę powyższe badania można stwierdzić, że analiza fraktalna układu naczyniowego utworzonego na obrazie siatkówki oka człowieka może być stosowana jako nieinwazyjna metoda wykrywania wczesnych chorób naczyń siatkówki.

Kolejne zastosowanie analizy fraktalnej w diagnostyce medycznej potwierdza Ary L. Goldberger, który w swojej pracy [21] zauważył cechy fraktalne w fizjologii pracy serca. Goldberger potwierdził hipotezę, że migotanie komór

serca nie jest chaosem, lecz wynika z analizy spektralnej przebiegów migotania, a także z zapisów elektrofizjologicznych podczas migotania, które wskazują na zaskakująco okresową dynamikę (4,6). Z drugiej strony normalne bicie serca nie jest ściśle regularne, pomimo powszechnego założenia, że normalny rytm zatokowy jest równoważny z „regularnym rytmem zatokowym”. W rzeczywistości normalne tętno zatokowe, nawet u osób w spoczynku, waha się w sposób nieregularny. Widmo jest szerokie z rozkładem podobnym do $1/f$, z nałożonymi skokami odpowiadającymi oddychaniu, kontroli baroreceptorów i innym mechanizmom kontroli fizjologicznej.

W pracy tej potwierdzono także, że zmienność zdrowego rytmu pracy serca jest spowodowana chaotycznym procesem regulacyjnym, który wykazuje podobne do siebie (fraktalne) fluktuacje w interwałach między uderzeniami w wielu skalach czasu. Dynamiki fraktalne obejmują złożone interakcje gałęzi nerwu błędnego i współczulnego autonomicznego układu nerwowego, które kontrolują częstość akcji serca [22].

W swoich badaniach, Chung i Huang [23] udowadniają, że analiza fraktalna jest potencjalnie odpowiednia do obiektywnego oszacowania przestrzennej heterogeniczności płuc, ponieważ uważa się ją za skuteczną w charakteryzowaniu złożonych układów, które trudno opisać przy użyciu konwencjonalnej geometrii euklidesowej. Celem pracy było zbadanie, na podstawie zdjęć uzyskanych podczas badań z zakresu medycyny nuklearnej, fizycznych znaczeń i konsekwencji implikacji analizy fraktalnej, które, jak podano, były skuteczne w określaniu ilościowym niejednorodnego rozkładu radioaerozolu cząstek węgla w płucach. Autorzy zaznaczyli, że wymiar fraktalny zdefiniowany we wcześniejszych badaniach był ograniczony do wskazania procentowego obszaru regionów o niskiej radioaktywności w odniesieniu do całkowitego obszaru tkanki na obrazie. Ponieważ wymiar fraktalny częściowo odzwierciedla pewien stopień ogniskowych o niskiej radioaktywności, autorzy artykułu zasugerowali stosowanie analizy fraktalnej w praktyce klinicznej tylko przy starannej kontroli i dokładnym zrozumieniu fizycznych znaczeń. Jest to bardzo ważny wniosek, znajdujący zastosowanie we wszystkich gałęziach medycyny, w których analiza fraktalna odgrywa kluczową rolę w procesie rozpoznawania jednostek chorobowych.

Klasyfikacja zwykle definiowana jest jako proces statystyczny, który używany jest do zbudowania modelu predykcji w celu zgrupowania lub identyfikacji podzbioru danych względem podobieństwa do konkretnych cech. Proces ten może obejmować dane w postaci ciągłej lub dyskretnej, o różnej skali i różnym charakterze.

Najbardziej typowy problem klasyfikacji stanowi zagadnienie rozpoznawania, czyli identyfikacja. Jest to proces, który na podstawie najczęściej uporządkowanych cech określa podobieństwo względem poszczególnych klas. Istotnym zatem jest szczegółowe zdefiniowanie uporządkowanego zbioru cech, nazywanym wektorem wejściowym.

Rozpoznawanie w rozumieniu potocznym zdefiniować można jako proces interpretacji zjawisk obserwowanych oraz ich przyporządkowywanie na podstawie zdobytej wiedzy do określonych grup podobieństwa. Tworzenie bazy wiedzy związane jest z wcześniejszymi obserwacjami, które w procesie poznawczym nazywa się uczeniem. Problem dotyczy zarówno uczenia maszynowego, jak i uczenia w sensie psychologicznym.

W diagnostyce obrazowej w dermatologii istnieje szereg cech zmian barwnikowych podlegających interpretacji. Wyodrębnienie szczególnych właściwości dotyczy zazwyczaj przetworzenia informacji zawartej w obrazie do postaci, która w bardzo prosty sposób pozwala na przyporządkowanie obiektu do konkretnej klasy (jednostki chorobowej).

Charakterystyka zmian dermatologicznych pozwala na zbudowanie informacji podstawowej, niezbędnej do analizy fraktalnej, w postaci zbioru następujących cech znamion: struktura, symetria, regularność kształtu, ostrość krawędzi obiektu, intensywność barwy brązowej oraz intensywność barwy czerwonej.

Badania prowadzone w ostatnich latach [5] udowadniają, że analiza fraktalna wprowadza dodatkowe informacje, które mogą być doskonałym uzupełnieniem dla zbioru cech wejściowych. Dlatego też przeprowadza się klasyfikację wstępną zmian dermatologicznych na podstawie cech fraktalnych.

4. Wnioski

Ocena stopnia złożoności badanego obiektu (obrazu) może być przeprowadzona za pomocą analizy fraktalnej. Analiza ta umożliwi mierzenie nieregularności struktur geometrycznych, dostarczając miary ilościowej w postaci wymiaru fraktalnego.

Metoda analizy obrazów wykorzystująca parametry fraktalne we wspomaganym rozpoznaniu medycznym jest obiecującym narzędziem w ocenie parametrów obrazu, niezależnie od przyjętej skali.

Obecność fraktali w diagnostyce medycznej jest coraz częściej zauważana przez lekarzy i inżynierów. Samopodobieństwo wielu struktur występujących w organizmach żywych uzasadnia stosowanie analizy fraktalnej w celu identyfikacji jednostek chorobowych a powtarzalność kompozycji skłania naukowców do poszukiwania cech fraktalnych w niezbadanych dotąd elementach.

W poprzednim rozdziale opisane zostały przykłady zastosowania analizy fraktalnej w diagnostyce medycznej. Jeden z nich dotyczy możliwości rozróżniania obrazów siatkówki oka, na których pojawiły się zmiany patologiczne. Zauważono, że naczynia krwionośne w gałęzi siatkówki posiadają cechy fraktali, a analiza fraktalna staje się użytecznym narzędziem w rozpoznawaniu występowania retinopatii cukrzycowej.

Oprócz okulistyki, analiza fraktalna znajduje swoje zastosowanie również w kardiologii. Opisane w niniejszym artykule badania potwierdzają występowanie cech fraktalnych w fizjologii pracy serca. Możliwe jest więc

prowadzenie dalszych badań w kontekście poszukiwania jednostek chorobowych związanych z nieprawidłowym, (oraz jak się okazuje, nie do końca „chaotycznym”) rytmem pracy serca.

Konsekwencja implikacji analizy fraktalnej jest skuteczna w określaniu ilościowym niejednorodnego rozkładu radioaerozolu cząstek węgla w płucach. Jak wykazali Chung i Huang, badania potwierdzają, że fraktale potwierdzają przestrzenną heterogeniczność płuc. Autorzy pracy podkreślili, że stosowanie analizy fraktalnej w praktyce klinicznej jest możliwe tylko przy starannej kontroli i dokładnym zrozumieniu fizycznych znaczeń.

Dyskusja przeprowadzona wśród lekarzy wskazuje na duży problem, jaki pojawia się szczególnie w diagnostyce dermatologicznej, polegający na kwalifikowaniu zmiany barwnikowej skóry. Na rynku dostępne są komercyjne narzędzia wykorzystujące zmiany rozkładu kształtu, kolorów czy poziomów symetrii w obrazie. Niestety, bardzo często błąd klasyfikacji jest duży. Stąd też coraz chętniej podejmowane są badania mające na celu usprawnienie procesu diagnostycznego chorób skóry poprzez pomoc w klasyfikacji zmian dermatologicznych do odpowiedniej grupy jednostek chorobowych.

Literatura

- [1] Kuczyński K. *Klasyfikacja obrazów radiologicznych na podstawie wymiaru fraktalnego*, Chełmski Biuletyn Informacyjny 1, 2008.
- [2] Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco, 1983.
- [3] Oczeretko E. *Wymiar fraktalny w biologii i medycynie – przegląd stosowanych algorytmów*, Current Topics of Biophysics, 2001.
- [4] Weng Y., Xu S. *A new approach to estimate fractal dimensions of corrosion images*, Pattern Recognition Letters 27, 2006.
- [5] Przystalski K. *Detekcja i klasyfikacja barwnikowych zmian skóry na zdjęciach wielowarstwowych*, rozprawa doktorska, Warszawa, 2014.
- [6] Allain C., Cloitre M. *Characterizing lacunarity of random and deterministic fractal sets*, Physic Review A 44, 3552, 1991.
- [7] Ratajczak W., *Metodologiczne aspekty fraktalnego modelowania rzeczywistości*, UAM, Poznań, 1998.
- [8] Kunze H., La Torre D., Mendivil F., Vrscay E.R. *Fractal – Based Methods in Analysis*, Springer.
- [9] Falconer K.J. *Fractal geometry: Mathematical Foundations and Applications*, John Wiley & Sons, Nowy Jork, 1990.
- [10] Barros Filho M. N., Sobreira F. J. A. *Accuracy of lacunarity algorithms in texture classification of high spatial resolution images from urban areas*, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2008.
- [11] Bisoï A. K., Mishra J. *On calculation of fractal dimension of images*, Pattern Recognition Letters 22, 2001.
- [12] Omiołek Z. *Zastosowanie wymiaru fraktalnego do analizy konturu obiektów*, IAP GOŚ 2, 2012.

- [13] Baish J. W., Jain R. K. *Fractal and Cancer*, Perspectives in Cancer Research 60, Boston, 2000.
- [14] Uahabi K.L., Atounti M. *Applications of fractals in medicine*, Annals of the University of Craiova, Mathematics and Computer Science Series 42(1), 167–174, 2015.
- [15] Szczeklik A. *Choroby wewnętrzne. Przyczyny, rozpoznanie i leczenie*, Wydawnictwo Medycyna Praktyczna, Kraków, 1202, 2005.
- [16] Cheng S. C., Huang Y. M. *A novel approach to diagnose diabetes based on the fractal characteristics of retinal images*, IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. 7, 163–170, 2003.
- [17] Cheung N. *Quantitative Assessment of Early Diabetic Retinopathy Using Fractal Analysis*, Diabetes Care 32, 106–110, 2009.
- [18] Masters B. R., *Fractal analysis of the vascular tree in the human retina*, Annu. Rev. Biomed. Eng. 6, 427–452, 2004.
- [19] Talu S., Giovanzana S. *Image analysis of the normal human retinal vasculature using fractal geometry*, Human and Veterinary Medicine, International Journal of the Bioux Society, 14–18, 2012.
- [20] Mancardi D., Varetto G., Bucci E. *Fractal parameters and vascular networks: facts & artifacts*, Theor. Biol. Med. Model., 5, 2008.
- [21] Goldberger A. L. *Nonlinear dynamics, fractals and chaos: Applications to cardiac electrophysiology*, Annals of Biomedical Engineering 18, 195–198, 1990.
- [22] West, B. J., Goldberger A. L. *Physiology in fractal dimensions*, American Scientist 75, 354–365, 1987.
- [23] Chung H.W., Huang Y.H., *Fractal analysis of nuclear medicine images for the diagnosis of pulmonary emphysema interpretations, implications, and limitations*, American Journal of Roentgenology 174, 1055–1059, 2000.

*Magdalena Michalska

Detekcja i usuwanie artefaktów z obrazów dermatoskopowych

Streszczenie: W procesie wstępnego przetwarzania obrazów dermatoskopowych szczególną uwagę zwraca się na powstające podczas wykonywania obrazów artefakty. Ich usunięcie ma szczególne znaczenie w procesie dalszego przetwarzania obrazów. Monografia opisuje sposoby detekcji i usuwania artefaktów z obrazów dermatoskopowych. Opisane zostały operacje morfologiczne, metoda Koehoorna i często używane automatyczne programy (DullRazor, VirtualShave).

Słowa kluczowe: dermatoskopia, detekcja artefaktów, detekcja włosów, usuwanie artefaktów

Detection and removal of artifacts from dermatoscopic images

Abstract: In the process of dermatoscopic images pre-processing special attention is paid to artifacts created during the execution of images. Their removal is of particular importance in the process of further image processing. The monograph describes methods of detecting and removing artifacts from dermatoscopic images. The morphological operations, Koehoorn's method and often used automatic programs (DullRazor, VirtualShave) have been described.

Keywords: dermatoscopy, artifact detection, hair detection, artifact removal

1. Wstęp

Do artefaktów należą obecne na obrazie dermatoskopowym włosy pacjenta, duże naczynia krwionośne, krwiaki, pęcherzyki pod skórą, nakreślone na skórze znaczniki zmian czy blizny. Bez ich eliminacji dalsza praca z obrazami nie dałaby zadowalających efektów w skomputeryzowanych systemach diagnostycznych [1]. Metoda wstępnego przetwarzania to pierwsza część służąca do usunięcia niechcianych artefaktów i szumu z obrazu. Usunięcie włosów z obrazów dermatoskopowych wpływa na diagnostykę zmiany skórnej. Segmentacja i następnie klasyfikacja zmian skórnych to dwa główne etapy wymaganej diagnostyki.

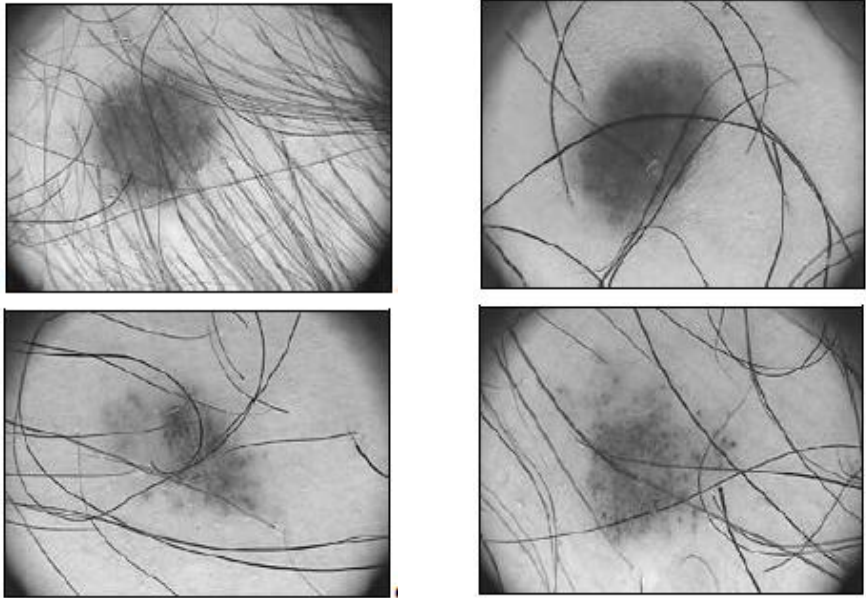
*magdalena.michalska@pollub.edu.pl, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

2. Detekcja i usuwanie włosów z obrazów

Większość z opracowanych już metod cyfrowego usuwania włosów z obrazów dematoskopowych składa się z dwóch etapów. Należy do nich wykrywanie istniejących na obrazach włosów w oparciu o dostępne techniki morfologiczne. Mają one za zadanie wyszukać w obrazie cienkich i wydłużonych obiektów, często ciemnych. Kolejny etap opiera się na usuwaniu wykrytych wcześniej włosów i uzupełnieniu wolnych pikseli za pomocą operacji malowania. Powstałe metody są zazwyczaj kwestionowane przez złożone morfologie, takie jak gęste, zmiennokolorowe, zwinięte włosy, nałożone na wierzch tekstur skóry o wysokim kontraście. W [2] proponuje, aby obrazy skóry były filtrowane w celu usunięcia niechcianych włosów i szumów. Do diagnozowania chorób skórnych stosuje się technik segmentacji i klasyfikacji zmian skórnych SVM i komputerowego wspomaganie diagnostyki (CAD). Znanych jest już kilka algorytmów do usuwania włosów z obrazów medycznych [3–7].

3. Operacja morfologiczna „bottom-hat”

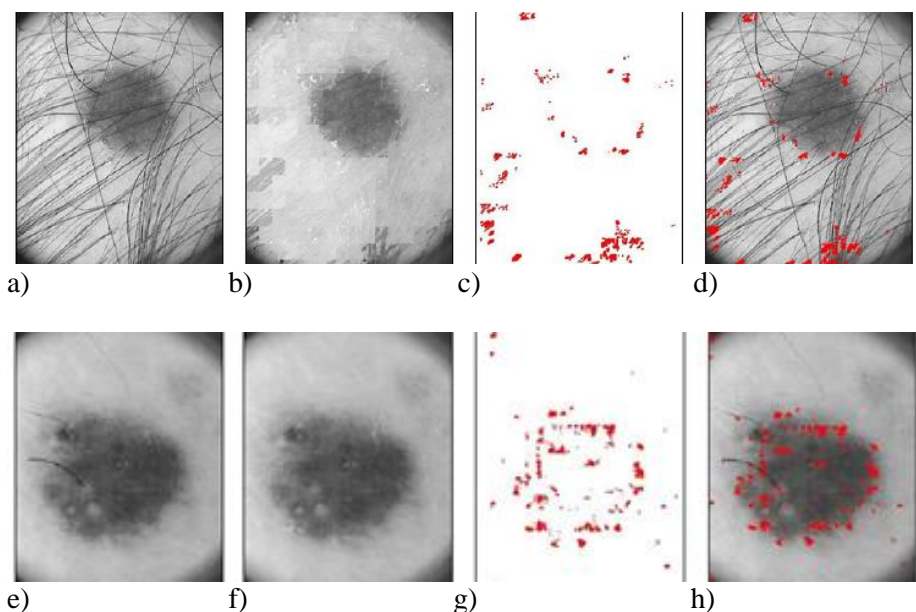
Ludzkie ciało jest prawie całkowicie pokryte włosami, które mają wiele różnych tekstur, kolorów i mogą rosnąć w różnych orientacjach w przestrzeni. Na Rys. 1 pokazano zmiany skórne pacjentów, gdzie występuje wiele grubych i ciemnych włosów. Usuwanie włosów jest ważnym krokiem w przetwarzaniu obrazów dermoskopowych i ma na celu prawidłowe sklasyfikowanie zmiany skórnej, jako łagodnej, złośliwej lub wymagającej dalszej diagnostyki.



Rys. 1. Obrazy dermatoskopowe ukazane w skali szarości z widocznymi włosami na skórze pacjentów

Źródło: baza danych PH₂, (<https://www.fc.up.pt/addi/ph2%20database.html>).

W [8] zaproponowany został algorytm usuwania włosów z obrazów dermoskopowych. Obejmuje on wykrywanie włosów i malowanie. Obrazy kolorowe (RGD) pochodzące z bazy danych zostały zamienione na obrazy w skali YIQ. W wykrywaniu włosów operacja morfologiczna „bottom-hat” jest zaimplementowana na obrazie dla kanału Y przestrzeni barw YIQ, po której następuje operacja binaryzacji. Kanał Y został podzielony na 256 niezależnych bloków, obrazy kanału Y widoczne są na rysunkach 2a i 2e. Kanał Y powstał po binaryzacji i przedstawia również białe piksele na obrazie (Rys. 2b i 2f). W procesie ponownego malowania białe piksele w danym bloku zostały zastąpione poprzez umieszczenie najwyższego piksu przy użyciu histogramu obrazu. Powstałe różnice między rysunkami 2a, 2b, 2e i 2f zilustrowane zostały czerwonymi kropkami na rysunku 2c i 2g.

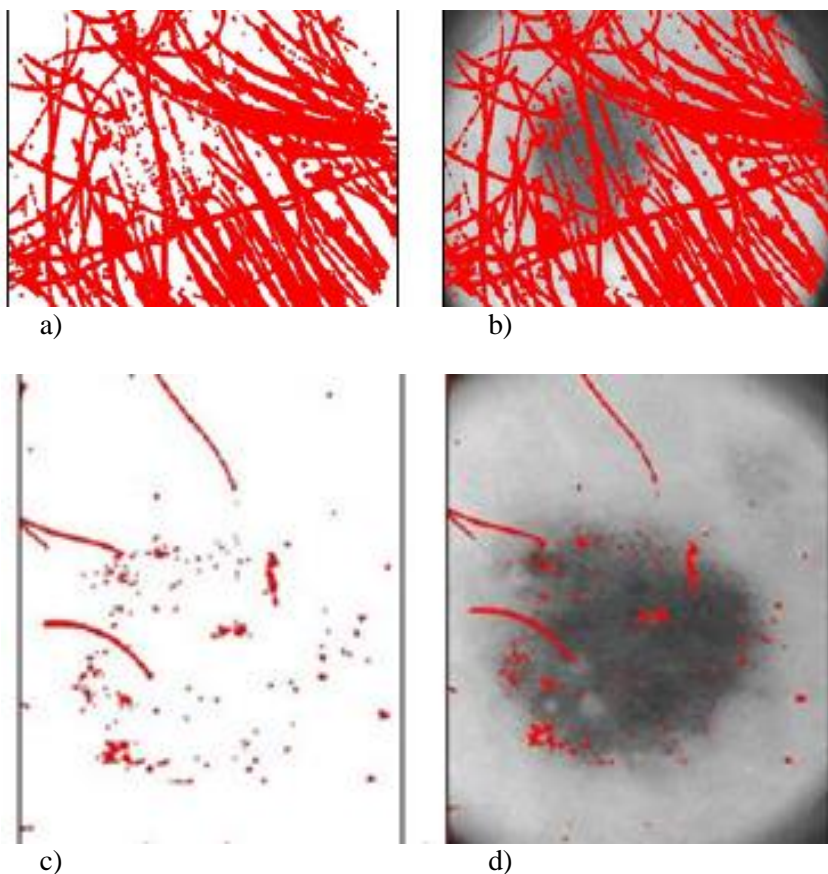


Rys. 2. Obliczenia False Positive Rate (FPR) : (a, e) kanał Y; (b, f) kanał Y''; (c, g) różnice między (a, b) i (e, f) zilustrowane czerwonymi kropkami; (d, h) Y–kanał z (False Negative (FN)) fałszywie ujemnymi pikselami reprezentowanymi przez czerwone kropki

Źródło: Zaqout I.S., An efficient block–based algorithm for hair removal in dermoscopic images, *Computer Optics*, 41(4), 521–527, 2017.

Autorzy artykułu przygotowali dodatkowo statystykę obrazów. Wartość True Positive (TP) została wyznaczona po zastosowaniu binaryzacji na segmencie włosów (Y'). Wizualnie lepiej jest, kiedy białe piksele reprezentowane są włosami w kolorze czerwonym. Na rysunku 3a i 3c czerwone włosy zostały zaznaczone na białym tle. Na rysunku 3b i rysunku 3d przeniesione zostały na obraz dermatoskopowy zmiany skórnej.

Dla zaproponowanego algorytmu użytkano True Positive Rate (TPR) – czułość na poziomie 97,36%, a False Positive Rate (FPR) 4,25%, True Negative Rate (TNR) – specyficzność to 95,75%. Osiągnięta dokładność diagnostyczna została rejestrowana na wysokim poziomie 95,78%.



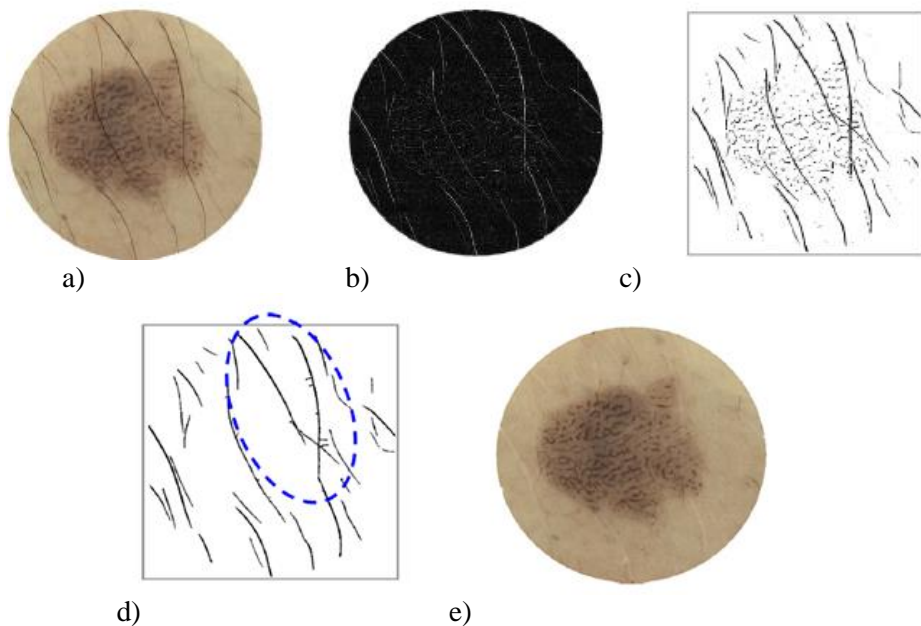
Rys. 3. Kalkulacja True Positive. (a, c) Wysegmentowane włosy przedstawione na obrazie binarnym; (b, d) zakwalifikowane piksele z włosami

Źródło: Zaqout I.S., An efficient block-based algorithm for hair removal in dermoscopic images, *Computer Optics*, 41(4), 521–527, 2017.

4. Operator „top-hat”

W [9] został użyty kolejny z operatorów „top-hat” – operator górnego kapelusza. Obejmuje on trzy etapy. W pierwszym kroku obrazy dermatoskopowe z widocznymi na nich włosami wzmocniane są przez operator top-hat. Następnie powstały obraz dzielony jest na segmenty według progu statystycznego. Włosy są wydobywane, usuwane z obrazu, a luki po nich są uzupełniane przez obraz oparty na PDE. Operator „top-hat” radzi sobie zarówno z mocnymi, ciemnymi, jak i słabymi włosami. Mogą być one wzmocnione jednocześnie. Problem naprawczy informacji po usunięciu włosów z obrazu rozwiązano bardzo dobrze, łącząc

ekstrakcję włosów z technologią malowania obrazu. Na rysunku 4 przedstawiono działanie opisanego algorytmu. do usuwania włosów opartego na operatorze „top-hat”. Wyniki eksperymentu pokazują, że przekształcone obrazy spełniają wymogi diagnostyki medycznej i poprawiają skuteczność segmentacji po usunięciu włosów z obrazów.



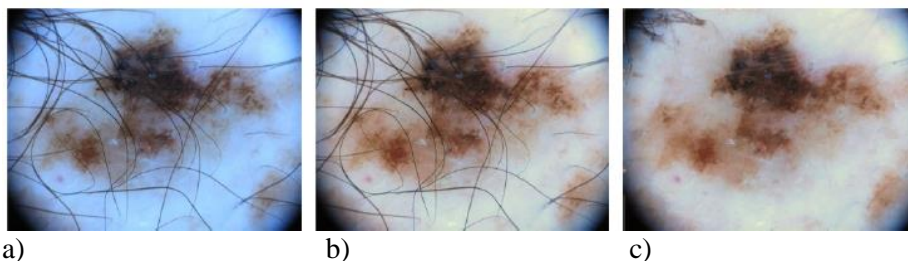
Rys. 4. Działanie algorytmu do usuwania włosów opartego na operatorze „top-hat”: a) oryginalny obraz dermatoskopowy, b) obraz po wykorzystaniu operatora „top-hat”, c) binarny obraz, d) wyodrębnione obszary włosów, e) wynik malowania na podstawie PDE.

Źródło: Xie, F., Qin, S., Jiang, Z., Meng, R, PDE-based unsupervised repair of hair-occluded information in dermoscopy images of melanoma, *Comp. Med. Imag. Graph.* 33(4), 275–282, 2009.

5. Metoda Koehoorna

W [10] do usunięcia włosów została użyta metoda Koehoorna, której efekty widoczne są na Rys. 5c. Pozwala ona na wykrywanie podobnych do włosów struktur na obrazie i zastępowanie ich odpowiednimi wartościami pikseli. W metodzie tej zaproponowano wieloprogowy schemat początkowego segmentowania włosów na obrazie. W każdym kroku progowania korzystano z wykrywania przerwy między pikselami potencjalnie obejmującymi włosy. Wszystkie początkowe wyniki zostały następnie połączone w jeden element. Niestety niektóre obiekty zostały błędnie zakwalifikowane, jako włosy.

W ostatnim kroku algorytmu autorzy użyli kombinacji morfologicznej, filtrów i deskryptorów medianowych do walidacji obiektów z włosami. Wykryte piksele ukazujące włosy są następnie poddawane algorytmowi malowania obrazu. Takie podejście jest w stanie wykrywać, malować ciemne i jasne włosy.



Rys. 5. Wstępne przetwarzanie obrazu dermoskopowego: (a) oryginalny obraz, (b) zastosowanie algorytmu „cienia szarego” w celu osiągnięcia stałości koloru, (c) usuwanie włosów z obrazu metodą Koehoorna.

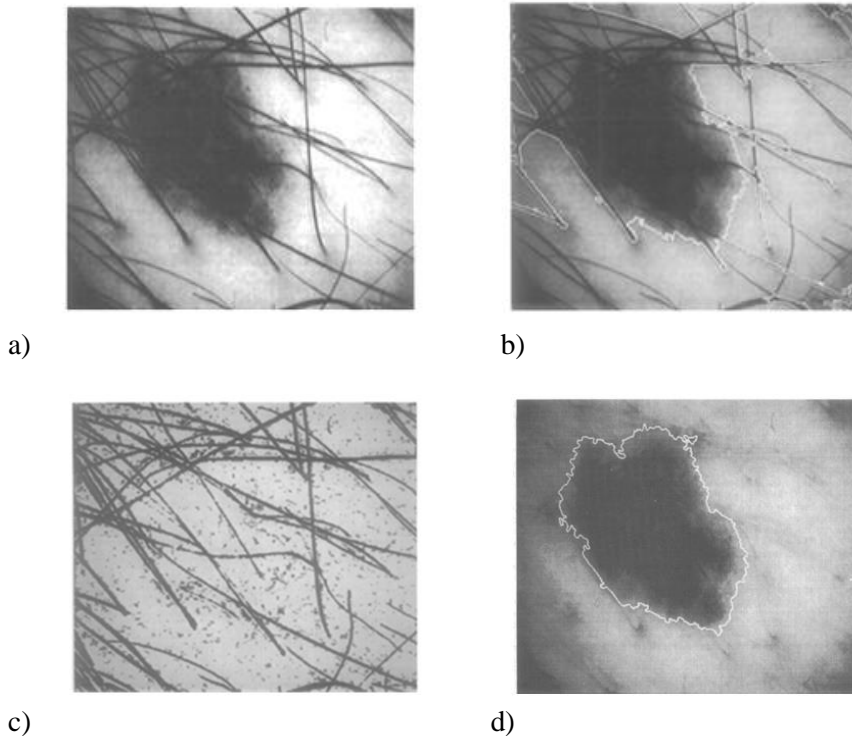
Źródło: Jahanifar M., Tajeddin N. Z., Asl B. M., Gooya A., *Supervised saliency map driven segmentation of lesions in dermoscopic images*, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics 23, 2, 2019.

6. Automatyczne programy

W ostatniej dekadzie wielu badaczy zajmowało się zmianami skórnymi na obrazach dermatoskopowych. Jednak obrazy dermoskopii często zawierają niektóre artefakty, takie jak naczynia krwionośne, włosy i linie skóry, które są przeszkodą w identyfikacji zmian skórnych z normalnej zdrowej skóry. W zawiązku z dużym zainteresowaniem szybkim procesem wstępnego przekształcania obrazów pojawiły się automatyczne programy. Z czasem stały się one szeroko rozpowszechnione.

7. DullRazor

Problem pojawiających się artefaktów pojawiał się bardzo często. Dlatego też pokuszono się o rozpoczęcie prac nad automatyzacją procesu ich usuwania. Automatyczny program do usuwania artefaktów w obrazach dermoskopii o nazwie DullRazor [3] jest często używany. W programie przedstawiono metodę wstępnej obróbki zdjęć do usuwania włosów z obrazu. Ten etap przetwarzania umożliwia osiągnięcie segmentacji zmiany z zadowalającymi wynikami. DullRazor'a można pobrać ze strony internetowej <http://www.derm.ubc.ca>.



Rys. 6. a) Obraz dermatoskopowy z widocznymi grubymi, ciemnymi włosami, b) wynik działania wstępnych algorytmów segmentacji, c) maska do włosów M potencjalne piksele włosów są wysświetlane w kolorze czarnym, d) nowy wynik segmentacji dzięki etapowi przetwarzania wstępnego DullRazor, granica zmiany skórnej wykryta przez program automatycznej segmentacji.

Źródło: Lee T., Ng V., Gallagher R., Coldman A., McLean D., DullRazor: A software approach to hair removal from images, *Computers in Biology and Medicine*, 27(6), 533–543, 1997.

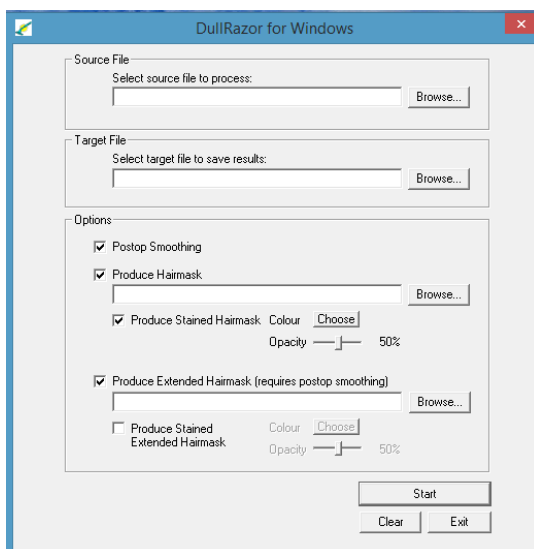
Istotnym krokiem w pracach nad segmentacją obrazów dermatoskopowych była automatyczna segmentacja potrzebna do oddzielenia zmiany od normalnej otaczającej ją skóry. W tym celu wykorzystano filtrowanie przez wielostopniowy filtr medianowy kolorowych obrazów w celu usunięcia szumu i zachowaniu odpowiedniej struktury zmiany skórnej na przefiltrowanym obrazie. W programie ustalono wartości progowe dla trzech różnych pasm kolorów. Na obrazach dermatoskopowych występuje wiele, zwłaszcza ciemnych, grubych włosów, pokrywających część zmian skórnych. Obrazy używane w segmentacji z ciemnymi włosami wprowadzały zakłócenia w algorytmach i uniemożliwiały segmentację całej zmiany skórnej (Rys. 6). Na białą został zaznaczony obszar

zmiany skórnej po procesie segmentacji. Niestety obszar obejmuje również ciemne włosy.

Technika przetwarzania wstępnego w programie DullRazor pozwala w pierwszym etapie usunąć niektóre artefakty, takie jak ciemne włosy. Są one przeszkodą w identyfikacji zmian skórnych od normy, zdrowej skóry.

Algorytm składa się z identyfikacji lokalizacji ciemnych włosów, zamianie pikseli włosów na piksele nie będące włosami oraz wygładzanie wyniku końcowego. Wykonanie uogólnionej morfologicznej operacji domknięcia w skali szarości stosowane jest do trzech pasm kolorów oddzielnie aby zlokalizować ciemny włos. Uogólniony obraz w skali szarości jest uzyskiwany przez maksymalną odpowiedź wyników w skali szarości przy wszystkich trzech określonych kierunkach: poziomo, po przekątnej i pionowo. Dzięki czemu wszystkie ciemne włosy są wygładzone a binarny obraz maski włosów jest tworzony przez progowanie różnicy pomiędzy oryginalnym pasmem koloru a uogólnionym obrazem w skali szarości. Dzięki czemu powstają dwa obszary: z włosami i bez, są one rozłączne. Utworzona Maska pikseli z włosami została przedstawiona na rysunku 6c. Na rysunku 6d został umieszczony przedstawiony wynik segmentacji zmiany skórnej bez włosów. Biała linia przedstawia wydzieloną z obrazu zmianę skórą.

Okno użytkownika programu przedstawiono na rysunku 7. Program ten stosuje domknięcie morfologiczne i adaptacyjny filtr medianowy w celu usunięcia niektórych niechcianych artefaktów na obrazach. W programie można usuwać artefakty dzięki użyciu wygładzenia obrazu i zastosowaniu masek z wyborem koloru, regulacji w procentach.

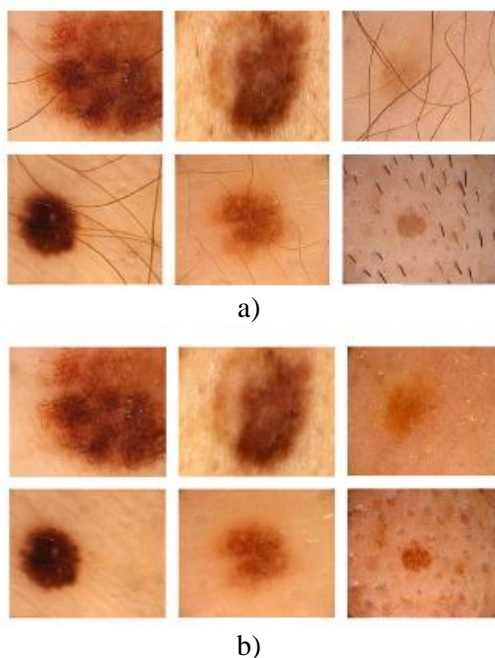


Rys. 7. Okno użytkownika programu DullRazor

8. VirtualShave

VirtualShave [5] to również narzędzie do usuwania włosów z cyfrowych obrazów dermatoskopowych. Pojedyncze włosy są identyfikowane za pomocą filtru górnoprzepustowego, po którym następuje morfologiczne przetwarzanie końcowe obrazu. Następnie są one zastępowane przez PDE, malowanie z oszacowaniem leżącej pod spodem skóry. Twórcy narzędzia chwalą się, że wydajność VirtualShave jest porównywalna z wydajnością człowieka. Przyjmuje się, że operator „usuwa włosy ręcznie”, a powstałe obrazy są prawie nie do odróżnienia z obrazami skóry pozbawionej włosów.

Moduł segmentacji VirtualShave stosuje on również operator „top-hat” do identyfikacji obszarów o wysokim kontraście. Następnie piksele obrazu są filtrowane poprzez morfologiczne drzewo decyzyjne i naprawiane są luki we włosach. W dalszej kolejności stosuje malowanie oparte na PDE i ma ono na celu maksymalizację jakości obrazu. Pozwala to na oznaczenie wszystkich pikseli włosów tym samym nieznanym kolorem. Wyniki działania całego modułu VirtualShave zostały przedstawione na rysunku 8b.

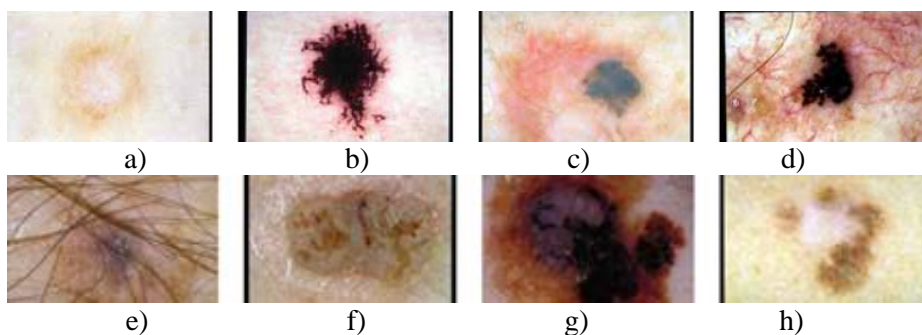


Rys. 8. a) oryginalne kolorowe obrazy dermatoskopowe, b) obrazy po zastosowaniu algorytmów z VirtualShave

Źródło: Fiorese, M., Peserico, E., Silletti, A.: VirtualShave: automated hair removal from digital dermoscopic images, Proc. IEEE EMBS, 5145–5148, 2011.

9. Detekcja i usuwanie pozostałych artektów

W [11] zostało wykorzystane automatyczne wykrywanie granic. Jest ono trudnym zadaniem z kilku powodów. Pierwszym z nich jest niski kontrast między zmianą a otaczającą skórą (Rys. 9a). Kolejne problemy wywołane są nieregularnym kształtem zmiany skórnej (Rys. 9b) i rozmytymi granicami uszkodzeń (Rys. 9c), artefaktami i wewnętrznymi cechami skórnymi (np. czarne ramki, linie skóry, naczynia krwionośne, włosami pęcherzykami powietrza. Problematiczna w segmentacji obrazów jest także barwna plama wewnątrz interesującej dermatologa zmiany i fragmentacja z różnych powodów (np. depigmentacja bliznowa (Rys. 9h).



Rys. 9. Problemy z detekcją krawędzi z uwagi na : a) niski kontrast, b) nieregularny kształt, c) rozmyte granice, d) obecność naczyń krwionośnych, e) obecne włosy, f) pęcherzyki powietrza, g) zmiany barwne wewnątrz całej zmiany skórnej, h) fragmentacja całej zmiany skórnej.

Źródło: Celebi, M. E., Schaefer, G., Iyatomi, H., Stoecker, W. V., Lesion Border Detection in Dermoscopy Images, *Comput Med Imaging Graph.*, 33(2), 148–153, 2009.

Obrazy dermoskopowe często zawierają artefakty, takie jak czarne ramki, oznaczenia atramentem, linijki, pęcherzyki powietrza. Dodatkowo wewnętrzne cechy skóry, które mogą wpływać na wykrywanie granic (krew, naczynia, włosy i linie skóry). Obecne artefakty i obecne elementy komplikują proces wykrywania granic przez utratę dokładności procesu dalszego przetwarzania obrazu i wzrostu czasochłonności przeprowadzanych algorytmów. Jako najprostrze sposoby usunięcia i wygładzenia samego obrazu przyjmuje się filtry Gaussa, medianowe. Alternatywnym rozwiązaniem jest użycie filtrów, których punkty traktowane są, jako wektory [12].

Ilość wygładzonych pikseli na obrazie jest proporcjonalna do rozmiaru wybranej maski. Jednak zbyt duże maski powodują rozmycie krawędzi i pogorszenie kontrastu w obrazie. Może to znacznie zmniejszyć dokładność wykrywania krawędzi, dlatego rozmiar maski powinien być proporcjonalny do

rozmiaru całego przetwarzanego obrazu [13, 14]. Istotnym kryterium wyboru maski jest również czas obliczeniowy. Filtry Gaussa i medianowe działają w stałym czasie niezależnie od wielkości maski [15, 16].

Alternatywną strategią usuwania artefaktów jest użycie specjalnych metod dla każdego typu artefaktu. Aby usunąć czarne ramki w [14] zaproponowano algorytm iteracyjny oparty na składniku jasności przestrzeni barw HSL (*ang. Hue–Saturation–Lightness*). W większości przypadków wygładzanie obrazu skutecznie usuwa linie skóry i naczynia krwionośne.

Usuwanie włosów z użyciem morfologii zajęto się w [13, 3]. Zastosowanie wykrywania struktury krzywoliniowej z różnymi ograniczeniami i wypełnianiu luk zrealizowano w [17]. Ostatnio w [18, 19] zaproponowano kolejne podejście malowania. Metoda, która może usunąć pęcherzyki z jasnym krawędziami wprowadzono w [17], gdzie autorzy wykorzystali morfologiczny operator górnego kapelusza, po czym następuje procedura poszukiwania radialnego.

10. Podsumowanie

Obrazy dermoskopowe zwykle zawierają pewne zakłócenia, takie jak naczynia krwionośne, włosy i linie skóry. W związku z tym istotne jest zastosowanie technik, aby usunąć niektóre artefakty z wejściowego obrazu RGB w pierwszym etapie przetwarzania obrazu.

Bardzo praktyczne jest używanie podejścia programowego do usuwania włosów, zamiast mechanicznego golenia każdej zmiany przed wykonaniem obrazu dermatoskopowego. Udoskonalenie automatycznego programu segmentacji, która oddziela zmiany od normalnej zdrowej skóry, wspiera potencjalne znaczenie tej techniki. Etapy wstępnego przetwarzania obrazu pomagają w automatyzacji programowej segmentacji, aby osiągnąć zadowalający wynik pomimo obecności artefaktów. Bez możliwości usunięcia artefaktów z obrazów dermatoskopowych nie mogłyby zostać wykorzystane do dalszej analizy.

W dotychczasowych badaniach zaproponowano szybkie i skuteczne metody do usuwania artefaktów w obrazach dermoskopowych. Wykrywanie włosów najczęściej wiąże się z morfologiczną operacją. Osiągnięte wyniki wskazują na wysoką dokładność nowopowstających algorytmów, a proponowane metody mogą być dedykowane dermatologom, jako etap wstępnego przetwarzania przed segmentacją zmian i ich dalszą klasyfikacją. Wciąż potrzebna jest solidna metoda umożliwiająca wykrywanie i usuwanie szerokiego zakresu morfologii włosów, czy innych artefaktów ze wszystkich pigmentowanych zmian skórnych.

Literatura

- [1] Iyatomi H. *Computer-based diagnosis of pigmented skin lesions*, Campolo D, New developments in biomedical engineering, In Tech 10, 183–200, 2010.

- [2] Bartunek, S.J. , Nilsson, M. *Adaptive FingerPrinst image enhancement with emphasis on preprocessing of data*, IEEE, 1– 13, 2011.
- [3] Lee T., Ng V., Gallagher R., Coldman A., McLean D. *DullRazor: A software spproach to sair removal from smages*, Computers in Biology and Medicine 27 (6), 533–543, 1997.
- [4] Huang, A., Kwan, S., Chang, W., Liu, M., Chi, M., Chen, G. *A robust hair segmentation and removal approach for clinical images of skin lesions*, Proc. IEEE EMBS, 3315–3318, 2013.
- [5] Fiorese, M., Peserico, E., Silletti, A. *VirtualShave: automated hair removal from digital dermatoscopic images*, Proc. IEEE EMBS, 5145–5148, 2011.
- [6] Kiani, K., Sharafat, A.R. *E–shaver: An improved dullrazor for digitally removing dark and light–colored hairs in dermoscopic images*, Comput. Biol. Med. 41 (3), 139–145, 2011.
- [7] Abbas, Q., Celebi, M. E., Garcia, I. F. *Hair removal methods: A comparative study for dermoscopy images*, Biomedical Signal Processing and Control 6 (4), 395–404, 2011.
- [8] Zaqout I.S. *An efficient block–based algorithm for hair removal in dermoscopic images*, Computer Optics 41(4), 521–527, 2017.
- [9] Xie, F., Qin, S., Jiang, Z., Meng, R. *PDE–based unsupervised repair of hair–occluded information in dermoscopy images of melanoma*, Comp. Med. Imag. Graph. 33 (4), 275–282, 2009.
- [10] Koehoorn J., Sobiecki A. C., Boda D., Diaconeasa A., Doshi S., Paisey S., Jalba A., Telea A. *Automated digital hair removal by threshold decomposition and morphological analysis*, International Symposium on Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing 9082, 15–26, 2015.
- [11] Celebi, M. E., Schaefer, G., Iyatomi, H., Stoecker, W. V. *Lesion border detection in dermoscopy images*, Comput Med Imaging Graph 33 (2), 148–153, 2009.
- [12] Celebi M. E., Kingravi H. A., Aslandogan Y. A. *Nonlinear vector filtering for impulsive noise removal from color images*, Journal of Electronic Imaging 16 (3), 033008, 2007.
- [13] Schmid P. *Segmentation of digitized dermatoscopic images by two–dimensional color clustering*, IEEE Trans on Medical Imaging 18 (2), 164–171, 1999
- [14] Celebi M. E., Kingravi H. A., Iyatomi H. *Border Detection in Dermoscopy Images Using Statistical Region Merging*, Skin Research and Technology 14 (3), 347–353, 2008
- [15] Geusebroek J. M., Smeulders A. W. M., van de Weijer J. *Fast Anisotropic Gauss Filtering*, IEEE Trans on Image Processing 12(8), 938–943, 2003.
- [16] Perreault S., Hébert P. *Median Filtering in Constant Time*, IEEE Trans on Image Processing 16 (9), 2389–2394, 2007.
- [17] Fleming M. G., Steger C., Zhang J. *Techniques for a Structural Analysis of Dermatoscopic Imagery*, Computerized Medical Imaging and Graphics 22 (5), 375–389, 1998.
- [18] Zhou H., Chen M., Gass R. *Feature–Preserving Artifact Removal from Dermoscopy Images*, Proc of the SPIE Medical Imaging 2008 Conf. 6914, 69141B–9, 2008.
- [19] Wighton P., Lee T. K., Atkins M.S. *Dermasopic Hair Disocclusion Using Inpainting*, Proc of the SPIE Medical Imaging 2008 Conf. 6914, 691427–8, 2008.

*Magdalena Michalska⁽¹⁾

Wykorzystanie segmentacji przez progowanie w wykrywaniu czerniaka skóry

***Streszczenie:** Celem monografii jest przegląd wybranych sposobów segmentacji przez progowanie zmian skórnych z czerniakiem. Przedstawiono również wyniki segmentacji zmian skórnych i analizy jakości powstałych po segmentacji obrazów. Analiza jakości powstałych obrazów przeprowadzona została w środowisku Matlab w oparciu o statystykę. Stworzony algorytm segmentacji pozwala na analizę pojedynczej zmiany skórnej, ukazuje trzy granice obszarów zmian skórnych w oparciu o ich barwę.*

Słowa kluczowe: dermatoskopia, czerniak, segmentacja przez progowanie, jakość obrazu

The use of thresholding in detection of skin melanoma

***Abstract:** The aim of the monograph is to review selected methods of thresholding skin lesions with melanoma. The results of skin segmentation and quality analysis resulting from image segmentation were also presented. The quality analysis of the created images was carried out in the Matlab based on statistics. The created segmentation algorithm allows analysis of a single skin lesion, shows three areas of skin lesions based on their color.*

Keywords: dermatoscopy, melanoma, thresholding, image quality

1. Wstęp

Obecnie zmiany klimatyczne stanowią poważny globalny problem. Dotyczy to wszystkich krajów. Rozmiar problemu może być zróżnicowany w zależności od położenia geograficznego. Globalne ocieplenie poprzez działanie promieni słonecznych może doprowadzić do zwiększenia liczby przypadków zachorowań na raka skóry. Czerniak jest jednym z najszybciej rozwijających się nowotworów wśród światowej populacji ludzi o jasnej skórze. Średni wzrost zachorowań na tę chorobę wśród ludzi w ciągu ostatnich czterech dekad wynosi 3%. Czerniak złośliwy jest rodzajem raka będącym jednym z najbardziej śmiertelnych na świecie, jednak jego wczesne rozpoznanie może prowadzić do skutecznego, ratującego życie leczenia. Dermatoskopia wydaje się skomplikowaną i niejasną techniką dla początkujących. Ta nieinwazyjna technika obrazowania zapewnia

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

ukazanie wielu cech zmian skórnych. Obrazy skóry są poddawane analizie dermatologa, jednak gdy jest on niedoświadczony, nowotwór może nie zostać zdiagnozowany. W związku z tym, potrzebny jest rozwój skutecznego skomputeryzowanego procesu diagnostyki w diagnozowaniu nowotworów skóry. W monografii przedstawione zostały krótko klasyczne metody wykrycia czerniaka, przetwarzanie obrazów dermatoskopowych w oparciu o regiony. Istotna jest jakość segmentacji przez progowanie, która pozwala wysegmentować obszary skóry z podejrzaną zmianą objętą czerniakiem.

2. Klasyczne metody wykrycia czerniaka

W ostatniej dekadzie wielu badaczy zajmowało się zmianami na ludzkiej skórze. Jeśli jego złośliwa odmiana jest zdiagnozowana we wczesnych stadiach na wyleczenie może liczyć 90 procent pacjentów [1]. Zostało opracowanych wiele technik do wykrywania granicy zmian skórnych na obrazach dermatoskopowych. Dermoskopia jest techniką obrazowania zapewniająca ukazanie wielu cech zmian skórnych, a powstające dzięki niej obrazy skóry są poddawane analizie dermatologa.

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) [2], algorytm CASH [3], skala Huntera, skala Clarka i Breslowa, skala TNM, lista 3 punktów, lista 7 punktów [4], metoda Menzies. Podstawowym celem badania dermoskopowego jest diagnostyka różnicowa zmian barwnikowych z podziałem na zmiany melanocytowe i niemelanocytowe. Następnie możliwe jest wyodrębnienie zmian melanocytowych wymagających wycięcia chirurgicznego. Pobrany wówczas wycinek skóry poddawany jest badaniu histopatologicznemu. Określne są wówczas znamiona atypowe, czerniak, rak podstawnokomórkowy skóry oraz znamiona łagodne, histiocytoma, naczylniki, brodawki łojotokowe. Zaletami badania dermoskopowego jest większa czułość diagnostyczna badania w porównaniu do oglądania znamion okiem nieuzbrojonym. Umożliwia to dokładniejsze badanie zmian na skórze oraz uniknięcie niepotrzebnych biopsji skóry w przypadkach trudnych do oceny gołym okiem.

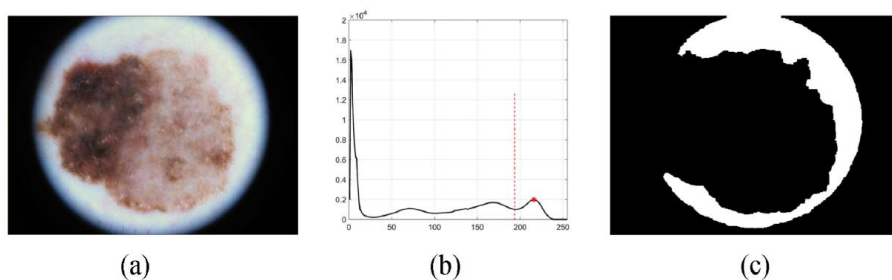
Systemów punktowania nie można stosować w przypadku niektórych specyficznych lokalizacji takich jak: twarz, błony śluzowe, dłonie lub podeszwy stóp, gdyż nie dają one sensownych wyników. Oznacza to, że w tych lokalizacjach metody te nie wystarczą. W związku z tym, rozwój skomputeryzowanego procesu diagnostyki jest niezwykle korzystne do diagnozowania nowotworów skóry [5]. Opracowane metody przekształceń obrazów dematoskopowych obejmują dzielenie oryginalnego obrazu na regiony [6–7]. Analiza obrazów na podstawie komputerowych systemów ma monitorować granice zmian skórnych [8].

3. Wykorzystanie algorytmów opartych na regionach w przetwarzaniu obrazów dermatoskopowych

Celem wielu projektów jest stworzenie automatycznego systemu komputerowego pozwalającego na wykonanie obrazów zmian skórnych, a następnie poddanie ich analizie. Analiza zazwyczaj dotyczy zmiany koloru, kształtu czy tekstury zmiany skórnej na ciele pacjenta. Obrazy są następnie kwalifikowane za pomocą różnych klasyfikatorów, jako te obrazujące zmianę zagrożoną nowotworem lub te ukazujące jedynie tkankę zdrową. Metoda wstępnego przetwarzania obrazów służy przede wszystkim do usunięcia niechcianych artefaktów z klinicznych obrazów dermatoskopowych. Znaczna ilość badań koncentruje się na automatyzacji segmentacji, ekstrakcji cech i klasyfikacji obrazów.

Stworzone zostały komputeryzowane metody analizy pojedynczej zmiany skórnej na obrazach [9–10]. Jednak w różnym stopniu oceniana jest ich skuteczność. Dostępne wersje programów diagnostycznych wciąż poprawiają skuteczność wczesnego wykrywania czerniaka. Na Rys. 1 przedstawiony został przykład wykorzystania segmentacji opartej na progowaniu. Użyto w niej wybranej wartości intensywności – progu, aby oddzielić zmianę skórą od tła jakim jest jasna skóra pacjenta.

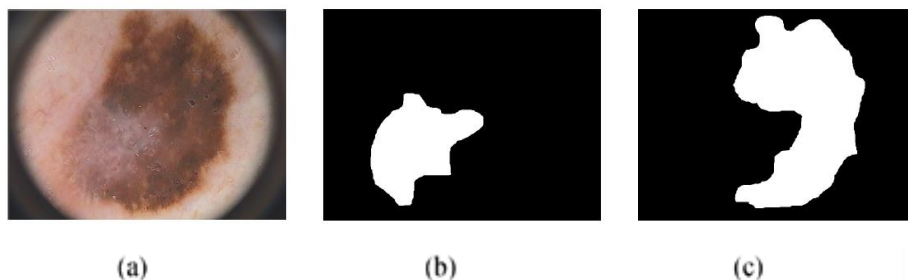
W dermoskopii zdrową skórę wokół zmiany można przyjąć jako tło, jednak konieczne jest prawidłowe określenie tła. Dla ogólnego zestawu danych istnieją obrazy zawierające inne obiekty na ich marginalnych obszarach, niektóre zakresy uszkodzeń docierają do granic obrazu. Aby wyeliminować niepożądane skutki tych problemów, wprowadzony został nowy region pseudo-tła [9,11–12]. Pożądanym jest, aby region obejmował tylko zdrową skórę.



Rys. 1. Uzyskanie nowego regionu pseudo-tła: (a) oryginalny obraz, (b) histogram szarego obrazu, w którym znajduje się ostatni pik i 90 percentyl jego lokalizacji jest wybierany jako próg, (c) progowane tło

Źródło: Cugmas B., Bürmen M., Bregar, M., Pernuš F., Likar B., Pressure-induced near infrared spectra response as a valuable source of information for soft tissue classification, *Journal of Biomedical Optics*, 18 (4), 047002, 2013.

Segmentacja przez progowanie została również wykorzystana w [13]. Obszar całej zmiany skórnej został podzielony na trzy charakteryzujące ją mniejsze obszary o różnej barwie, dzięki czemu możliwa jest skuteczniejsza analiza całej zmiany skórnej.



Rys. 2. Uzyskanie nowych regionów zmiany skórnej: (a) oryginalny obraz, (b) niebiesko–szara (środkowa) część zmiany, (c) ciemnobrązowy obszar zmiany skórnej

Źródło: Mendonca T., Ferreira P. M., Marques J. S., Marcal A. R., Rozeira J., A dermoscopic image database for research and benchmarking, 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS Osaka, 5437–5440, 2013

Zautomatyzowana diagnostyka dermoskopowa opiera się na wykorzystaniu komputerowego algorytmu analizy zmian. Obecnie jednak komputerowa analiza obrazu nie jest zalecana, jako jedyny sposób oceny zmian, gdyż jak dotąd nie jest ona w stanie ograniczyć niepotrzebnych zabiegów chirurgicznych, jak również nie zwiększa w znaczny sposób wykrywalności czerniaka. W porównaniu do badania klinicznego wzrasta jej czułość, ale zmniejsza się swoistość. Być może dalszy rozwój techniki pozwoli w przyszłości na stosowanie analizy dermoskopowej wspomaganą komputerowo, jako wiodącej metody diagnostycznej. Tymczasem jednak ma znaczenie edukacyjne i daje możliwość obserwacji rozwoju zmian w czasie oraz prowadzenia telekonsultacji.

4. Segmentacja przez progowanie zmian skórnych z obrazów dermatoskopowych

Celem tego rozdziału jest segmentacja zmian skórnych człowieka z obrazów dermatoskopowych i analiza jakości powstałych po segmentacji obrazów. Obrazy pochodzą z bazy obrazów dermatoskopowych DERMIS [14]. Obrazują czerniaka złośliwego, metastatycznego (ang. *Malignant Melanoma, Metastatic*). Ten niezwykle złośliwy czerniak może się rozprzestrzeniać się za pośrednictwem naczyń limfatycznych lub krwi, z których może atakować każdy organ ciała, zwłaszcza płuca, wątrobę, mózg, skórę i kości. Z bazy wybrane zostały dwa

obrazy zmian skórnych kobiet o pochodzeniu kaukaskim. Ich zmiany skórne zostały zdiagnozowane jako złośliwe odmiany czerniaka skóry po wykonaniu również badań histopatologicznych. Są to kolorowe obrazy dermatoskopowe o wysokiej rozdzielczości jasnej skóry, bez ciemnych i grubych włosów w okolicy czerniaka. Użyto segmentacji przez progowanie z różnymi progami. Analiza jakości powstałych obrazów przeprowadzona została w środowisku Matlab w oparciu o statystykę powstałych po segmentacji obrazów. Stworzony algorytm segmentacji pozwala na analizę pojedynczej zmiany skórnej, ukazuje trzy granice obszarów zmian skórnych w oparciu o ich barwę.

5. Obraz cyfrowy

Obraz cyfrowy można rozpatrywać jako dyskretny rozkład poziomów szarości dla obrazów monochromatycznych lub nasycenia barw dla obrazów kolorowych w funkcji L jego dyskretnych współrzędnych płaskich m i n :

$$l = L(m, n)$$

gdzie: m, n – dyskretne współrzędne punktów obrazu; l – dyskretna wartość poziomu jasności lub barwy danego punktu (m, n) obrazu cyfrowego l należącego do zbioru liczb całkowitych.

Wiele informacji o obrazie można uzyskać rozpatrując jego wybrane przekroje. Obraz będący funkcją dwóch zmiennych jest trudny do interpretacji, chociaż w zadowalający sposób oddający charakter obrazu. W Matlabie obraz można przedstawić jako funkcję dwóch zmiennych lub uzyskać przekroje obrazów w poziomie, pionie lub względem dowolnej prostej.

Segmentacja przez progowanie opiera się o proces binaryzacji obrazu. Może ona dotyczyć wyboru jednego lub wielu progów [15]. BINARYZACJĘ z górnym progiem przedstawia się jako:

$$L(m, n) = \begin{cases} 0 & \text{for } L1(m, n) \geq p \\ 1 & \text{for } L1(m, n) < p \end{cases}$$

gdzie: $L1(m, n)$ – stopnie szarości punktu w obrazie monochromatycznym; $L(m, n) \in \{0, 1\}$ – wartości w obrazie wynikowym; p – próg binaryzacji

Funkcja binaryzacji z progiem górnym powoduje, że wszystkie punkty, których stopnie szarości są powyżej progu czułości stają się czarne. Natomiast piksele w obrazie poniżej stają się białe. BINARYZACJA z dwoma progami pozwala na przekształcenia obrazu na taki, którego piksele mieszczą się pomiędzy zadanymi progami. Są one wówczas białe na obrazie, a wszystkie pozostałe piksele stają się czarne. Funkcja została przedstawiona poniżej:

$$L(m, n) = \begin{cases} 0 & \text{for } L1(m, n) \leq p1 \\ 1 & \text{for } L1(m, n) \leq p2 \\ 0 & \text{for } L1(m, n) > p2 \end{cases}$$

$p1, p2$ – progi binaryzacji, $p1 < p2$

6. Jakość obrazów

Z powodu zniekształceń podczas pozyskiwania i przetwarzania obrazu jakość obrazu może ulec znacznemu pogorszeniu. Obiektywne mierniki oceny jakości obrazu używane są do porównywania algorytmów przekształcania obrazu. Oryginalny obraz może służyć jako obraz referencyjny do pomiaru jakości innych przekształconych wersji oryginalnego obrazu. Bezpośrednio porównuje się obraz docelowy i obraz odniesienia. Jeśli natomiast obraz odniesienia bez zniekształceń nie jest dostępny można skorzystać z metryki jakości obrazu bez referencji. Należą do nich statystyki obrazów: maksymalny stosunek sygnału do szumu, wskaźnik podobieństwa strukturalnego (SSIM). Niereferencyjne metryki jakości obrazu zapewniają obiektywny wynik jakości obrazu. Pełne algorytmy odniesienia porównują obraz wejściowy z obrazem referencyjnym.

Cechy statystyczne obrazu wejściowego są porównywane z zestawem funkcji pochodzących z bazy danych obrazów. Należy do nich [16]: błąd średniokwadratowy (MSE), maksymalny stosunek sygnału do szumu (pSNR) i wskaźnik podobieństwa strukturalnego (SSIM) łączy lokalną strukturę obrazu, luminancję i kontrast w jeden lokalny wynik. MSE mierzy średnią kwadratową różnicę pomiędzy rzeczywistymi i idealnymi wartościami pikseli, natomiast pSNR pochodzi ze średniego błędu kwadratowego i wskazuje stosunek maksymalnej intensywności pikseli do mocy zniekształceń. Struktury są wzorcami intensywności pikseli, zwłaszcza pomiędzy sąsiadującymi pikselami, po normalizacji luminancji i kontrastu, może generować mapę jakości obrazu (SIM Index Map).

7. Wyniki segmentacji przez progowanie

Istotna jest technika wstępnego przetwarzania obrazów. Obrazy demoskopowe często zawierają niektóre artefakty, takie jak naczynia krwionośne, włosy i linie skóry, które jest przeszkodą w identyfikacji zmian skórnych ze zdrowej skóry. Do sprawdzenia algorytmu w Matlabie zostały wybrane obrazy jasnej skóry bez ciemnych włosów w okolicy zmian, dzięki czemu nie musiały być one wycinane z oryginalnych obrazów dermatoskopowych. Obrazy kolorowe zostały

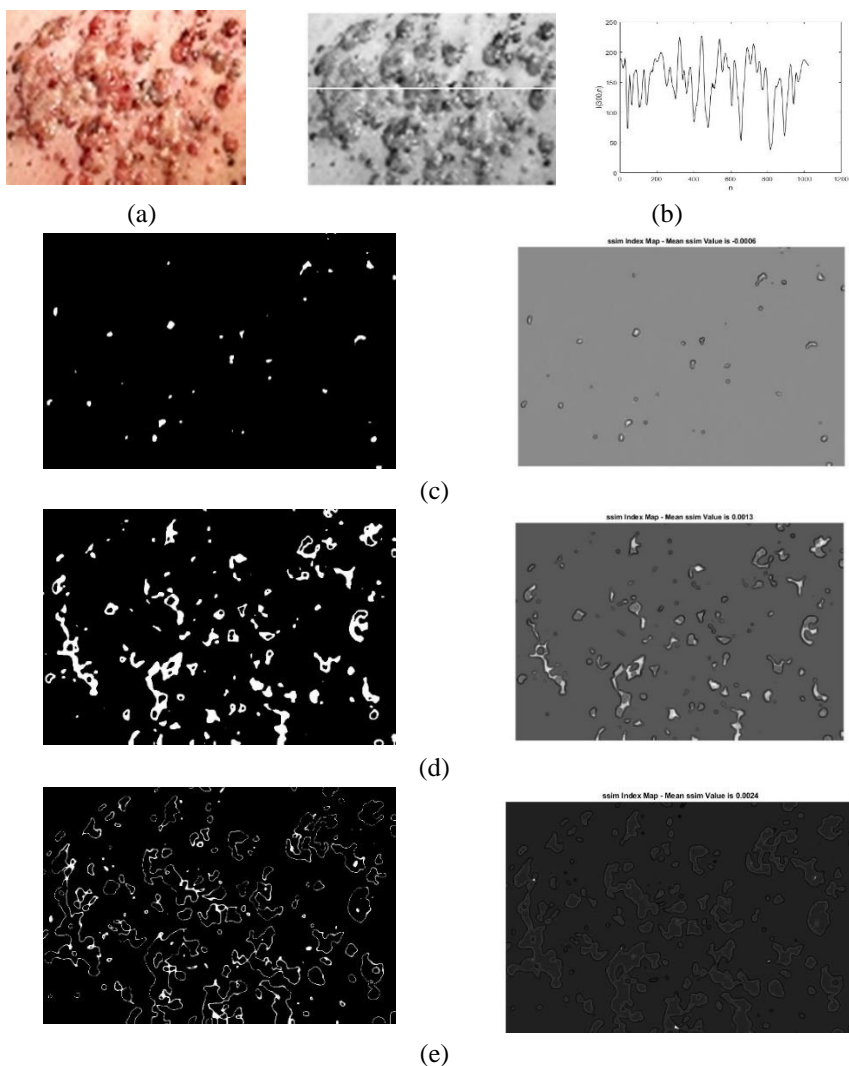
zamienione na obrazy w skali szarości, wyznaczono również ich znormalizowane histogramy. Otrzymane obrazy są obrazami monochromatycznymi, ich wartości intensywności reprezentowane są przez liczny z zakresu 1–256.

Dodatkowo określono wartości poziomów szarości wzdłuż linii poziomej. Współrzędne poziome określono tak, by ukazywały one jak najwięcej zmian poziomów intensywności skali szarości w zmianie skórnej. W Matlabie realizowano zależność poziomów jasności poszczególnych punktów w funkcji dwóch zmiennych $L(m,n)$ oraz zależności poziomów szarości wzdłuż linii poziomej $L(m^*,n)$ dla wartości $m^*=const$. Umieszczenie linii poziomej na obrazie monochromatycznym i zależności poziomów jasności poszczególnych punktów zostały przedstawione na rysunku 3b dla pacjenta 1 i $n = 300$, dla kolejnego pacjenta n również miało tą samą wartość, umieszczone na rysunku 4b.

Dla każdego pacjenta zostały wyodrębnione trzy optymalne obszary różniące się wartością intensywności pikseli. Wybrano wartości z przedziału mniejszego niż 50, 55 – 100 i 120 – 130. Obszary te najlepiej ukazują zmiany w barwie czerniaka na obrazie. Analiza barwy stanowi jeden z podstawowych elementów dla lekarza dermatologa w procesie wstępnej diagnozy czerniaka. Obszar z pikselami najciemniejszymi o wartości poniżej 50 otrzymano używając w procesie segmentacji w Matlabie binaryzacji z progiem górnym, wraz z SIM Index Map zostały przedstawione dla pacjenta 1 na rysunku 3c, dla pacjenta 2 na rysunku 4c. Kolejne z dwa z wymienionych obszarów uzyskano wykorzystując binaryzację z dwoma progami. Obszar obejmujący piksele z zakresu od 55 do 100 dla każdego z pacjentów wraz z SIM Index Map został przedstawiony na rysunku 3d dla pacjenta 1, rysunek 4d – pacjent 2.

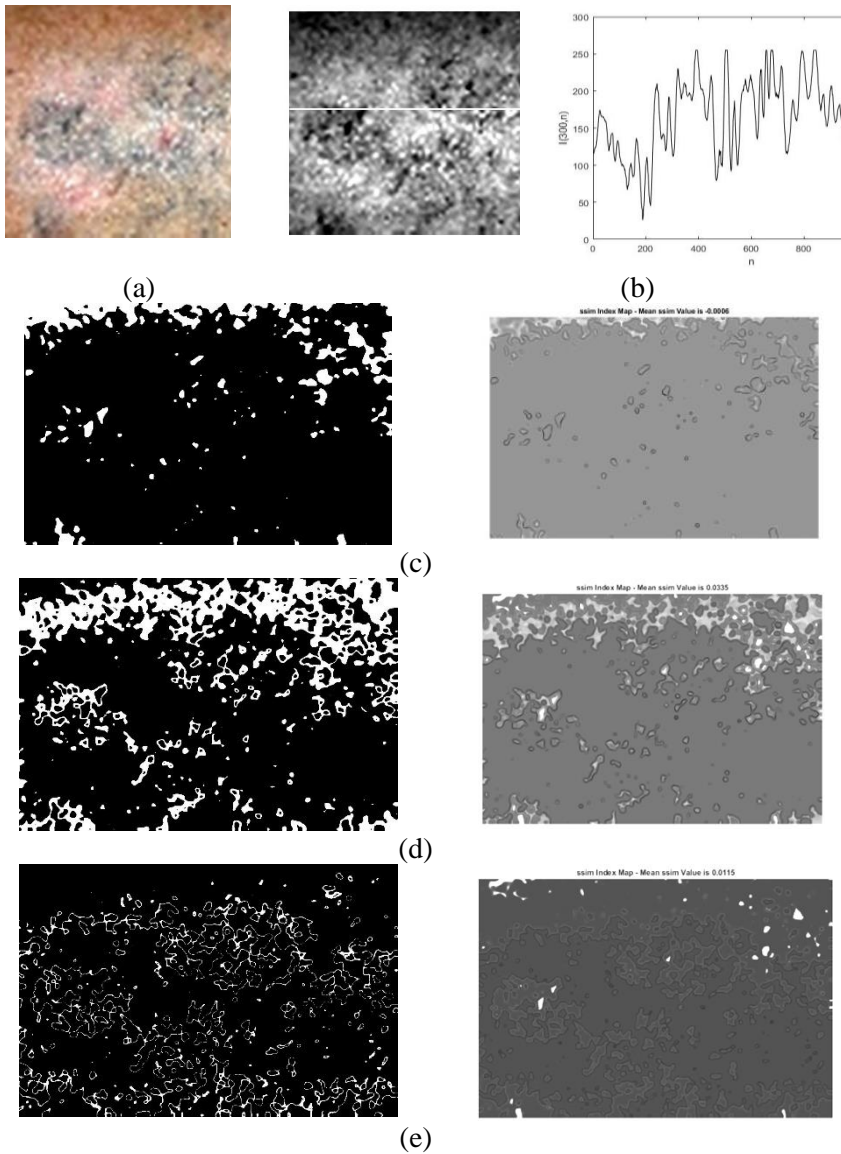
Trzeci najjaśniejszy z obszarów obejmujących zmianę skórą – malignat melanoma zawiera piksele z zakresu 120 – 130 wartości intensywności pikseli. Ukazuje on granicę pomiędzy zmianą a tkanką nieobjętą nowotworem, jak i część tkanki wewnątrz nowotworu. Nowotwór charakteryzuje się zmianami barwy wewnątrz zmiany, ale jednocześnie obszary o podobnej barwie kumulują się obok siebie. Obszary te wraz z SIM Index Map zostały przedstawione dla pacjenta 1 na rysunku 3 e, dla pacjenta 2 na rysunku 4e.

Zostały wyliczone wartości błędów MSE, p-SNR, SNR i SSIM dla każdego z trzech wysegmentowanych obszarów dla dwóch wybranych pacjentek. Każdy z obrazów uzyskanych po segmentacji wybranego z trzech obszarów ma inne wartości błędów, większe z obszarów mają większą wartość wspomnianych błędów. Obszar z wysegmentowanymi najciemniejszymi pikselami w obrazie dla pacjenta 1 i 2 mają najniższe wartości SSIM.



Rys. 3 a) Oryginalny kolorowy obraz dermatoskopowy pacjent 1; b) obraz monochromatyczny i jego wykres wzdłuż linii poziomej $L(300, n)$; c) segmentacja z progiem poniżej 50 i SIM Index Map obrazu; d) obraz po segmentacji z pikselami o wartości 55–100 i jego SIM Index Map; e) obraz po segmentacji z pikselami o wartości 120–130 i jego SIM Index Map

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



Rys. 4. a) Oryginalny obraz dermatoskopowy pacjent 2; b) obraz momochromatyczny i wykres wzdłuż linii poziomej $L(300, n)$; c) segmentacja z progiem poniżej 50 i SIM Index Map obrazu; d) obraz po segmentacji z pikselami o wartości 55–100 i jego SIM Index Map; e) obraz po segmentacji z pikselami o wartości 120–130 i jego SIM Index Map

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

8. Podsumowanie

Segmentacja odnosi się do podziału obrazu na jednorodne obszary rozłączne w odniesieniu do wybranej właściwości, takiej jak luminancja, kolor, tekstura [17]. Metody bazujące na progowaniu obejmują określenie jednego lub większej liczby wartości progowych histogramu, które oddzielają obiekty od tła. Metody oparte na regionach obejmują grupowanie pikseli w jednorodne regiony używając łączenia regionów, podziału regionu lub obu tych sposobów.

Proponowany algorytm segmentacji obrazów dermatoskopowych w Matlabie pozwala na rozróżnienie trzech obszarów skóry objętych maligną melanomą. Algorytm może być bardziej niezawodny przy automatycznym wyznaczaniu linii poziomych na obrazie czy wyznaczeniu większej ilości obszarów różniących się wartościami intensywności.

Ludzki sposób widzenia dobrze postrzega strukturę, metryka jakości SSIM bardziej zgadza się z subiektywnym wynikiem jakości. Analiza obrazu może być narzędziem korzystnym dla diagnozowania raka skóry – czerniaka w oparciu o klasyfikatory. Algorytmy w przyszłości mogą zostać przetestowane na wielu zestawach danych, co pozwoli na większą skuteczność w ocenie nowotworu.

Pojawia się jednak wiele problemów z procesem segmentacji, który daje możliwość wykrywania cech i późniejszej klasyfikacji zmian skórnych. Prężny rozwój techniki w ostatnich latach spowodował wyodrębnienie z dermatoskopii: foto- i wideodermoskopii korzystającej z zapisu cyfrowego. Archiwizacja uzyskanych obrazów znamion melanocytowych umożliwia ich porównywanie w czasie oraz sporządzanie tzw. map ciała, a wraz z rozwojem teledermoskopii na przekazywanie obrazów wideodermoskopowych podczas telekonsultacji.

Literatura

- [1] Jemal A., Siegel R., Ward E. *Cancer statistics 2008*, CA Cancer J. Clinicians 58, 22, 71–98, 2008.
- [2] Bulińska A. *Wprowadzenie do dermatoskopii według zmodyfikowanej analizy wzorca*, Czasopismo lekarzy dermatologów 1/2014 (5), 2014,
- [3] Henning J., Dusza S., Wang S. *The cash (color, architecture, symmetry, and homogeneity) algorithm for dermoscopy*, Archives of Dermatology 56, 45–52, 2007.
- [4] Argenziano G., Catricalà C., Ardigò M. *Seven-point checklist of dermoscopy revisited*, The British Journal of Dermatology 4, 785–90, 2011.
- [5] Maglogiannis I., Doukas C. N. *Overview of advanced computer vision systems for skin lesions characterization*, IEEE Trans. on Info. Tech. in Biomedicine 13(5), 721–733, 2009.
- [6] Otsu N. *A Threshold selection method from gray-scale histograms*, IEEE Trans. on Syst. Man. Cybern. 9 (1), 62–66, 1978.
- [7] Xu L., Jackowski M., Goshtasby A., Roseman D., Bines S., Yu C., Dhawan A., Huntley A. *Segmentation of Skin Cancer Images*, Image and Vision Computing 17(1), 65–74, 1999.

- [8] Menzies S. W., Crotty K. A., Ingwar C., MacCarthy W. H. *An atlas of surface microscopy of pigmented skin lesion: Dermoscopy*, McGraw–Hill, Sydney, 2003.
- [9] Jahanifar M., Tajeddin N. Z., Mohammadzadeh Asl B., Gooya A. *Supervised saliency map driven segmentation of lesions in dermoscopic images*, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics 23 (2), 509–518, 2019.
- [10] Oliveira R. B., Filho E. M., Ma Z., Papa J. P., Pereira A. S., Tavares J. M. R. S. *Computational methods for the image segmentation of pigmented skin lesions: A review*, Comput. Methods Programs Biomed. 131, 127–141, 2016.
- [11] Zhou H., Schaefer G., Sadka A. H., Celebi M. E. *Anisotropic mean shift based fuzzy C–means segmentation of dermoscopy images*, IEEE J. Sel. Topics Signal Process. 3 (1), 26–34, 2009.
- [12] Celebi M. E., Wen Q., Hwang S., Iyatomi H., Schaefer G. *Lesion border detection in dermoscopy images using ensembles of thresholding methods*, Skin Res. Technol. 19 (1), 252–258, 2013.
- [13] Mendonca T., Ferreira P. M., Marques J. S., Marcal A. R., Rozeira J. *A dermoscopic image database for research and benchmarking*, 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS Osaka, 5437–5440, 2013.
- [14] <http://www.dermis.net/dermisroot/en/18195/diagnose.htm>
- [15] Wróbel Z., Koprowski R. *Praktyka przetwarzania obrazów w programie Matlab*, Wyd.Exit, Warszawa 2004.
- [16] <https://uk.mathworks.com/help/images/image-quality.html>
- [17] Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. *Image processing, analysis and machine vision*, Cengage–engineering, Stamford, 2007.

*Dawid Zarzeczny

Kryteria doboru materiałów do zastosowania w urządzeniach biomedycznych

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest zagadnieniom związanym z biokompatybilnością materiałów. Przedstawiono kryteria jakie musi spełnić materiał aby mógł zostać wykorzystany w aplikacjach biomedycznych. Opierając się na badaniach przeprowadzonych przez Stensaas pogrupowano materiały na niereaktywne, reaktywne i toksyczne. Omówiono wpływ danych materiałów na organizmy żywe. Opisano negatywne skutki, jakie mogą one powodować. Przedstawiono metody wyboru materiałów i kryteria decyzyjne.

Słowa kluczowe: Materiały, materiały biokompatybilne, mikrowytwarzanie, aplikacje biomedyczne, cienkie warstwy

Criteria for selection of materials for use in biomedical devices

Abstract: The article is devoted to issues related to biocompatibility of materials. The criteria that the material must meet to be used in biomedical applications are presented. Based on research by Stensaas, materials were grouped into non-reactive, reactive and toxic. The influence of given materials on living organisms was discussed. Negative effects that they can cause are described. Materials selection methods and decision criteria were presented.

Keywords: Materials, biocompatible materials, microfabrication, biomedical applications, thin film

1. Wstęp

Rozwój mikro i nanotechnologii przyczynia się do powstawania gamy urządzeń o różnych zastosowaniach. Wykorzystanie mikrowytwarzania do rozwoju przyrządów biomedycznych stworzyło nową generację zminiaturyzowanej technologii wspomagającej diagnostykę, badania i leczenie. Dziedzina MEMS udowadnia swój potencjał, będąc wykorzystywaną do produkcji wielu czujników i urządzeń wykonawczych. Przykłady są liczne i obejmują czujniki fizjologiczne, czujniki biochemiczne, protezy nerwowe, protezy ślimakowe, urządzenia do podawania leków, implanty oczne i stenty naczyniowe. Korzystne właściwości skalowania, materiałów oraz występujących

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

zjawisk fizycznych powoduje, iż różnorodność i aprobatą techniczną urządzeń MEMS stale rośnie. Złożone urządzenia inżynierskie, dzięki precyzji wykonania w skali mikronowej umożliwiają prowadzenie szerokiego spektrum eksperymentów. Dzięki temu wykonywane przyrządy stają się wszechobecne nie tylko w badaniach laboratoryjnych, lecz także w aplikacjach codziennego użytkowania. Dla naukowców, urządzenia typu BioMEMS stanowią rozwiązanie obecnych problemów dotyczących uwarunkowanej manipulacji lub obserwacji tkanki żywej, dla inżynierów szereg powiązanych ze sobą wyzwań projektowych, dla pacjentów zaś opcję nieinwazyjnego leczenia punktowego. W niniejszej pracy przedstawiono problematykę związaną z doбором odpowiednich materiałów spełniających specyficzne wymagania urządzeń przeznaczonych do pracy w obecności organizmów żywych [1, 4, 5, 19, 20, 21].

2. Znaczenie procesu produkcji

Podczas rozwijania danej technologii, do chwili obecnej głównym obszarem zainteresowań był sam proces wytwarzania. Optymalizacja wydajności urządzeń była kwestią drugoplanową. Jednak wraz z dojrzewaniem procesów produkcyjnych i ich standaryzacją zauważono, że wyrób powinien przechodzić przez trzy etapy. Pierwszym jest koncepcyjny projekt urządzenia, gdzie uwaga kierowana jest na potwierdzenie rozważanego rozwiązania, za pomocą fizycznie demonstrowanego pomysłu lub zasady. Drugi etap nazwać można projektem wykonawczym, którego celem jest wykonanie prototypu. Realizowany jest za pomocą przybliżonych metod analizy i optymalizacji. Na tym etapie posługuje się przybliżonymi właściwościami materiału. Ostatni etap odnosi się do szczegółowego wykonania poprzednich stadiów produkcji. Nacisk kładzie się na rygorystyczną analizę, przy użyciu komercyjnych narzędzi analitycznych (np. MES) i technik optymalizacji. Podczas tego etapu wykorzystywane są dokładne właściwości materiału. Obecnie większość urządzeń MEMS kończy właśnie pierwszy etap projektowania dotyczący koncepcji lub przechodzi do etapu drugiego. W nim nacisk kładzie się na przezwycięzenie ograniczeń związanych z przetwarzaniem i poszerzaniem zakresu produkcji. Podczas projektowania wymagania związane z wydajnością przekładane są na optymalizację geometrii, topologii i masy wytwarzanych struktur. Z rzadka obiektem optymalizacji jest dobór materiału. Zazwyczaj wybór materiału determinowany jest dostępnością oraz prostotą obróbki podczas procesów technologicznych. Jednakże w urządzeniach specjalnych, jakimi są urządzenia typu BioMEMS, należy kierować się dodatkowymi kryteriami doboru materiałów. Diagnostyczne urządzenia biomedyczne przeznaczone do badania komórek muszą sprostać wyzwaniom dotyczącym ich rozmiaru, zużycia energii oraz biokompatybilności. Należy osiągnąć kompromis między kilkoma, zwykle sprzecznymi celami. Konieczna jest ocena możliwości wykorzystania danego

tworzywa. Później wymagana jest ocena materiałów w celu zwiększenia wydajności urządzeń z nich wykonanych, a w dalszym ciągu wyboru surowca dla optymalnej wydajności. Takie podejście zapewnić może trzy poziomy optymalizacji konstrukcji urządzenia. Aby zagwarantować osiągnięcie celu wyboru najlepszego materiału, potrzebne jest ustalenie ram jego doboru. Podczas projektowania i produkcji urządzeń typu BioMEMS, wybór materiału musi uwzględniać wszelkie niezbędne ograniczenia dotyczące właściwości mechanicznych, elektrycznych, termicznych, optycznych i chemicznych. Dodatkowo często występują także wymagania dotyczące unikalnych właściwości materiału. Struktura urządzeń, jak i metody ich wytwarzania są ograniczone wyborem materiału, który musi spełniać pożądane właściwości. Ponadto charakteryzować powinien się odpowiednią hermetycznością i biokompatybilnością. Oznacza to, że winien być bezpieczny dla organizmu, z którym posiada kontakt oraz być zdolny do funkcjonowania w warunkach *in vivo*. Analizując krytyczną rolę wyboru materiału w projektowaniu i produkcji należy wziąć pod uwagę wszystkie wymienione wyżej czynniki, co nie jest prostym zadaniem [1, 3, 4, 5].

3. Metody wytwarzania urządzeń typu BioMEMS

Wybór materiału określa narzędzia i techniki mikroobróbki dostępne do produkcji urządzeń typu MEMS. W konsekwencji precyzuje minimalny rozmiar, rozdzielczość oraz geometrie możliwe do uzyskania podczas realizacji projektu. Dostępne są liczne metody wytwarzania, posiadające różne specyficzne cechy i ograniczenia z nimi związane. Dotyczą one modelowania, osadzania cienkich warstw metalizacji oraz trawienia. Dlatego powinny być one zgodne z początkową fazą projektowania, określaniem wymiarów krytycznych oraz przyszłym przebiegiem procesu technologicznego. Alternatywne metody mikroobróbki zawierają bezpośrednie frezowanie laserowe, wykorzystywane przy obróbce metali i polimerów. Powszechnie stosowane procesy posiadają rozdzielczość produkcyjną od 10 do 100 μm , podczas gdy morfologia powierzchni, przy wystawieniu na działanie lasera, zawiera się w skali nanometrowej. Wszystkie wymienione ujęcia problematyki zawężają dostępne metody mikroobróbki, gdyż kluczowym czynnikiem przy wyborze materiałów jest możliwość ich późniejszego kształtowania [4, 10–15].

Istnieje szereg metod osadzania cienkich warstw metali, znajdujących zastosowanie przy napyłaniu typowych biokompatybilnych materiałów. Zaliczają się do nich odparowywanie oraz rozpylanie katodowe i magnetronowe. Dokładność uzyskiwanych grubości warstw sięga jednego nanometra. Warstwy takie można obrabiać wykorzystując procesy litograficzne, gdzie jedynym ograniczeniem jest uzyskiwana rozdzielczość, związana z metodyką przeprowadzania prac. Alternatywne procesy CVD zapewniają szeroki zakres

grubości warstw, począwszy od monowarstw, aż do dziesiątek mikronów. Ponadto gwarantują wysoką jednorodność powierzchni, składu chemicznego oraz odpowiednią strukturę. Niestety nie mogą być wykorzystane przy osadzaniu niektórych materiałów [6, 16, 19].

W przypadku trudności z formowaniem materiałów po procesie osadzania, kluczowe znaczenie ma możliwość wytrawiania interesujących struktur. Można spotkać się z wieloma technikami trawienia. Rozróżniamy trawienie mokre oraz trawienie suche. W skład pierwszego zaliczamy wytrawianie izotropowe i anizotropowe. Przykładami trawienia suchego jest trawienie plazmowe (Plasma Etching) i reaktywne trawienie jonowe (Reactive Ion Etching) z wykorzystaniem wiązki jonów. Ich wadą jest jednak niska prędkość wytrawiania oraz tworzenie się chropowatych powierzchni. Niestety i w tych przypadkach, procesy te nie mogą być wykonywane na pewnych materiałach [4, 19].

W przeciwieństwie do takich materiałów jak krzem, szkło lub ceramika, metale oferują wyższą od pozostałych wytrzymałość mechaniczną. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko pęknięcia, i co za tym idzie, awarii gotowego przyrządu. Przemawia to na korzyść metali jako materiałów. Jednakże równocześnie większość metali nie może być wykorzystana przy budowie skomplikowanych powierzchniowo konstrukcji elektronicznych. Przez to stosowanie ich ograniczone jest do prostych i wytrzymałych urządzeń, takich jak m.in. stenty wieńcowe i elektrody pomiarowe [4].

4. Znaczenie biokompatybilności materiałów

Zestaw materiałów wykorzystywanych w urządzeniach MEMS i BioMEMS jest dziś ogromny, ograniczony jedynie ze względu na trudności procesów stosowanych w technologii mikroprodukcji. Skupiając się na urządzeniach BioMEMS, oprócz zwracania uwagi na właściwości elektryczne i mechaniczne, pochylić należy się nad ich biogodnością. Biokompatybilność szczególnie znaczenie ma dla aplikacji przeznaczonych do przewlekłego stosowania. Przez to materiał musi spełniać rygorystyczne wymagania zarówno bezpieczeństwa użytkownika, jak również nie może osłabiać skuteczności urządzenia. Materiały testowane są pod kątem toksyczności, rakotwórczości, występujących produktów ługowania lub degradacji, oraz w celu określenia rozkładu, korozji i charakteru rozpuszczania w temperaturze otoczenia, ciśnieniu i zasoleniu typowym dla środowiska *in vivo*. Ponadto należy wziąć pod uwagę, iż odpowiedź organizmu na występowanie danego materiału determinowana jest nie tylko przez jego skład chemiczny, lecz również jego morfologię, krystaliczność, energię powierzchniową i właściwości mechaniczne [1, 4, 19, 20].

Wraz z rozwojem technik przetwarzania, takich jak LIGA, litografia stereofoniczna i mikroobróbka laserowa, obecnie możliwe jest wytwarzanie urządzeń BioMEMS złożonych z czterech różnych klas materiałów inżynierskich

– metali, niemetali, polimerów i ceramik. W niniejszej pracy skupiono się jednak tylko na metalach. Ponieważ wiele urządzeń BioMEMS jest wykorzystywanych jako czujniki, niezawodność tych urządzeń staje się bardzo ważnym parametrem, który należy brać pod uwagę. Ponadto, ważnym aspektem jest biokompatybilność danych materiałów. Przykładami typowych materiałów uważanych za biokompatybilne są kobalt, chrom, iryd, tytan, platyna oraz nitinol. Klasyfikując i dobierając materiały należy wziąć pod uwagę czy reagują z stosowanymi substancjami, posiadają odpowiednie właściwości mechaniczne oraz jakie są możliwości technologiczne ich obróbki. Wytrzymałość stosowanych w tego typu urządzeniach elektrod pomiarowych, o charakterze rezystancyjnym jak i pojemnościowym, odnosi się do odporności na związki chemiczne, w otoczeniu których znajdują się. W zależności od przeznaczenia, czujniki rejestrujące zdarzenia biologiczne lub przeprowadzające pomiary stężenia danych substancji chemicznych, nie mogą w jakikolwiek sposób wpływać na wynik pomiarów. Ponadto nie powinny reagować z obiektem badanym, lub reakcja powinna nastąpić po możliwie najdłuższym okresie. Stabilny kontakt jest w takich przypadkach niezbędny, gdyż w przeciwnym razie może dojść do rozpuszczenia materiału, lub w przypadku eksperymentów z komórkami, zajścia reakcji zapalnej badanej próbki. Dlatego, aby określić biokompatybilność strukturalną i materiałową istnieje potrzeba prowadzenia badań z zakresu badania możliwości wykorzystania poszczególnych materiałów w aplikacjach biomedycznych [1, 3, 4, 5, 7, 8, 20].

Wiele metali jest materiałami niereaktywnymi, niepowodującymi żadnych zmian. Niestety użycie niektórych, skutkuje wystąpieniem lokalnych efektów toksycznych. Grupując materiały, zgodnie z danymi histopatologii implantów koronowych Stensaas, biorąc pod uwagę ich wpływ na obiekt biologiczny, można wyodrębnić trzy główne zbiory: materiały niereaktywne, reaktywne i toksyczne. Wśród metali niereaktywnych znajdują się aluminium, złoto i między innymi platyna. Powodują niewielki lub wręcz żaden wpływ na komórki znajdujące się w ich otoczeniu. Materiały reaktywne wykazują różny stopień biokompatybilności. Znajdując się w podobnych warunkach, wykazują szersze zmiany na komórki i inne tkanki, w stosunku do materiałów niereaktywnych. Chociaż istnieją mechanizmy neutralizujące wpływ substancji na organizm, w przypadku obecności materiałów reaktywnych, procesy te są mocno utrudnione. Do materiałów reaktywnych zalicza się tantal oraz dwutlenek krzemu, natomiast jako materiały toksyczne należy traktować żelazo, kobalt, srebro, nikiel oraz miedź. Materiały uważane za toksyczne, tj. miedź, żelazo i kobalt, niezależnie od lokalnych poziomów toksyczności, największe działanie szkodliwe powodują po długotrwałej ekspozycji. Dochodzić może wtedy do mineralizacji ukrytej tkanek. Zjawisko polega na występowaniu podwyższonej zawartości danych pierwiastków w tkance. Powoduje to różnego typu dolegliwości, mogące prowadzić nawet do śmierci całego organizmu. Mineralizacja jest konsekwencją zmian zachodzących w płynie

pozakomórkowym. Dlatego wyżej wymienione metale nie powinny być używane do urządzeń wszczepianych, ze względu na wysoką reaktywność tkanek. Przy ocenie toksyczności implantu należy zbadać obecność mineralizacji w przestrzeni pozakomórkowej, lub w makrofagach, astrocytach i fibroblastach [1, 2, 9, 20, 21].

Przeprowadzono szereg eksperymentów, dotyczących szczegółowego określenia wpływu różnych metali na organizm. Jednymi z najbardziej rozpowszechnionych materiałów stosowanych do produkcji układów mikroelektronicznych są miedź i aluminium. Technologia obróbki danych metali jest dobrze znana, a wytwarzanie cienkowarstwowych struktur bazujących na nich jest relatywnie proste. Niestety w aplikacjach typu BioMEMS zastosowanie ich jest mocno ograniczone, ze względu wykazywania toksyczności na materiał biologiczny. Poddając badaniom możliwość wykorzystania miedzi i aluminium, które posiadają znakomite właściwości elektryczne, dowiedziono, iż z danych metali to właśnie aluminium w mniejszym stopniu reaguje z tkankami organizmów żywych. Miedź umiejscowiona wewnątrz organizmu okazuje się bardzo toksyczna, powodując zauważalne uszkodzenia i martwicę tkanek. Nie wyklucza to jednak jej wykorzystania w aplikacjach in vitro, o krótkim czasie trwania, np. wszelkiego rodzaju czujnikach i detektorach [1, 2]

Liczne eksperymenty wykazały, że bardziej odpowiednimi materiałami do zastosowań w aplikacjach medycznych są złoto oraz stal nierdzewna. Wykazują one bardzo dobrą biokompatybilność, w stosunku do takich materiałów jak platyna lub wolfram, których biogodność jest na wysokim poziomie. Ze względu na wysoką cenę złota uwagę należy zwrócić na stal nierdzewną oraz chromonikielinę, która może w znaczącym stopniu zredukować koszty prowadzenia badań. Ciekawym rodzajem stali nierdzewnej, łączącej oba materiały, jest stal chirurgiczna serii 300 zawierająca nikiel oraz chrom. Jest ona najbardziej odporna na korozję spośród pozostałych gatunków stali chirurgicznych. Wykonuje się z niej niektóre narzędzia chirurgiczne, przyrządy do przekuwania skóry (piercing) oraz wyroby będące w stałym kontakcie ze skórą (biżuteria). Analizując jej zalety, takie jak odporność na korozję ze strony rozcieńczonych kwasów i roztworów alkalicznych, zakwalifikować można ją do materiałów niewpływających na organizmy żywe, bądź których wpływ jest znikomy. Biorąc pod uwagę fakt, iż wspomniana stal chirurgiczna zawiera w swoim składzie różne pierwiastki, nie można zapomnieć o możliwości wystąpienia niepożądanego reakcji związanej z wpływem jednego z nich. Szczególnie dotyczy to urządzeń wprowadzanych do organizmu. Odpowiedź alergiczna odzwierciedla stan nadwrażliwości uzyskanej przez wcześniejszą ekspozycję na konkretną substancję, tzw. alergen, co skutkuje wytwarzaniem zwiększonej zdolności układu odpornościowego do reagowania. Alergenem nazywamy każdą substancję zdolną do wytworzenia określonego rodzaju podatności. Reakcję alergiczną można uznać za przesadne zachowanie mechanizmów obronnych organizmu. Wiadomo, że na ogół jeśli stop zawiera pierwiastek alergenny, implantacja stopu wywoła reakcję alergiczną. Istnieje lista

metali alergicznych, na której znajdują się m.in. nikiel, chrom i kobalt. Alergia na pierwszy dotyczy 20% ludzi, chrom 1–2%, natomiast kobalt zaliczany jest do alergenów towarzyszących. Stosunkowo rzadko objawy alergiczne związane są z wpływem platyny, aluminium, srebra oraz złota. Znany jest przykład opisany przez Barranco i Solomana, którzy zgłosili przypadek niklowego zapalenia skóry u kobiety, która miała przekłute uszy przed implantem chirurgicznym. Po kontuzji rzepki do zabezpieczenia przeniesionego ścięgna w nowym miejscu, użyta została śruba ze stali nierdzewnej. Po zabiegu wystąpiła reakcja alergiczna charakteryzująca się wypryskowym zapaleniem skóry. Następnie objawy przerzuciły się na miejsca kontaktu skóry z biżuterią, która wykonana była ze stali nierdzewnej. Lekarze podejrzewali, że spowodowane jest to najprawdopodobniej przez nikiel. Przeprowadzono testy płatkowe, polegające na przyklejeniu na plecach pacjenta specjalnych płatków lub plastrów nasączonych alergenami. Testy te odczytywane są po 72 i 96 godzinach. Reakcja zapalna na skórze w postaci zaczerwienienia lub obrzęku świadczy o uczuleniu na dany alergen. W celu identyfikacji substancji wywołującej alergię, rozszerzono paletę standardowych próbek o czysty nikiel, siarczan niklu oraz fragmenty usuniętej z ciała kobiety śruby ze stali nierdzewnej. Rezultaty otrzymane z wszystkich próbek dały wynik negatywny, z wyjątkiem wymienionych, zawierających w swoim składzie nikiel. Przykład ten wyraźnie ukazuje, że organizm lub próbka biologiczna może reagować na pojedynczy element znajdujący się w stopie. W danym przypadku był to nikiel znajdujący się w stali chirurgicznej [1].

5. Podsumowanie

Proces wytwarzania aplikacji BioMEMS jest zadaniem skomplikowanym. Ich złożoność uniemożliwia wykorzystanie wszystkich dostępnych metod mikroobróbki. Podczas projektowania należy zwrócić uwagę na wszystkie etapy procesu produkcji, aby móc dobrać najlepsze metody mikrowytwarzania. Dodatkowo, najprawdopodobniej najważniejszą kwestią jest biokompatybilność używanych materiałów. W pracy przedstawione zostały zagadnienia związane z analizą możliwości wykorzystania poszczególnych materiałów do wykorzystania ich przy produkcji urządzeń biomedycznych. Skupiono się na materiałach najczęściej stosowanych w urządzeniach BioMEMS. Dokonano podziału materiałów na niereaktywne, reaktywne oraz toksyczne. Przedstawiono przykładowe materiały, które mogą zostać użyte. Zwrócono uwagę na mnogość kryteriów, które muszą być spełnione przez wykorzystywany materiał. Przedstawiono zagrożenia związane z doбором niewłaściwego materiału. Poruszone w artykule kwestie determinują do prowadzenia dalszych badań nad wpływem poszczególnych materiałów na organizmy żywe.

Literatura

- [1] Geddes L. A., Roeder R. *Criteria for the Selection of Materials for Implanted Electrodes*, Annals of Biomedical Engineering 31, 879–890, 2003.
- [2] Stensaas S. S., Stensaas L. J. *Histopathological Evaluation of Materials Implanted in the Cerebral Cortex*, Acta neuropathologica 41, 145–155, 1978.
- [3] Ullman D. G. *The Mechanical Design Process*, McGraw–Hill Education, 1992.
- [4] Scholten K., Meng E. *Materials for Microfabricated Implantable Devices: A Review*, Lab on a Chip 15, University of Nebraska, 2015.
- [5] Meng E., Sheybani R. *Insight: implantable medical devices*, Lab Chip 14, 3233–3240, 2014.
- [6] Madou M. J. *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*, CRC press, 2002.
- [7] Jiang G. *Design challenges of implantable pressure monitoring system*, Frontiers in Neuroscience 4, 2010.
- [8] Jiang G., Zhou D. D. *Technology Advances and Challenges in Hermetic Packaging for Implantable Medical Devices*, Implantable Neural Prostheses 2, Springer, 27–61, 2010.
- [9] Stensaas S. S., Stensaas L. *Histopathological evaluation of materials implanted in the cerebral cortex*, Acta neuropathologica 41, 145–155, 1978.
- [10] Kathuria Y., Mater J. *Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy*, Journal of Materials Processing Technology 170, 545–550, 2005.
- [11] Kathuria Y. P. *An overview on laser microfabrication of biocompatible metallic stent for medical therapy*, Laser Assisted Micro and Nanotechnologies, 5399, 234–244, 2004.
- [12] Schuettler M., Stiess S., King B., Suaning G. *Fabrication of implantable microelectrode arrays by laser cutting of silicone rubber and platinum foil*, J. Neural Eng. 2, 121–128, 2005.
- [13] Malek C. G. K. *Laser processing for bio–microfluidics applications (part I)*, Analytical and bioanalytical chemistry 385, 1351–1361, 2006.
- [14] Malek C. G. K., *Laser processing for bio–microfluidics applications (part II)*, Analytical and bioanalytical chemistry 385, 1362–1369, 2006.
- [15] Vorobyev A., Guo C. *Femtosecond laser structuring of titanium implants*, Applied surface science 253, 7272–7280, 2007.
- [16] Ghodsi R., Lin P. *MEMS Materials and Processes Handbook*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [17] Napieralska M., Jabłoński G., *Research and Training Action for System on Chip Design*, Podstawy Mikroelektroniki, Łódź, 2002.
- [18] Kociubiński A., Zarzeczny D., Szypulski M. *Kondensatory grzebieniowe z miedzi do monitorowania funkcji życiowych komórek hodowlanych*, Przegląd Elektrotechniczny 9, 59–61, 2018.
- [19] Zarzeczny D., Szypulski M., Lizak T., Muzyka K., Kociubiński A., Prendecka M., Malecka–Massalska T. *Design and technology of titanium comb capacitor*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High–Energy Physics Experiments, 10808, 2018.
- [20] Kociubiński A., Szypulski M., Zarzeczny D., Lizak T., Muzyka K., Prendecka M., Malecka–Massalska T., *Design and technology of copper comb capacitors*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High–Energy Physics Experiments, 10808, 2018.

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

Tynki renowacyjne z udziałem Zeolitów

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest ocenie wpływu dodatku zeolitów na właściwości warstwy podkładowej tynków renowacyjnych. Przedmiotem badań była zaprawa z dodatkiem różnych zeolitów: zeolitu naturalnego – Klinoptylolitu oraz zeolitów syntetycznych – Na–A, Na–X. W artykule dokonano pomiarów podstawowych parametrów mechanicznych i fizycznych. Określono wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie, gęstość pozorną oraz właściwą, porowatość całkowitą, mrozoodporność oraz odporność na ciśnienie krystalizacyjne soli. Wszystkie próbki charakteryzowały się wysoką porowatością co spowodowane było dodatkiem zeolitu. Zwiększenie porowatości spowodowało spadek właściwości wytrzymałościowych. Próbki przeszły badania na mrozoodporność oraz na krystalizację soli jednak wynik nie był zadowalający. Najlepsze wyniki uzyskiwały zaprawy z zeolitem klinoptylolitem. Najlepszymi właściwościami wytrzymałościowymi odznaczały się zaprawy z zeolitem Na–P1. Zeolit ten charakteryzował się największym stosunkiem krzemu do glinu, co powoduje wzrost zawartości fazy C–S–H.

Słowa kluczowe: zeolity, tynki renowacyjne, mrozoodporność, krystalizacja soli

Renovation renders with Zeolites

Abstract: The article is devoted to assessing the impact of the addition of zeolites on the properties of the undercoat of renovation plasters. The subject of the study was mortar with the addition of various zeolites: natural zeolite – Clinoptilolite and synthetic zeolites – Na–A, Na–X. Basic mechanical and physical parameters were measured in the article. Flexural strength, compressive strength, apparent and specific density, total porosity, frost resistance and resistance to salt crystallisation pressure were determined. All samples were characterized by high porosity which was caused by the addition of zeolite. Increasing the porosity caused a decrease in strength properties. Samples underwent tests for frost resistance and salt crystallization, however the result was not satisfactory. Mortars with zeolith clinoptilolite obtained the best results. Mortars with zeolite Na–P1 had the best strength properties. This zeolite had the highest silicon to aluminum ratio, which causes an increase in the C–S–H phase content.

Keywords: zeolite, ,renovation render, frost resistance, salt crystallization,

1. Wstęp

Remonty przeprowadzane na starych, wilgotnych, słonych ścianach muszą rozwiązać problemy obecności soli w ich strukturze. Często wymagana jest w tym

⁽¹⁾j.styczen@pollub.pl, Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

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

celu ekspertyza związana z migracją wilgoci do wnętrza ściany oraz naprawa zniszczonej elewacji [1]. Krystalizacja soli powoduje liczne wykwyty w postaci płam oraz pęknięcia na powierzchni ściany. Na takich ścianach należy zastosować system tynków renowacyjnych [2]. System ten składa się z kilku warstw, najważniejszą z nich jest warstwa podkładowa. Za zadanie ma ona akumulację soli w swojej strukturze [3]. Musi więc charakteryzować się wysoką porowatością by sole miały miejsca na krystalizację. Poszukiwane są dodatki dzięki, którym tynk mógłby uzyskać odpowiednią strukturę. Jednym z takich dodatków są minerały z grupy zeolitów. Dzięki licznym przestrzeniom oraz kanałom zawartym w swojej strukturze idealnie nadają się na zastosowanie w tynkach renowacyjnych [4].

2. Charakterystyka materiałowa i wymagania

2.1. Tynki renowacyjne

Bardzo często w budownictwie mamy do czynienia z zasolonymi, popękkanymi ścianami. Przy renowacji takich ścian stosowany jest kompleks tynków renowacyjnych. Kompleks ten składa się z kilku warstw tynku, a mianowicie: obrutki tynkowej, warstwy podkładowej i warstwy zewnętrznej. Warstwy te są ze sobą kompatybilne, a każda z warstw pełni inną funkcję. Obrzutka nakładana jest wybiórczo na tynk, jej głównym zadaniem jest zwiększenie przyczepności kolejnych warstw muru. Warstwa podkładowa jest najważniejszą warstwą ponieważ ma za zadanie akumulowanie w swojej strukturze soli z zawilgoconego muru [4, 5]. Warstwa wierzchnia powinna odznaczać się dużą hydrofobowością, tak by stanowiła barierę dla wód opadowych. Tynki renowacyjne określane są mianem tynków WTA, wymagania im stawiane są bowiem opisane w niemieckiej instrukcji WTA-2-9-04 „Sanierputzsysteme” [6].

System tynków renowacyjnych powinien spełniać następujące wymagania [7]:

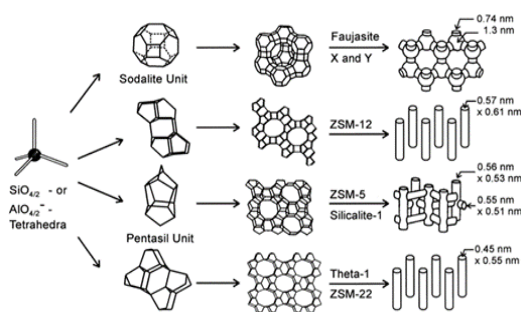
- zawartość powietrza w świeżej mieszance powinna być większa niż 20%
- odpowiedni współczynnik absorpcji wody powierzchniowej w 24 godz.> 0,3 kg/m²,
- wytrzymałość na ściskanie β_d powinna wynosić między 1,5 i 5 MPa
- stosunek β_d / β_{bz} (wytrzymałość na rozciąganie) <3.
- wysoką mrozoodporność
- wysoka wodoodporność
- odporność na ciśnienie krystalizacyjne soli
- hydrofobowość

2.2. Zeolity

Zeolity to grupa glinokrzemianów w której występują duże liczne kanały oraz komory. W składzie chemicznym minerałów z grupy zeolitów można wyróżnić trzy rodzaje składników, a mianowicie: kationy jonowymiennie, sieć krystaliczną oraz wodę zeolitową zgodnie ze wzorem nr 1 [8].



Szkielet zeolitów ma budowę hierarchiczną przedstawioną na rysunku 1. Tetraedry krzem- i glinotlenowe łączy się ze sobą narożami tworząc układy pierścieniowe, które z kolei łączą się tworząc bryły o różnych kryształach [9]



Rys. 1. Struktura wybranych zeolitów i ich system kanałów

Źródło: Weitkamp, 2000 [9]

Zeolity dzielimy ze względu na różnorodny system kanałów: [10]

- System jednowymiarowych kanałów
 - System dwuwymiarowych kanałów
 - System trójwymiarowych kanałów (Breck, 1974)
- Inną metodą podziału jest klasyfikacja Zeolitów ze względu na rozmiar porów [10]
- Zeolity wąskoporowate zawierające pierścienie ośmioczłonowe
 - Zeolity średnioporowate zawierające pierścienie dziesięcioczłonowe
 - Zeolity szerokoporowate zawierające pierścienie dwunastoczłonowe

W środowisku naturalnym zeolity występują w jeziorach alkalicznych, złożach wulkanicznych, glebach alkalicznych itp. Do powstania zeolitów prowadzi również oddziaływanie wód powierzchniowych na skały piroklastyczne bogate w szkliwo wulkaniczne. Do największych złoża zeolitowych możemy zaliczyć: klinoptylolit filipsyt i mordenit.

Obok zeolitów naturalnych występują zeolity syntetyczne, o ściśle określonych strukturach i cechach. Syntetyczne zeolity mogą być otrzymywane z odczynników chemicznych, surowców mineralnych oraz odpadów

stanowiących uboczne produkty spalania węgla np. z popiołów lotnych. W przeciwieństwie do Zeolitów naturalnych nie zawierają domieszek innych minerałów. Zeolity syntetyczne ponadto nie wymagają drogiej obróbki i modyfikacji co czyni go lepszym materiałem przemysłowym [11].

W badaniach wykorzystane zostały zeolity syntetyczne oraz dla porównania zeolit naturalny klinoptylolit.

Węgiel kamienny jest jednym z podstawowych surowców dostarczających energię. Ciągłe rosnące zapotrzebowanie powoduje jego znaczne wykorzystanie w gospodarce. Wykorzystuje się przede wszystkim węgiel kamienny, brunatny jak i jego mieszaniny z biomasą. Energia pozyskiwana jest w procesie spalania. Niesie to za sobą wiele niekorzystnych dla środowiska zmian. W procesie tym powstaje wiele odpadów, które niekorzystnie wpływają na środowisko naturalne. Są to spaliny zawierające tlenki azotu, siarki oraz węgla. Temu procesowi towarzyszy również powstanie odpadów stałych tj. popioły lotne. [12] Popioły te wykorzystywane są do produkcji wtórnych surowców tj. zeolity syntetyczne. Zeolity syntetyczne wykorzystane w pracy to zeolity Na-X, Na-P1. Zeolity te zostały zsyntezowane metodą hydrotermalną.

Metoda syntezy polega na rozpuszczeniu popiołu lotnego w roztworze wodorotlenku sodu NaOH. W tej metodzie bardzo duże znaczenie ma skład popiołu lotnego, temperatura, tężenie roztworu oraz czas reakcji. Roztwór NaOH powoduje rozpuszczenie szkliwa glinokrzemianowego występującego w popiele. Po części następuje również rozpuszczenie kwarcu oraz mullitu. Kondensujący żel osadza się na powierzchni cząstek popiołu dzięki czemu następuje nukleacja zeolitów [13].

3. Materiały i metody

3.1. Materiały

Przygotowano skład trzech mieszanek warstwy podkładowej tynku renowacyjnego. Kompozycje suchych składników zaprawy przedstawiono w Tabeli 1. Receptury oznaczono następującymi symbolami: NaX – zaprawa z dodatkiem zeolitu NaX, NaP1 – zaprawa z dodatkiem zeolitu Na-P1, K – zaprawa z dodatkiem zeolitu naturalnego klinoptylolitu.

W zaprawach zastosowane zostały trzy odmiany zeolitu [8]:

- Klinoptylolit – o uziarnieniu 0,5–3. Minerale pochodzenia wulkanicznego. Skała o barwie szarej. Charakteryzuje wysoka porowatość oraz dyfuzyjność zaprawy. Porowata struktura mieszanek z naturalnym zeolitem stymuluje migrację wody co wpływa na wiązanie i wytrzymałość mechaniczną.
- Zeolit syntetyczny Na-P1 (GIS) – skład chemiczny: $\text{Na}_6[\text{Si}_{10}\text{Al}_6\text{O}_{32}] \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$, Trójwymiarowa sieć kanałów, rozmiar kanałów: $4,5 \times 3,1 \text{ \AA}$, $4,8 \times 2,8 \text{ \AA}$

- Zeolit syntetyczny (FAU) – skład chemiczny: $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_2,5\text{O}_9] \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, Trójwymiarowa sieć kanałów, rozmiar kanałów: 7,4 x 7,4 Å

Tabela 2. Składy zapraw tynku renowacyjnego – warstwa podkładowa

	Na–P1	Na–X	K
CEM I 52.5 R	15,54	15,54	15,54
Zeolit syntetyczny	7,5	7,5	–
Zeolit klinotylolit frakcji 0,5–3mm	–	–	7,5
Keramzyt	3,45	3,45	3,45
Wapno hydratyzowane	4,8	4,8	4,8
Piasek zwykły frakcji 0–2mm	60,16	60,16	60,16
Domieszka stabilizująca – retentor o składzie wodorotlenku metylocelulozy	0,15	0,15	0,15
Żywica proszkowa na bazie kopolimeru octanu winylu–etylenu	0,9	0,9	0,9
Perlit	7,5	7,5	7,5

Źródło: opracowanie własne

Wapno hydratyzowane użyte w badaniach spełniało wymagania stawiane w normie PN–EN 459–1. Gęstość pozorna 390–410 kg/m³. Skład chemiczny wapna: CaO – 95,5%, MgO – 0,5%, CO₂ – 2,1%, SO₃ – 0,1%, woda wolna – 1,5% [14].

Cement portlandzki klasy wytrzymałościowej 52,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej (R). Głównym składnikiem cementu CEM I 52, 5R był klinkier portlandzki (95%) oraz regulator czasu wiązania (do 5%). Cement spełnia wymagania zawarte w normie PN–EN 197–1 "Cement –Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku". oraz PN–EN 197–2:2002 – "Cement – Część 2: Ocena zgodności" [15,16]

Keramzyt – lekkie, trwałe, porowate kruszywo ceramiczne, uzyskiwane przez wypalanie gliny w piecach o temp. Ok. 1150°C. Jest lekkim, izolującym ciepło, niepalnym i mrozoodpornym dodatkiem o szerokim zastosowaniu. Właściwości fizyczne: gęstość nasypowa 790 kg/m³, absorpcja wody 14%, porowatość 69%, przewodność cieplna 0,20 W/mK [17]

Domieszka stabilizująca – retentor o składzie wodorotlenku metylocelulozy – Zaprawy z dodatkiem metylocelulozy uzyskują dobre właściwości funkcjonalne.

Właściwości metylocelulozy to: gęstość 1,1–1,5 g / cm³ pH 6–8 (10 g / lw temp. 20°C), gęstość nasypowa 200–600 g / l, rozpuszczalność w wodzie > 10 g / l [18].

Żywica proszkowa na bazie kopolimeru octanu winylu–etylenu – zastosowano jako domieszkę uplastyczniająco–wzmacniającą. Polimer poprawia wiele właściwości: urabialność, poprawia elastyczność mieszanki. Właściwości: temperatura zeszklenia 19–21°C, średnia wielkość cząstek 400–500 nm, pH 3,5–5, zawartość suchej masy 50±2%, minimalna temperatura tworzenia filmu 5–7°C.

Perlit – jest amorficznym szkłem wulkanicznym o stosunkowo wysokiej zawartości wody. Jest to minerał przemysłowy i produkt handlowy przydatny ze względu na małą gęstość po przetworzeniu. Właściwości: ogniotrwały i chemicznie obojętny o stabilnej objętości, odporny na wilgoć i zanieczyszczenia, wysoka odporność na zamarzanie, szkodniki, mikroorganizmy i wysokie temperatury, niski przewodność cieplna, dzięki czemu może pełnić funkcję izolatora termicznego [19].

Piasek kwarcowy (0/2 mm). Skład chemiczny, w którym stosuje się piasek, wynosi 95,3% SiO₂, 1,9% Al₂O₃, 0,7% Fe₂O₃, 0,35% CaO. Piasek kwarcowy ma ciężar właściwy 2650 kg · m³, absorpcję wody 1,2%, a wilgotność 0,16% [20].

3.2. Przygotowanie próbek

Próbki zostały przygotowane na podstawie normy PN–EN 196–7: 2008. Przygotowano próbki o wymiarach 40×40×160 mm. Procedura polegała na połączeniu suchych składników, a następnie dodaniu wody. Mieszanie odbywało się w mieszarce automatycznej, gdzie wszystkie etapy mieszania dokonywane były samoczynnie. Czas mieszania – 4 minuty. Beleczki uformowano w przygotowanej wcześniej formie trójdzielnej. Do każdej przegrody formy, odmierzone po 300 g zaprawy, po czym zagęszczono ją 60 wstrząsami. Procedura ta została powtórzona. Po usunięciu nakładki, nadmiar zaprawy usunięty został za pomocą linijki zgarniającej. Formy rozformowano po 24h. Próbki przechowywano w komorze klimatycznej w temperaturze 23,5°C przy wilgotności względnej 73,5% przez 21 dni [21].

3.3. Metody

Określona została gęstość objętościowa stwardniałych zapraw zgodnie z normą PN–EN 1015–10 tabeli 2 [22]. Do wyznaczenia gęstości właściwej użyto metody piknometrycznej. Przeprowadzono badanie dwóch próbek dla każdego rodzaju zaprawy. Materiał do badań uprzednio został wysuszony w suszarce do stałej masy a następnie rozdrobniony w młynku kulowym.

Wskaźnik szczelności określony został jako stosunek gęstości pozornej do gęstości właściwej.

Określono współczynnik absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy wg. PN–EN 1015–18 „Metody badań zapraw

do murów –Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy" [23].

Wykonane zostały również badania porowatości całkowita stwardniałych zapraw na podstawie normy PN-EN 1936:2010 [24].

Wytrzymałość na zginanie i na ściskanie zbadano na podstawie normy PN-EN 1015-11 [25] odpowiednio na 3 i 6 próbkach.

Badanie mrozoodporności zostało przeprowadzone zgodnie z normą PN-88/B-06250 [26]. Do badań przyjęto po 6 próbek na każdy zarób.

Badanie odporności na krystalizację soli zostało wykonane według zaleceń normy PN-EN12370:2001 [27].

4. Rezultaty

Własności fizyczne i mechaniczne warstwy podkładowej tynku renowacyjnego przedstawione zostały w Tabeli.2.

Tabela 2. Właściwości fizyczne oraz mechaniczne zapraw

Typ zaprawy	Gęstość pozorna (kg/m ³)	Gęstość (kg/m ³)	Całkowita porowatość (%)	β_{bd} Wytrzymałość na ściskanie (MPa)	β_{bz} Wytrzymałość na zginanie (MPa)	Stosunek β_{bd}/β_{bz}
Na-P1	1100,4	2660	48,05	3,4	1,32	2,57
Na-X	930,5	2510	51,43	2,55	1,1	2,32
K	901,4	2440	55,2	2,9	1,9	1,53

Źródło: opracowanie własne

Największą gęstość miały próbki z udziałem zeolitu Na-P1. Porowatość całkowita największa była dla próbek z udziałem zeolitu klinoptylolitu. Ma to związek z jego uziarnieniem, ponieważ w przeciwieństwie do zeolitów syntetycznych miał on ziarna o frakcji 0,5–3mm. Zeolity syntetyczne miały postać proszkową. Największą wytrzymałością na ściskanie oraz zginanie charakteryzowały się próbki z udziałem zeolitu Na-P1. Wszystkie próbki spełniły warunek stawiany przez instrukcję WTA dotyczący stosunku β_{bd}/β_{bz} .

Badanie mrozoodporności zostało przeprowadzone na 6 próbkach na każdy zarób. próbki zostały poddane cyklicznemu zamrażaniu w powietrzu o temperaturze $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$, przez co najmniej 4 godz., a następnie ich rozmrażaniu w wodzie o temperaturze $18\pm 2^{\circ}\text{C}$. Liczba cykli wynosiła 25. Wszystkie analizowane warstwy podkładowe tynków renowacyjnych przeszły test. Ubytek masy był największy w próbkach z udziałem Zeolitu Na- X. Najlepsze okazały się próbki z zeolitem Klinoptylolitem, tu ubytek masy wynosił 9%.

Tabela 2. Średni procentowy ubytek masy

Typ badania	Na-P1	Na-X	Z
Mrozoodporność	13%	14%	9%
Krystalizacja soli	29%	40%	18%

Źródło: opracowanie własne

Do badania odporności na ciśnienie krystalizacyjne soli użyto po 6 próbek z każdego zarobu o wymiarach 40×40×40 mm. Próbkę po wysuszeniu i zważeniu zostały zanurzone w 14-procentowym roztworze siarczynu sodu. Cykl nasączenia i suszenia wykonano 15 razy. Wyniki przedstawione są w Tabeli. 2. Zdjęcia próbek po 15 cyklach przedstawione są na Rys.2.



Rys. 2. Wygląd próbek po badaniu odporności na ciśnienie krystalizacyjne soli. Od lewej zaprawy: Z, Na-P1, Na-X

Źródło: Opracowanie własne

Próbki przeszły test na ciśnienie krystalizacyjne soli. Próbki jednak po piętnastu cyklach charakteryzowały się licznymi spękaniem oraz łuszczącą się powierzchnią. Najgorzej wypadły próbki z udziałem zeolitu Na-X, tu ubytek masy wynosił aż 40%. Najmniejszy spadek masy występował w próbkach z Klinopytlolitem.

5. Wnioski

Artykuł analizuje przydatności zeolitu, jako dodatku do warstwy podkładowej tynków renowacyjnych. Poddane badaniom zostały próbki z zeolitem naturalnym klinopytlolitem oraz zeolitami syntetycznymi Na-P1 oraz Na-X. Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnąć można następujące wnioski końcowe:

- Wszystkie badane warstwy podkładowe tynków nie przekroczyły wymaganego przez WTA stosunku wytrzymałości β_{bd} do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu β_{bz} . Stosunek $\beta_{bd}/\beta_{bz} < 3$.
- Wszystkie analizowane tynki renowacyjne wykazały się mrozoodpornością. Najlepsze wyniki uzyskały zaprawy z udziałem Zeolitu Na–P1.
- Tynki wykazały odporność na krystalizację soli. Masa próbek jednak znacznie zmalała. Co może mieć związek z obecnością perlitu w składzie.
- Badania wytrzymałościowe wykazały, że najlepsze parametry uzyskują zaprawy z zeolitem Na–P1. Zeolit ten ma największy stosunek krzemu do glinu co powoduje wzrost facy C–S–H, a tym samym wzrost wytrzymałości.

Podsumowując dodatek zeolitu do zapraw nadaje im cechy tynku renowacyjnego. Nie wszystkie parametry były jednak zadowalające. Należy tak zmodyfikować skład mieszanek aby poprawić jeszcze wytrzymałość na ciśnienie krystalizacyjne soli. Dodatek perlitu wpływa pozytywnie na porowatość mieszanki jednak zmniejsza znacznie jej wytrzymałość.

Literatura

- [1] Bernat – Hunek D., Siddique R., Klimek B., Franus M. *The use of zeolite, lightweight aggregate and boiler slag in restoration renders*, Construction and Building Materials 142, 2017.
- [2] Mosquera M.J., Benitez D., Perry S.H. *Pore structure in mortars applied on restoration. Effect on properties relevant to decay of granite buildings*, Cem. Concr. Res. 32, 2002.
- [3] Degryse P., Elsen J., Waelkens M. *Study of ancient mortars from Salassos (Turkey) in view of their conservation*, Cement and Concrete Research 32, 2002.
- [4] Barnat–Hunek D., Klimek B., Franus W. *Wpływ dodatku zeolitu na właściwości fizykomechaniczne tynków renowacyjnych*, Izolacje 9, 2014.
- [5] Pavlíková M., Pavlík Z., Keppert M., Černý R. *Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings walls*, Construction and Building Materials 25, 1205–1212, 2010.
- [6] WTA Merkblatt 2–9–04 Sanierputzsysteme.
- [7] Maggot C., Rokieli M. *Tynki renowacyjne w świetle normy PN–EN 998–1:2004 oraz instrukcji WTA nr 2–9–04*, Materiały Budowlane 9, 6–8, 2009.
- [8] Franus W. *Zastosowanie zeolitów syntetycznych w inżynierii środowiska*, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska, Monografie 135, 59, Lublin.
- [9] Weitkamp J. *Zeolites and catalysis*, Solid State Ionics, 131, 2000.
- [10] Breck D.W. *Zeolite Molecular Sieves, Structure, chemistry, and use –New York–London–Sydney–Toronto*, John Wiley&Sons, 1974.
- [11] Franus W., Wdowin M. *Wykorzystanie popiołów lotnych klasy F do produkcji materiału zeolitowego na skalę półtechniczną*, Polityka Energetyczna 11 (2), 79–91, 2011.

- [12] Galos K., Uliasz–Bocheńczyk A. *Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce*, Gosp. Sur. Min. 21(1), 23–42, 2005.
- [13] Franus W. *Characterization of X-type zeolite prepared from coal fly ash*, Polish J. Environ. Studies 21 (2), 337–343, 2012.
- [14] PN–EN 459–1:2012, *Wapno budowlane — Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*.
- [15] PN EN 197–1: 2012 *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- [16] PN–EN 197–2:2002 *Cement – Część 2: Ocena zgodności*.
- [17] Suchorab Z., Barnat–Hunek D., Franus M., Łagód G. *Mechanical and physical properties of hydrophobized lightweight aggregate concrete with sewage sludge*, Materials 317, 1–18, 2016.
- [18] Torres M, García–Ruiz P. *Light weight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption*, Cem. Conc. Comp. 31, 114–119, 2009.
- [19] Maxim L., Niebo D., McConnell R., Ernest E. *Perlite toxicology and epidemiology – a review*, Inhalation Toxicology 26, 259–270, 2014.
- [20] Barnat–Hunek D., Góra J., Andrzejuk W., Łagód G. *The microstructure–mechanical properties of hybrid fibres–reinforced self–compacting lightweight concrete with perlite aggregate*, Materials 11, 1093, 1–18, 2018.
- [21] PN–EN 196–7: 2008, *Metody badania cementu – Część 7: Sposoby pobierania i przygotowania próbek cementu*.
- [22] PN–EN 1015–10:2010 *Metody badań zapraw do murów – Część 10: Określenie gęstości wysuszonej stwardniałej zaprawy*.
- [23] PN–EN 1015–18 *Metody badań zapraw do murów – Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy*.
- [24] PN–EN 1936:2010 *Metody badań kamienia naturalnego: Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*.
- [25] PN–EN 1015–11:2001P, *Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy*.
- [26] PN–88/B–06250, *Beton zwykły*.
- [27] PN–EN12370:2001, *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli*

*Joanna Styczeń⁽¹⁾, Rafał Ślusarski⁽²⁾ Arkadiusz Urzędowski⁽³⁾

Rodzaje wypełnień iniekcyjnych w konstrukcjach budowlanych

Streszczenie: Metoda iniekcji jest podstawową metodą naprawy zniszczonej konstrukcji murów. Opiera się na wprowadzaniu rzadkich roztworów lub zawiesin w strukturę zniszczonej konstrukcji. Wyróżnić można trzy rodzaje iniekcji: niskociśnieniową, średnociśnieniową, wysokociśnieniową. Na metody iniekcyjnej wpływ ma wiele czynników: wielkość porów, wytrzymałość materiału, grubość ściany, rodzaj materiału z jakiego wykonane są mury, użyty iniekt.. Przy doborze odpowiedniej metody należy wziąć pod uwagę wszystkie czynniki. Przy przywróceniu ciągłości struktury (poprawa wodoszczelności, mrozoodporności, ochrona zbrojenia) odpowiednie będą iniektory chemiczne, które posiadają wysokie zdolności penetracyjne. Mieszanki cementowe ze względu na konkurencyjność cenową stosowane są przy większych, bardziej dostępnych pustkach wewnętrznych. Jeżeli natomiast chodzi o wzmocnienie elementów bądź przywrócenie ich pierwotnej nośności, bardzo dobrze sprawdzą się różnego rodzaju epoksydy, które idealnie nadają się do sklejanie rys.

Słowa kluczowe: iniekcja ciśnieniowa, beton, cement

Types of injection fillings in building constructions

Abstract: The injection method is the basic method of repairing damaged wall structures. It is based on introducing rare solutions or suspensions into the structure of the destroyed structure. There are three types of injection: low pressure, medium pressure, high pressure. The injection method is influenced by many factors: the size of the pores, the strength of the material, the thickness of the wall, the type of material the walls are made of, the injection used. When choosing the right method, all factors should be taken into account. When restoring the continuity of the structure (improvement of waterproofness, frost resistance, protection of reinforcement), chemical injections that have high penetration capabilities will be suitable. Due to their price competitiveness, cement mixes are used for larger, more accessible internal voids. However, when it comes to strengthening the elements or restoring their original load capacity, various types of epoxies, which are perfect for gluing scratches, will work very well.

Keywords: pressure injection, concrete, cement

*⁽¹⁾j.styczen@pollub.pl, Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

⁽²⁾slusarski.rafal@googlemail.com, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

⁽³⁾a.urzedowski@pollub.pl, Katedra Podstaw Techniki, Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach większość konstrukcji budowlanych jest żelbetowa. Na budowie zużywane są ogromne ilości betonu. Naukowcy ciągle poszukują sposobów na zwiększenie ich trwałości, wytrzymałości jak również poszukują dodatków, które mogłyby nadawać się do prac remontowo–naprawczych.

Defekty w strukturze betonu odznaczają się zazwyczaj pęknięciami oraz ubytkami w konstrukcji. Przyczyny występowania defektów w strukturze można podzielić na:

- pierwotne – wynikające z błędów projektowych lub z użycia niewłaściwego materiału;
- wtórne – związane z długotrwałą lub niewłaściwą eksploatacją jak również przeciążeniem konstrukcji czy agresywnym środowiskiem;

Jedną z metod napraw zarysowanych lub porowatych betonów jest iniekcja ciśnieniowa. Iniekcja jest to proces fizyczny, w którym do struktury włączany jest materiał płynny. Mogą to być substancje na bazie cementów lub specjalne związki żywiczne. Materiał ten wypełnia puste przestrzenie, kapilary czy rysy.

Metoda iniekcji pomimo wielu lat doświadczenia oparta jest w dużej mierze o intuicję i doświadczenie inżynierów. Jest jednym z najtrudniejszych etapów naprawczych w konstrukcjach betonowych i żelbetowych. Na skuteczność metody iniekcji wpływ ma wiele czynników, z których część nie jest mierzalna w procesie naprawczym. Wykonując prace stale należy kontrolować proces, ze względu na możliwość wystąpienia utrudnień, przerw czy nieprawidłowości w stosunku do zamierzonego przebiegu. Bardzo często zdarza się, że należy zmienić rodzaj iniektu czy parametry procesu. [1]

2. Iniekcja ciśnieniowa

Zadania należące do metody iniekcji zapisane są w normie PN–EN 1504–9:2013. Dotyczą one naprawy konstrukcji, uszczelnienia, wypełnienia oraz wzmocnienia betonu. Normą wyróżnia dwa podstawowe zadania iniekcji: [2]

- IP (Protection Against Ingress) jest zasadą o szczelności i nieprzepuszczalności betonu. Stosowanie iniekcji według tej zasady ma zapobiec lub ograniczyć wnikaniu m.in. wody, pary oraz gazów powodujących korozję stali zbrojeniowej.
- SS (Structural Strengthening) iniekcja ma za zadanie wzmocnienie betonu, a co za tym idzie całej konstrukcji [2].
- Kolejność wykonywanych czynności podczas iniekcji jest następująca: [1]
- określenie typu rysy: rysa powierzchniowa/rysa konstrukcyjna;
- przebieg rysy;
- określenie szerokości rozwarcia rysy oraz zmianę rozwarcia;
- określenie wilgotności: rysa wilgotna/mokra,/przeciekająca;
- określenie stopnia zanieczyszczenia rysy;

- przeprowadzenie analizy optymalnych rozwiązań materiałowych;
 - dobranie środka iniekcyjnego;
 - określenie sposobu osadzenia oraz rozmieszczenia końcówek iniekcyjnych;
 - dobranie metody oraz parametrów iniekcji tj. czas, ciśnienie;
 - określenie sposobów powierzchniowego uszczelnienia;
 - obsadzenie pakarów;
 - przeprowadzenie iniekcji;
 - usunięcie końcówek iniekcyjnych i zasklepienie otworów;
 - sprawdzenie poprawności wykonanych prac;
- Urządzeniami niezbędnymi do przeprowadzenia prac iniekcyjnych są między innymi [1]:
- pakery powierzchniowe dla iniekcji niskociśnieniowych. Przyklejane na rysę bezpośrednio
 - iniektory śrubowe i iniektory zabijane stosowane do tłoczenia ciśnieniowego
 - zbiorniki iniekcyjne dla iniekcji grawitacyjnej,
 - zbiorniki iniekcyjne dla iniekcji ciśnieniowej,
 - pompy ciśnieniowe
 - węże iniekcyjne i akcesoria,
- Wyroby iniekcyjne można podzielić na trzy kategorie [2]:
- Kategoria S – iniektory oraz wyroby iniekcyjne które poprzez swoje pęczniejące właściwości dopasowują się do wypełnianych rys i pustek w betonie. Stosowane są do uszczelniania rys, pęknięć i pustek w warunkach wilgotnych, mokrych lub wody płynącej.
 - Kategoria D – są to iniektory, wyroby iniekcyjne, przeznaczone do elastycznego wypełniania rys i pustek w betonie.
 - Kategoria F – są to iniektory, wyroby iniekcyjne do przenoszenia naprężeń, sklejają rysy, pustki oraz szczelnie,
 - Podział wyrobów iniekcyjnych wynikający z grupy materiałów:
 - Grupa P – iniektory zawierające w swoim składzie spoiwa polimerowe. Twardnienie przy zastosowaniu iniektów z grupy P zachodzi na drodze polimeryzacji.
 - Grupa H – iniektory zawierające w swoim składzie spoiwa hydrauliczne. Twardnienie przy zastosowaniu iniektów z grupy H zachodzi na drodze hydratacji spoiwa.
- Metoda iniekcji jest podstawową metodą mającą na celu naprawę zniszczonej konstrukcji murów. Opiera się na wprowadzaniu rzadkich roztworów lub zawiesin w strukturę naprawianej konstrukcji. Wyróżnić można trzy rodzaje iniekcji:
- niskociśnieniowa tj. grawitacyjna – dla ciśnienia poniżej 0,15 MPa,
 - średnociśnieniowa – dla ciśnienia w przedziale 0,15 MPa do 0,8 MPa,
 - wysokociśnieniowa – dla ciśnienia powyżej 0,8 MPa,

Na metody iniekcyjnej wpływ ma wiele czynników: wielkość porów, wytrzymałość materiału, grubość ściany, rodzaj materiału z jakiego wykonane są mury, użyty iniekt.

3. Rodzaje iniekcji

3.1. Iniekcja zewnętrzna

Iniekcja zewnętrzna zabezpiecza budynek przed negatywnym skutkiem osiadania. Materiał iniekcyjny wprowadzany jest do gruntu w miejscu jego styku z konstrukcją lub wokół fundamentu. Materiałem najczęściej używanym w iniekcji zewnętrznej jest cement. Iniekcja ta może być również stosowana jako stabilizacja podłogi na gruncie. W takim przypadku podłoga zostaje nawiercana, a następnie w przygotowane otwory wpuszczany zostaje iniekt. Iniekcja zewnętrzna przeciwdziała również zjawiskowi klawiszowania płyty.

3.2. Iniekcje wewnętrzne

Iniekcja wewnętrzna ma za zadanie naprawę zarysowań i pustek w betonie. Najlepsze w tym celu jest zastosowanie polimerów lub zaczynów cementowych. Cement ma zbliżone właściwości do materiału naprawianego, natomiast polimery świetnie nadają się do „zszywania”.

3.3. Iniekcja uszczelniająca

Podczas iniekcji uszczelniającej wypełniane są przede wszystkim miejsca gdzie występują przecieki, podczas tego zabiegu następuje również wypełnienie drobnych rys i porów. Iniekcja uszczelniająca ma za zadanie przerwanie przepływu wody przez konstrukcję. Wybór iniektu i metody zależy oczywiście od szczegółowej analizy zarówno jeżeli chodzi o możliwości zastosowania jak i funkcje, które iniekt powinien spełniać. Przed przystąpieniem do prac iniekcyjnych należy określić rodzaj cieczy, która wypływa z uszkodzonego miejsca. Bardzo ważne jest określenie ciśnienia, temperatury cieczy, jak również częstotliwość jej wypływu (stały, burzliwy). Należy również określić trasę przepływu cieczy, jej długość oraz dokonać sprawdzenia czy zjawisku nie towarzyszą inne defekty.

Zarówno w iniekcji wewnętrznej, jak zewnętrznej, należy zaprojektować proces wykonawczy: określić czas wiązania iniektu, dobrać odpowiednie końcówki iniekcyjne, określić ciśnienie, czas iniekcji oraz objętość iniektu.

3.4. Materiały iniekcyjne na bazie cementu

Podstawową zaletą stosowania zaczynów cementowych przy naprawach konstrukcji betonowych jest ich kompatybilność cech fizyko-chemicznych iniektu i betonu. Zbieżność ta umożliwia współpracę podczas dalszej eksploatacji

oraz prawidłowe wypełnienie uszkodzeń. Duże pole manewru daje również możliwość stosowania różnorodnych typów cementów. Iniekty cementowe są tańsze w porównaniu z innymi tego typu materiałami.

Dużym problemem przy zaczynach cementowych jest właściwy dobór wskaźnika W/C. W zasadzie każdy iniektowany element wymaga indywidualnego podejścia. Dużą wadą jest również zjawisko sedymentacji, które często prowadzi do zaczopowania strefy przez którą włączany jest iniekt. Na wielkość zjawiska sedymentacji wpływ ma współczynnik W/C, im wskaźnik jest większy, tym większa skłonność do sedymentacji. Segregacja składników zaczynu cementowego zachodzi również przy zbyt wysokim ciśnieniu włączania iniektu w materiał naprawiany. Dobór zbyt wysokiego ciśnienia powoduje rozdzielenie się składników zaczynu cementowego [3].

3.5. Iniekty cementowe

Jako materiał iniekcyjny początkowo stosowane były zaprawy oraz zaczyny cementowe. Szybko okazało się jednak, że stosowanie zaczynów cementowych jest technologicznie kłopotliwie, ze względu na ich dyspersyjny charakter. Występujące zjawisko sedymentacji i segregacji prowadzi do powstawania zatorów w trakcie tłoczenia [4].

Iniekty cementowe stosowane są najczęściej do wzmacniania podłoża gruntowych, naprawy rys w konstrukcjach nieruchomych, wilgotnych lub wypełnionych wodą, a także do iniekcji kanałów w konstrukcjach kablobetonowych. Mieszanki cementowe charakteryzują się szybkim przyrostem wytrzymałości na ściskanie i zginanie. Wytrzymałość na ściskanie po 24h wynosi już ok. 20 MPa i 40 MPa po 28 dniach. Wytrzymałość na zginanie wynosi odpowiednio 2MPa (po 24h) i około 6 MPa (po 28 dniach). Zalecane ciśnienie wprowadzania iniektu < 0,8 MPa (wartości zalecane 0,4÷0,6 MPa). W trakcie iniekcji należy stale kontrolować wpływ ciśnienia.

3.6. Iniekty mikrocementowe

Iniekty mikrocementowe pozwalają na iniekcję rys o szerokości rozwarcia > 0,1 mm. Mikrocementy charakteryzują się wysokim stopniem przemiału. Powinien on mieścić się w granicach od 10000 cm²/g do 12000 cm²/g. Mikrocement stosowany w tej metodzie powinien zawierać 95% ziaren mniejszych od 16 μm [5]. Iniekty mikrocementowe są bardzo wrażliwe na sposób mieszania. Użycie zwykłego mieszadła może powodować powstawanie skupisk ziaren cementu, które będą uniemożliwiać właściwą penetrację zaczynu w rysach. Iniekty mikrocementowe charakteryzują się: jednorodną, rzadką strukturą o dobrej płynności, łatwą aplikacją, brakiem występowania zjawiska sedymentacji nawet przy dużym ciśnieniu iniekcyjnym [1].

3.7. Iniektory polimerowo–cementowe

Iniektory polimerowo–cementowe są dwuskładnikowymi preparatami zawierające jako bazę cement z wypełniaczami, modyfikatorami, oraz płynnymi roztworami kopolimerów. Polimery zwiększają przyczepność jak również dodają iniektowi elastyczność [1]. Zależnie od wybranego rodzaju cementu, iniektory takie stosuje się do wypełniania rys o stopniu rozwarcia $> 0,2$ mm, z użyciem mikrocementów, natomiast do wypełnienia rys $> 0,5$ mm–z użyciem cementów wysokich marek. Do wtlaczania iniektów polimerowo–cementowych używa się zwykle pompy jednokomponentowej [6].

3.8. Materiały iniektcyjne niemineralne

Ze względu na fakt iż cement nie zawsze nadaje się do wypełnienia wszystkich rodzajów pęknięć zaczęto poszukiwać nowych materiałów wypełniających. Różnica lepkości pomiędzy materiałem naprawianym, a materiałem naprawiającym jest dużą zaletą, wykorzystano dlatego żywice epoksydowe, poliuretanowe, poliakryloamidy oraz akryle. Charakteryzują się one: łatwością wypełnienia drobnych spękań w betonie. Nadają się do zastosowań w rysach już od 0,05 mm, wglębną penetracją, krótkim czasem wiązania, szybkim okresem uszczelnienia (poliuretany), możliwością pracy w niskich temperaturach. Minimalna temperatura aplikacji iniektów epoksydowych, poliuretanowych i akrylowych to $+5^{\circ}\text{C}$.

3.9. Iniektory poliuretanowe

Jedną z najważniejszych cech iniektów poliuretanowych jest ich duża elastyczność. Substancje te idealnie nadają się do zastosowania przy nieustabilizowanych szerokościach rys. Sprawdzają się dobrze w uszczelnianiu rys wilgotnych, mokrych i przewodzących wodę [1].

Do tamowania wycieków wody stosuje się silnie pieniące jednoskładnikowe iniektory poliuretanowe (zawierające modyfikowane izocyjaniiny i katalizatory). Do iniekcji doszczelniających używa się dwuskładnikowych iniektów poliuretanowych (tworzonych na bazie polieteroplioli i izocyjaniinów) [1].

3.10. Iniektory epoksydowe

Iniektory epoksydowe składają się z niskocząsteczkowych roztworów żywic epoksydowych oraz utwardzaczy [33]. Epoksydy charakteryzują się bardzo małą elastycznością oraz wysokimi parametrami wytrzymałościowymi. Stosowanie epoksydów do iniekcji może doprowadzić do miejscowego przeszywnienia iniektowanego elementu.

Iniektory epoksydowe stosowane są do rys przede wszystkim suchych lub zawilgoconych. Nadają się tylko do rys stałych, nieruchomych lub do rys o odkształceniach nie przekraczających 0,03 mm. Z uwagi na swoje silne wiązanie, są przeznaczone do wytrzymałościowego scalania rys w konstrukcjach [8].

W procesie iniekcji należy uwzględnić temperaturę pracy ze względu na zmieniającą się lepkość mieszanek na bazie epoksydów. Lepkość jest zależnością odwrotnie proporcjonalną do temperatury. Im mniejsza temperatura, tym większa lepkość epoksydowych mieszanek iniekcyjnych.

3.11. Iniekty poliakryloamidowe

Iniekty poliakryloamidowe są hydrożelami służącymi do uszczelniania mokrych bądź zawilgoconych rys w konstrukcjach betonowych, żelbetowych oraz murowych. Izolacje tego typu przeprowadzane są w budynkach istniejących, których w wyniku błędu wykonawczego izolacje przeciwwilgociowe bądź przeciwwodne zostały wadliwie wykonane [9]. W iniekcji poliakryloamidami (hydrożelami) aktywatorem procesu żelowania jest woda. Przed żelowaniem materiał cechuje niska lepkość zbliżona do lepkości wody. Zaletą hydrożeli jest możliwość regulowania początku i końca czasu żelowania w zależności od proporcji użytych składników [10].

3.12. Warunki określające przydatność mieszanek iniekcyjnych

Skuteczność iniekcji określana jest dokładnością wypełnienia pustek w betonie oraz zespoleniem materiału naprawianego z materiałem naprawczym.

Warunki iniekcyjne powinny spełniać następujące wymagania [11]:

- mała lepkość aby mieszanka iniekcyjna dotarła w głąb rysy przy małych oporach płynięcia,
- stosunkowo małe napięcie powierzchniowe aby nastąpiło zwilżenie powierzchni łączonych,
- odpowiedni czas urabialności – wiązanie nie może zaczynać się przed wypełnieniem całej objętości rys. Czas wiązania nie może być jednak również zbyt długi, aby nie nastąpiło spływanie mieszanki,
- mały skurek wiązania w celu uniknięcia mikrozarysowań.

3.13. Iniekcyjne wzmocnienie konstrukcji

Konstrukcje żelbetowe pracują w różnorodnych środowiskach oraz warunkach. By budowle utrzymać na zadowalającym poziomie użytkowym należy dobrać odpowiednie zabezpieczenie. Przy środowisku agresywnym chemicznie, we wszystkich przypadkach, wymagana jest ochrona materiałowa. W środowisku o średniej agresywności stosuje się ochronę powierzchniową – ograniczającą dostęp czynników agresywnych, a w środowisku silnie agresywnym – ochronę odcinającą dostęp do tych czynników. Ochrona materiałowo–strukturalna odbywa się dzięki odpowiedniemu doborowi składników mieszanki betonowej. Ochrona materiałowo–strukturalna powinna mieć miejsce zarówno dla nowo wznoszonych konstrukcji jak i do naprawy już istniejących. Jeżeli ochrona powierzchniowa, nie została poczyniona

w początkowej fazie budowy, może być naniesiona w późniejszym momencie użytkowania. Wcześniej wymagane jest przeanalizowanie struktury materiału [12].

Najczęściej spotykane uszkodzenia występujące w betonie to rysy oraz pęknięcia. Na początku eksploatacji konstrukcji zwykle pojawiają się mikrorysy które pod wpływem obciążeń, osiadania konstrukcji oraz działania czynników zewnętrznych, przekształcają się w pęknięcia. W przypadku mniej kruchych betonów są to małe miejscowe quasi–plastyczne deformacje. Ze względu na miejsce występowanie defektów można je podzielić na:

- uszkodzenia wewnątrz–materiałowe – szczelina Griffith'a, w przypadku betonów kruchych,
- uszkodzenia w postaci pęknięć krawędziowych występujących na powierzchniach betonu.

Pierwsze uszkodzenia pojawiają się zazwyczaj na styku kruszywa z zaprawą lub matrycy cementowej. Podłoże powstawania rys może być różne. Wpływ na ich powstanie mogą mieć: pory występujące we wszystkich fazach kompozytu, rodzaj zastosowanego wypełniacza, niehydratyzowane ziarna cementu, nieodpowiednio przeprowadzony proces technologiczny mieszanki betonowej [13].

Aby określić kierunek oraz sposobu rozchodzenia się pęknięć w konstrukcji należy zlokalizować uszkodzenia. Dla analizy dwuwymiarowej można wyodrębnić pęknięcia typu prostoliniowego i skrzydłowego. Wykorzystując analizę trójwymiarową można określić rzeczywiste pęknięcia [13].

Proces powstawania pęknięć podzielono na następujące etapy [14]:

- zapoczątkowanie prostego mikropęknięcia w skutek nukleacji porów występujących na granicy kruszywa. Długość początkowego mikropęknięcia jest znacznie mniejsza od wymiaru ziarna a charakter uszkodzenia jest tylko lokalny
 - rozwój mikropęknięcia występującego na całej długości ziarna
 - wzrost mezopęknięcia pierwotnego prostego w pęknięcia wtórne o zmienionym kierunku propagacji wskutek napotkania bariery energetycznej
- Ważną rolę w rozwoju szczeliny odgrywają zjawiska zachodzące na jej powierzchni. Wyróżnić można następujące rodzaje szczelin: [13]

- dylatacyjne
- szczeliny z tarciem kontaktowym gdy, brzegi doznają poślizgu,
- szczeliny z warstwą kohezyjną pomiędzy jej brzegami,
- szczeliny z tzw. „strefą procesową” w wierzchołku mikroszczeliny.

Szczeliny można podzielić również ze względu na sposób obciążenia materiału:

- zamknięte – lokalne składowe stanu naprężenia w miejscu szczeliny wywołują stan naprężeń.
- otwarte – lokalne składowe naprężenia w miejscu szczeliny wywołują stan rozciągania,

4. Wnioski

Beton jest materiałem kompozytowym, ciało stałe zawiera w swej strukturze dużą liczbę pustych przestrzeni, o bardzo małych wymiarach. Nieciągłości w strukturze betonu powstają w wyniku hydratacji cementu. Spowodowane są błędami wykonawczymi, a także nieprawidłową eksploatacją elementu.

Typowymi uszkodzeniami, gdzie należałoby zastanowić się nad przeprowadzeniem napraw iniekcyjnych są [15]:

- rysy oraz pęknięcia,
- raki i pustki wynikające z niedostatecznego zagęszczenia lub niewłaściwego układania mieszanki betonowej,
- niewypełnione zaprawą pustki wokół ziaren kruszywa spowodowane niedostatecznym wymieszaniem składników lub jej późniejszym rozsegregowaniem (honeycombing).

Iniekcja w elementach batonowych ma za zadanie przywrócenie ciągłości struktury (poprawa wodoszczelności, mrozoodporności, ochrona zbrojenia). W tym celu stosowane są głównie iniekty chemiczne, które posiadają wysokie zdolności penetracyjne. Mieszanki cementowe ze względu na konkurencyjność cenową stosowane są przy większych, bardziej dostępnych pustkach wewnętrznych. Przy wzmocnieniach elementów bądź przy przywróceniu ich pierwotnej nośności bardzo dobrze sprawdzają się różnego rodzaju epoksydy – idealnie nadają się do sklejanie rys.

Literatura

- [1] www.raportsekocenbud.pl/artukul/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bnews%5D=123&cHash=a94efcaa41a264dd1503164b5e6b2372, aktualne na dzień 13.08.2015
- [2] PN-EN 1504-5:2006 *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności.*
- [3] Szerafin J. *Transport zaczynu iniekcyjnego w makrokapilarach*, Inżynieria i budownictwo, 1999.
- [4] Szerafin J. *Dyspersje cementowe w procesie iniekcyjnej naprawy defektów betonu*, Monografie, Politechnika Lubelska, 2011.
- [5] Widmann R. *Proceedings Of The International Conference on Grouting in Rock and Concrete*, Salzburg, 1993.
- [6] Maćkowski R. *Scalanie uszkodzonych konstrukcji murowych przez iniekcję zaczynem lub zaprawą cementową*, KN PZITB, Katowice, 1990.
- [7] www.abc-izolacje.pl/index2.php?site=art&id=334, aktualne na dzień 11.08.2015.
- [8] Królikowski W. *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1988.
- [9] Rokiel M. *Hydroizolacje w budownictwie*, Dom Wydawniczy Medium, wyd. II, Warszawa 2009.

- [10] www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materiały_i_tehnologie,artykuł,materiały_hydroizolacyjne_do_iniekcji,6948 aktualne na dzień 01.08.2015.
- [11] Szaferafin J. *Równania konstytutywne ciecży w zastosowaniu do dyspersji cementowych w procesie iniekcyjnego wypełniania pustek w strukturze betonu*, rozprawa doktorska, Lublin, 1999.
- [12] Czarnecki L., Emmons P. H. *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement, Kraków, 2002.
- [13] Golewski G., Sadowski T., *Analiza kruchych uszkodzeń w kompozytach betonowych*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Budownictwo z 1–B, 2007.
- [14] Tanaka I., Suzuki N., Ono Y., Koishi M. *A comparison of the fluidity of spherical cement with that of broad cement and a study of the properties of fresh concrete using spherical cement*, Cement and Concrete Research 29, 1999.
- [15] Aksjelrund G.A., Altszuler M. A. *Ruchy masy w ciałach porowatych*, Wydawnictwo Naukowo–Techniczne, Warszawa, 1987.