

Andrzej Sikora, Adam Zielonka
Politechnika Śląska, Gliwice

OGRANICZENIE STRAT MOCY W SILNIKU BLDC WYNIKAJĄCYCH Z PULSACJI PRĄDU ZASILANIA

LIMITING POWER LOSSES IN BLDC MOTOR DUE TO SUPPLY CURRENT PULSATIONS

Abstract: The paper presents analysis of current waveforms of BLDC motor running idle and operating at partial load. The supply voltage waveform is trapezoidal, but emf induced in the windings and influenced by permanent magnets differs in shape; therefore the supply current contains significant ripple component. In case of idle run, the instantaneous value of emf (during one supply commutation sequence) is higher than supply voltage and this causes instantaneous change in current direction – the current flows away from the motor and into the supply source. When BLDC motor is supplied with ripple current, the winding power losses increase compared to losses generated by constant current equal to average value of supply current with ripple component (over one commutation sequence time interval). These power losses due to current ripple may be decreased if supply circuit is modified in such a way, that instantaneous supply voltage value is controlled by PWM so that motor current is stabilised.

1. Wstęp

Cechą charakterystyczną silników bezszczotkowych BLDC jest pulsacja prądu płynącego przez uzwojenia (w trakcie jednego taktu). Przepływ prądu tętniącego przez uzwojenia silnika powoduje powstanie w uzwojeniach większych strat mocy niż prąd o tej samej wartości średniej i przebiegu trapezowym. Zważywszy na to, że napędy z silnikami BLDC należą do najbardziej sprawnych podjęto próbę ograniczenia strat związanych z tętnieniem prądu płynącego w uzwojeniach (w trakcie jednego taktu zasilania). Celem badań jest analiza przebiegów prądów w silniku BLDC pracującym na biegu jałowym jak i z obciążeniem różnej wielkości. Zadaniem analizy jest określenie strat wynikających z przepływu prądu przez uzwojenia silnika oraz zaproponowanie sposobu ich minimalizacji. Do badań wybrano silnik PMSg80-6B zasilany poprzez komutator elektroniczny, w którym do określenia położenia wału silnika wykorzystuje się sygnały pochodzące z hallotronów.

2. Cechy charakterystyczne układu zasilania silnika BLDC

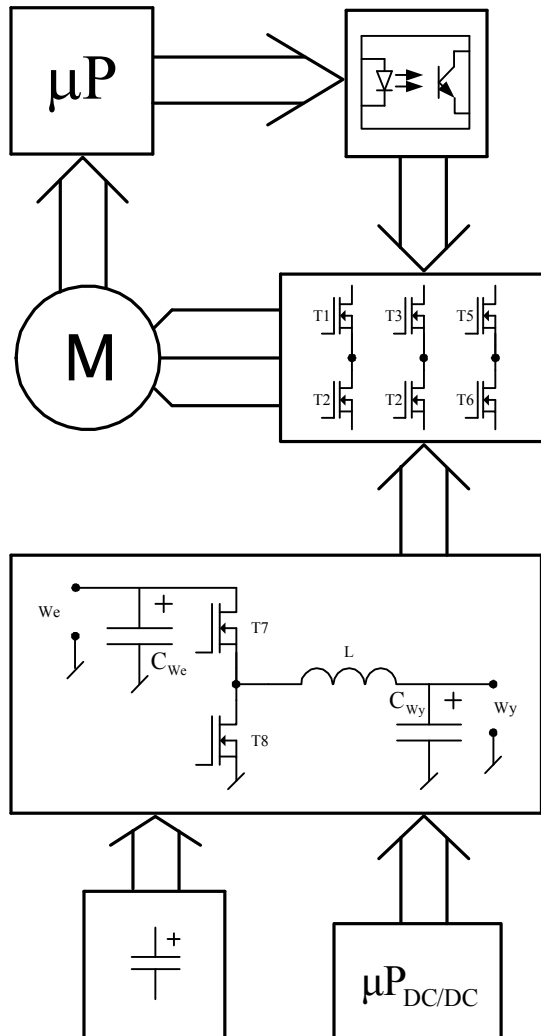
Przebieg napięcia zasilania silnika BLDC jest przebiegiem trapezowym, natomiast napięcie indukowane w uzwojeniach, pochodzące od magnesów trwałych ma przebieg odbiegający od kształtu przebiegu napięcia zasilającego, przez co prąd zasilania zawiera istotną skła-

dową tętniącą. W przypadku pracy na biegu jałowym, chwilowa wartość napięcia indukowanego w uzwojeniach (w trakcie trwania jednego taktu zasilania) przekracza wartość napięcia zasilania, powodując chwilowy przepływ prądu z silnika do źródła zasilania. Zasilając silnik BLDC prądem tętniącym w jego uzwojeniach powstają większe straty mocy, niż w przypadku zasilania go prądem o stałej wartości, równej wartości średniej prądu tętniącego (w trakcie trwania jednego taktu zasilania).

3. Pomiary i analiza prądu zasilania silnika BLDC

W celu określenia, w jakim stopniu można poprawić sprawność napędu, przez eliminację tętnień bądź ich ograniczenie, przeprowadzono pomiary prądu zasilania silnika w różnych stanach pracy tzn. dla biegu jałowego oraz obciążenia różnej wielkości. Pomiary wykonano w układzie jak na rysunku 1 (układ analogiczny do układu omówionego [1]). W dalszej części artykułu układ ten nazwano układem podstawowym. Następnie w oparciu o uzyskane wyniki przeprowadzono analizę, na podstawie której określono wartość skuteczną (RMS) i średnią (AVG) prądu zasilania silnika. Analiza prądu została przeprowadzona w obrębie taktu zasilania. Otrzymane w ten sposób wyniki zostały przedstawione w tabeli 1 – praca na biegu jałowym i w tabeli 2 – praca pod obciążeniem.

Pomiary wykonano dla dwóch kierunków wirowania.



Rys. 1. Schemat układu napędowego składającego się z mikroprocesora, transoptorów, komutatora elektronicznego, silnika z magnesami trwałymi, źródła zasilania i dwutranzystorowej przetwornicy DC/DC wraz z jej mikroprocesorem sterującym

Na rysunkach rys.2. – rys.5. został przedstawiony przebieg prądu dla pojedynczych taktów (przepływ prądu w jednym i drugim kierunku) zasilania silnika. Ponadto zaznaczono dla pojedynczego taktu wartość średnią (linia kropkowana) i skuteczną prądu (linia ciągła pogrubiona), przy czym wartość skuteczną przedstawiono ze znakiem wartości średniej w celu lepszego porównania.

Tabela 1a. Zestawienie wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania

w prawo z różnymi prędkościami na biegu jałowym

n [obr/min]	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
116	0.55	0.38	0.40	-0.22
214	0.76	0.35	0.71	-0.37
300	1.14	0.38	1.34	-0.30
340	1.39	0.40	1.42	-0.27
400	1.47	0.33	1.60	-0.25
500	1.45	0.39	1.55	-0.28
540	1.53	0.42	1.44	-0.38

Tabela 1b. Zestawienie wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w lewo z różnymi prędkościami na biegu jałowym

n [obr/min]	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
116	0.37	0.25	0.52	-0.34
214	0.76	0.42	0.68	-0.41
300	1.16	0.52	1.00	-0.21
340	1.22	0.32	1.44	-0.41
400	1.45	0.32	1.70	-0.43
500	1.65	0.37	1.92	-0.52
540	1.93	0.64	1.62	-0.53

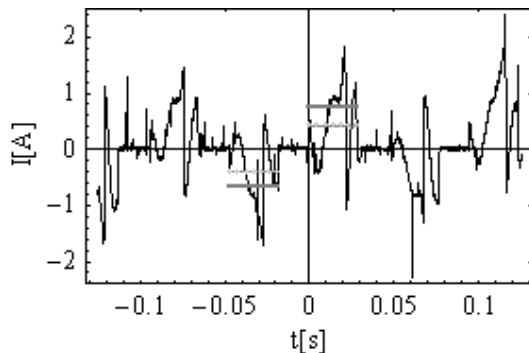
Tabela 2a. Zestawienie wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w prawo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
M=0	0.76	0.35	0.71	-0.37
M1	2.53	2.47	2.38	-2.17
M2	5.88	5.81	5.37	-5.25
M3	8.23	8.17	7.68	-7.53

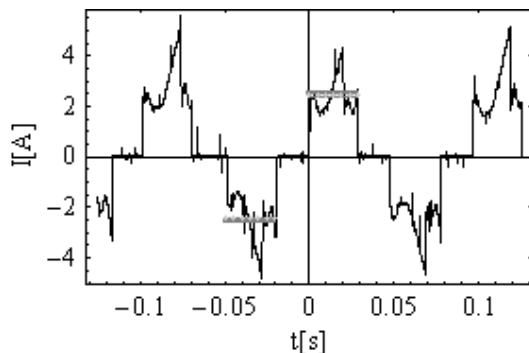
Tabela 2b. Zestawienie wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w lewo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
M=0	0.76	0.42	0.68	-0.41
M1	2.50	2.40	2.58	-2.40
M2	6.09	5.97	5.84	-5.60
M3	8.80	8.67	7.80	-7.43

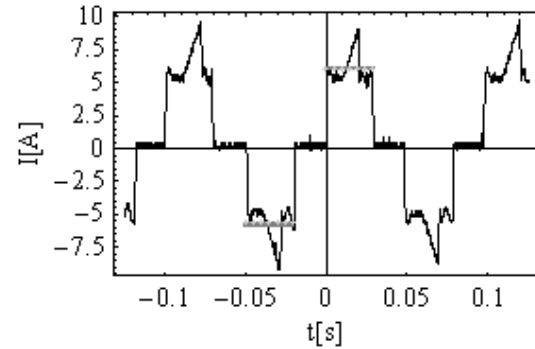
Z rysunków rys.2. – rys.5. oraz danych przedstawionych w tabelach tabela1 i tabela2 wynika, że wartość skuteczna prądu silnika jest większa od wartości średniej w danym takcie zasilania. Dodatkowo analiza wykazała, że udział składowej tętniącej w prądzie silnika zmniejsza się wraz ze wzrostem obciążenia.



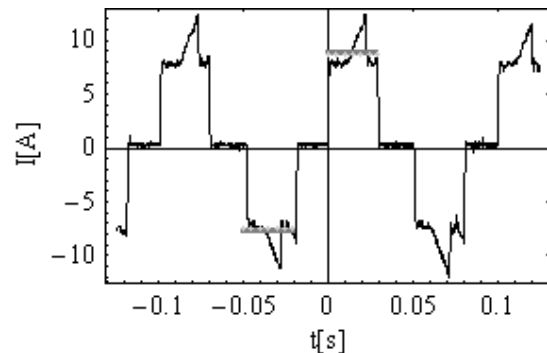
Rys. 2. Przebieg prądu jednej fazy silnika podczas pracy z obciążeniem $M=0$



Rys. 3. Przebieg prądu jednej fazy silnika podczas pracy z obciążeniem $M1$



Rys. 4. Przebieg prądu jednej fazy silnika podczas pracy z obciążeniem $M2$



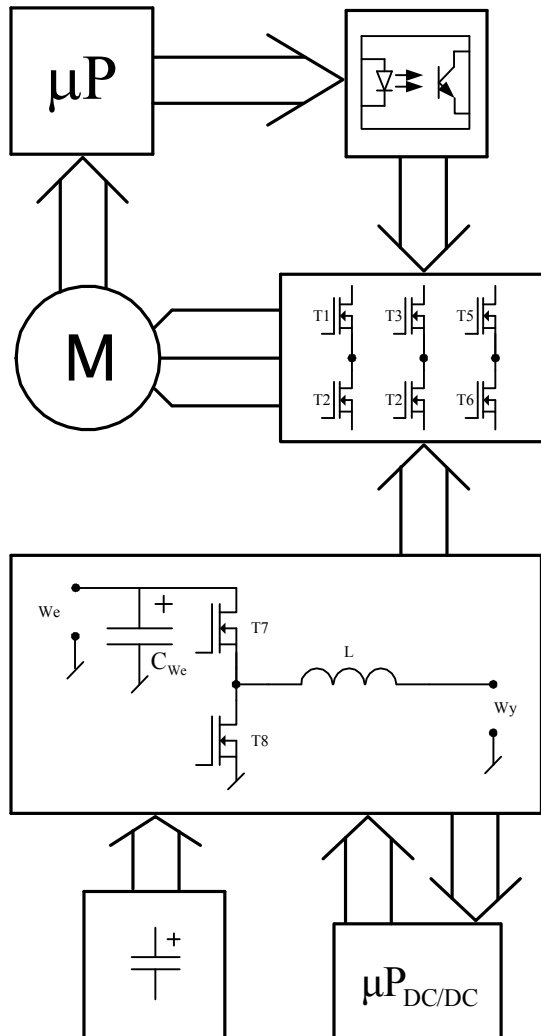
Rys. 5. Przebieg prądu jednej fazy silnika podczas pracy z obciążeniem $M3$

Taki wynik analizy prądu zasilania silnika wskazuje możliwość zmniejszenia strat w uzwojeniach silnika poprzez zastosowanie przekształtnika stabilizującego prąd w uzwojeniu silnika (w takcie trwania jednego taktu), przy czym, w celu utrzymania parametrów mechanicznych napędu, wartość prądu powinna odpowiadać wartości średniej w obrębie danego taktu.

4. Realizacja układu obniżającego tętnienia prądu zasilania silnika BLDC

Postawione powyżej zadanie zostało zrealizowane w oparciu o zmodyfikowaną wersję przekształtnika opisanego w rozdziale 3. W celu zapewnienia możliwości stabilizacji prądu w trakcie trwania jednego taktu zasilania silnika z przekształtnika usunięto filtr pojemnościowy znajdujący się za przetwornicą DC/DC (C_{wy}). Przekształtnik został rozbudowany o układ współpracujący sygnał proporcjonalny do wartości średniej prądu zasilania silnika oraz układ, który na podstawie tego sygnału steruje tranzystorami mocy przetwornicy DC/DC (T7 i T8). Tranzystory te spełniają również funkcję regulacji prędkości napędu poprzez modulację PWM. Natomiast tranzystory komutatora elek-

tronicznego (T1 - T6) otwierane są tylko na podstawie informacji o położeniu wirnika (brak modulacji PWM). Schemat układu przedstawiono na rysunku 6. W dalszej części artykułu układ ten nazwano układem zmodyfikowanym.



Rys. 6. Schemat układu napędowego składającego się z mikroprocesora, transoptorów, komutatora elektronicznego, silnika z magnesami trwałymi, źródła zasilania i dwutranzystorowej przetwornicy DC/DC pozwalającej na wygładzanie prądu zasilania silnika wraz z jej mikroprocesorowym układem sterującym

Analogicznie jak w przypadku układu bez wygładzania prądu zasilania silnika przeprowadzone zostały pomiary i analiza prądu w obrębie taktu zasilania. Dla pracy na biegu jałowym dane zestawiono w tabeli 3, zaś dla pracy pod obciążeniem w tabeli 4.

Tabela 3a. Zestawienie, dla zmodyfikowanego układu, wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w prawo z różnymi prędkościami na biegu jałowym

n [obr/min]	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
116	0.42	0.36	0.28	-0.18
214	0.37	0.35	0.48	-0.26
300	0.43	0.42	0.58	-0.28
340	0.36	0.35	0.43	-0.35

Tabela 3b. Zestawienie, dla zmodyfikowanego układu, wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w lewo z różnymi prędkościami na biegu jałowym

n [obr/min]	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
116	0.23	0.18	0.43	-0.39
214	0.31	0.30	0.29	-0.27
300	0.49	0.46	0.48	-0.40
340	0.40	0.36	0.44	-0.42

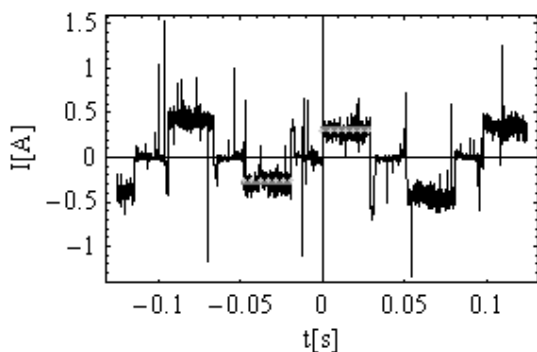
Tabela 4a. Zestawienie, dla zmodyfikowanego układu, wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w prawo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
M=0	0.31	0.30	0.29	-0.27
M1	2.41	2.39	2.23	-2.19
M2	5.91	5.91	5.27	-5.04
M3	8.32	8.28	8.12	-8.07

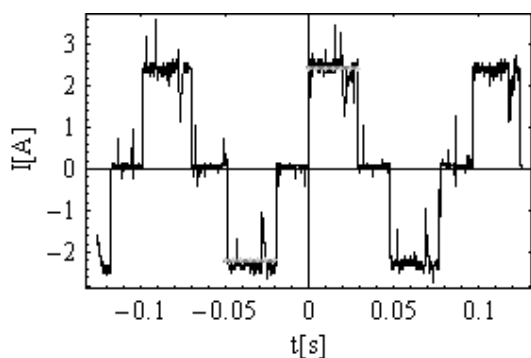
Tabela 4b. Zestawienie, dla zmodyfikowanego układu, wartości średnich (AVG) i skutecznych (RMS) prądu w pojedynczych taktach zasilania silnika, podczas wirowania w lewo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	RMS [A]	AVG [A]	RMS [A]	AVG [A]
M=0	0.37	0.35	0.39	-0.35
M1	2.40	2.39	2.28	-2.14
M2	5.87	5.86	5.24	-5.15
M3	8.40	8.38	7.53	-7.22

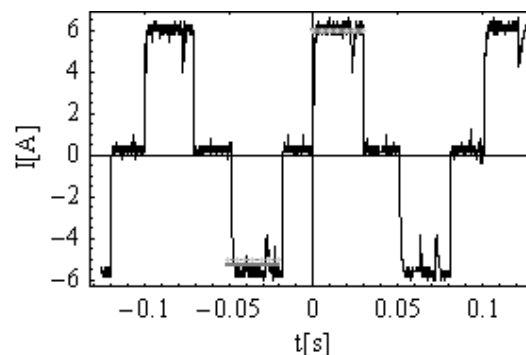
Na rysunkach rys.7. – rys.10. został przedstawiony przebieg prądu dla pojedynczych taktów (przepływ prądu w jednym i drugim kierunku) zasilania silnika podczas pracy z układem ograniczającym pulsacje prądu silnika.



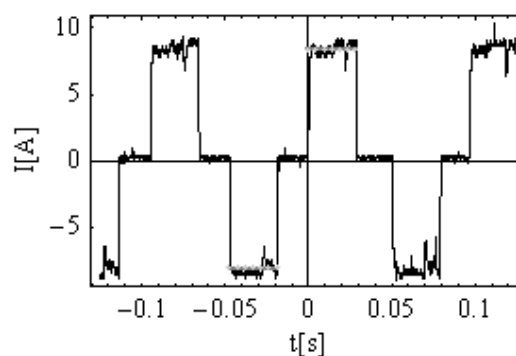
Rys. 7. Przebieg prądu jednej fazy silnika w układzie z ograniczeniem tętnień prądu podczas pracy z obciążeniem $M=0$



Rys. 8. Przebieg prądu jednej fazy silnika w układzie z ograniczeniem tętnień prądu podczas pracy z obciążeniem $M1$



Rys. 9. Przebieg prądu jednej fazy silnika w układzie z ograniczeniem tętnień prądu podczas pracy z obciążeniem $M2$



Rys. 10. Przebieg prądu jednej fazy silnika w układzie z ograniczeniem tętnień prądu podczas pracy z obciążeniem $M3$

Ponadto zaznaczono dla pojedynczego taktu wartość średnią (linia kropkowana) i skuteczną prądu (linia ciągła pogrubiona), przy czym wartość skuteczną przedstawiono ze znakiem wartości średniej w celu lepszego porównania.

5. Porównanie pracy układu podstawowego i zmodyfikowanego

W celu weryfikacji działania układu zmniejszającego tętnienia prądu silnika (w trakcie trwania jednego taktu zasilania) w tabelach: 3 i 4, porównano procentową względną różnicę wartości średniej I_{AVG} od wartości skutecznej I_{RMS} prądu zasilania określoną wzorem:

$$\Delta_I = 100\% \frac{|I_{RMS} - I_{AVG}|}{I_{AVG}}$$

oraz wyznaczono wartości parametru Δ_P określony wzorem:

$$\Delta_P = \frac{I_{RMS}^2 - I_{AVG}^2}{I_{AVG}^2}$$

co odpowiada względnej różnicy przyrostu strat w uzwojeniach silnika. Obydwa te parametry zostały wyznaczone dla pracy bez i z układem ograniczenia tętnienia prądu zasilania silnika, z uwzględnieniem pulsów dodatnich i ujemnych.

Tabela 5a. Porównanie wartości parametru Δ_I opisującego różnicę pomiędzy I_{RMS} I_{AVG} dla pracy na biegu jałowym z różnymi prędkościami podczas wirowania w prawo

n [obr/min]	Δ_I [%]			
	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
116	30.9	14.3	45.0	35.7
214	53.9	5.4	47.9	45.8
300	66.6	2.3	77.6	51.7
340	71.2	2.8	81.0	18.6

Tabela 5b. Porównanie wartości parametru Δ_I opisującego różnicę pomiędzy I_{RMS} I_{AVG} dla pracy na biegu jałowym z różnymi prędkościami podczas wirowania w lewo

n [obr/min]	Δ_I [%]			
	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
116	32.4	21.7	34.6	9.3
214	44.7	3.2	39.7	6.9
300	55.2	6.1	79.0	16.7
340	73.8	10.0	71.5	4.5

Tabela 6a. Porównanie wartości parametru Δ_I opisującego różnicę pomiędzy I_{RMS} I_{AVG} dla wirowania w prawo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami silnika ($M=0<M1<M2<M3$)

obciążenie	Δ_I [%]			
	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
M=0	53.9	3.3	47.9	6.9
M1	2.4	0.8	8.8	1.8
M2	1.1	0	2.2	4.5
M3	0.7	0.5	1.9	0.6

Tabela 6b. Porównanie wartości parametru Δ_I opisującego różnicę pomiędzy I_{RMS} I_{AVG} dla wirowania w lewo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami silnika ($M=0<M1<M2<M3$)

obciążenie	Δ_I [%]			
	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
M=0	44.7	5.4	39.7	11.43
M1	4.0	0.4	7.0	6.5
M2	2.0	0.2	4.3	1.7
M3	1.4	0.2	4.7	4.1

Tabela 7a. Porównanie wartości parametru Δ_p opisującego względną różnicę przyrostu strat mocy dla pracy na biegu jałowym z różnymi prędkościami podczas wirowania w prawo

n [obr/min]	Δ_p			
	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
116	1.09	0.36	2.31	1.42
214	3.71	0.12	2.68	2.41
300	8.00	0.05	18.95	3.29
340	11.08	0.06	26.66	0.51

Tabela 7b. Porównanie wartości parametru Δ_p opisującego względną różnicę przyrostu strat mocy dla pracy na biegu jałowym z różnymi prędkościami podczas wirowania w lewo

n [obr/min]	Δ_p			
	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
116	1.19	0.63	1.34	0.22
214	2.27	0.07	1.75	0.15
300	3.98	0.13	21.68	0.44
340	13.54	0.23	11.34	0.10

Tabela 8a. Porównanie wartości parametru Δ_p opisującego względną różnicę przyrostu strat dla wirowania w prawo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami silnika ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Δ_p			
	Wirowanie w prawo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
M=0	3.72	0.07	2.68	0.15
M1	0.05	0.02	0.20	0.37
M2	0.02	0.00	0.05	0.09
M3	0.01	0.01	0.04	0.01

Tabela 8b. Porównanie wartości parametru Δ_p opisującego względną różnicę przyrostu strat dla wirowania w lewo z prędkością $n=200$ obr/min i z różnymi obciążeniami silnika ($M=0 < M1 < M2 < M3$)

obciążenie	Δ_p			
	Wirowanie w lewo			
	Puls dodatni		Puls ujemny	
	układ podst.	układ zmod.	układ podst.	układ zmod.
M=0	2.27	0.12	1.75	0.24
M1	0.09	0.01	0.16	0.14
M2	0.04	0.00	0.09	0.04
M3	0.03	0.00	0.10	0.09

Zestawienie danych z tabel 5 i tabela 6 dotyczących Δ_i , oraz z tabel 7 i tabela 8 dotyczących Δ_p pokazuje, że ograniczenie tętnień prądu silnika w jednym takcie zasilania znacząco zmniejsza parametr Δ_i w pewnych warunkach pracy (niewielkie obciążenie), a tym samym straty wynikające z przepływu prądu (parametr Δ_p).

6. Wnioski

Przedstawione wyniki analizy pokazują, że eliminacja składowej tętniącej prądu silnika (podczas jednego taktu zasilania) znacząco zmniejsza wartość skuteczną prądu zasilania silnika podczas pracy na biegu jałowym i z niepełnym obciążeniem. Wraz ze wzrostem obciążenia, układ charakteryzuje się tym, że różnica pomiędzy wartością skuteczną i średnią prądu maleje (w trakcie trwania jednego taktu zasilania). W trakcie pracy z dużym obciążeniem różnica pomiędzy wartością skuteczną i średnią prądu jest na tyle mała, że próba ograniczania tętnienia prądu silnika nie wnosi istotnych korzyści. Stosowanie układu eliminacji składowej tętniącej prądu silnika uzasadnione jest w przypadku napędów charakteryzujących się znaczącym czasem pracy na biegu jałowym. W przypadku pozostałych układów tzn. takich dla których czas pracy bez obciążenia, bądź z niewielkim obciążeniem jest nieistotny w cyklu pracy, nie jest konieczne eliminowanie składowej tętniącej prądu zasilania silnika (w trakcie trwania jednego taktu), ze względu na jej mały udział.

7. Literatura

- [1]. Sikora A., Zielonka A.: Porównanie dwóch wariantów zasilania silnika bezszczotkowego. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe Nr 86/2010 PEMINE Komel, Rytró, maj 2010r. ISSN 0239-3646, str. 53-55.
- [2]. Glinka T.: Electric motors with permanent magnets. Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, nr 7/2008, str. 1 – 7.
- [3]. Bernatt J., Glinka T., Król E., Rossa R.: Electric Motors with Permanent Magnets. ICRM 2008. IEEE Catalog Number: CFP0890B-CDR. ISBN: 978-1-4244-1736-0. Library of Congress Number: 2007906913. Poz.58.
- [4]. Sikora A., Zielonka A.: Napęd łodzi motorowej z wykorzystaniem silnika bezszczotkowego zasilanego poprzez komutator elektroniczny. Napędy i Sterowanie ISSN 1507-7764, nr 2'2010 str.46-48.
- [5]. Jarzębowski L., Karwowski K.: Bezczytnikowe sterowanie trakcyjnym silnikiem IPMSM małej mocy. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności

Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK
2010, Zakopane, październik 2010r. ISBN 978-83-
86219-51-3, str. 271-278.

Autorzy

dr inż. Andrzej Sikora
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział
Elektryczny, Instytut Elektrotechniki Przemys-
łowej i Informatyki, Zakład Inżynierii Elek-
trycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10,
44-100 Gliwice, tel. (32)2371258,
Andrzej.Sikora@polsl.pl

dr inż. Adam Zielonka
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział
Matematyczno-Fizyczny, Instytut Matematyki,
Zakład Zastosowań Matematyki, ul. Kaszubska
23, 44-100 Gliwice, Adam.Zielonka@polsl.pl

Artykuł jest fragmentem grantu finansowanego
przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyż-
szego nr N N510 326637