

Aleksander Fręchowicz, Adam Heyduk
Politechnika Śląska, Gliwice

POMIARY PRĄDU I PRĘDKOŚCI W UKŁADACH STEROWANIA WOLNOOBROTOWYCH SILNIKÓW BLDC

SPEED AND CURRENT MEASUREMENTS IN CONTROL SYSTEMS FOR LOW-SPEED BLDC MOTORS

Abstract: BLDC motors become more and more popular for direct drive systems without clutches and mechanical gearboxes. For small devices like mobile robots and wheelchairs they need to be low-speed motors. They need a proper control system, providing fast and accurate response to commands and disturbances. Usually they are equipped with cascade control systems with outer speed feedback control loop and inner current feedback control loop. These loops need fast and precise measurements of two input signals – speed and current values. The paper presents some practical experiences from design and laboratory tests of a low speed wheelchair drive. For low-speed motors period measurements fed directly from digital Hall sensors are much better than frequency measurements because they give much faster response. But they are very sensitive to the accuracy of Hall sensor displacement. The fastest reactions to speed changes can be achieved using a back EMF measurements with maximum value phase selection. The key to successful measurements is an application of low-pass analogue filters on the voltage inputs. Current measurements are heavily disturbed by strong pulse disturbances in transistor switching time instants. Much better accuracy can be achieved when the measurements are done in the middle of the PWM pulse. It can be achieved using a symmetrical modulation technique instead of the asymmetrical one. Additional hardware interrupt allows for precise readout synchronization.

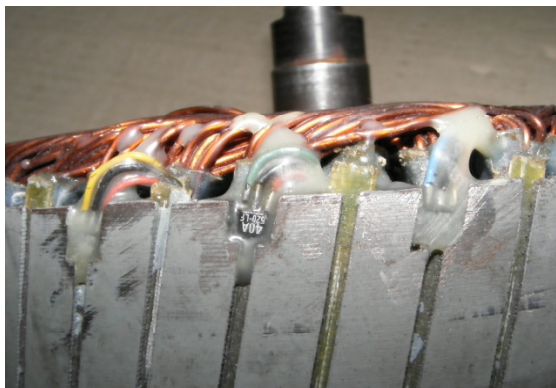
1. Wstęp

Ważnym problemem, skupiającym w ostatnich latach uwagę konstruktorów jest rozwój pojazdów mechanicznych napędzanych przez silniki elektryczne. Szczególne zainteresowanie wzbudzają silniki, które mogą napędzać koła bezpośrednio, bez użycia sprzęgieł i przekładni mechanicznych. W takich zastosowaniach szczególnie dobrze sprawdzają się bezkomutatorowe silniki z magnesami trwałymi. W tych silnikach wirujące magnesy umieszczone są w piaście koła wirującego wokół nieruchomego twornika. Rolę komutatora przejmuje odpowiedni układ elektroniczny. W napędach mniejszych i wolniejszych pojazdów, takich jak mobilne roboty kołowe lub wózki inwalidzkie, często muszą to być silniki wolnoobrotowe.

W obecnych rozwiązaniach konstrukcyjnych bezkomutatorowe silniki z magnesami trwałymi stosuje się w tych napędach, w których wymagana jest dokładna regulacja prędkości obrotowej lub przy wysokich wymaganiach stawianych dynamice pojazdu. W takich zastosowaniach opisywane liniowymi równaniami silniki z magnesami trwałymi dają lepsze efekty niż popularne napędy z silnikami indukcyjnymi, zasilanymi z falowników. Bezszerokowe

silniki z magnesami trwałymi dzielimy na bezszczotkowe silniki prądu stałego, w skrócie BLDC (*brushless DC motors*) i silniki synchroniczne z magnesami trwałymi, w skrócie PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motors*). Oba typy silników wyposażone są w magnesy trwałe w wirniku i trójfazowe uzwojenie twornika w stojanie. Silniki PMSM muszą być wyposażone w precyzyjny czujnik położenia wału, co mocno komplikuje konstrukcję, a w silnikach BLDC (a dokładniej: w żłobkach twornika) instaluje się jedynie trzy czujniki Halla (rys. 1), reagujące na pole wirujących magnesów. Niniejszy artykuł opisuje problemy występujące przy pomiarach sygnałów sterujących w silnikach BLDC.

Dokładne układy napędowe wymagają stosowania odpowiednich układów regulacji. Podobnie jak w klasycznych silnikach prądu stałego, najczęściej stosuje się kaskadowe układy regulacji, składające się z nadrzędnej pętli regulacji prędkości i podrzędnej pętli regulacji prądu. Oba regulatory są zrealizowane cyfrowo, w oprogramowaniu sterownika. Struktura układu regulacji zależy od wielu czynników, między innymi od przyjętego sposobu przełączania tranzystorów falownika.



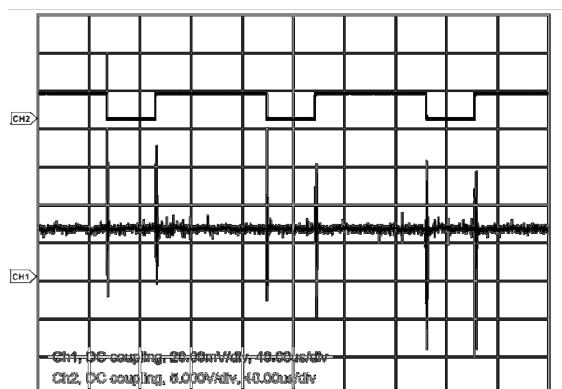
Rys. 1. Przykład rozmieszczenia czujników hallotronowych w żłobkach twornika silnika BLDC

Przy tworzeniu oprogramowania sterującego układem napędowym zwraca się szczególną uwagę na jego niezawodność, wyrażającą się niezależnością działania poszczególnych procedur (przy ich jednoczesnej synchronizacji), dążąc równocześnie do maksymalnego uproszczenia struktury programu głównego. Możliwie duża ilość zadań jest przenoszona bezpośrednio na podzespoły sprzętowe mikrosterownika i jest wykonywana niezależnie od toku oprogramowania. Stąd też dla minimalizacji strat czasu związanych z rozpoczynaniem i oczekiwaniem na zakończenie pomiaru analogowego przyjęto zasadę ciągłego cyklicznego pomiaru wszystkich wielkości analogowych (każda wartość mierzona jest odświeżana co okres ok. 10 μ s), a jednocześnie chwile odczytu pomierzonych wartości są synchronizowane z momentami próbkowania regulatorów lub z działaniem liczników sterujących modulacją szerokości impulsów. Rozwiązanie takie w sposób istotny upraszcza konstrukcję programu i pozwala wyeliminować wielokrotne oczekiwanie na zakończenie procesu przetwarzania AC.

2. Pomiary wartości prądu w obwodzie stałoprądowym

Pomiary wartości prądu mają bardzo duże znaczenie dla poprawnej pracy całego układu napędowego, gdyż uzyskiwane z nich wartości są sygnałami wejściowymi dla podrzędnej pętli regulacji prądu. W układzie badawczym pętla pracuje z okresem próbkowania równym 800 μ s, aby szybko odwzorowywać przebieg prądu wyznaczony w nadrzędnej pętli regulacji prędkości. W zarejestrowanym przebiegu prądu (rys. 2), wyraźnie widoczne są zakłócenia związane z przebiegiem modulacji szerokości impulsów i komutacją tranzystorów falownika.

Stąd też niezbędne jest zastosowanie w układzie wejściowym aktywnych, dolnoprzepustowych filtrów RC.

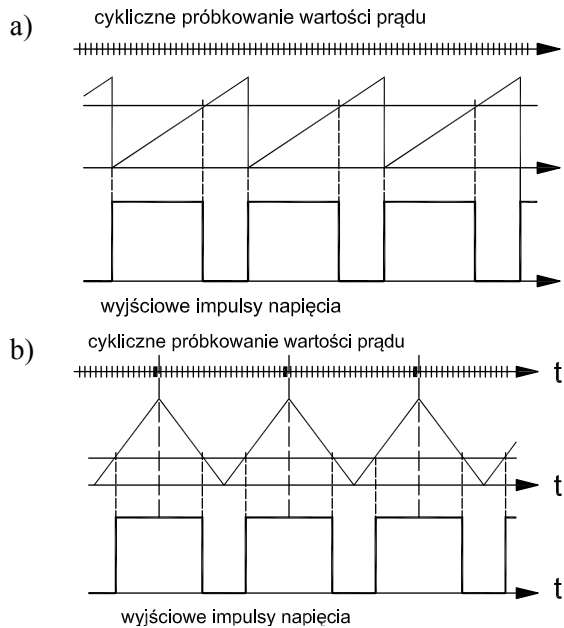


Rys. 2. Impulsy zakłócające przebieg pomiaru prądu pojawiające się w momencie przełączania tranzystorów

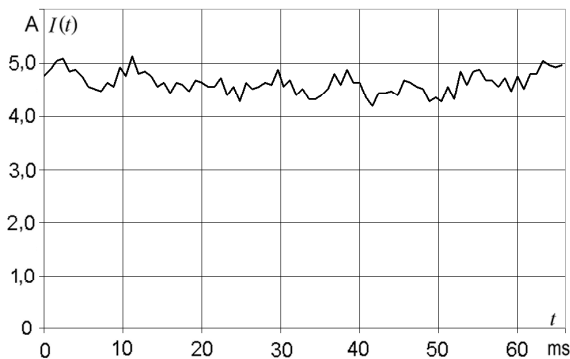
Zastosowanie filtrów dolnoprzepustowych o niskiej częstotliwości granicznej dobrze tłumie te zakłócenia, jednak powoduje pogorszenie dynamiki pracy całego układu regulacji. Stąd zastosowano filtry o wyższej częstotliwości granicznej i równocześnie poszukiwano efektywnych metod eliminacji zakłóceń (charakteryzujących się słabszymi skutkami ubocznymi). Jedną z takich metod jest synchronizacja chwil próbkowania z przebiegiem modulacji szerokości impulsów. Pozwala ona zapewnić dobrą powtarzalność wyników przy utrzymującej się stałej wartości średniej prądu. Realizacja tej metody możliwa jest przy wykorzystaniu symetrycznej (zamiast asymetrycznej – rys. 3a) modulacji szerokości impulsów i wykorzystaniu dodatkowego przerwania, generowanego w chwili przepełnienia licznika sterującego przebiegiem fali PWM (rys. 3b). W procedurze obsługi przerwania odczytywana jest aktualna wartość prądu. Wyniki cyklicznych pomiarów wartości prądu przy takim próbkowaniu pokazano na rys. 4. Charakterystyczny jest brak impulsów zakłócających przebieg prądu, widocznych na rys. 2.

Dodatkowym problemem jest wyznaczenie znaku prądu, niezbędne przy realizacji procesu hamowania. Ponieważ przetwornik analogowo-cyfrowy mikrosterownika może mierzyć jedynie wartości dodatnie, możliwe są tutaj dwa rozwiązania:

- (a) zastosowanie dwupołkowego prostownika aktywnego z odpowiednim filtrem wygładzającym i dodatkowego komparatora określającego znak prądu (rys. 5a)



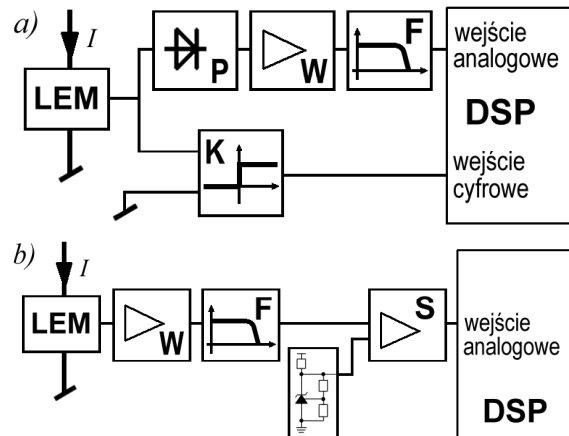
Rys. 3. Wpływ rodzaju modulación szerokości impulsów napięcia na wybór momentu próbkowania prądu (okres próbkowania regulatora prądu dużo większy od okresu PWM): a) modulación asymetryczna (brak możliwości synchronizacji pomiarów), b) modulación symetryczna - łatwa synchronizacja momentu próbkowania z środkiem impulsu



Rys. 4. Wyniki cyklicznych pomiarów wartości prądu przy próbkowaniu zsynchronizowanym z symetryczną modulación szerokości impulsów

(b) przesunięcie sygnału napięciowego (proporcjonalnego do wartości prądu) o stałą wartość odpowiadającą połowie zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego (rys. 5b)

Rozwiązanie (a) wymaga wykorzystania dodatkowego wejścia cyfrowego oraz może stwarzać problemy z właściwym ustawieniem progu przełączania komparatora w okolicach zera (choć zaletą jest zwiększenie rozdzielczości pomiaru), stąd też jako bardziej niezawodne przyjęto rozwiązanie (b).



Rys. 5. Schematy blokowe układów pomiaru prądu: a) odrębny pomiar modulu i znaku, b) układ z przesunięciem wartości zerowej, oznaczenia: LEM – czujnik prądu, P - prostownik, W – wzmacniacz, F – filtr dolnoprzepustowy, K - komparator, S – sumator, DSP – procesor sygnałowy

3. Pomiary prędkości obrotowej

3.1. Pomiar prędkości obrotowej z wykorzystaniem dyskretnych sygnałów z czujników hallotronowych

W typowych napędach szybkoobrotowych wyposażonych w silniki BLDC stosuje się najczęściej pośredni pomiar prędkości, wykorzystujący częstotliwość sygnału otrzymanego z jednego z czujników hallotronowych. Częstotliwość zmian sygnału wyjściowego tego czujnika jest proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika. W silnikach wolnoobrotowych taki pomiar trwa zbyt długo. Przykład: na obwodzie wirnika wolnoobrotowego silnika rozmieszczono magnesy trwałe (8 par biegunów). W stanie co 120 stopni elektrycznych zainstalowano trzy czujniki Halla. Zakładając, że przy normalnej pracy obciążony silnik wiruje z prędkością od 10 do 100 obr/min (1,047 do 10,47 s⁻¹), stan wyjść wszystkich trzech czujników zmienia się 48 razy na jeden obrót silnika. Wynika stąd, że nawet biorąc pod uwagę stan wszystkich trzech czujników otrzymuje się sygnał częstotliwości od 8 Hz do 80 Hz. Oznacza to, że pojedynczy pomiar prędkości wykonywany z dokładnością 1% nawet dla największych prędkości musiałby trwać więcej niż jedną sekundę. Jest to za dużo, aby można było zbudować szybko reagujący układ sterowania i dlatego postanowiono zastosować inną metodę pomiaru prędkości obrotowej. W oparciu o dostępne w układzie badaw-

czym sygnały rozpatrywano dwie grupy metod pośredniego pomiaru prędkości obrotowej:

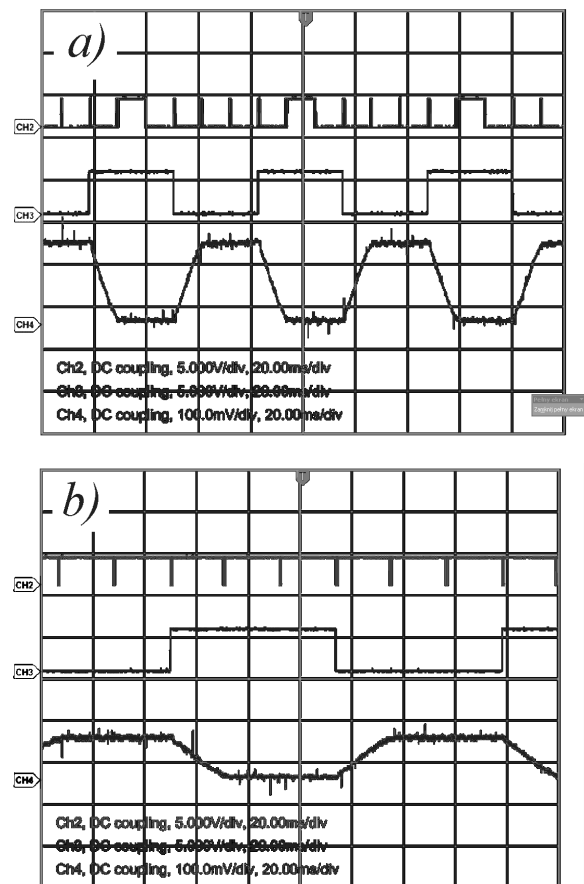
- przez pomiar okresu w sygnałach otrzymywanych z czujników Halla .
- przez pomiar siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach silnika.

Jako najprostsze rozwiązanie zapewniające wymaganą dynamikę pomiaru, określano prędkość obrotową na podstawie pomiaru okresu między kolejnymi dwoma zmianami stanów występujących na wyjściach czujników Halla wykorzystywanych przez komutator elektroniczny. W zależności od ustawionej prędkości, podczas normalnej jazdy mierzone są okresy od 12,5 ms do 125 ms.

Na podstawie zmierzonych okresów mikrosterownik oblicza prędkość wirowania silnika. Ponieważ prędkość obrotowa silnika jest odwrotnie proporcjonalna do zmierzonej wartości okresu, więc typowa procedura przetwarzająca okres na prędkość wymaga zastosowania dzielenia przez zmienną, a taka operacja wykorzystuje dużą ilość czasu maszynowego procesora. Aby obliczenia prędkości mogły być wykonane jak najszybciej, w pamięci mikrosterownika umieszczono tablicę funkcji $y=1/x$. Znając wartość okresu, wynik (wartość proporcjonalna do prędkości) jest odczytywany bezpośrednio z tablicy i na tej podstawie wyliczana jest aktualna prędkość wirowania silnika.

Zastosowanie tej metody dało dobre wyniki (patrz krzywe na rysunkach 9 b, c). Niestety, okazało się, że na skutek mało precyzyjnego naklejenia hallotronów na tworniku maszyny występują różnice w odczytanych okresach sięgające nawet $\pm 14\%$. Tak duża rozbieżność powodowała znaczne wahania prędkości w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. Szczególnie przy dużej prędkości objawiało się to głośną pracą napędu. W tej sytuacji przejście do pracy z pomiarem okresu obliczanym na podstawie sygnału wyjściowego tylko jednego hallotronu – od razu poprawiało jakość regulacji. Niestety, taki układ nie pracował poprawnie przy małych prędkościach bowiem pomiary prędkości były zbyt rzadkie i przy pracy w zamkniętej pętli prędkości praca silnika stawała się nierówna. Na podstawie przeprowadzonych prób postanowiono, że napęd będzie pracował wykorzystując sygnały z wszystkich hallotronów przy prędkościach od małych do średnich (rys. 6b), po czym zostanie przełączony do pracy przy pomiarze okresu z jednego tylko hallotronu

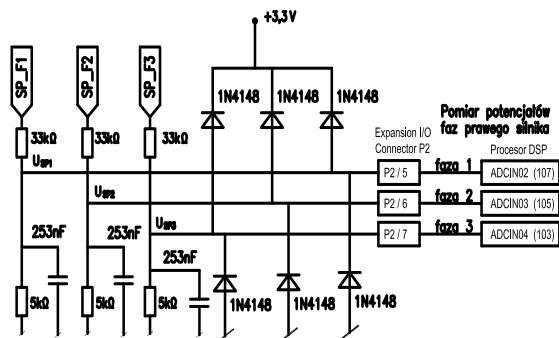
(rys. 6a). Układ sterowania z tak zaprojektowanym algorytmem pomiarowym pracował poprawnie.



Rys. 6. Sygnały mierzone podczas pomiaru okresu (od dołu): sem indukowana w jednym paśmie uzwojenia, sygnał cyfrowy z jednego hallotronu, czas pomiaru okresu (pomiar odbywa się, gdy ten sygnał przyjmuje wartość wysoką)
 a) przy dużej prędkości obrotowej (pomiar okresu z jednego hallotronu),
 b) przy małej prędkości obrotowej (pomiar okresu z wszystkich hallotronów).

3.2. Pomiary prędkości obrotowej z wykorzystaniem wartości siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach silnika

Pomiar siły elektromotorycznej wykorzystywany jest bardzo często w mniej odpowiedzialnych układach regulacji prędkości obrotowej maszyn prądu stałego. Pozwala on praktycznie na bieżąco śledzić prędkość obrotową maszyny (współczesne przetworniki analogowo – cyfrowe pozwalają na pomiar sygnału analogowego przy czasie przetwarzania mniejszym niż 1 μ s). Na stanowisku badawczym pomiar wykonywano w układzie pokazanym na rys. 7.

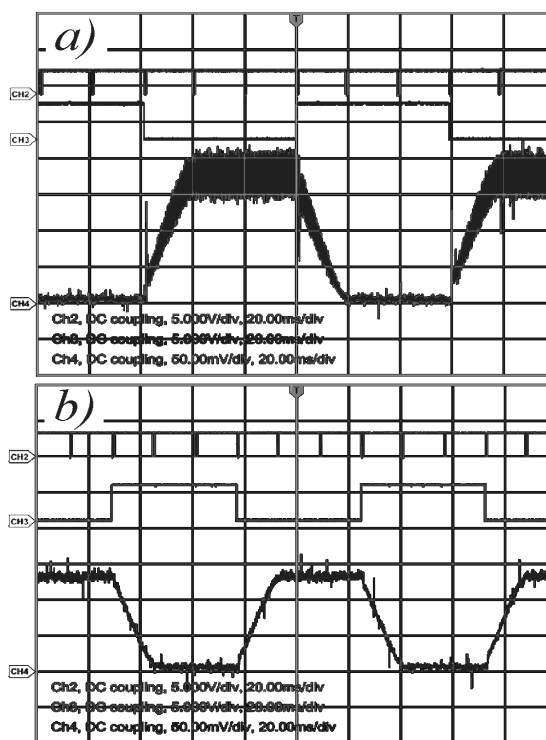


Rys. 7. Schemat ideowy układu do pomiaru siły elektromotorycznej na zaciskach silnika BLDC

Punkty oznaczone na schemacie jako SP_F1,2,3 dołączono do zacisków wirującego silnika. Otrzymane napięcia wprowadzono na dzielniki oporowe i oczyszczono z zakłóceń na filtrze RC o stałej czasowej 165 μ s. Wartość tej stałej czasowej została dobrana z uwagi na częstotliwość próbkowania wielokanałowego przetwornika analogowo cyfrowego (czas cyklu ok. 10 μ s). Diody pokazane w układzie zabezpieczają wejścia przetwornika analogowo cyfrowego przed napięciami wykraczającymi poza zakres pomiarowy przetwornika (0 do 3,3V). Na rys. 8 przedstawiono przykład zarejestrowanego przebiegu siły elektromotorycznej w jednej z faz silnika. Wyraźnie widoczny jest bardzo duży poziom zakłóceń nałożonych na przebieg trapezoidalny. Stwarza to duże trudności przy obróbce sygnałów w układzie trójfazowym. W silniku o przebiegu SEM pokazanym na rys. 8a odczytywano trzy wartości napięcia, po jednej dla każdej fazy silnika. Pomiar powtarzano co 50 ms dla prędkości bardzo małej, średniej i stosunkowo dużej. Następnie próbowano obliczać prędkość silnika na podstawie trzech algorytmów:

- jako wartość tego napięcia fazowego, które w danej chwili przyjmuje wartość maksymalną,
- jako wartość średnią z dwóch napięć fazowych (zawsze jedno napięcie ma wartość równą lub zbliżoną do zera i tę wartość pomijano),
- jako średnią geometryczną z trzech napięć fazowych.

Dla łatwiejszej orientacji te same wartości połączono liniami. Otrzymane wyniki porównano z wartością prędkości obrotowej uzyskaną z pomiaru okresu sygnałów otrzymanych z czujników Halla (opisaną w p. 3.1). Wyniki pomiarów pokazano na rys. 9.

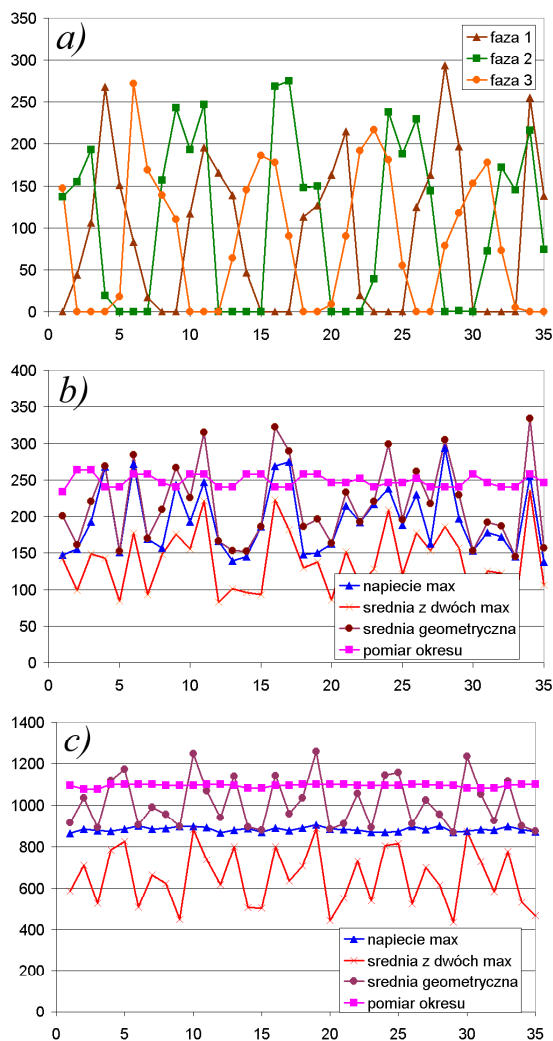


Rys. 8. Siła elektromotoryczna rotacji zmierzona w jednej z faz silnika: a) z filtrem dolnoprzepustowym o stałej czasowej 165 μ s, b) z filtrem dolnoprzepustowym o stałej czasowej 1.65 ms

Jak widać na rys. 9 wyniki pomiarów charakteryzują się dużym rozrzutem błędów pomiarowych, który jest spowodowany silnym odkształceniem. Rozważano jeszcze możliwość obliczania pierwszej harmonicznej z przebiegu indukowanych SEM, ale takie przetwarzanie zajęłoby bardzo dużo czasu procesora i dlatego takie badania nie zostały podjęte. Znaczną poprawę uzyskano po zastosowaniu silnie tłumiących filtrów RC. Uzyskane w ten sposób przebiegi przedstawiono na rys. 10.

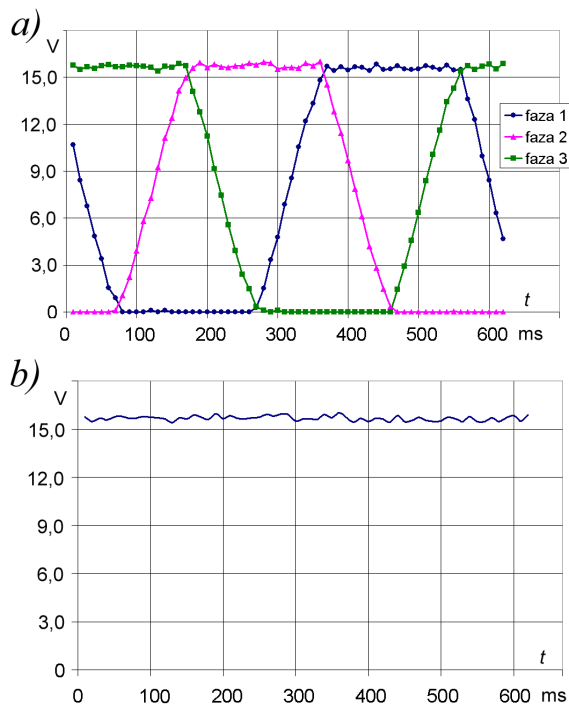
4. Wnioski

Jakość pomiarów prędkości i prądu jest bardzo istotna dla pracy całego układu napędowego z wolnoobrotowym silnikiem BLDC, gdyż wprowadzenie składowej zmiennej sygnału związanej z błędami pomiarowymi, a nie z rzeczywistym przebiegiem zjawisk fizycznych powoduje reakcję pracującego w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego układu sterowania na nieistniejące zmiany. Reakcja ta objawia się generowaniem oscylacji zarówno prądu, jak i momentu oraz prędkości obrotowej i towarzyszącym temu hałasem. Stąd też celowe jest poszukiwanie metod minimalizacji błędów pomiarowych.



Rys. 9. Próby wykonania pomiaru prędkości na podstawie pomiaru SEM indukowanych w uzwojeniach silnika BLDC: a) napięcia fazowe zmierzone dla bardzo małej prędkości, b) pomiary wykonane dla bardzo małej prędkości, c) pomiary wykonane dla dużej prędkości

Z uwagi na fakt, że pomiar prędkości za pomocą czujników hallotronowych charakteryzuje się dużą wrażliwością na niedokładności mocowania tych czujników, bardziej odporny na błędy montażowe wydaje się układ pomiaru siły elektromotorycznej i ten układ może być zalecany do zastosowania w tych konstrukcjach, w których wystarcza przybliżone śledzenie wartości zadanej prędkości. Występujące przy pomiarach SEM zakłócenia związane z komutacją tranzystorów wymagają jednak stosowania odpowiednich filtrów analogowych RC oraz odpowiednich metod obróbki sygnałów w układzie trójfazowym. Dobór tych filtrów musi



Rys. 10. Przebiegi sił elektromotorycznych w poszczególnych fazach (a) i wartości maksymalnej (b) uzyskane przy zastosowaniu filtrów dolnoprzepustowych o zwiększonej stałej czasowej

uwzględniać nie tylko częstotliwość próbkowania przetwornika analogowo cyfrowego, ale przede wszystkim częstotliwość modulacji szerokości impulsów w falowniku. W przypadku pomiarów prądu, oprócz stosowania filtrów analogowych najbardziej skuteczna okazuje się synchronizacja momentów próbkowania z przebiegiem pracy układu sterowania symetryczną modulacją szerokości impulsów

5. Literatura

- [1]. Bonert R.: Digital Tachometer with Fast Dynamic response Implemented by a Microprocessor. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 19, No. 6, 1983.
- [2]. Brock S., Zawirski K.: Speed Measurement Method for Digital Control System. Proc. of European Conf. on Power Electronics and Applications, EPE'2001, Graz, 2001.
- [3]. Hagel R.: Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, Część II. Metody pomiarowe. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1982.
- [4]. Miłek M. Miernictwo wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Wyd. PZ. Zielona Góra 1998.