

Piotr GRZEJSZCZAK
Roman BARLIK

MODELOWANIE TRÓJMODUŁOWEGO UKŁADU DC-DC Z PRZEKSZTAŁTNIKAMI TYPU DAB POŁĄCZONYMI SZEREGOWO-RÓWNOLEGLE

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono opis analityczny i wyniki badań symulacyjnych modelu dynamicznego wielomodułowego przekształtnika DC-DC, złożonego z podwójnych mostków aktywnych (DAB). Rozpatrywana topologia charakteryzuje się szeregowo połączonymi zaciskami wysokonapięciowymi i równoległe połączonymi zaciskami niskonapięciowymi, zapewniając w ten sposób dużą przekładnię napięciową między sprzęganymi obwodami napięcia stałego. Na podstawie obwodowego modelu podwójnego mostka aktywnego, opracowano uśredniony model dynamiczny opisany transmitancją operatorową. Wykorzystano przy tym narzędzia do identyfikacji obiektów dostępne w pakiecie System Identification Toolbox w środowisku Matlab'a, które umożliwiły dokonanie doboru parametrów regulatorów PI napięcia i prądu, wchodzących w skład zamkniętego układu sterowania przekształtnikiem trójmodułowym, zapewniających jego stabilną pracę i odpowiednie właściwości dynamiczne.*

Słowa kluczowe: układ wielomodułowy, podwójny mostek aktywny (DAB), układ szeregowo-równoległy, model dynamiczny

DOI: 10.5604/01.3001.0009.4810

1. WSTĘP

Dwukierunkowe przekształtniki DC-DC z izolacją galwaniczną typu DAB mogą być wykorzystywane jako bloki składowe do budowy różnego rodzaju układów wielomodułowych, charakteryzujących się możliwością dwukierunkowego przekazywania energii między obwodami prądu stałego [1-2].

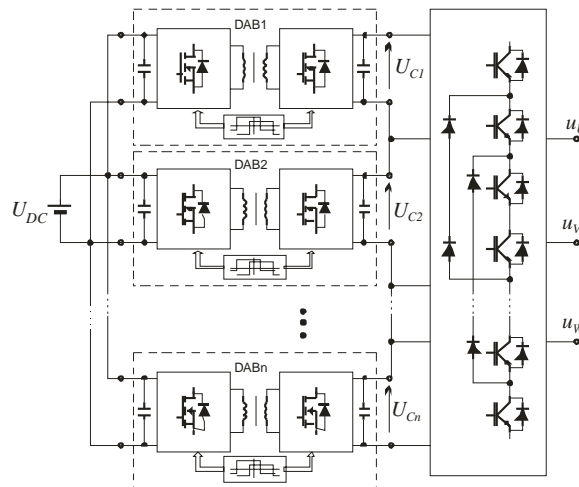
dr inż. Piotr GRZEJSZCZAK
e-mail: piotr.grzejszczak@ee.pw.edu.pl

prof. dr hab. inż. Roman BARLIK

Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej,
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Uzyskiwane dzięki temu właściwości użytkowe są często nieosiągalne dla pojedynczego przekształtnika DAB, w którym parametry podzespołów stanowią często barierę, wykluczającą ich zastosowanie. Łączenie przekształtników składowych, stanowiących poszczególne moduły, w sposób szeregowy pozwala na wymianę energii między obwodami prądu stałego o dużych napięciach, co w przypadku pojedynczego układu DAB nie jest możliwe z uwagi na niewystarczającą wytrzymałość napięciową dostępnych łączników energoelektronicznych. Przy równoległym łączeniu modułów uzyskuje się zwiększenie obciążalności prądowej po obu stronach stałoprądowych kompletnego układu wielomodułowego, a także zwiększenie jego niezawodności, poprzez wprowadzenie redundancji. Połączenia mieszane, zwane dalej szeregowo-równoległymi, pozwalają na jednoczesne zwiększenie napięć i prądów w wejściowych i wyjściowych obwodach prądu stałego. Istotną zaletą układów wielomodułowych jest możliwość budowy urządzeń o różnych mocach, napięciach i prądach, przy wykorzystaniu zunifikowanych przekształtników składowych, o konstrukcjach zoptymalizowanych pod względem właściwości użytkowych, takich jak sprawność energetyczna, gęstość mocy, wymiary geometryczne przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednich termicznych warunków pracy wszystkich podzespołów [2].

Wielomodułowe układy mieszane, oprócz wymienionych powyżej właściwości, umożliwiają dodatkowo zwiększenie przekładni napięciowej kompletnego przekształtnika, a tym samym sprzęganie obwodów prądu stałego o znacznie różniących się napięciach. Spośród ważniejszych zastosowań tych układów można wymienić bezpośrednie sprzęgi źródeł odnawialnych (OZE) z magazynami energii (akumulatory, baterie superkondensatorowe), hybrydowe pojazdy elektryczne HEV[3], a także stopnie pośredniczące, współpracujące z wielopoziomowymi przekształtnikami średniego i wysokiego napięcia z diodami poziomującymi (NPC) oraz o topologiach kaskadowych, które coraz częściej są wykorzystywane w układach napędowych dużej mocy oraz urządzeniach typu FACTS, w tym służących do przesyłu energii prądem stałym - HVDC [4] (rys. 1).



Rys. 1. Przykład zastosowania n – modułowego, dwukierunkowego przekształtnika DC/DC o topologii szeregowo-równoległej, współpracującego z wielopoziomowym falownikiem typu NPC o liczbie poziomów $n+1$

Dwukierunkowe układy wielomodułowe pracujące w konfiguracji szeregowo-równoległej, powinny być wyposażone w system sterowania, który zapewni prawidłową pracę poszczególnych przekształtników z równomiernym podziałem przekształcanej energii (prądu i napięcia) między poszczególne moduły zarówno w stanach ustalonych jak i dynamicznych. Właściwy dobór nastaw regulatorów napięć i prądów w zamkniętej pętli sterowania wymaga opracowania modelu dynamicznego przekształtnika, który pozwoli wyznaczyć optymalne parametry członów proporcjonalno-całkujących, a tym samym zapewnić poprawne działanie układu z zachowaniem stabilności i dobrych właściwości dynamicznych.

W przedstawionych w niniejszej pracy badaniach wykorzystano praktyczną metodę identyfikacji parametrów modelu dynamicznego przekształtnika DAB, a następnie przeprowadzono analizę i dobór nastaw regulatorów napięć i prądu układu trójmodułowego, o szeregowo połączonych wejściach wysokonapięciowych i równoległe połączonych zaciskach po stronie niskonapięciowej. Przedstawiono wyniki szczegółowych badań symulacyjnych, potwierdzające dobre właściwości dynamiczne testowanego układu z zamkniętą pętlą sterowania, umożliwiającą dwukierunkowy przesył energii o kontrolowanych parametrach i zapewniającą równomierny podział prądu i napięcia pomiędzy poszczególnymi modułami układu. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych przyjęto parametry laboratoryjnego modelu przekształtnika, którego konstrukcja została opisana szczegółowo w pracy [5].

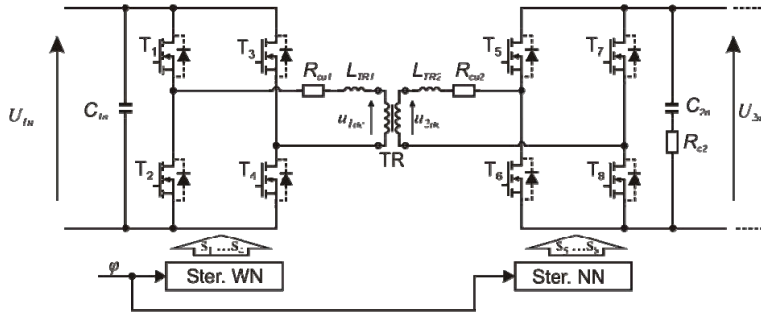
2. MODELOWANIE MODUŁU DAB

Dzięki dynamicznemu rozwojowi oprogramowania komputerowego, służącego do modelowania urządzeń energoelektronicznych możliwe jest prowadzenie badań symulacyjnych przy wykorzystaniu tzw. modelu obwodowego przekształtnika, którego opracowanie odbywa się na podstawie jego schematu elektrycznego. Takie postępowanie znacznie ułatwia wykonanie badań symulacyjnych i doskonale się sprawdza w procesie projektowania układu (wybór punktu pracy, dobór elementów, szacowanie strat mocy itd.).

Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2, w tabeli 1 podano parametry elektryczne podwójnego mostka aktywnego, według których opracowano model symulacyjny, na potrzeby niniejszej pracy.

Wysoka częstotliwość przełączeń $f_s = 100$ kHz i wynikająca stąd wysoka częstotliwość napięcia w obwodzie napięcia przemiennego pozwala na zastosowanie w przekształtniku DAB transformatora wysokiej częstotliwości, charakteryzującego się małymi wymiarami geometrycznymi, dzięki czemu możliwa jest minimalizacja gabarytów urządzenia, a także zmniejszenie parametrów elektrycznych i geometrycznych elementów inercyjnych pojedynczego układu, co ma szczególne znaczenie w perspektywie budowy układu wielomodułowego o dużej gęstości mocy.

Ze względu na przeznaczenie modelu symulacyjnego, ukierunkowane na badania właściwości dynamicznych, zdecydowano się przyjąć pewne uproszczenia, polegające na zastąpieniu tranzystorów MOSFET idealnymi łącznikami oraz na pominięciu w modelu transformatora strat mocy w rdzeniu i pasożytniczych pojemności uzwojeń, a także założeniu stałej wartości rezystancji uzwojeń, określonej dla częstotliwości 100 kHz.



Rys. 2. Schemat elektryczny podwójnego mostka aktywnego

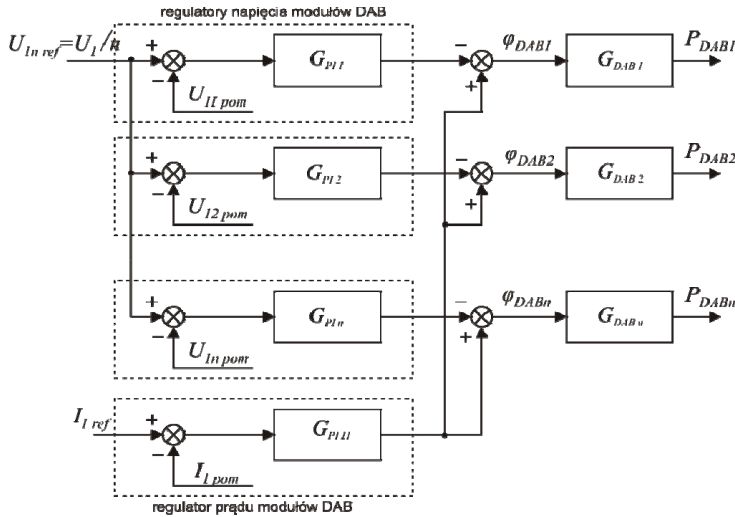
TABELA 1

Podstawowe parametry modelu DAB

Lp.	Nazwa	Wartość
1.	Napięcie strony wysokonapięciowej U_{1n}	300 V
2.	Napięcie strony niskonapięciowej U_{2n}	54 V
3.	Pojemność kondensatora strony wysokonapięciowej C_{1n}	660 μ F
4.	Pojemność kondensatora strony niskonapięciowej C_{2n}	2000 μ F
5.	Indukcyjność rozproszenia (wypadkowa) transformatora: $L_r = L_{TR1} + L'_{TR2}$	40 μ H
6.	Rezystancja obwodu AC: $R_r = R_{Cu1} + R'_{Cu2}$	26,4 m Ω
7.	Częstotliwość w obwodzie AC f_s	100 kHz
8.	Czas martwy sterowania łączników w gałęziach mostków t_{db}	100 ns
9.	Moc nominalna P_N	3,5 kW
10.	Przekładnia transformatora $n = N_2:N_1$	2:11

2.1. Strategia sterowania przekształtnikiem modułowym

Obwód główny rozpatrywanego układu składa się z trzech modułów, pracujących w topologii szeregowo-równoległej (z ang. *Input Series Output Parallel* – ISOP). Zadaniem systemu sterowania jest zapewnienie równomiernego podziału napięcia wejściowego po stronie wysokonapięciowej, co przy szeregowym połączeniu zacisków trzech modułów umożliwia jednocześnie sterowanie przepływem energii z równomiernym obciążeniem wszystkich modułów mocą $P_{DAB1} = P_{AB2} = \dots = P_{DABn}$. Szczegóły dotyczące przyjętego sposobu realizacji rzeczywistego układu sterowania, wykorzystanego w modelu laboratoryjnym zostały przedstawione w pracy [6]. Transmitacyjny schemat blokowy układu regulacji, wyjaśniający zasadę sterowania trójmodułowym przekształtnikiem o topologii ISOP przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Idea układu sterowania dwukierunkowym wielomodułowym przekształtnikiem DC-DC w topologii ISOP

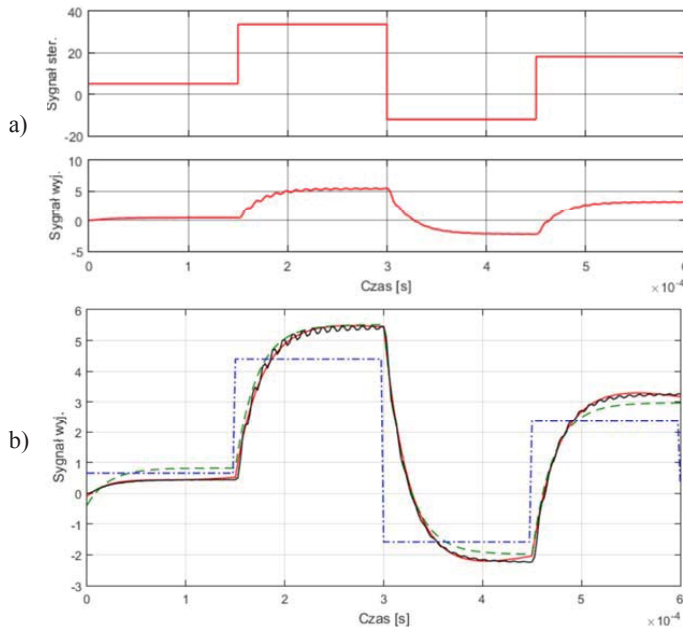
W układzie tym każdy przekształtnik DAB ma indywidualną pętlę z regulatorem napięcia występującego na zaciskach wejściowych szeregowo połączonych modułów oraz wspólną pętlę z regulatorem prądu płynącego w obwodzie wysokonapięciowym. Głównym celem badań była analiza i poprawa właściwości dynamicznych tego przekształtnika poprzez dobór odpowiednich nastaw w odniesieniu do części proporcjonalnych i stałych zdwojenia zastosowanych regulatorów PI.

2.2. Identyfikacja modelu dynamicznego

Do badań właściwości dynamicznych układów automatycznej regulacji z zamkniętymi pętlami ujemnych sprzężeń zwrotnych, obwodowy model przekształtnika jest mało przydatny. W tego typu analizach najwygodniej posługiwać się tzw. modelem dynamicznym przekształtnika, który może być opracowany w jednej z wielu postaci analitycznych, znanych z teorii sterowania, np. z wykorzystaniem równań zmiennych stanu lub transmitancji operatorowej [7-8]. W przypadku układów energoelektronicznych o złożonej budowie, do których należą także moduły DAB, sformułowanie analitycznego opisu modelu dynamicznego jest zadaniem bardzo trudnym.

Bardzo pomocne okazuje się w takich przypadkach zaawansowane oprogramowanie inżynierskie, do identyfikacji parametrów dowolnych obiektów fizycznych. I tak, wchodząca w skład pakietu Matlab skrzynka narzędziowa o nazwie *System Identification Toolbox* – SIT [9], umożliwia przygotowanie modelu dynamicznego przekształtnika na podstawie procesu identyfikacji, przeprowadzonego z wykorzystaniem modelu obwodowego, opracowanego w Simulinku. W wyniku takiego procesu otrzymuje się kompletny model dynamiczny badanego obiektu, w wybranej przez użytkownika postaci (np. model

zmiennych stanu, model transmitancyjny, itd.). Proces identyfikacji polega na wyborze sygnału sterującego (wejścia) i wyborze odpowiedniego sygnału odpowiedzi (wyjścia) układu, a następnie przeprowadzeniu testów zachowania się sygnału wyjściowego (wielkości wyjściowej) przy zadanych skokowych zmianach sygnału sterującego w modelu obwodowym (rys. 4a). Na podstawie zgromadzonych danych, algorytm SIT przeprowadza estymację parametrów zamodelowanego obwodowo obiektu fizycznego do wybranej postaci analitycznej modelu dynamicznego. W procesie tym projektant ma wpływ na poziom dokładności i stopień skomplikowania modelu poprzez przyjęcie jego rzędu. Estymowany model dynamiczny obiektu może być następnie poddany szybkiej weryfikacji poprzez ocenę uzyskanego stopnia zgodności z modelem obwodowym (rys. 4b).



Rys. 4. Sygnał testowy i odpowiedź modelu obwodowego w programie SIT:

a) przebiegi wykorzystywane w modelu obwodowym na potrzeby identyfikacji,
 b) charakterystyczne sygnały wyjściowe, uzyskane w estymowanych modelach dynamicznych o różnych rzędach.

2.3. Model transmitancyjny przekształtnika

Dysponując modelem dynamicznym obiektu możliwe jest przeprowadzenie szczegółowej analizy właściwości dynamicznych, dobór i optymalizacja nastaw regulatorów układu z zamkniętą pętlą sterowania oraz badania stabilności. Schemat blokowy klasycznej pętli regulacji, z wykorzystaniem modelu w postaci bloku o przykładowej transmitancji operatorowej $G_o(s)$, przedstawiono na rysunku 5.

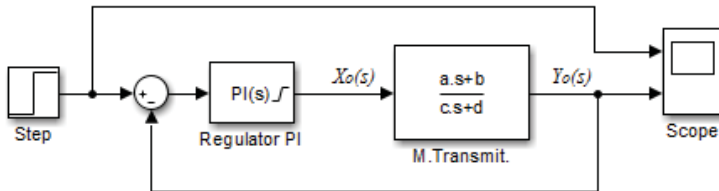
$$G_o(s) = \frac{Y_o(s)}{X_o(s)} = \frac{a \cdot s + b}{c \cdot s + d} \quad (1)$$

gdzie:

$X_o(s)$ – transmitancja sygnału wejściowego $x_o(t)$;

$Y_o(s)$ – transmitancja sygnału wyjściowego $y_o(t)$;

a, b, c, d – współczynniki transmitancji.



Rys. 5. Schemat blokowy klasycznego układu regulacji w programie Simulink

Wykorzystując opisane wcześniej oprogramowanie, opracowany model obwodowy poddano testom z użyciem standardowego sygnału proporcjonalnego do kąta przesunięcia fazowego ϕ , rejestrując przebieg napięcia po stronie wysokonapięciowej. Następnie, wykorzystując narzędzie SIT dokonano identyfikacji tego modelu, której wynikiem były modele dynamiczne różnych rzędów, opisane transmitancją operatorową $G_o(s)$.

W modelu tym, sygnałem sterującym jest kąt przesunięcia fazowego ϕ między napięciami wyjściowymi mostków przekształtnika, natomiast wyjściem układu jest napięcie po stronie wysokonapięciowej. Uzyskane modele dynamiczne zostały zweryfikowane z użyciem sygnału wejściowego o identycznym przebiegu standardowym, poprzez porównanie uzyskanych sygnałów wyjściowych z przebiegiem napięcia strony wysokonapięciowej, uzyskanego z modelu obwodowego. Na podstawie przeprowadzonego w ten sposób procesu, oszacowano transmitancję operatorową $G_U(s)$ układu DAB o postaci:

$$G_U(s) = \frac{Y_U(s)}{X_U(s)} = \frac{U_{wy}(s)}{\phi_{we}(s)} = \frac{0,00661s + 101,2}{s + 0,4134} \quad (2)$$

gdzie:

$Y_U(s)$ jest wielomianem licznika, którego pierwiastki oznaczają liczbę zer, a $X_U(s)$ jest wielomianem mianownika, którego pierwiastki oznaczają liczbę biegunów i stanowią rząd modelu transmitancyjnego (MT). Przebiegi sygnałów, będącymi odpowiedziami modelu transmitancyjnego MT1 i modelu obwodowego MO przestawiono na rysunku 6. Uzyskano przy tym daleko idącą zgodność obu modeli na poziomie 92,5%. Na rysunku 6 podano także przebieg MT2 (zgodność na poziomie 5,7%), jako jeden z wyników pośrednich procesu identyfikacji.

W kolejnym kroku przeprowadzono proces doboru parametrów regulatora PI, w przypadku układu z zamkniętą pętlą regulacji napięcia o strukturze wg rysunku 5,

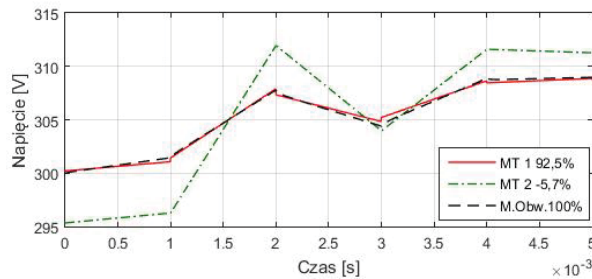
w której obiekt opisany jest transmitancją $G_U(s)$. Posłużono się przy tym innym narzędziem z pakietu Matlab, tj. modulem *Tune*, który służy do graficznej optymalizacji nastaw regulatora PI. Proces optymalizacji (strojenia) polega na nastawianiu parametrów regulatora z jednoczesnym podglądem odpowiedzi układu regulacji, przy standardowym sygnale zadanym. Tym samym projektant może precyzyjnie dobrać nastawy regulatora z uwzględnieniem stopnia przeregulowania i czasu regulacji.

W rezultacie dobrano następujące parametry regulatora napięcia:

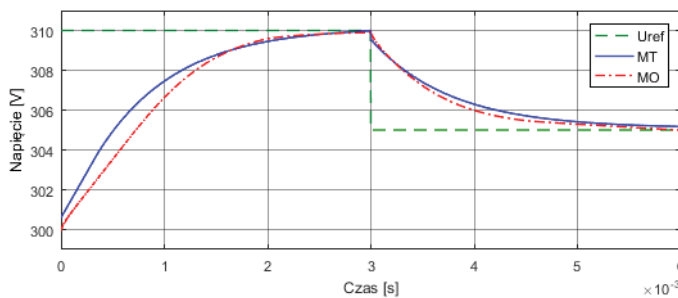
- wzmacnienie członu proporcjonalnego: $K_p = 14,4$;
- czas zdwojenia części całkującej: $T_i = 0,039s$.

Ze względu na charakterystykę sterowania podwójnego mostka aktywnego DAB [10], użyteczną w zakresie zmian kąta $\varphi < -90^\circ; 90^\circ$, w regulatorach zastosowano ograniczenia sygnału sterującego do wartości $\pm 90^\circ$ el.

Dla powyższych danych przeprowadzono ponownie testy porównawcze modelu obwodowego przekształtnika z modelem transmitancyjnym, z zamkniętą pętlą regulacji napięcia, przy skokowej zmianie wartości zadanej (rys. 7). Wyniki tych badań potwierdzają zgodność przeprowadzonej analizy, a przyjęte parametry układu regulacji zapewniają jednocześnie minimalny czas ustalania się napięcia obwodu wysokonapięciowego DAB do wartości zadanej.



Rys. 6. Porównanie odpowiedzi na skokową zmianę kąta zadanego φ_{zad} modelu obwodowego przekształtnika DAB i modelu transmitancyjnego $G_U(s)$ (MT1) oraz jednego z modeli pośrednich (model 1-rzędu MT2), uzyskanego w trakcie identyfikacji modelu dynamicznego

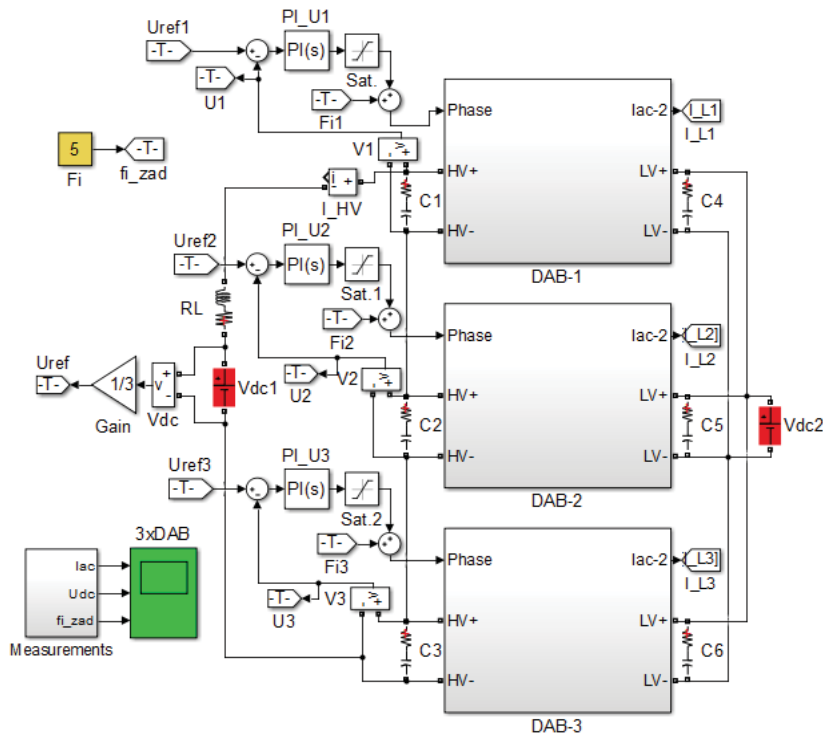


Rys. 7. Porównanie odpowiedzi na skokową zmianę napięcia zadanego U_{ref} modelu obwodowego przekształtnika DAB i modelu transmitancyjnego $G_U(s)$, testowanych w układzie zamkniętym, z regulatorem PI napięcia

3. BADANIA UKŁADU TRÓJMODUŁOWEGO Z REGULATORAMI NAPIĘĆ

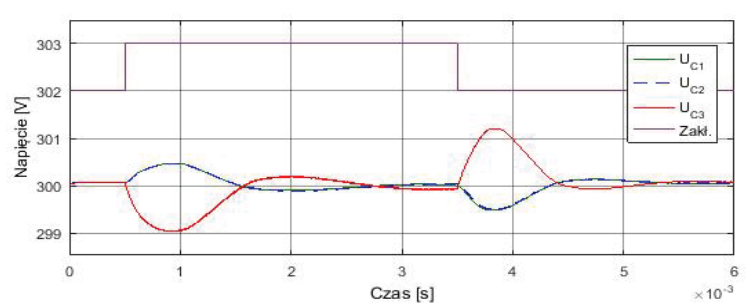
Pozytywne wyniki działania modelu dynamicznego pojedynczego przekształtnika z pętlą regulacji napięcia, stały się podstawą do badań układu wielomodułowego (ISOP). W modelu przedstawionym na rysunku 8 zastosowano wzajemne przesunięcie fazowe o kąt 120° el między sygnałami sterującymi układami DAB. Dzięki temu, uzyskano trzykrotnie wyższą częstotliwość tętnień prądów i napięć w obwodach DC [5], pozwalającą na zmniejszenie pojemności użytych kondensatorów. Tak opracowany model poddano testom symulacyjnym, których celem była analiza i ocena właściwości dynamicznych przekształtnika w następujących warunkach pracy:

- zakłóceniu w postaci załączenia dodatkowego rezystora równoległe do kondensatora C3, na wejściu trzeciego modułu (rys. 9),
- skokowa zmiana kąta sterowania φ_{zad} , równoznaczna ze zmianą mocy przekształcaną w układzie (rys. 10),
- skokowa zmiana kąta sterującego φ_{z1} w pierwszym module DAB, wymuszająca niesymetryczne obciążenie układu trójmodułowego (rys. 11).

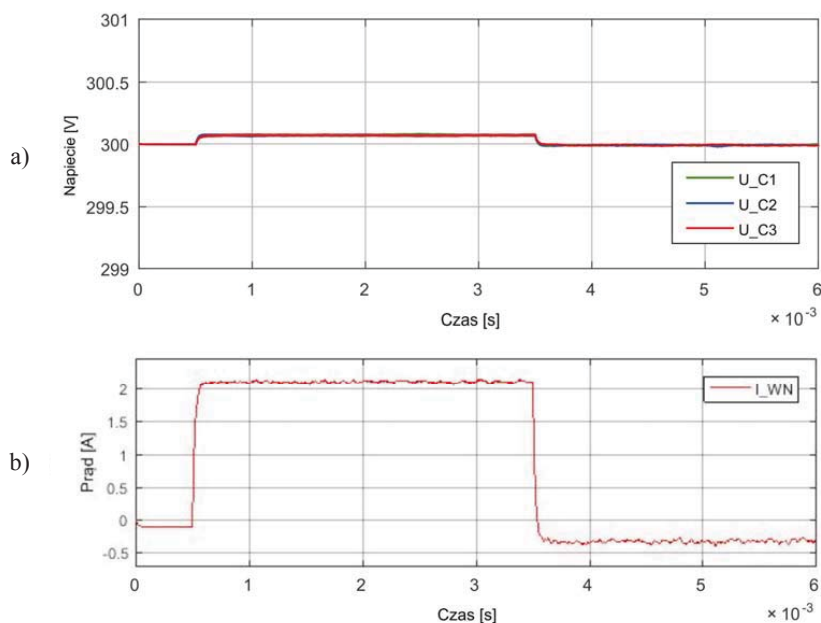


Rys. 8. Schemat modelu symulacyjnego trójmodułowego przekształtnika DC/DC z układami DAB pracującymi w konfiguracji szeregowo-równoległej (ISOP) z zamkniętą pętlą regulacji napięcia po stronie wysokonapięciowej każdego układu

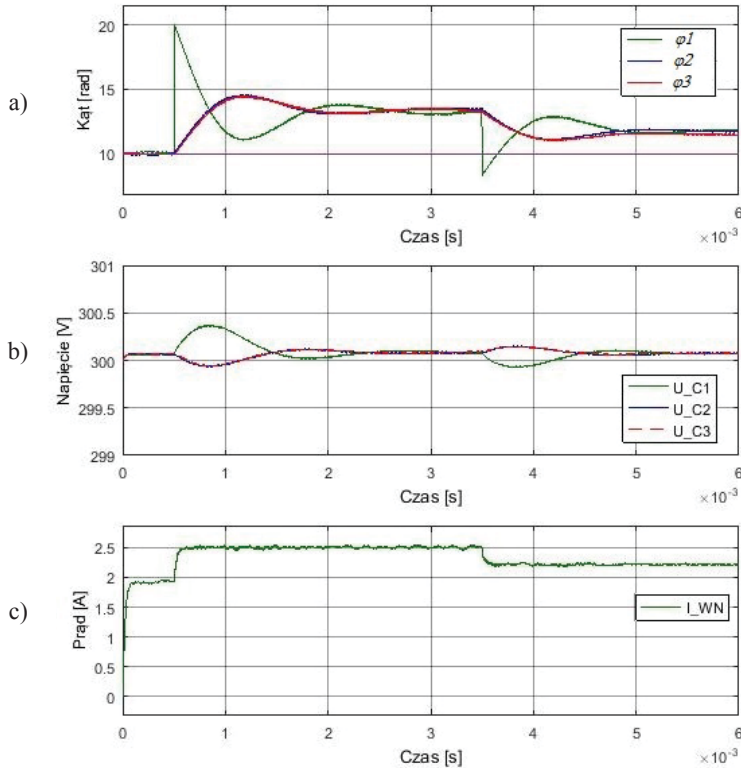
W każdym z wymienionych testów obserwuje się jedynie niewielkie zmiany napięcia na zaciskach wejściowych poszczególnych modułów, co w pełni potwierdza prawidłowe działanie regulatorów napięć.



Rys. 9. Sygnal zakłócenia oraz przebiegi wartości chwilowych napięć w obwodach wysokonapięciowych szeregowo połączonych przekształtników DAB w układzie przekształtnika trójmodułowego w przypadku włączenia równoległe do kondensatora C3 dodatkowego rezystora



Rys. 10. Przebiegi wartości chwilowych napięć w obwodach wysokonapięciowych szeregowo połączonych przekształtników DAB układu trójmodułowego: a) oraz przebieg prądu I_{WN} w tych obwodach, b) przy skokowej zmianie przekształcanej mocy



Rys. 11. Charakterystyczne przebiegi połączonych szeregowo przekształtników DAB w układzie trójmodułowym, przy skokowej zmianie mocy pierwszego przekształtnika (praca niesymetryczna modułów): a) przebiegi kątów sterujących modułami, b) wartości chwilowe napięć poszczególnych obwodów wysokonapięciowych, c) przebieg prądu I_{WN} w obwodzie prądu stałego

4. STEROWANIE UKŁADU Z REGULATOREM PRĄDU

Wyniki badań symulacyjnych przedstawionych w poprzednim punkcie wskazują na prawidłową pracę przekształtnika trójmodułowego w przypadku zamkniętych pętli regulacji napięć obwodów wysokonapięciowych poszczególnych modułów jednak bez zamkniętej pętli regulacji prądu wspólnego dla wszystkich modułów, połączonych szeregowo od strony wysokonapięciowej. Stąd też w kolejnym etapie badań symulacyjnych dokonano syntezy modelu dynamicznego układu trójmodułowego z regulatorem prądu, którego poprawne działanie jest niezbędne do automatycznego sterowania mocą całego przekształtnika.

Podobnie jak w przypadku regulatorów napięć, dobór nastaw regulatora prądu poprzedził proces identyfikacji modelu dynamicznego całego układu. W rezultacie otrzymano model dynamiczny przekształtnika, opisany transmitancją:

$$G_I(s) = \frac{Y_\Sigma(s)}{X_\Sigma(s)} = \frac{I_{WN}(s)}{\phi(s)} = \frac{8100}{s + 42810} \quad (3)$$

Transmitancja wg wzoru (3) jest stosunkiem transformaty operatorowej prądu $I_{WN}(s)$ jako wielkości wyjściowej do transformaty sygnału wejściowego, jakim jest kąt $\phi(s)$.

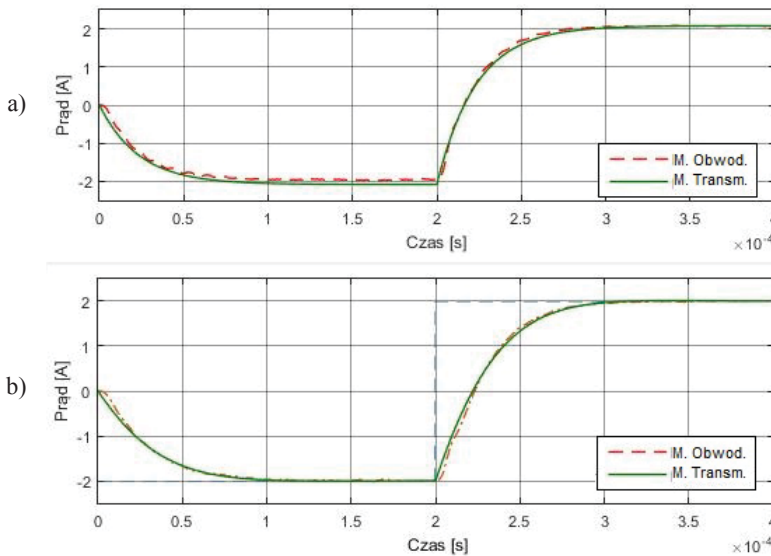
Przebiegi wartości chwilowych prądu w obwodzie wysokonapięciowym uzyskane w wyniku testów modelu obwodowego i dynamicznego $G_I(s)$ wykazują bardzo dużą zbieżność (rys. 12a).

Ze względu na dużą częstotliwość napięcia i prądu w obwodzie transformatora oraz niewielkie indukcyjności w tym obwodzie, pętla regulacji prądu charakteryzuje się znacznie mniejszą inercją w porównaniu z właściwościami dynamicznymi procesu regulacji napięć obwodów wysokonapięciowych modułów.

W kolejnym kroku przeprowadzono strojenie regulatora prądu PI w programie *Tune*. W wyniku tego procesu otrzymano następujące nastawy:

- wzmocnienie części proporcjonalnej: $K_p = 3,4342$,
- stała zdwojenia części całkującej: $T_i = 1,7956 \cdot 10^{-5}$ s;

Następnie przeprowadzono testy porównawcze działania modelu obwodowego i transmitancyjnego z zamkniętą pętlą regulacji prądu (rys. 12b). W obydwu przypadkach widoczna jest duża zbieżność wyników, co świadczy o prawidłowym doborze nastaw regulatora prądu.



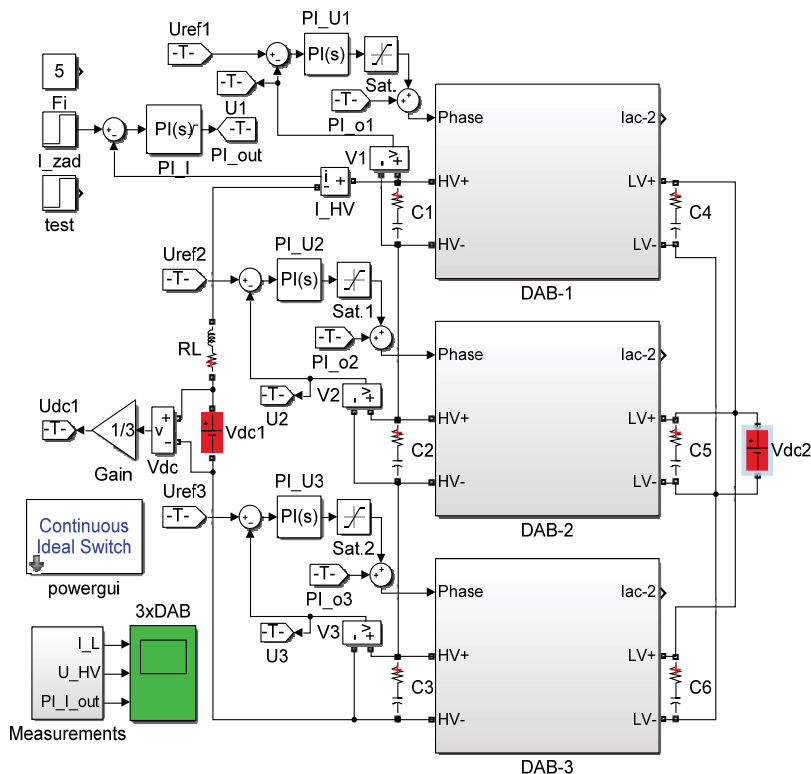
Rys. 12. Porównanie odpowiedzi modelu obwodowego trójmodułowego przekształtnika ISOP (---) z wyjściem modelu transmitancyjnego $G_I(s)$ (—) na skokową zmianę zadanej wartości prądu (---): a) w pętli otwartej, b) z regulatorem prądu

5. BADANIA MODELU DYNAMICZNEGO PRZEKSZTAŁTNIKA TRÓJMODUŁOWEGO

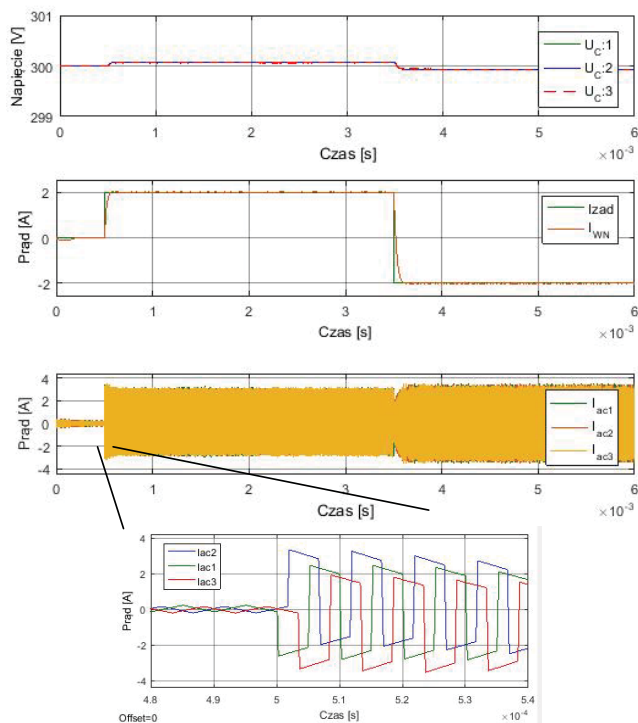
Badania kompletnego modelu przekształtnika trójmodułowego, w którym występują zamknięte układy regulacji napięć w wysokonapięciowych obwodach prądu stałego poszczególnych przekształtników DAB oraz zewnętrzna pętla regulacji prądu w tych obwodach obejmowały próby polegające na:

- skokowej zmianie wartości i kierunku przekształcanej energii, uzyskane poprzez zmianę zadanej wartości prądu na wejściu regulatora PI (rys. 14),
- skokową zmianę wartości napięcia na równoległe połączonych zaciskach wyjściowych (U_{2n}) (rys. 15).

Otrzymane wyniki potwierdzają prawidłowe działanie układu regulacji.

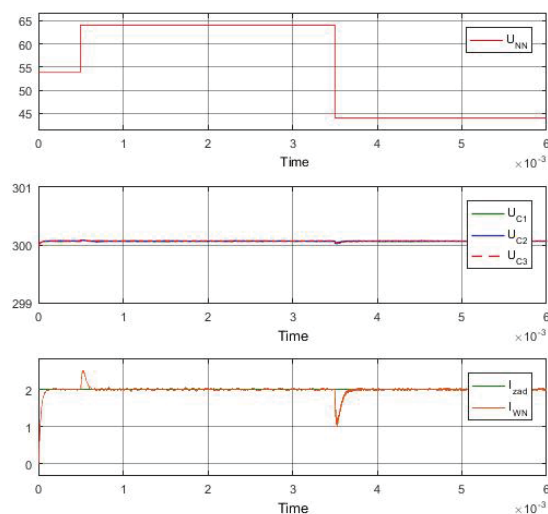


Rys. 13. Schemat modelu symulacyjnego trójmodułowego przekształtnika DC/DC z układami DAB pracującymi w konfiguracji szeregowo równoległej (ISOP) z zamkniętą pętlą regulacji ($U_{ref1} = U_{ref2} = U_{ref3} = 1/3U_{1n}$)



Rys. 14. Działanie układu trójmodułowego ISOP przy skokowej zmianie mocy

Od góry przebiegi czasowe: napięcie modułów po stronie WN; wartości zadanej prądu I_{zad} i prądu zmierzonego I_{WN} oraz prądów w obwodach prądu przemiennego modułów



Rys. 15. Działanie układu ISOP przy skokowej zmianie wartości napięcia U_{2n}

Od góry przebiegi czasowe: napięcia U_{2n} ; napięcie po stronie WN; wartości zadanej prądu I_{zad} i prądu zmierzonego I_{WN}

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodykę projektowania i optymalizacji układu sterowania wielomodułowego przekształtnika DC/DC o topologii ISOP, pracującego z zamkniętą pętlą regulacji napięcia i prądu w obwodach prądu stałego poszczególnych modułów. W procesie projektowania, wspomaganym badaniami symulacyjnymi wykorzystano możliwości zaawansowanego oprogramowania inżynierskiego, jakie zawiera środowisko Matlab, pozwalającego na identyfikację parametrów modelu, bez konieczności wyznaczania ich w sposób analityczny, związany przeważnie z licznymi uproszczeniami i zawiłymi przekształceniami matematycznymi. Przedstawione podejście pokazuje praktyczny, nieskomplikowany sposób estymacji parametrów modelu dynamicznego (transmitancyjnego) dowolnego przekształtnika, na podstawie wyników badań uzyskiwanych z modelu obwodowego (fizycznego) układu. Dzięki temu dobór i optymalizacja układu regulacji przekształtnika nie wymaga dużego nakładu czasu, i wystarczy, aby projektant wykazywał się jedynie znajomością podstawowych zasad z teorii sterowania.

Przedstawione wyniki badań modelu opracowanego przy wykorzystaniu narzędzia *System Identification Toolbox* w środowisku Matlab'a, w sposób przekonujący ilustrują zarówno praktyczną przydatność tego oprogramowania jak i poprawność doboru nastaw regulatorów PI występujących w skomplikowanych systemach sterowania przekształtników o złożonych topologiach, do których należą układy wielomodułowe.

Przeprowadzona analiza teoretyczna pracy podwójnego mostka aktywnego, jak również układu wielomodułowego, potwierdzają dobre właściwości dynamiczne zaprojektowanego układu regulacji.

Podziękowanie

Praca naukowa finansowana ze środków na działalność statutową Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej w ramach grantu dziekańskiego w roku 2015.

LITERATURA

1. Zumel P., Ortega L., Lazaro A., Fernandez C., Barrado A., Rodriguez A., Hernando M.M.: Modular Dual Active Bridge converter architecture, IEEE Conf., nr. 5, s. 1081-1087, 2014.
2. Chen W., Ruan X., Yan H., Tse Ch.K.: DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications, IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, nr 6, s. 1463-1474, 2009.
3. Fang T., Ruan X., Tse Ch. K.: Control strategy to achive input and output voltage sharing for input-series-output series-conected inverter systems, IEEE Trans. on Power Electronics. vol. 25, nr 6, s. 1585-1596, 2010.
4. Luth T., Merlin M.M.C., Green T.C., F. Hassan, Barker C.D.: High-Frequency Operation of a DC/AC/DC System for HVDC Applications, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 29, nr 8, s. 4107- 4115, 2014.

5. Grzejszczak P., Nowak M., Barlik R., Wysocki R., Kozdrój K.: Budowa i badania wielomodułowego przekształtnika DC/DC, mat. XI konf. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, CD, s. 1-6, Łódź, 2013.
6. Nowak M., Grzejszczak P., Wysocki R., Barlik R.: Sterowanie wielomodułowego, transformatorowego przekształtnika DC/DC o dwukierunkowym przepływie energii, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, nr 12b, s. 295-298, 2012.
7. Qin H., Kimball J.W.: Generalized Average Modeling of Dual Active Bridge DC-DC Converter, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, nr 4, s. 2078-2084, 2012.
8. Krismer F., Kolar J.W.: Accurate small-signal model for the digital control of an automotive bidirectional dual active bridge, IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, nr 12, s. 2756-2768, 2009.
9. Ljung L.: System Identification Toolbox™ User's Guide, www.mathworks.com, 2016.
10. 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, vol. 61, nr 4, s. 1-20, 2013.

Przyjęto do druku dnia 06.12.2016 r.

DYNAMIC MODEL OF MODULAR DC-DC CONVERTER WITH THREE DUAL ACTIVE BRIDGE CONVERTERS WITH SERIES INPUT PARALLEL OUTPUT CONNECTIONS

Piotr GRZEJSZCZAK, Roman BARLIK

ABSTRACT *This paper describes the results of the analysis of the dynamic model of a multi-modular DC-DC converter, consisting of double active bridges DAB. The considered topology has a series-connected high-voltage terminals and low-voltage terminals connected in parallel. On the basis of the circuit model of the DAB, averaged dynamic model in the form of a transfer function has been developed, using tools available in the System Identification Toolbox in Matlab. Using this software, the parameters of PI regulators in closed loop control were tuned, providing adequate dynamic properties and maintaining the stability of the system.*

Keywords: *multimodular converter, dual active bridge, series input parallel output, dynamic model*

Dr inż. Piotr GRZEJSZCZAK ukończył studia magisterskie (2009) i doktoranckie (2014) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Od 2010 roku jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Brał udział w badaniach dotyczących łączników półprzewodnikowych wykonanych z węgla krzemu (SiC), a także badaniach wysokosprawnych przekształtników energoelektronicznych pracujących z dużą częstotliwością łączeń. Jest autorem i współautorem licznych publikacji naukowych z tej tematyki. Od 2013 roku jest także członkiem IEEE oraz recenzentem czasopism IEEE o tematyce energoelektronicznej.



Prof. dr hab. inż. Roman BARLIK uzyskał tytuł mgra inż., stopień naukowy doktora oraz doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej odpowiednio w latach 1972, 1977 i 1989. Tytuł profesora uzyskał w 1997 roku.

W latach 1989 do 1993 pełnił funkcję zastępcy dyrektora ds. naukowych, a następnie dyrektora Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. W latach 1993 do 1999 pełnił funkcję prodziekana do spraw naukowych Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej a następnie przez dwie kadencje (1999-2005) dziekana tegoż Wydziału. Obecnie pracuje w PW na stanowisku profesora zwyczajnego, pełniąc od 2009 roku funkcję kierownika Zakładu Elektroniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym PW. Blisko dwa lata, począwszy od 1982 roku, przebywał na stażach naukowych w Uniwersytecie Technicznym w Akwizgranie, Niemcy.

Specjalizuje się w energoelektronice i napędzie elektrycznym. Z tego zakresu jest autorem i współautorem około 200 prac naukowych, opublikowanych w czasopismach i materiałach konferencyjnych w kraju i zagranicą. Recenzent krajowych i zagranicznych czasopism naukowo – technicznych oraz referatów konferencyjnych. Wchodzi w skład licznych komitetów naukowych i programowych konferencji krajowych i międzynarodowych. Jest współautorem kilkunastu monografii i książek, m.in. „Poradnika inżyniera energoelektronika” (WNT, 1998, 2015) i „Energoelektronika – elementy, podzespoły, układy” (Oficyna Wyd. PW, 2014). Jest autorem i współautorem blisko trzydziestu patentów krajowych. Prowadzi liczne projekty badawcze dla przemysłu, a także finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Jest członkiem Komitetu Elektrotechniki PAN, SEP-u, PTETiS-u (członkostwo honorowe) oraz IEEE (od 2003 roku Senior Member). Wieloletni Członek Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów.

