

## Wpływ debouncingu na właściwości szybkobieżnych bezszczotkowych silników prądu stałego

*W ostatnich latach coraz częściej w napędach górniczych wymagających dokładnej regulacji prędkości obrotowej stosuje się bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC), wzbudzone za pomocą magnesów trwałych umieszczonych w wirniku. W tych silnikach rolę komutatora przejmuje falownik sterowany przez elektroniczne czujniki położenia wału. Zastosowanie maszyn BLDC powoduje powstanie nowych problemów. Jednym z nich jest niepewna praca czujników położenia wału, w których elementami przełączającymi są najczęściej hallotrony. W chwilach komutacji prądu, a także pod wpływem silnych zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych czujniki mogą wysłać fałszywe impulsy sterujące, wskutek czego pojawiają się błędne przełączenia tranzystorów falownika. Aby napęd mógł pracować poprawnie, należy ograniczyć wpływ niepewności czujników hallotronowych na pracę maszyny. W tym celu stosuje się tzw. procedury debouncingu, pozwalające na przełączenie obwodu dopiero wtedy, kiedy upewnimy się, że wirnik istotnie obrócił się o założony kąt. Wprowadzają one pewne, niewielkie opóźnienie chwili komutacji tranzystorów. W artykule przedstawiono problemy związane z zastosowaniem procedur debouncingu w szybkobieżnych maszynach BLDC dużej mocy.*

### 1. STANOWISKO WYKORZYSTANE PODCZAS BADAŃ

---

Badania opisane w artykule przeprowadzane były w laboratorium Politechniki Śląskiej na bezszczotkowym silniku prądu stałego (BLDC = *BrushLess DC current motor*) o parametrach znamionowych: moc znamionowa  $P_n = 25$  kW, napięcie znamionowe  $U_n = 250$  V, prąd znamionowy  $I_n = 160$  A, liczba par biegunów  $p = 3$ , znamionowa prędkość wirowania  $n_n = 3500$  obr/min. Dzielone uzwojenia stojana silnika były połączone w gwiazdę, przy czym na zewnątrz wyprowadzone były wszystkie początki, końce i środki uzwojeń. Silnik przeznaczony był do pracy w dwóch strefach regulacji prędkości obrotowej. Pracę w drugiej strefie realizowano przez elektroniczne bocznikowanie połowy uzwojenia. Opis koncepcji falownika realizującego pracę dwustrefową silnika BLDC można znaleźć w [1].

Podczas pracy w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej możliwe było osiąganie prędkości wirowania do 7000 obr/min. Maszyna była badana w laboratorium

Politechniki Śląskiej (na biegu jałowym lub przy niewielkim obciążeniu) i w laboratorium Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel (przy prędkościach do 6000 obr/min i przy pełnym obciążeniu).

### 2. ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI WYZNACZANIA CHWIL KOMUTACJI SILNIKÓW BLDC

---

Na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych stwierdzono, że główną przyczyną awarii silników z wirującymi magnesami trwałymi (BLDC oraz silników synchronicznych z wirującymi magnesami) są uszkodzenia mechaniczne czujników położenia wału, montowanych na silniku jako oddzielne podzespoły wirujące (magnetyczne lub optoelektroniczne). Takie czujniki są mocowane do obudowy silnika i napędzane wałem maszyny. Głównymi przyczynami awarii są uszkodzenia przewodów prowadzących sygnały sterujące i przesunięcia elementów pomiarowych względem wału. Dodatkowym źródłem błędów występujących podczas wyzna-

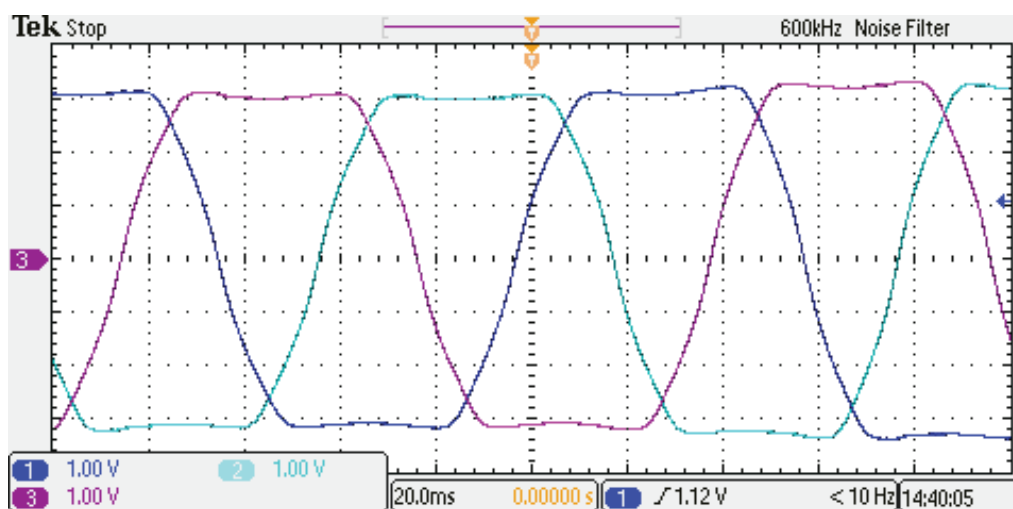
czenia chwil komutacji są też luzy mechaniczne na elementach sprzęgających wał z czujnikiem.

Czujniki położenia wału można również zamontować wewnątrz maszyny. Wykorzystuje się wówczas czujniki hallotronowe, które umieszcza się w stojanie maszyny (najczęściej we wgłębieniach wyfrezowanych w żłobkach stojana). Niestety, w takim przypadku czujniki znajdują się pod wpływem pól magnetycznych przewodów wiodących prąd silnika, co może doprowadzić do powstania błędnych impulsów komutacyjnych. W takich rozwiązaniach ilość uszkodzeń mechanicznych jest znacznie mniejsza, ale zwiększa się niepewność pomiarów wykonanych przez czujniki reagujące nie tylko na wirujące pole magnesów trwa-

łych, ale również na zmiany pola spowodowane przez prądy płynące przez uzwojenie stojana.

Trzecią przyczyną błędnej komutacji są opóźnienia wprowadzane przez algorytm sterujący komutacją. Takie zjawiska widoczne są zwłaszcza w silnikach szybkobieżnych, a przyczyny ich powstawania wyjaśnione będą poniżej.

Uzwojenie twornika silnika BLDC skonstruowane jest w ten sposób, by siła elektromotoryczna rotacji indukowana w stojanie miała charakter trapezoidalny. Przykładowe przebiegi sił elektromotorycznych rotacji indukowanych w trzech fazach wirującego silnika BLDC przedstawiono na rys. 1. Jest to dość typowy przebieg spotykany w większości obecnie budowanych silników BLDC.



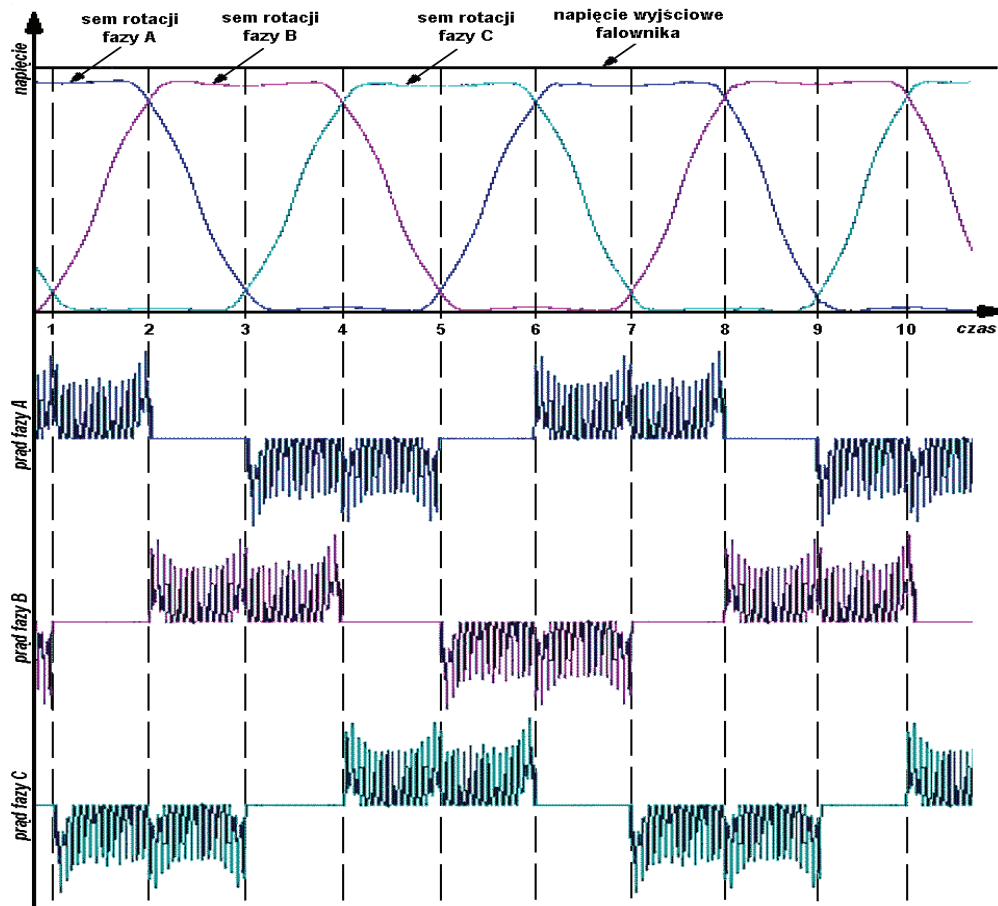
Rys. 1. Przebieg sił elektromotorycznych rotacji w trzech fazach silnika BLDC [1]

Cechą charakterystyczną badanego silnika jest duży zakres regulacji prędkości obrotowej (do 7000 obr/min). Przy maksymalnej prędkości wirnik silnika w ciągu jednej sekundy wykonuje 117 obrotów. Ponieważ silnik wyposażony jest w trzy pary biegunów, w ciągu sekundy pełny przebieg napięcia (trzysta sześćdziesiąt stopni elektrycznych) powtarza się 350 razy. W ciągu każdego okresu komutacja powtarza się co 60 stopni (elektrycznych), zatem w ciągu jednej sekundy może wystąpić 2100 zdarzeń komutacji, co daje jedną komutację co 476  $\mu$ s.

Podczas pracy silnika do cewek dołączone jest napięcie stałe przez komutator elektroniczny. Podczas komutacji tranzystory falownika przełączają napięcie w ten sposób, by wyższy potencjał był doprowadzony zawsze do tej cewki, której siła elektromotoryczna rotacji jest na górnej, prostoliniowej części swojego przebiegu (górnej podstawie trapezu), a niższy potencjał – do tej cewki, w której indukowana siła elektromotoryczna rotacji znajduje się w dolnej prostoliniowej części przebiegu (dolna podstawa trapezu). W ten

sposób napięcie zasilające cewki jest zawsze tylko nieco wyższe od napięcia indukowanego w silniku, a różnica tych napięć wymusza przepływ prądu przez uzwojenia silnika. Wyjaśniono to na rys. 2. Liczby 1, 2, 3 itd. na osi odciętych oznaczają punkty naturalnej komutacji. W tych chwilach tranzystory powinny przełączać napięcie między cewkami.

Teoretycznie w punktach naturalnej komutacji siła elektromotoryczna rotacji powinna jeszcze znajdować się na „podstawie” trapezu. Niestety, w rzeczywistych silnikach zmniejszenie wartości siły elektromotorycznej rotacji występuje nieco wcześniej, przed punktem naturalnej komutacji. Dlatego w pobliżu tych punktów różnica między napięciem zasilającym i siłą elektromotoryczną rotacji gwałtownie rośnie, co powoduje wzrost prądu fazowego. Ostatecznie cały przebieg prądów fazowych wygląda jak na rys. 2. Wyraźnie widoczne są udary prądów na końcach okresów przewodzenia. Wartość tych uderzeń zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości, powodując dodatkowe szумы, przez co praca silnika na wyższych prędkościach staje się głośnie.



Rys. 2. Przebieg sił elektromotorycznych rotacji i prądów płynących w cewkach silnika BLDC. Liczby 1, 2, 3... 10 na osi czasu oznaczają punkty naturalnej komutacji maszyny [1]

Warto również zwrócić uwagę na konieczność precyzyjnego ustalenia momentu wystąpienia komutacji tranzystorów falownika. Każde przesunięcie punktu rzeczywistej komutacji w prawo lub w lewo względem punktu naturalnej komutacji powoduje powiększenie się różnicy między napięciem zasilającym i siłą elektromotoryczną rotacji oraz związany z tym dalszy wzrost udaru prądu. Dlatego czujniki położenia wału powinny być elementami bardzo precyzyjnymi i szybkimi.

### 3. DEBOUNCING

Zastosowanie silników BLDC spowodowało konieczność rozwiązania nowych problemów. Jednym z nich jest niepewna praca czujników położenia wału, wyznaczających chwile komutacji prądu twornika. Najczęściej elementami przełączającymi czujników są hallotrony umieszczone w żłobkach stojana. W chwilach przełączania, a także pod wpływem silnych zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych obwody czujników mogą wysłać pojedynczy bądź

wielokrotny fałszywy impuls sterujący. Aby napęd mógł pracować poprawnie, konstruktor musi zastosować procedury debouncingu, które ograniczą niepewność wyznaczania położenia wirnika i zminimalizują wpływ opóźnień związanych z debouncingiem na pracę maszyny.

Typowa procedura debouncingu [2] powinna umożliwić identyfikację punktu naturalnej komutacji (po wystąpieniu zmiany stanu sygnałów wyjściowych hallotronowych czujników położenia), a następnie zrealizować krótką zwłokę czasową, w czasie której kontrolowana jest stabilność sygnałów wyjściowych czujników położenia wału. Jeśli podczas całego okresu zwłoki stan sygnałów wyjściowych czujników nie zmieni się, procesor potwierdza wykrycie stabilnej zmiany stanu czujników i przeprowadza komutację prądów twornika maszyny.

Przykładowy algorytm kontroli stanu sygnałów wyjściowych czujników położenia wirnika może być zrealizowany w następujący sposób. Stan sygnałów jest sprawdzany co ustalony odstęp czasu (np. co 30  $\mu$ s). Jeśli ten stan nie zmienia się, procesor nie podejmuje żadnych dodatkowych czynności. Jeśli zauważona zostanie zmiana stanu sygnałów czujników położenia,

wówczas przez określony odstęp czasu kontrolowana jest stabilność nowego stanu (np. dziesięć razy co 30  $\mu$ s). Jeśli w tym czasie stan czujników nie ulegnie zmianie, przyjmuje się, że procedura debouncingu została zakończona, a odczytany nowy stan sygnałów wyjściowych czujników hallotronowych wyznacza nowe położenie wirnika i procesor może przeprowadzić komutację. W rozważanym przypadku wypadkowy czas trwania zwłoki wprowadzanej przez procedurę debouncingu wynosi ok. 300  $\mu$ s. W typowym silniku powinno to wystarczyć na wyeliminowanie błędnych odczytów położenia oraz zlikwidowanie wpływu przypadkowych, szpilkowych zakłóceń na sygnały wyjściowe czujnika. Takie przedziały czasu zastosowano początkowo w badanym napędzie.

Przy braku zakłóceń czas trwania procedury debouncingu jest stały. Jeśli w sekwencji dziesięciu kolejnych odczytów stanów czujników pojawia się odczyt błędny, odliczaną sekwencję kolejnych takich samych odczytów stanu należy zaczynać od nowa.

Czas trwania niezakłóconej procedury debouncingu jest stały i niezależny od prędkości obrotowej silnika. Oznacza to, że silnik wirujący z dużą prędkością w trakcie procedury debouncingu wykona obrót o większy kąt niż silnik wirujący z małą prędkością. Na przykład w rozpatrywanym silniku przy prędkości 700 obr/min w czasie 300  $\mu$ s silnik wykona obrót o ok. 3,8 stopni elektrycznych, natomiast przy prędkości maksymalnej 7000 obr/min w tym samym czasie wirnik wykona obrót o ok. 38 stopni elektrycznych. Każda dodatkowa zwłoka między punktem naturalnej komutacji i punktem rzeczywistej komutacji przesunęła okres przewodzenia tranzystorów w tę część przebiegu siły elektromotorycznej rotacji (bok „trapezu”), w której prąd płynący przez uzwojenia gwałtownie rośnie. Przy małych prędkościach, przy których dodatkowa zwłoka wynikająca

z czasu trwania procedury debouncingu jest relatywnie niewielka, wpływ debouncingu na pracę maszyny będzie mały, ale przy dużych prędkościach – znaczny.

Na rys. 3-6. pokazano oscylogramy przykładowych przebiegów prądu fazowego maszyny biegnącej jałowo, zarejestrowane dla małej i dużej prędkości i dla dwóch różnych okresów debouncingu (celowo większych niż zaprojektowane w układzie). W opisie rysunków przyjęto następujące oznaczenia:

$U$  – napięcie (stałe) w torze pośredniczącym falownika,

$I$  – prąd stały obwodu pośredniczącego,

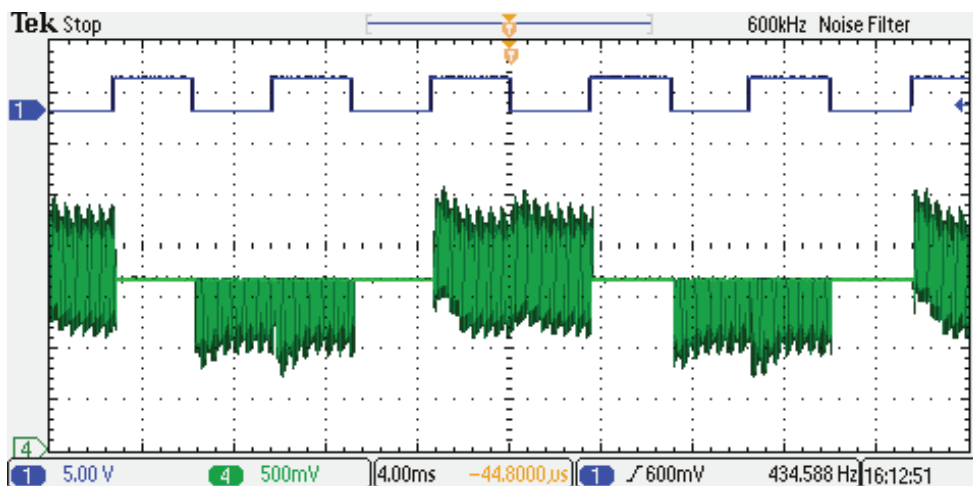
$n$  – prędkość wirowania wirnika,

$I_f$  – prąd fazowy uzwojenia (wartość skuteczna true rms),

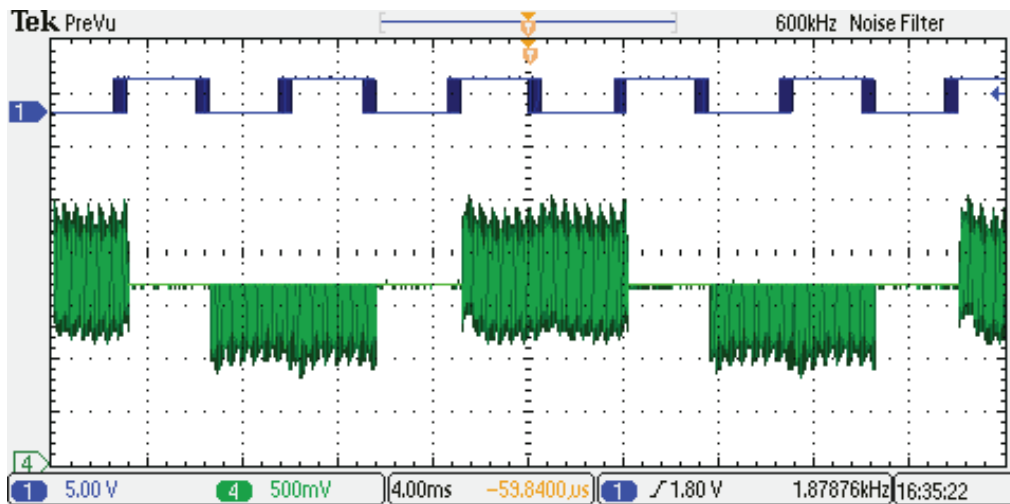
$T_d$  – okres debouncingu.

Na wszystkich rysunkach przebieg prostokątny w górnej ich części objaśnia stan komutacji. Procedura debouncingu odbywa się podczas linii pionowych. Grubość pionowej kreski oznacza czas trwania okresu debouncingu. Początek linii pionowej wyznacza punkt naturalnej komutacji, a jej koniec – moment rzeczywistej komutacji tranzystorów. W czasie, gdy linia ma przebieg poziomy, stan tranzystorów falownika nie zmienia się.

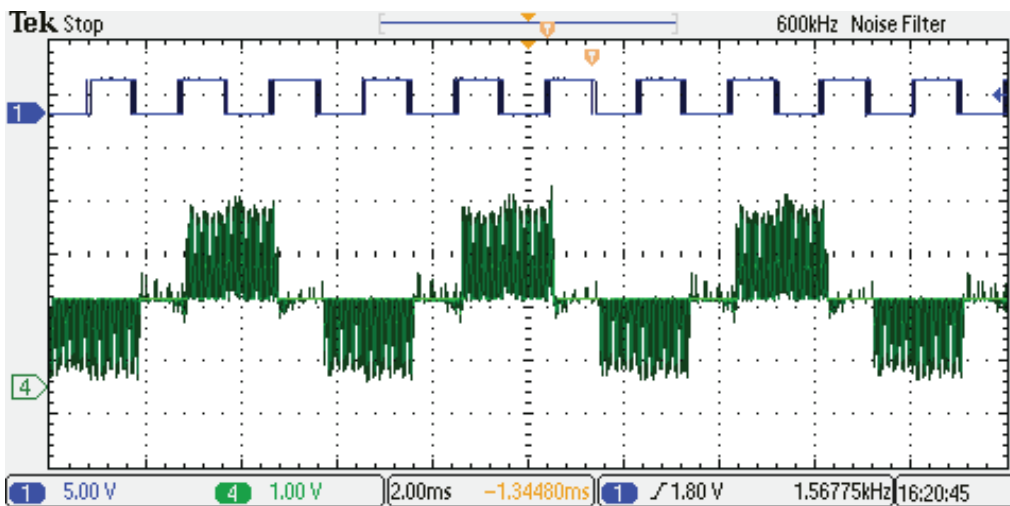
Przebieg pokazany w środkowej części rysunku to prąd fazowy uzwojenia. Przy krótkim okresie debouncingu przebieg prądu jest poprawny zarówno dla małych, jak i dla dużych prędkości wirowania. Przy dłuższych okresach debouncingu i przy dużych prędkościach (rys. 6) przebieg prądu fazowego ulega silnej deformacji. Pojawiają się skoki prądu niezwiązane z rzeczywistą pracą napędu. Następnym tego zjawiska jest hałaśliwa praca maszyny i gwałtowny wzrost wartości skutecznej prądu maszyny (silne nagrzewanie uzwojeń).



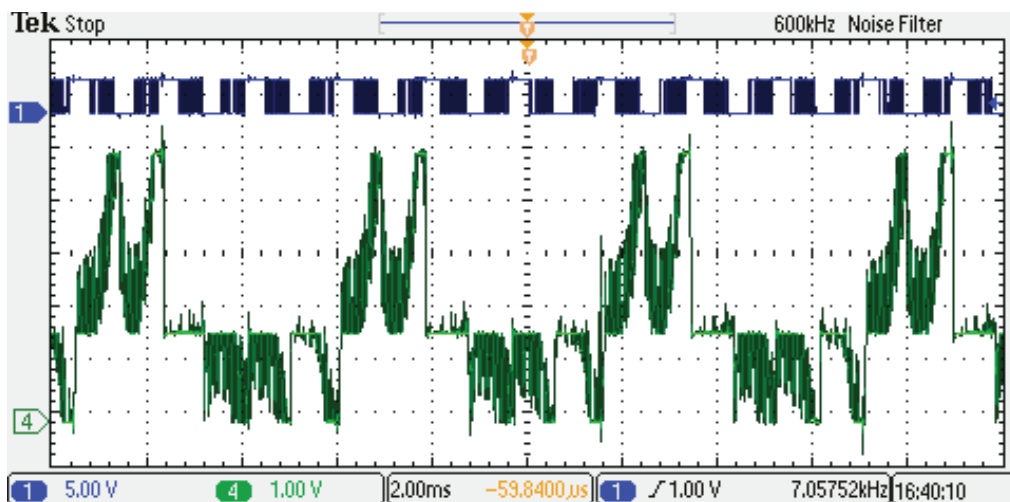
Rys. 3. Prąd fazowy silnika BLDC przy małej prędkości i przy krótkim okresie debouncingu:  
 $U = 100$  V;  $I = 1,9$  A;  $n = 960$  obr/min;  $I_f = 6,98$  A;  $T_d = 120$   $\mu$ s [2]



Rys. 4. Prąd fazowy silnika BLDC przy małej prędkości i przy długim okresie debouncingu:  
 $U = 100 \text{ V}$ ;  $I = 1,8 \text{ A}$ ;  $n = 951 \text{ obr/min}$ ;  $I_f = 6,50 \text{ A}$ ;  $T_d = 520 \mu\text{s}$  [2]



Rys. 5. Prąd fazowy silnika BLDC przy dużej prędkości i przy krótkim okresie debouncingu:  
 $U = 100 \text{ V}$ ;  $I = 7,3 \text{ A}$ ;  $n = 3460 \text{ obr/min}$ ;  $I_f = 10,93 \text{ A rms}$ ;  $T_d = 120 \mu\text{s}$  [2]



Rys. 6. Prąd fazowy silnika BLDC przy dużej prędkości i przy długim okresie debouncingu:  
 $U = 100 \text{ V}$ ;  $I = 11,2 \text{ A}$ ;  $n = 3607 \text{ obr/min}$ ;  $I_f = 28,9 \text{ A rms}$ ;  $T_d = 520 \mu\text{s}$  [2]



#### 4. ZMODYFIKOWANY ALGORYTM DEBOUNCINGU

Przebiegi prądu przedstawione na rys. 3-6. wyraźnie pokazują, że okres debouncingu zastosowany w maszynach szybkoobrotowych powinien być jak najkrótszy. Dlatego do dalszych badań przyjęto, że zarówno odstęp czasu między kolejnymi odczytami stanu czujników hallotronowych, jak i wymagana liczba kolejnych takich samych odczytów zostanie zmniejszona o połowę, czyli przyjęto, że okres debouncingu będzie składał się z 5 kolejnych próbkowań odczytywanych co 15  $\mu$ s, zatem będzie wynosił 75  $\mu$ s. Uznano, że takie wartości będą gwarantowały poprawną pracę zespołu falownika i silnika.

Niestety, podczas prób napędu przeprowadzanych przy pełnym obciążeniu okazało się, że przy przełączaniu prądu o natężeniu przekraczającym 120 A silne (własne) zakłócenia elektromagnetyczne wytworzone przez komutujące zwoje stają się przyczyną błędnych odczytów położenia wału przez czujniki hallotronowe umieszczone w tych samych żłobkach co uzwojenie. Błędny odczyt zakłóca odliczaną sekwencję pięciu kolejnych takich samych odczytów stanu, którą (zgodnie z klasycznym algorytmem) należy zaczynać liczyć od nowa. Przy bardzo silnych zakłóceniach również ta druga sekwencja może nie zakończyć się sukcesem, trzeba zaczynać trzecią itd. Okazało się, że w szybkoobrotowych silnikach dużej mocy błędne sekwencje potrafią opóźnić moment komutacji o kilkadziesiąt stopni elektrycznych. Powoduje to gwałtowny wzrost prądu, głośną pracę silnika i najczęściej prowadzi do awaryjnego wyłączenia napędu przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe.

Aby zapobiec temu zjawisku, zmodyfikowano zastosowany w układzie algorytm debouncingu. Podobnie jak w przypadku klasycznego debouncingu, w strukturze algorytmu wydzielono licznik udanych próbkowań, czyli strukturę zliczającą powtarzające się stany wyjść czujników hallotronowych. Po pięciokrotnym odczycie tej samej wartości, uznaje się, że odczytany stan jest stanem poprawnym (a nie jest wynikiem przypadkowych zakłóceń), co kończy „zatwierdzenie” wyniku pomiaru i zezwala na przeprowadzenie komutacji tranzystorów falownika.

W omawianym algorytmie wprowadzono jeszcze jedną strukturę licznika, którą nazwano licznikiem „niespodziewanych” próbkowań. Ten licznik zlicza stany wyjść czujników, które nie powinny pojawić się podczas pracy napędu, ale tylko takie, które powtarzają się podczas kolejnych odczytów stanów czujników. Jeśli licznik zliczy pewną (u nas zaprogramowaną na dzień się) liczbę takich samych stanów „niespodziewanych”, ten stan zostaje uznany za stan poprawny. Wprowadze-

nie tego licznika zapobiega możliwości wystąpienia przypadkowego „zapętlenia się” algorytmu.

Opisując działanie algorytmu, wyróżniono cztery rodzaje stanu falownika:

- stan „obecny”, czyli stan określony na podstawie ostatnio odczytanego stanu czujników hallotronowych,
- stan „zatwierdzony”, którym staje się stan „obecny” po pięciu takich samych odczytach czujników hallotronowych,
- stan „następny”, czyli stan spodziewany po następnej komutacji tranzystorów (określany na podstawie znajomości stanu „zatwierdzonego” i wybranego przez użytkownika kierunku wirowania),
- stan „niespodziewany”, czyli stan obecny (odczytany z czujników położenia wału), który nie jest ani stanem „zatwierdzonym” ani stanem „następnym”.

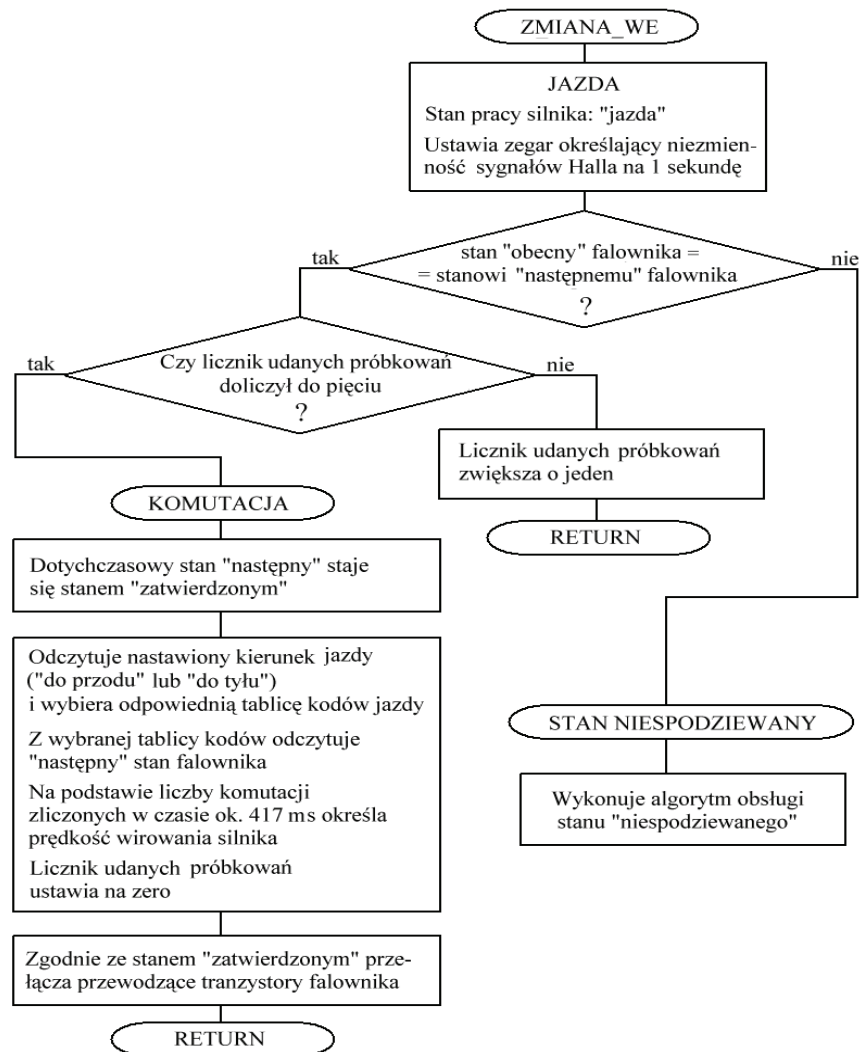
Uznano, że podstawową wadą klasycznego algorytmu debouncingu jest konieczność powtarzania kompletnej sekwencji identycznych pomiarów położenia do momentu, w którym odczytany stan zostanie ostatecznie uznany za poprawny. W zmodyfikowanym algorytmie przyjęto następujące zasady:

1. Odczytany stan czujników zostanie uznany za poprawny, jeśli ten sam odczyt powtórzy się co najmniej 5 razy.
2. Jeśli w trakcie zliczania sekwencji identycznych pomiarów położenia wału wystąpi stan „niespodziewany”, nie spowoduje on (jak w algorytmie klasycznym) wyzerowania licznika udanych próbkowań, a jedynie zmniejszy zawartość tego licznika o jeden. W ten sposób wprowadzona zostaje konieczność wykonania nie pięciu, ale sześciu powtarzających się próbkowań czujników.
3. Ponieważ zerowanie licznika udanych próbkowań zastąpiono dekrementacją, zmniejszyła się rzetelność określania położenia wału. Aby nie dopuścić do błędnego określenia położenia, przyjęto, że jedynymi stanami, które mogą być uznane za poprawne, są: stan „zatwierdzony” i stan „następny”. Wszystkie pozostałe odczytane stany są uznawane za wynikające z zakłóceń (stan „niespodziewany”) i odrzucane.
4. Reguła (3) ma jeden wyjątek. Jeżeli stan „niespodziewany” powtórzy się dziesięć razy, uznaje się błąd algorytmu (zapętlenie się na stanie, który w rzeczywistości nie ma miejsca) i kontynuację pracy od tego punktu.

Algorytm działania został uzupełniony o cztery tablice. W pierwszej każdemu odczytanemu stanowi wyjść czujników hallotronowych przypisany został odpowiedni stan tranzystorów falownika przy jeździe „do przodu”, w drugiej – to samo przy jeździe „do tyłu”. Trzecia tablica określa stany

„następne” na podstawie stanów obecnych przy jeździe „do przodu”, a czwarta – to samo przy jeździe „do tyłu”.

Szczegóły głównej części algorytmu zmodyfikowanego debouncingu pokazano na rys. 7. Dokładny opis pełnego algorytmu można znaleźć w [3].



Rys. 7. Zmodyfikowany algorytm obsługi stanu „jazda” [3]

## 5. WNIOSKI

Przedstawiony algorytm debouncingu zastosowano w napędzie pojazdu z opisanym w artykule silnikiem BLDC. Silnik wyposażono w czujnik położenia umieszczony w żłobkach stojana (czujniki hallotronowe A3280EUA). W początkowej wersji zastosowano klasyczny algorytm debouncingu. Niestety, już przy prądach przekraczających 120 A sygnały otrzymywane z czujników hallotronowych były tak zakłócone, że stan „zatwierdzony” położenia wirnika otrzymywano z opóźnieniem sięgającym aż 30 stopni elektrycznych. Powodowało to widoczne uderzenia prądu, głośną pracę maszyny i (przy jeszcze większych prądach) wyłączenie napędu przez zabezpieczenia nadprądowe.

Radykalną poprawę pracy przyniosło dopiero zastosowanie opisanego wyżej algorytmu debouncingu.

Napęd stał się w pełni sterowalny – nawet przy prądach przekraczających 120% obciążenia znamionowego (ok. 200 A) nie zauważono żadnych problemów z komutacją silnika.

### Literatura

- Fręchowicz A.: *Dobór diod zabezpieczających w falownikach silników BLDC z elektronicznym bocznikowaniem części uzwojenia*, Referat na XXI Seminarium Naukowo-Techniczne BOBRME Komel „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”, Ryto, 23-25 maja 2012 r.
- Sensored Control of 3-Phase Brushless DC Motor, BLDC3-1 System Documentation*, Digital Control Systems (DCS) Group, SPRU445 September 2000.
- Fręchowicz A., Heyduk A.: *Debouncing w warunkach środowiska silnie zakłóconego magnetycznie*, Referat na 39. Konferencję „Automatyka, Telekomunikacja, Informatyka – ATI 2013”, Zakopane, 30 września – 2 października 2013.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.