

Stanowisko do analizy wpływu błędów rozmieszczenia czujników położenia wału silnika BLDC na jego pracę

Streszczenie. W artykule zaproponowano szybką strukturę obliczeniową wykorzystującą sygnały z trójkanałowego enkodera inkrementalnego do generacji impulsów symulujących pracę układu obserwacji położenia wału silnika BLDC. Jego zadaniem jest zastąpienie układu wykorzystującego 3 czujniki i umożliwiającego wygenerowanie $6p$ zmian stanów na 1 obrót wału silnika. Podstawowym założeniem opracowanego stanowiska jest możliwość wytworzenia sygnału czujników silnika BLDC z dokładnością kąta mechanicznego równą $0,18$ stopnia w przypadku zastosowanego w stanowisku enkodera o liczbie impulsów na obrót równej 500 . Możliwość niemal dowolnego wpływania na błąd rozmieszczenia czujników umożliwia testowanie wpływu dokładności wykonania elementów mechanicznych komutatora elektronicznego na pracę silnika zarówno w układzie otwartym (badanie wpływu komutacji przyspieszonej i opóźnionej), jak i zamkniętym, w którym oprócz nieprawidłowej komutacji mamy do czynienia również z błędnym określeniem prędkości wału silnika na podstawie czasu zmierzonego pomiędzy poszczególnymi punktami komutacji silnika BLDC. Wykorzystanie opracowanego stanowiska znacznie upraszcza ocenę wpływu dokładności wykonania elementów układu obserwacji położenia wału na jego pracę, co przyczynia się do optymalizacji kosztów produkcji układów napędowych wykorzystujących tę technikę sterowania.

Abstract. This paper proposes the use of a high-speed computing structure using signals from a three-channel incremental encoder in generating impulses simulating the operation of an observation system of the BLDC motor shaft position using 3 sensors and allowing the generation of $6 \cdot p$ status changes for 1 revolution of the motor shaft. The possibility of an almost arbitrary influence on the positional error of BLDC motor sensors allows one to test the impact of the manufacturing precision of the mechanical components of an electronic commutator on the work of a BLDC motor both in an open system (study of the effects of accelerated and delayed commutation) and a closed one, where in addition to incorrect commutation we are also dealing with an erroneous evaluation of the motor shaft speed, based on the time measured between individual points of the BLDC motor commutation. The use of the prepared test stand will greatly simplify the impact assessment of the accuracy of the components of the observation system of the BLDC motor shaft position on its work, which will contribute to the optimisation of the production costs of drive systems using this control technique. (The test stand for analysing the impact of the distribution error of the BLDC motor shaft position sensors on its work)

Słowa kluczowe: silnik BLDC, błąd rozmieszczenia czujników, enkoder.

Keywords: BLDC motor, misalignment error, encoder.

Wstęp

Wymagania rynkowe dotyczące ograniczenia obsługowości urządzeń napędu elektrycznego, przy jednoczesnym poprawieniu parametrów ich pracy, skłania konstruktorów do sięgnięcia po nowoczesne struktury układów napędowych przy projektowaniu nowych, bądź modernizowaniu już istniejących rozwiązań. Tendencją taką można zauważyć w systematycznym zastępowaniu silników prądu stałego małej mocy przez bezszczotkowe silniki BLDC. Wykorzystanie silników BLDC w miejsce silników prądu stałego pozwala na znaczne polepszenie parametrów eksploatacyjnych takich rozwiązań, a zastąpienie wymagającego konserwacji komutatora mechanicznego komutatorem elektronicznym oprócz ograniczenia obsługowości urządzenia, podnosi znacząco sprawność całego układu napędowego. Zazwyczaj element ten składa się z trzech dwustanowych czujników, które określają położenie wirnika z dokładnością 60° elektrycznych. Chęć minimalizacji kosztów produkcji silnika BLDC sprawia, że dokładność montażu tych elementów i sposób ich regulacji często pozostawia wiele do życzenia, szczególnie w jednostkach gdzie priorytetem jest niska cena. Ponieważ informacja o położeniu wału silnika jest kluczowa w procesie jego sterowania, błąd popełniany na tym etapie rzutuje bardzo silnie na pracę całego układu napędowego i przyczynia się do pogorszenia wszystkich parametrów pracy [5, 6, 7].

Inżynierowie badający wpływ błędnego rozmieszczenia czujników położenia wału silnika BLDC na jego pracę niemal zawsze napotykali na trudności związane z ustawieniem pożądanego przesunięcia pomiędzy optymalną osią pracy czujnika, a osią rzeczywistą. Utrudnia to znacznie oszacowanie wpływu dokładności wykonania układu obserwacji położenia wału na pracę maszyny roboczej urządzenia finalnego [7, 8].

W artykule zaproponowano wykorzystanie szybkiej struktury obliczeniowej wykorzystującej sygnały z trójkanałowego enkodera inkrementalnego do

generowania impulsów symulujących pracę układu obserwacji położenia wału silnika BLDC wykorzystującego 3 czujniki i umożliwiającego wygenerowanie $p \cdot 6$ (gdzie p – liczba biegunów silnika) zmian stanów na 1 obrót wału silnika.

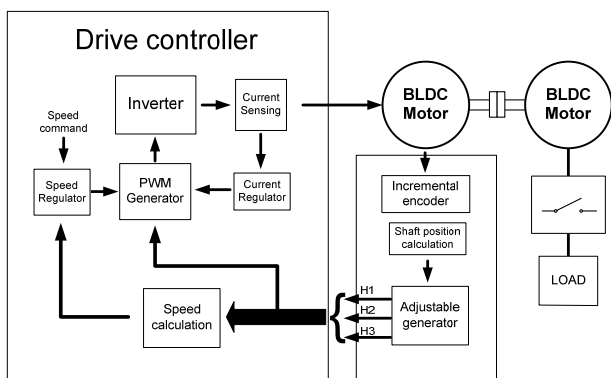
Możliwość niemal dowolnego wpływania na błąd rozmieszczenia czujników silnika BLDC umożliwia testowanie wpływu dokładności wykonania elementów mechanicznych komutatora elektronicznego na pracę silnika BLDC zarówno w układzie otwartym (badanie wpływu komutacji przyspieszonej i opóźnionej), jak i zamkniętym, w którym oprócz nieprawidłowej komutacji mamy do czynienia również z błędnym określeniem prędkości wału silnika na podstawie czasu zmierzonego pomiędzy poszczególnymi punktami komutacji silnika BLDC [1, 2, 9].

Budowa stanowiska

Aby dokonać obserwacji wpływu dokładności wykonania elementów komutatora elektronicznego na pracę silnika BLDC zbudowano stanowisko laboratoryjne składające się z dwóch sprzężonych ze sobą maszyn BLDC (rys.1). Pierwsza z nich pełni rolę silnika, a druga hamownicy. Ponieważ praktyczna implementacja układu obserwacji wału silnika, w którym błąd rozmieszczenia czujników byłby regulowany z pożądaną rozdzielczością i dokładnością, jest bardzo trudna ze względu na ograniczenia techniczne i technologiczne, konieczne było wykorzystanie innej metody generowania informacji o położeniu wału silnika napędowego.

Zastosowano w tym celu enkoder inkrementalny o rozdzielczości 500 impulsów/obrotów oraz odpowiedni algorytm generujący sygnały 3 czujników położenia wirnika silnika BLDC. Rozwiązanie takie daje możliwość dowolnego konfigurowania błędów rozmieszczenia czujników, co umożliwia szybkie i dokładne przeprowadzenie testów bez konieczności ingerencji w konstrukcję mechaniczną silnika. Dokładność generowania impulsów dla sterownika silnika

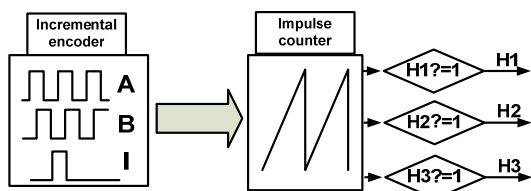
BLDC wynosi $p \cdot \pi / 1000$ stopnia elektrycznego, co jest wartością wystarczającą do badania wpływu dokładności rozmieszczenia czujników na poprawność jego pracy.



Rys.1. Schemat blokowy stanowiska do badania wpływu dokładności rozmieszczenia czujników położenia wału na pracę silnika BLDC.

Zarówno do sterowania silnika, jak i generowania impulsów dla sterownika użyto dwóch niezależnych układów mikroprocesorowych opartych o mikrokontroler specjalizowany MB91F267. Zawiera on w swej strukturze elementy umożliwiające szybką syntezę procedury sterowania silnikiem BLDC, jak również bloki dedykowane do obsługi enkodera. Szybki tor przetwarzania informacji umożliwia zmniejszenie niedokładności generowania impulsów wynikającej z opóźnienia czasowego powstającego w torze wytwarzania impulsów dla sterownika silnika. Konieczność zapewnienia informacji o położeniu wału silnika sprawia, że niezbędne jest użycie enkodera absolutnego, lub inkrementalnego z dodatkowym sygnałem referencyjnym, dającym jednoznaczną informację o położeniu wału silnika.

Zasadę wytwarzania sygnałów sterujących zobrazowano na rysunku 2.

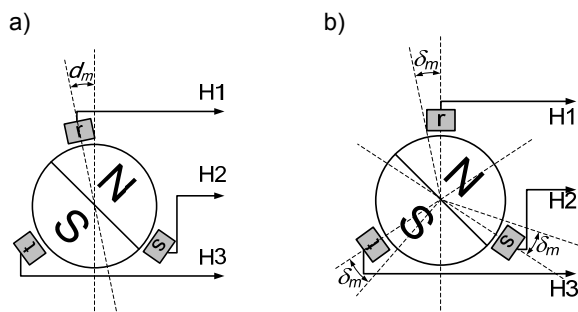


Rys.2. Schemat blokowy kształtowania sygnału położenia wirnika silnika BLDC z wykorzystaniem enkodera inkrementalnego.

W pamięci mikrokontrolera, w tablicy danych nieulotnych, zapisane są przedziały zadziałania odpowiednich czujników położenia wału silnika. Każdorazowo przy zmianie stanu wyjść enkodera inkrementalnego generowane jest przerwanie, w którym układ generujący sygnał imitujący czujniki, porównuje aktualną wartość inkrementowanego licznika z wartościami zapisanymi w tablicy i w przypadku stwierdzenia zgodności dokonuje odpowiedniego wysterowania 3 wyjść, na podstawie których sterownik silnika dobiera odpowiedni wektor sterowania. Istotne jest to, że wartości graniczne zadziałania poszczególnych czujników mogą być indywidualnie modyfikowane tak, aby jak najdokładniej odwzorować w warunkach laboratoryjnych niedokładność ich montażu lub przeprowadzić testy poprawności działania sterownika silnika przy np. awarii jednego z czujników.

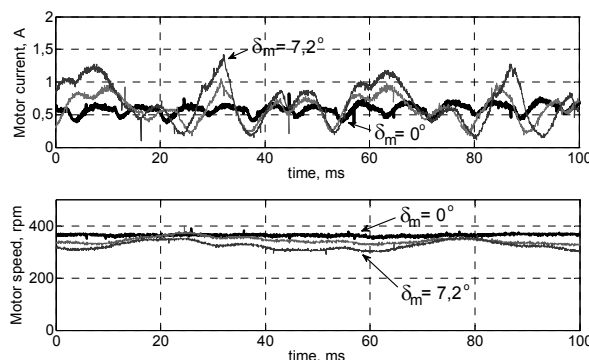
Badania laboratoryjne.

Aby przekonać się o poprawności przyjętych założeń przeprowadzono pomiary prędkości obrotowej wału silnika, prądu pobieranego przez napęd oraz przebiegu impulsów układu obserwacji położenia jego wału. Testy przeprowadzono dla 2 przypadków: w przypadku z rysunku 3a położenie jednego z czujników było zmieniane w zakresie δ_p zmieniającym się od 0 do $21,6^\circ$ elektrycznego co $7,2^\circ$, co dla badanego silnika o liczbie par biegunów $p=3$ odpowiada przesunięciu o kąt mechaniczny δ_m równy od 0 do $7,2^\circ$, co $2,4^\circ$ (rys. 3a).



Rys.3. Przykładowe błędy w montażu czujników położenia wału przetestowane na stanowisku pomiarowym.

Zarejestrowane na stanowisku przebiegi wskazują na duży wpływ dokładności montażu czujnika na pracę silnika BLDC. Znaczny wzrost pulsacji prądu powoduje pulsację momentu napędowego silnika, co przekłada się na drgania i fluktuacje prędkości obrotowej – rysunek 4.



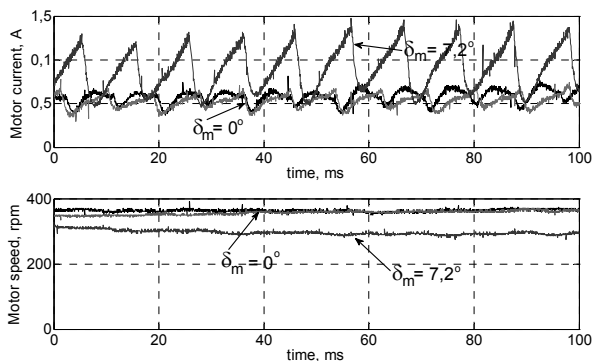
Rys.4. Przebiegi prędkości i prądu biegu jałowego silnika BLDC dla różnych kątów δ_m odchylenia od osi optymalnej jednego z czujników położenia wału.

Z tego rodzaju błędem użytkownik napędu ma do czynienia w sytuacji błędnego lub niezbyt dokładnego wykonania elementu komutatora elektronicznego odpowiedzialnego za ustalenie położenia wału silnika. Warto zauważyć, że już dla małych wartości błędu rozmieszczenia jednego z czujników znacznemu odkształceniu ulega prąd silnika, co przekłada się na nieoptymalną pracę napędu i odczuwalny przez użytkownika wzrost amplitudy drgań emitowanych przez maszynę.

W przypadku drugim dokonano jednoczesnego przesunięcia wszystkich czujników położenia wału tak, jak ma to miejsce w większości napędów w przypadku nieoptymalnego zorientowania tarczy z czujnikami względem wału silnika (rys. 3b). Przebiegi prądu i prędkości przedstawione zostały na rysunku 5.

Błąd przesunięcia wszystkich czujników zmienił się w podobnym zakresie, jak dla zmiany położenia jedynie jednego z nich, a mimo to, prędkość wykazywała znacznie mniejszą zmienność. Wartością, która jest miarą

poprawności regulacji położenia grupy czujników względem wału silnika BLDC jest wartość skutecznego prądu pobieranego przez układ napędowy pracujący bez obciążenia. Na rysunku 5 widać wyraźnie, że wartość prądu jest najniższa dla prawidłowego zorientowania czujników względem wału i nie rośnie zbyt gwałtownie w funkcji błędu przesunięcia czujników od osi optymalnej. Fakt ten sprawia, że użytkownik ma możliwość korygowania ustawień części układu obserwacji położenia wału silnika w dość szerokim zakresie niemal bez zauważalnego, negatywnego oddziaływania na pracę silnika.



Rys.5. Przebiegi prędkości i prądu biegu jałowego silnika BLDC dla różnych kątów δ_m odchylenia od osi optymalnej czujników położenia wału.

Praca w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego

Wysokie wymagania stawiane urządzeniom sprawiają, że w wielu aplikacjach konieczna jest realizacja prędkościowego sprzężenia zwrotnego, tak aby zapewnić odpowiednie właściwości regulacyjne prędkości wału silnika, a niekiedy nawet jego położenia. Rozwijane systematycznie metody bezczujnikowego sterowania silników BLDC sprawdzają się w zakresie wyższych prędkości obrotowych, a są niewystarczające dla prawidłowego zestawienia pętli sprzężenia prędkościowego w zakresie niższych prędkości wału, dla których niezbędne jest wykorzystanie czujników jego położenia [3, 4].

Obecność w układzie obserwacji położenia wału silnika trzech niezależnych czujników monitorowanych przez wydajny system mikroprocesorowy umożliwia pomiar wartości prędkości wirnika na kilka sposobów. Najpopularniejszym z nich jest pomiar czasu jaki upływał pomiędzy kolejnymi zmianami stanu czujników w układzie obserwacji położenia wału. Metoda ta jest korzystna z punktu widzenia dynamiki pracy układu, gdyż wartość opóźnienia odczytu prędkości jest przy jej użyciu najmniejsza. Sprowadza się ona do inkrementowania licznika i obliczenia prędkości przy zmianie stanu dowolnego z trzech czujników położenia wału silnika

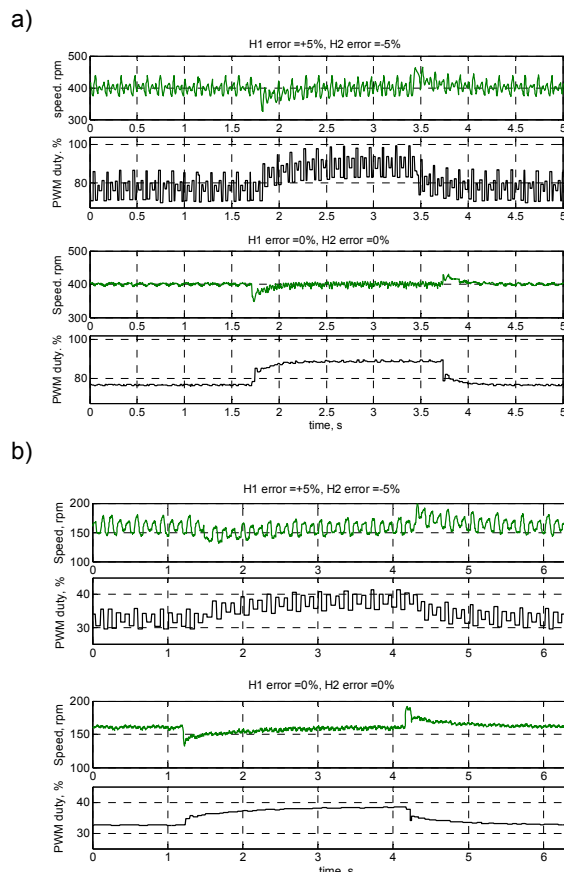
Błąd obliczenia prędkości δ_p zależy od kąta mechanicznego δ_m odchylenia od osi poprawnego montażu rysunku 3a. Wpływa ono na błąd określania położenia punktu komutacji dla silnika BLDC zgodnie ze wzorem 1.

$$(1) \quad \delta_{p\%} = 6 \cdot p \cdot \delta_{m\%}$$

Wyraźnie widać, że precyzja wykonania silnika jest szczególnie ważna w przypadku maszyn wielobiegunowych. Co ciekawe symetryczne przesunięcie wszystkich czujników jednocześnie – rysunek 3b nie wpływa na dokładność określania prędkości kątowej.

Błąd ten w wielu aplikacjach niemal uniemożliwia poprawne określenie prędkości obrotowej silnika na podstawie obliczenia czasu pomiędzy kolejnymi punktami komutacji.

W ramach weryfikacji praktycznej przeprowadzono pomiary przebiegu prędkości wirnika silnika BLDC w zamkniętej pętli prędkościowego sprzężenia zwrotnego dla dwóch prędkości zadanych. Założono 5% dokładność montażu 2 czujników położenia wału oraz dla porównania w przypadku drugim dla montażu poprawnego. Próby przeprowadzono dla silnika BLDC o 3 parach biegunów, mocy 150 W, napięciu znamionowym 24 V oraz znamionowej prędkości obrotowej 500 obr/min.



Rys.6. Przebiegi prędkości i współczynnika wypełnienia sygnału PWM dla różnych błędów rozmieszczenia czujników: a) dla prędkości zadanej 400 obr/min oraz b) dla prędkości zadanej 160 obr/min, przy skokowym załączeniu i wyłączeniu obciążenia dla układu pracującego w zamkniętej pętli sprzężenia prędkościowego.

Pomiary przeprowadzono dla tych samych nastaw regulatora prędkości i tych samych struktur układu sterowania. Podczas badań stwierdzono, że praca układu napędowego z błędnie rozmieszczonymi czujnikami położenia wału w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego jest niepoprawna. Duże zmiany prędkości będące wynikiem błędnego działania regulatora prędkości, niemal uniemożliwiają pracę układu napędowego szczególnie w zakresie niskich prędkości obrotowych. Jednocześnie poprzez modyfikację parametru błędu rozmieszczenia czujników możliwe jest określenie kryteriów wykonania silnika (dokładności wykonania elementów obserwacji położenia wału) tak, aby opracowywany układ napędowy pracował poprawnie w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Umożliwia to jasne określenie kryteriów doboru jakości silnika już na etapie projektowania jego poszczególnych elementów, co znacznie przyczynia się do zmniejszenia ryzyka wprowadzenia nowego, niesprawdzonego produktu na rynek. Jednocześnie możliwa stała się minimalizacja kosztów wytworzenia urządzenia poprzez zmniejszenie rygoru dokładności

wykonania tego elementu silnika oraz przeanalizowanie nowych jego parametrów bez konieczności wykonywania prototypu układu obserwacji położenia wału.

Podsumowanie

Podstawowym założeniem opracowanego stanowiska była możliwość arbitralnego wygenerowania sygnału czujników silnika z dokładnością uzależnioną jedynie od rozdzielczości enkodera i szybkości struktury obliczeniowej, co oznacza dla użytych elementów zdolność symulowania działania czujników z dokładnością 0,18 stopnia mechanicznego.

Wykorzystanie opracowanego stanowiska znacznie uprościło ocenę wpływu dokładności wykonania elementów układu obserwacji położenia wału silnika BLDC na jego pracę, co przyczyni się do optymalizacji kosztów produkcji układów napędowych wykorzystujących tę technikę sterowania. Testy dla precyzyjnie dobranych parametrów pozwolą na określenie wartości granicznych dokładności wykonania elementów dla poddostawców. Umożliwi to weryfikację jakości wykonania silników otrzymywanych od kontrahentów, ograniczy konieczność przeprowadzania kosztownych akcji serwisowych i pozwoli na optymalizację kosztów układu napędowego poprzez precyzyjne określenie kryteriów jakości wykonania układu obserwacji położenia wału silnika BLDC.

Z przedstawionych badań wynika, że praca silnika w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego wymaga znacznie dokładniejszego wykonania elementów obserwacji położenia wału. Nawet niewielkie błędy w rozmieszczeniu czujników powodują znaczące błędy w określaniu prędkości obrotowej, a co za tym idzie w zmianie parametrów sterowania regulatora prędkości, który w skrajnym przypadku może doprowadzić do niestabilności uniemożliwiającej pracę układu napędowego.

Autor: dr inż. Krzysztof Kolano, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Polska, e-mail: k.kolano@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Chen Y., Cai D.-S., Lou X., Relationship detection between the signals of composite photoelectric encoder and the windings of BLDC Motor, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.7a
- [2] Sudhoff S.D., Krause P.C., Operation Modes of the Brushless DC Motor with a 120 Inverter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5 (1990), n.3, 558-564
- [3] Kia M., Rezayieh K.R., Taherkhani R., A novel method for measuring rotational speed of BLDC motors using voltage feedback, 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), (2011), 791-794, DOI: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356761
- [4] Damodharan P., Vasudevan K., Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 25, (2010), n.3, 661-668
- [5] Sikora A., Zielonka A., Kulesz B, Impact of Hall sensors positioning on symmetry of BLDC control signals Power Electronics, Electrical Drives, International Symposium on Automation and Motion (SPEEDAM), (2012), 249-252, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264444
- [6] J.-H. Choi, J.S. Park, B.-G. Gu, J.-H. Kim, C.-Y. Won, Position estimation and control of BLDC motor for VVA module with unbalanced hall sensors, IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), (2012), 390-395, DOI: 10.1109/PECon.2012.6450244
- [7] Samoylenko N., Han Q., Jatskevich J., Dynamic Performance of Brushless DC Motors With Unbalanced Hall Sensors IEEE *Transactions on Energy Conversion*, 23, (2008), n.3, 752-763 DOI: 10.1109/TEC.2008.921555
- [8] Alaeinovin P., Chiniforoosh S., Jatskevich J., Evaluating misalignment of hall sensors in brushless DC motors, IEEE Electric Power Conference, 2008, Canada (2008), 1-6, DOI: 10.1109/EPC.2008.4763350
- [9] Baszyński M., Piróg S., A Novel Speed Measurement Method for a High-Speed BLDC Motor Based on the Signals From the Rotor Position Sensor, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (2014), n.1, 84-91
- [10] Samoylenko N., Qiang Han, Jatskevich J., Improving Dynamic Performance of Low-Precision Brushless DC Motors with Unbalanced Hall Sensors Power Engineering, IEEE *Society General Meeting*, (2007), 1-8