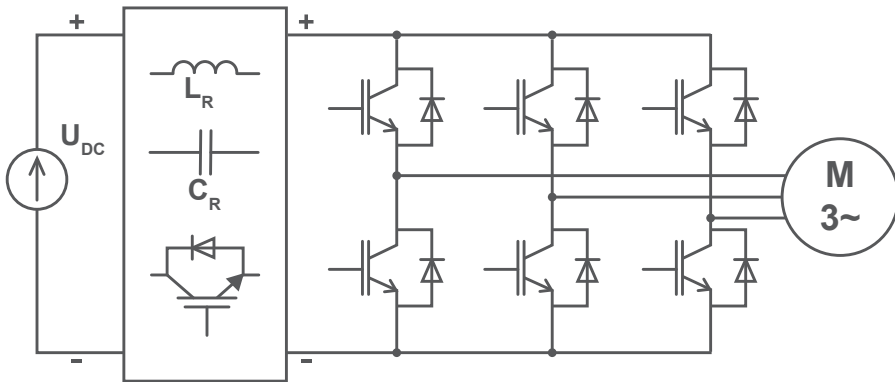


Marek Turzyński

# FALOWNIKI NAPIĘCIA

## Z QUASI-REZONANSOWYM OBWODEM POŚREDNICZĄCYM W UKŁADACH NAPĘDOWYCH



Gdańsk 2020

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Dariusz Mikielewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

RECENZENCI

*Piotr Chrzan*

*Jacek Rąbkowski*

REDAKCJA JĘZYKOWA

*Agnieszka Frankiewicz*

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI

*Wioleta Lipska-Kamińska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej,  
Gdańsk 2020

ISBN 978-83-7348-822-9

# SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	5
1. WSTĘP .....	7
1.1. Rys historyczny rozwoju napędu elektrycznego .....	7
1.2. Koncepcja napędu elektrycznego .....	8
1.3. Przedmiot oraz struktura monografii .....	13
2. KOMUTACJA TWARDA W DWUPOZIOMOWYM FALOWNIKU NAPIĘCIA .....	14
2.1. Wprowadzenie .....	14
2.2. Proces włączania i wyłączania tranzystora w dwupoziomowym falowniku mostkowym .....	16
2.3. Straty przełączenia w układach o komutacji twardej .....	19
2.4. Sprawność trójfazowego mostkowego falownika napięcia .....	22
2.5. Inne negatywne efekty wynikające z twardej komutacji tranzystorów falownika i metody ich redukcji .....	28
3. FALOWNIKI MIĘKKO PRZEŁĄCZALNE .....	34
3.1. Wstęp .....	34
3.2. Klasyfikacja falowników miękko przełączalnych .....	36
3.3. Przegląd wybranych struktur falowników napięcia z rezonansowym i quasi-rezonansowym równoległym obwodem pośredniczącym napięcia stałego .....	49
3.3.1. Struktura bazowa BRDCLI .....	49
3.3.2. Układy rezonansowe z aktywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	51
3.3.3. Układy quasi-rezonansowe z aktywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	55
3.3.4. Układy z pasywnym ograniczaniem napięcia $u_F$ .....	58
3.3.5. Układy quasi-rezonansowe z równoległym obwodem rezonansowym ....	60
3.3.6. Badania symulacyjne wybranych topologii układów PRDCLI .....	67
4. NAPIĘCIE WSPÓLNE I PRĄDY ŁOŻYSKOWE W UKŁADACH NAPĘDOWYCH Z FALOWNIKAMI NAPIĘCIA Z KOMUTACJĄ TWARDAŁ .....	71
4.1. Obwody przepływu prądów zaburzeń wspólnych .....	71

4.2.	Mechanizm powstawania napięcia wspólnego w układzie napędowym z mostkowym falownikiem napięcia .....	72
4.3.	Model impedancji silnika dla składowej wspólnej .....	76
4.4.	Prądy łożyskowe .....	85
4.5.	Metody ograniczenia napięcia wspólnego i efektów związanych z jego oddziaływaniem .....	88
5.	PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI Z QUASI-REZONANSOWYM OBWODEM POŚREDNICZĄCYM .....	104
5.1.	Napięcie wspólne w układach typu PQRDCLI .....	104
5.2.	Falownik napięcia z quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym z dwoma łącznikami izolacyjnymi .....	109
5.2.1.	Opis matematyczny układu dla silnikowego trybu pracy .....	110
5.2.2.	Podokresy pracy układu w trybie generatorowym .....	117
5.2.3.	Strategia sterowania .....	120
5.2.4.	Dobór podstawowych parametrów układu .....	124
5.3.	Układ eksperymentalny .....	126
5.3.1.	Układ sterowania z modulatorem VSDM .....	126
5.3.2.	Stanowisko laboratoryjne .....	128
5.3.3.	Przebiegi operacyjne układu .....	130
5.3.4.	Napięcia i prądy falownika oraz właściwości EMC .....	132
5.3.5.	Przebiegi wysokoczęstotliwościowych prądów i napięć .....	135
5.3.6.	Analiza sprawności układu .....	140
5.4.	Porównanie proponowanej topologii z innymi rozwiązaniami przekształtników PQRDCLI .....	142
6.	PODSUMOWANIE .....	146
6.1.	Wnioski oraz dalsze perspektywy rozwoju układów PQRDCLI do zastosowań w układach napędowych .....	146
7.	DODATEK .....	148
7.1.	Wartość średnia i skuteczna prądu wejściowego falownika $i_O$ .....	148
7.2.	Analiza wartości napięcia wspólnego $u_{N\_PE}$ w stanie przerwy beznapięciowej w układzie przekształtnika PQRDCLI z dwoma tranzystorami separującymi $T_1, T_4$ .....	150
7.3.	Analiza teoretyczna sprawności przekształtnika PQRDCLI .....	152
	BIBLIOGRAFIA .....	156
	STRESZCZENIE W JĘZ. POLSKIM .....	167
	STRESZCZENIE W JĘZ. ANGIELSKIM .....	167

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

## Oznaczenia ogólne

- $x, x(t)$  – wartość chwilowa
- $X$  – składowe stałe
- $\hat{I}$  – wielkość estymowana

## Napięcia

- $u_{A\_PE}$  – napięcie wyjściowe falownika w fazie A mierzone względem uziemienia
- $u_{AB}$  – przewodowe napięcie wyjściowe mierzone pomiędzy fazami A i B falownika
- $U_{C1}$  – napięcie pojemności pomocniczej  $C_1$
- $U_{DC}$  – źródło napięcia stałego
- $u_F$  – napięcie wejściowe falownika
- $u_{N\_PE}$  – napięcie wspólne
- $u_{SH}$  – napięcie wałowe

## Prądy

- $i_A$  – prąd wyjściowy falownika w fazie A
- $i_{CR}$  – prąd kondensatora rezonansowego
- $i_{LR}$  – prąd cewki rezonansowej
- $I_{LR(max)}$  – wartość maksymalna prądu cewki rezonansowej
- $I_{LR(min)}$  – wartość minimalna prądu cewki rezonansowej
- $i_O$  – prąd obciążenia
- $i_{PE}$  – prąd w przewodzie PE
- $I_{PE(max)}$  – wartość maksymalna prądu w przewodzie PE
- $i_{SH}$  – prąd wałowy maszyny elektrycznej
- $I_{SH(max)}$  – wartość maksymalna prądu wałowego

## Inne wielkości

- $C_1$  – pojemność pomocnicza
- $C_{BRG}$  – pojemność łożyska
- $C_F$  – pojemność kondensatora w obwodzie pośredniczącym

---

$C_{p1}, C_{p2}$	– pojemności doziemne
$C_{PE}$	– pojemność pomiędzy uziemionym korpusem a punktem neutralnym uzwojeń stojana połączonych w gwiazdę
$C_R$	– pojemność kondensatora rezonansowego
$C_{RK}$	– pojemność pomiędzy wałem a uziemionym korpusem maszyny elektrycznej
$C_{SK}$	– pojemność pomiędzy zaciskami stojana a uziemionym korpusem maszyny elektrycznej
$C_{SR}$	– pojemność pomiędzy zaciskami uzwojeń stojana a wałem maszyny elektrycznej
$f_S$	– częstotliwość przełączeń tranzystorów falownika
$L_R$	– indukcyjność cewki rezonansowej
$P_C$	– straty przewodzenia
$P_{DYN}$	– straty przełączania
$P_{TF}$	– straty przewodzenia tranzystorów falownika
$T_S$	– okres przełączeń tranzystorów falownika
$T_Z$	– czas opadania napięcia
$Z_C$	– impedancja składowej wspólnej

### Skróty

A, B, C	– oznaczenia faz napięcia wyjściowego falownika
CM	– składowa wspólna (ang. <i>common mode</i> )
$D_F$	– diody w mostku falownika
F	– falownik
IGBT	– tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (ang. <i>insulated gate bipolar transistor</i> )
K	– korpus maszyny elektrycznej
M	– maszyna elektryczna
MOSFET	– tranzystor polowy z izolowaną bramką (ang. <i>metal oxide semiconductor field effect transistor</i> )
P	– prostownik
PDM	– modulacja gęstości impulsów (ang. <i>pulse-density modulation</i> )
PE	– uziemienie ochronne (ang. <i>protective earthing</i> )
PQRDCLI	– falownik napięcia z quasi-rezonansowym obwodem pośredniczącym (ang. <i>parallel quasi-resonant DC-link inverter</i> )
PWM	– modulacja szerokości impulsów (ang. <i>pulse-width modulation</i> )
R	– wał maszyny elektrycznej
S	– początek połączonych w gwiazdę uzwojeń stojana maszyny elektrycznej
$T_F$	– tranzystory falownika
V	– obwód pośredniczący
ZCS	– przełączanie w stanach bezprądowych (ang. <i>zero-current switching</i> )
ZVS	– przełączanie w stanach beznapięciowych (ang. <i>zero-voltage switching</i> )