

Odtwarzanie położenia wału dla prędkości zerowej w napędzie z PMSM z użyciem analizy głównych składowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono sposób odtwarzania położenia wału silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z wykorzystaniem dodatkowego prądu wysokiej częstotliwości. Uzyskany hodograf tego prądu przetwarzany jest z użyciem analizy głównych składowych. Rezultatem przetwarzania jest informacja o poziomie dopasowania do poszczególnych wzorców. Wzorzec o najlepszym dopasowaniu określa odtworzone położenie wału maszyny. Badania zostały przeprowadzone z użyciem danych pomiarowych laboratoryjnego układu napędowego z PMSM.

Abstract. This paper presents a method of estimating the shaft position of a permanent magnet synchronous motor using an additional high-frequency current. The resulting hodograph of this current is processed using principal component analysis. The result of the processing is information about the level of fit to individual patterns. The pattern with the best match determines the estimated shaft position. The research was carried out using measurement data of a laboratory drive with a PMSM. (**Shaft position estimation for zero speed in a PMSM drive using principal component analysis**)

Słowa kluczowe: PMSM, sterowanie bezczujnikowe, odtwarzanie, analiza głównych składowych
Keywords: PMSM, sensorless control, estimation, principal component analysis

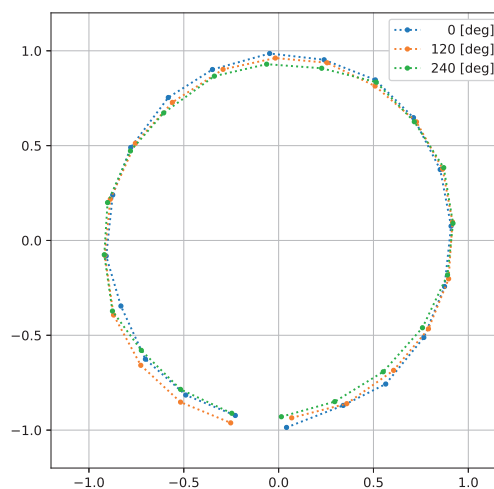
Wstęp

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motor) są powszechnie stosowane zarówno w przemyśle, jak i w sprzęcie gospodarstwa domowego. Wykorzystywane są i w napędach o wysokiej precyzji jak i tych o mniejszych wymaganiach. Rośnie także zainteresowanie tymi napędami w pojazdach elektrycznych [1, 2], np. jako napędy wbudowane w koła [3]. Silnik tego typu zazwyczaj sterowany jest wektorowo [4, 5]. Taki sposób sterowania wymaga zapewnienia informacji o aktualnym położeniu elektrycznym wału, dostarczanej w typowej realizacji przez czujnik położenia. Możliwość pracy napędu bez tego czujnika może zwiększyć niezawodność napędu oraz obniżyć jego koszt. Powszechnie stosowaną metodą odtwarzania położenia wału jest zastosowanie technik wykorzystujących odtwarzanie siły elektromotorycznej (SEM) rotacji, a następnie wyznaczenia na podstawie jej wartości chwilowych - położenia wału. Metody te jednak zasadniczo nie sprawdzają się w zakresie prędkości (bardzo) małych i przy zatrzymanym wale, ze względu na brak lub małą wartość indukowanej SEM [6, 7] oraz niski – w tym zakresie prędkości – stosunek sygnału do szumu. W przypadku pracy przy zatrzymanym wale lub w zakresie niskich prędkości można zastosować metodę fizyczną wykorzystującą zmienność indukcyjności w funkcji położenia wału [8]. Zmienność ta może być intencjonalna, jak w przypadku maszyny o wydatnych biegunach lub magnesach umieszczonych wgłębnie w wirniku, może być też przypadkowa, wynikająca np. z ograniczonej dokładności montażu maszyny. Prezentowane rozwiązanie może wykorzystywać przypadkową zmienność – koncepcja odtwarzania położenia została zbadana dla maszyny o założonej symetrii magnetycznej. Wykorzystane w pracy wyniki uzyskano eksperymentalnie na stanowisku wyposażonym w napęd z PMSM. Przedstawiony sposób odtwarzania położenia może być wykorzystany w układzie wektorowego sterowania PMSM, zasilanego z falownika. Obliczenia zostały zrealizowane w języku *Python 3*, wykorzystując do obliczeń bibliotekę *numpy*. Przedstawione równania opisane pseudokodem odnoszącym się do tych narzędzi programistycznych.

Odtwarzanie położenia wału PMSM

W układach odtwarzania położenia wału dla zakresu zerowej prędkości, zazwyczaj wykorzystuje się metody pomiaru indukcyjności polegające na okresowym dodawaniu

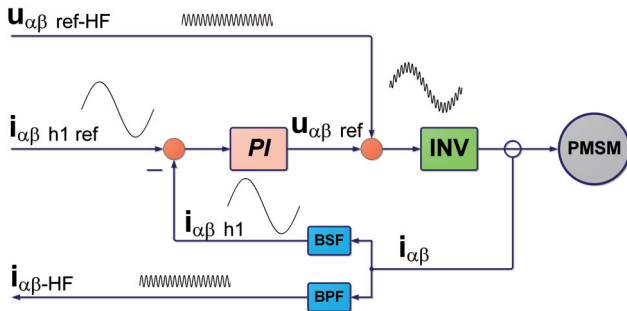
sygnału testowego (metoda INFORM: Indirect Flux Detection by On-Line Reactance Measurement) [9, 10] lub z dodatkiem ciągłego sygnału wysokiej częstotliwości [11]. W prezentowanym rozwiązaniu wykorzystywana jest metoda bazująca na ciągłym wprowadzaniu dodatkowego sygnału. Dla nieruchomego wału silnika, jeżeli stojan zostanie zasilony symetrycznym trójfazowym napięciem sinusoidalnym, można wygenerować hodograf, wykorzystując zmierzone prądy. Może on mieć kształt w przybliżeniu eliptyczny dla silnika o biegunach wydatnych lub w przypadku IPMSM (Interior magnets PMSM, z magnesami umieszczonymi wgłębnie), a analizując położenie jednej z osi tej elipsy, można określić położenie wału silnika, jednak z niepewnością odnośnie zakresu kąta: $0 - \pi$ lub $\pi - 2\pi$. W przypadku maszyny o dużej symetrii magnetycznej, uzyskany hodograf prądu miałby kształt zbliżony do okręgu. Rzeczywista maszyna nie cechuje się jednak idealną symetrią. Może to być spowodowane m.in. asymetrią mechaniczną, niejednorodnym materiałem itp. Hodograf prądu będzie miał więc inny kształt niż okrąg i kształt ten może się zmieniać wraz ze zmianą położenia wału. Na rysunku 1 przedstawiono zarejestrowane hodografy badanej



Rys. 1. Wyznaczone eksperymentalnie przeskalowane, wycentrowane i zsynchronizowane hodografy prądu badanej maszyny dla trzech położenia wału: 0° , 120° , 240°

maszyny, dla trzech położenia wału: $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$. Dla prezentowanych na tym rysunku hodografów trudno dostrzec prawidłowość w kontekście powiązania kształtu z położeniem wału, jednak wykorzystując metody inteligencji obliczeniowej można dokonać poprawnej klasyfikacji położenia. W pracy przedstawiono wykorzystanie metody bazującej na analizie głównych składowych (PCA: Principal Component Analysis). Innym sposobem może być wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej [12].

Ogólną koncepcję generowania hodografu prądu pokazano dla struktury sterowania wykorzystującej stacjonarny układ współrzędnych $\alpha\beta$ skojarzony ze stojanem (rys. 2). W układzie regulacji prądu, do



Rys. 2. Schemat układu regulacji prądu PMSM z wykorzystaniem prądów wysokiej częstotliwości w torze sterowania $\alpha\beta$

napięcia generowanego w torze sterowania $U_{\alpha\beta ref}$ dodawane jest napięcie wysokiej częstotliwości $U_{\alpha\beta ref-HF}$ odpowiednio w osi α i β , którego hodograf ma kształt okręgu. Suma tych napięć wzbudza przepływ prądu $i_{\alpha\beta}$. Hodograf jest wyznaczany z wysokoczęstotliwościowej składowej prądu $i_{\alpha\beta-HF}$, która jest wydzielana za pomocą filtra pasmowo-przepustowego (BPF: band-pass filter). Tor sterowania prądem wykorzystuje w sprzężeniu zwrotnym sygnał prądowy po usunięciu składowych wysokiej częstotliwości $i_{\alpha\beta h1}$ za pomocą filtra pasmowo-zaporowego (BSF: band-stop filter). Dodatkowo napięcie wysokiej częstotliwości $U_{\alpha\beta ref-HF}$ powinno mieć amplitudę na tyle małą, aby ograniczyć generowanie dodatkowego momentu, a w rezultacie wzbudzenie dodatkowych wibracji wału i na tyle dużą, aby wzbudzić prąd, którego wartość może być poprawnie zmierzona (z odpowiednim stosunkiem sygnału do szumu). Powinno mieć też tak dobrą częstotliwość, aby dla maksymalnej prędkości obrotowej maszyny w tym trybie bezczujnikowym, była ona dużo większa niż częstotliwość pierwszej harmonicznej prądu i możliwie dużo mniejsza od częstotliwości nośnej falownika. Zastosowano częstotliwość 500 Hz , która jest odpowiednio mniejsza niż 10 kHz częstotliwości nośnej falownika w zastosowanym układzie.

Tego typu metoda sprawdza się najlepiej przy zatrzymanym wale lub bardzo niskich prędkościach, ponieważ przy prędkościach średnich i wysokich wprowadzenie dodatkowego sygnału wysokiej częstotliwości powoduje coraz bardziej znaczące odkształcenie prądów fazowych, pogarszając tym samym jakość regulacji momentu.

Metoda PCA

Metody bazujące na analizie głównych składowych wykorzystywane są m.in. w dziedzinie przetwarzania obrazu lub dźwięku, kompresji danych, w cybernetyce, uczeniu maszynowym i w eksploracji danych [13, 14, 15, 16, 17]. Wykorzystanie PCA w dziedzinie elektrotechniki, a w szczególności w zastosowaniach napędowych jest rzadziej

prezentowane. W pracach [18, 19] wykorzystano PCA do modelowania PMSM, a w [20, 21] metodę PCA zastosowano do wykrywania awarii w maszynach elektrycznych.

Prezentowana implementacja PCA jako elementu składowego procedury odtwarzania położenia wału obejmuje dwa podstawowe zadania: redukcja rozmiaru wykorzystanych danych opisujących wzorce hodografów prądu dla poszczególnych położenia wału, oraz klasyfikacja obrazów (hodografów prądu). Każdej zarejestrowanej pozycji wału odpowiada "wzorcowy" hodograf. Założono, że każdy hodograf składa się z 20 punktów $\{i_{\alpha}, i_{\beta}\}$, czyli każdy hodograf można interpretować jako punkt 40-wymiarowy (2×20). Przed uruchomieniem algorytmu odtwarzającego położenie, należy przygotować zestawy obrazów (hodografów) wzorcowych dla poszczególnych wartości kąta położenia wału, do których będą porównywane nowe, wygenerowane lub zmierzone w trakcie pracy napędu hodografy dla aktualnego położenia wału. Prezentowane wyniki bazują na eksperymentalnych danych pomiarowych ale realizacja algorytmu jest w trybie *off-line*. Macierz zarejestrowanych danych A jest dwuwymiarowa. Kolumny – 40 wierszy (2×20 próbek). Liczba kolumn, czyli liczba hodografów wzorcowych (i liczba rozróżnianych sektorów), w badanym rozwiązaniu wynosi 80, czyli położenie identyfikowane jest z rozdzielczością $4,5^\circ$. W celu przygotowania danych wzorcowych, należy w pierwszym kroku usunąć składową stałą odpowiednio dla każdego spośród 40 wymiarów:

$$(1) \quad \mathbf{avImg} = \mathit{mean}(\mathbf{A}, \mathit{axis} = 1).$$

Następnie usuwana jest składowa stała dla wszystkich i obrazów wzorcowych

$$(2) \quad \mathbf{avA}[:, i] = \mathbf{A}[:, i] - \mathbf{avImg}$$

i wyznaczana jest mała macierz kowariancji C

$$(3) \quad \mathbf{C} = \mathbf{avA}^T \mathbf{avA}.$$

Wyznaczane są macierz wartości własnych $\{eval_1, eval_2, \dots\}$ i macierz wektorów własnych $\{evec_1, evec_2, \dots\}$ małej macierzy kowariancji. Macierz wektorów własnych jest konwertowana do dużego rozmiaru:

$$(4) \quad \mathbf{evec}_{BIG} = \mathbf{avA} \mathbf{evec}.$$

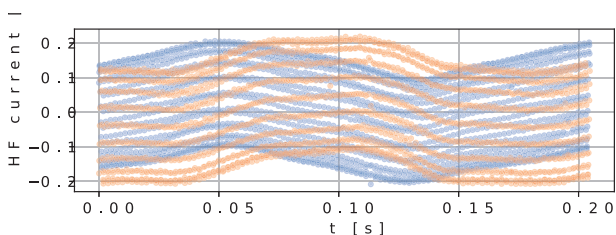
W kolejnym kroku wartości własne $eval_n$, są sortowane w kolejności malejącej (wartość własna o największej wartości określa najistotniejszą cechę). W tej samej kolejności ustawiane są odpowiadające im (indeksem n) wektory własne $evec_{nBIG}$, tworząc wektor cech \mathbf{FV} (feature vector).

Na koniec należy wybrać liczbę cech n_{sel} i wyznaczyć macierz wag \mathbf{wi} :

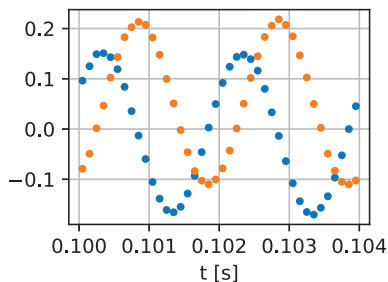
$$(5) \quad \begin{aligned} &\mathbf{for} \mathit{mi} \mathit{in} \mathit{range}(\mathit{imagenumbers}) : \\ &\quad \mathbf{for} \mathit{k} \mathit{in} \mathit{range}(n_{sel}) : \\ &\quad \quad \mathbf{wi}[\mathit{mi}, \mathit{k}] = \mathbf{FV}[:, \mathit{k}] \mathbf{avA}[:, \mathit{mi}], \end{aligned}$$

gdzie $\mathit{imagenumbers}$ jest liczbą obrazów wzorcowych, a mi oraz k oznacza indeksy. Baza danych jest gotowa do pracy. Procedura ta jest realizowana jednorazowo przed pierwszym uruchomieniem układu bezczujnikowego. Liczbę cech można dobrać wykorzystując metodę analityczną lub graficzną, np. wykres osypiska [22]. W prezentowanym rozwiązaniu przeprowadzono analizę porównawczą estymatora położenia dla różnej liczby cech.

Mając gotową bazę obrazów (hodografów) wzorcowych można już uruchomić procedurę przygotowującą dane pomiarowe dla obliczeń estymatora położenia. Procedura ta jest uruchamiana w pętli w trakcie pracy bezczujnikowej, każdorazowo po zebraniu kolejnych 2×20 próbek prądu w osi α i β , które definiują aktualny hodograf. Uzyskana grupa punktów pomiarowych prądu wysokiej częstotliwości jest – niezależnie od metody PCA – poddawana wstępnej obróbce polegającej na skalowaniu, centrowaniu i synchronizacji. Wartości prądu mierzonego wysokiej częstotliwości są skalowane do amplitudy jednostkowej względem historycznie największej wartości prądu (wysokiej częstotliwości) za okres wyznaczania zakresu zmian prądów (wysokiej częstotliwości). Centrowanie jest konieczne ze względu możliwość wystąpienia dodatkowej składowej prądu, np. w przypadku niezerowej prędkości wału – ten przypadek jest widoczny na rysunku 3. Przedstawia on jeden z



Rys. 3. Przebiegi prądu wysokiej częstotliwości dla osi α i β po normalizacji, przed centrowaniem. Zarejestrowany jeden z zestawu wielu hodografów, widoczna składowa związana z ruchem wału



Rys. 4. Powiększony fragment rysunku 3. Przebiegi prądów tworzących dwa kolejne hodografy

zarejestrowanych zestawów grup hodografów. Na rysunku 4 widać powiększony fragment rysunku 3. Dla sygnału wysokiej częstotliwości 500 Hz i 20 (dwuwymiarowych) próbkach na jeden hodograf, co 2 ms są zebrane dane tworzące kolejny hodograf **newFace**. Synchronizacja polega na rotacji obu rejestrów prądów (o rozmiarze 20 komórek dla i_α i 20 dla i_β) tworzących jeden hodograf o tę samą liczbę próbek w obu rejestrach tak, aby dla wybranej osi pierwsza próbka zawierała wartość największą (w tym rejestrze). Dzięki temu każdy hodograf ma początek w tym samym miejscu. W kolejnym kroku, z danych hodografu po operacji skalowania, centrowania i synchronizacji **newFaces_{CS}**, usuwana jest składowa stała:

$$(6) \quad \text{avFace} = \text{newFaces}_{\text{CS}} - \text{avImg},$$

wyznaczane są wagi nowego obrazu **wface**:

$$(7) \quad \text{for } k \text{ in range}(n_{\text{sel}}) : \\ \text{wface}[k] = \text{FV}[:, k] \text{avFace}$$

i odległość od poszczególnych obrazów wzorcowych:

$$\text{for } m_i \text{ in range}(\text{imagenumbers}) : \\ \text{odl}_1 = 0 \\ \text{for } k \text{ in range}(n_{\text{sel}}) : \\ (8) \quad \text{odl}_1 + = (\text{wface}[k] - \text{wi}[m_i, k])^2$$

$$\text{odleglosc}[m_i] = \sqrt{\text{odl}_1},$$

gdzie odl_1 jest zmienną pomocniczą. Następnie wyszukiwany jest indeks najbliższego wzorca (wyszukiwanie minimalnej wartości w rejestrze). Określa on oszacowane położenie wału:

$$(9) \quad \text{polozenie} = \text{argmin}(\text{odleglosc}).$$

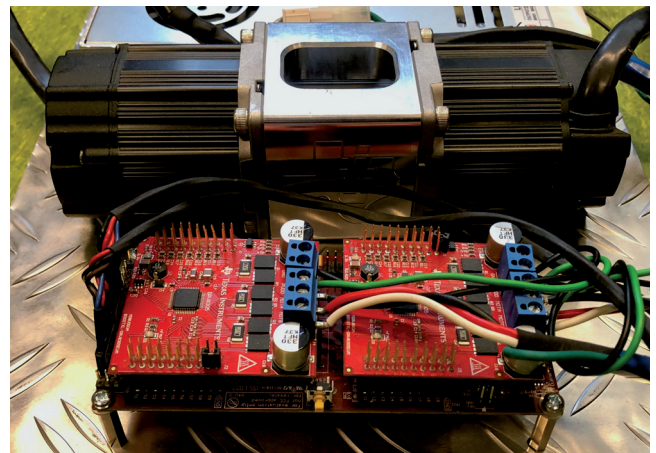
Dla określonego indeksu określającego numer wzorca z tablicy odczytywany jest sinus i cosinus położenia. Są one wielkościami wyjściowymi układu odtwarzającego położenie. Aby określić jakość odtwarzania położenia wykorzystano następującą postać funkcji jakości:

$$(10) \quad Q = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sin(\Theta)_i - \widehat{\sin(\Theta)}_i \right)^2 + \left(\cos(\Theta)_i - \widehat{\cos(\Theta)}_i \right)^2 \right],$$

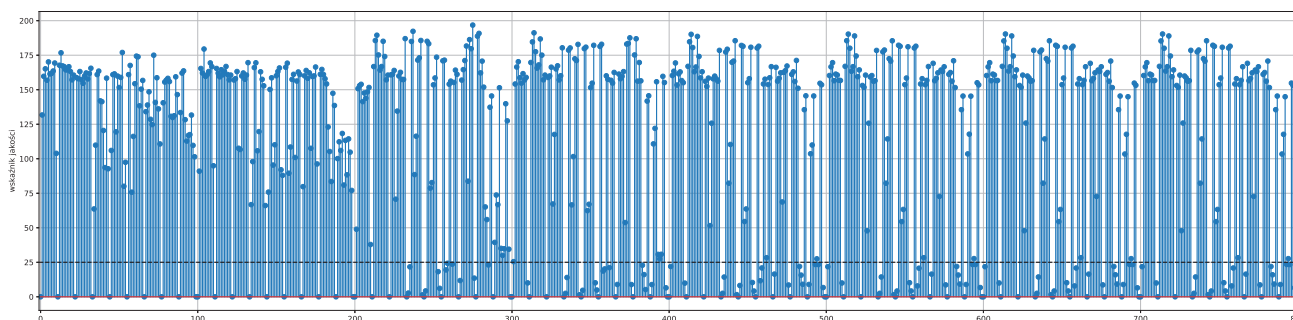
gdzie $\sin(\Theta)$ i $\cos(\Theta)$ oznaczają sinus i cosinus rzeczywistego położenia, a $\widehat{\sin(\Theta)}$ i $\widehat{\cos(\Theta)}$ oznaczają wartości odtworzone położenia dla wszystkich n obrazów wzorcowych położenia.

Stanowisko badawcze

Badania zostały zrealizowane na stanowisku wyposażonym w dwa identyczne, połączone sztywnym sprzęgłem, niskonapięciowe 3-fazowe silniki PMSM (rys. 5). Każdy z nich może niezależnie, dzięki odpowiedniej



Rys. 5. Widok ogólny laboratoryjnego zestawu napędowego strukturze oprogramowania, w prosty sposób realizować funkcję maszyny badanej, sterowanego obciążenia lub maszyny napędzającej. Zastosowano silniki *Teknic M-2310P-LN-04K* klasy przemysłowej *NEMA 23* o właściwościach zapewniających naturalną charakterystykę PMSM przy niskim napięciu zasilania. Oba silniki są wyposażone w enkodery inkrementalne o rozdzielczości 4000 impulsów na obrót. Tor sterowania jednego z silników został uzupełniony o źródło napięcia wysokiej częstotliwości. Dodatkowy sygnał o częstotliwości 500 Hz i



Rys. 6. Wskaźnik jakości dla różnej liczby cech i możliwych połączeń *zestaw uczący – zestaw testowy* danych pomiarowych

amplitudzie $1,6\text{ V}$ w testowanych warunkach wzbudzał prąd o amplitudzie około $1,1\text{ A}$. Drugi silnik pełnił funkcję napędu niskiej prędkości obrotowej. Maszyny zasilane są niezależnie z trójfazowych falowników MOSFET. Układ sterowania zawiera następujące elementy: dwa moduły falowników Texas Instruments Booster Packs Evaluation *BOOSTXL-DRV8305* oraz zestaw uruchomieniowy czasu rzeczywistego *Texas Instruments LAUNCHXL-F28379D*. Wykorzystane falowniki przeznaczone są do pracy przy niskich napięciach, poniżej 45 V i dużych prądach, do 20 A . Część sterująca bazuje na zestawie z dwurdzeniowym, szybkim koproprocesorze czasu rzeczywistego *Control Law Accelerator F28379D* z wbudowanym JTAG i portem USB.

Wyniki badań

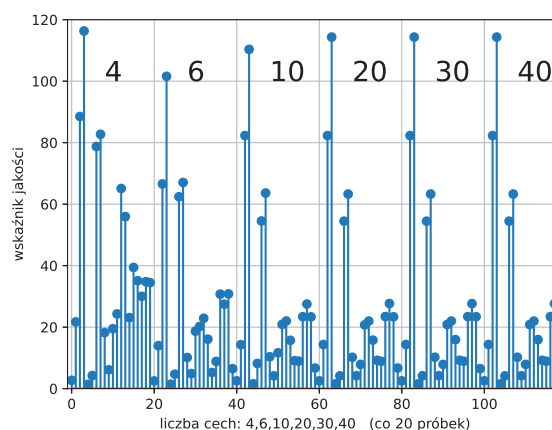
Zaprezentowane wyniki testów zostały zrealizowane z wykorzystaniem wyłącznie danych rzeczywistych (pomiarowych). Dotyczy to zarówno procesu przygotowania bazy obrazów wzorcowych, jak i testów działania układu odtwarzania położenia. Testy te wykorzystują przygotowaną bazę przetworzonych hodografów wzorcowych i realizują obliczenia na "nowych" hodografach prądu, a nie na tych wykorzystanych do wygenerowania obrazów wzorcowych. Wartości odstające nie były odrzucone.

Pierwsza część badań obejmowała zebranie danych pomiarowych niezbędnych do wyznaczenia hodografów. Maszyna badana była pobudzana napięciem wysokiej częstotliwości, druga maszyna wymuszała obrót wału z niską prędkością. Zostały zarejestrowane przebiegi prądów wysokiej częstotliwości dla pojedynczych obrotów wału, w kilku niezależnych sekwencjach. Równocześnie rejestrowano położenie wału (sinus i cosinus położenia) w celu walidacji wyników. Rejestracje danych przeprowadzono z przerwami pomiędzy poszczególnymi sekwencjami rejestracji, w celu zróżnicowania warunków początkowych, np. dla różnych wartości temperatury maszyny, różnych początkowych położenia wału itp.

Podczas pierwszej fazy testów wstępnie określono, jaka jest minimalna liczba cech, dla których wyniki mogą być poprawne i który zestaw pomiarowy może pełnić funkcję wzorca bazując na najlepszym wskaźniku jakości. W tym celu wyznaczono wskaźniki jakości dla różnej liczby cech ze zbioru $\{1, 2, 4, 6, 10, 20, 30, 40\}$ oraz możliwych połączeń *zestaw uczący – zestaw testowy* dla 10 zebranych sekwencji danych. Uzyskane wyniki przedstawia rysunek 6. Wstępna analiza wykazała, że liczba cech nie powinna być mniejsza niż 4. Dla mniejszej liczby wskaźniki jakości dla testowanych kombinacji danych pomiarowych cechują się wysokimi wartościami. Dodatkowo zauważono, że niektóre zestawy danych jako wzorcowe generują wysokie wartości wskaźnika jakości dla innych zestawów (ale mogą być z zadowalającą dokładnością poprawnie rozpoznawane,

jeżeli pełnią funkcję "nowych" danych), powinny być więc odrzucone ze zbioru możliwych wzorców.

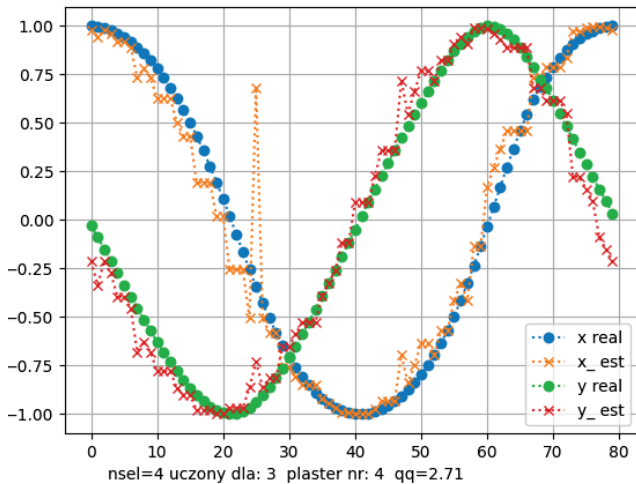
W kolejnej fazie testów zostały zbadane wskaźniki dla pozostałych, wybranych zestawów danych. Uzyskane wartości wskaźnika jakości przedstawiono na rysunku 7. Można zauważyć, że dla liczby cech 10 i więcej (są to



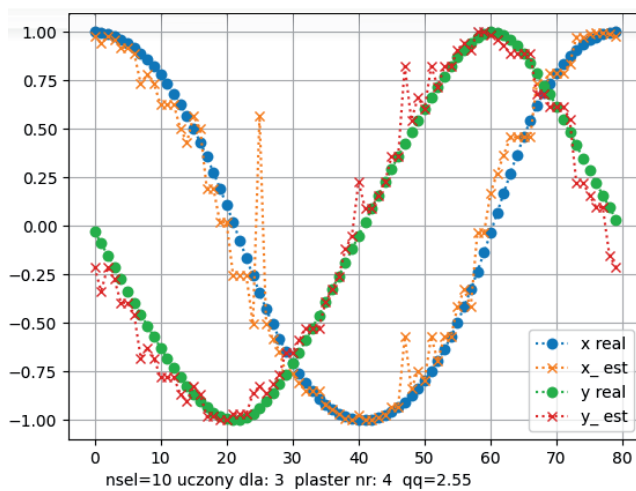
Rys. 7. Wskaźnik jakości dla wybranych zestawów pomiarowych

pomiary o indeksie od 40 do 120) wartości wskaźnika jakości nie zmienia się w istotny sposób dla tych samych sekwencji danych (liczba cech dla których wyznaczono wartość wskaźnika jakości opisana jest w górnej części ilustracji). Można więc założyć, że dla tego zadania użycie 10 cech jest wystarczające i zwiększanie tej liczby nie wpływa już na polepszenie wskaźnika jakości tego układu odtwarzania położenia. Na rysunku nie przedstawiono wartości wskaźnika jakości dla testów zestawów danych hodografów, które były źródłem obrazów wzorcowych. Dla tych kombinacji wskaźnik jakości jest równy zero.

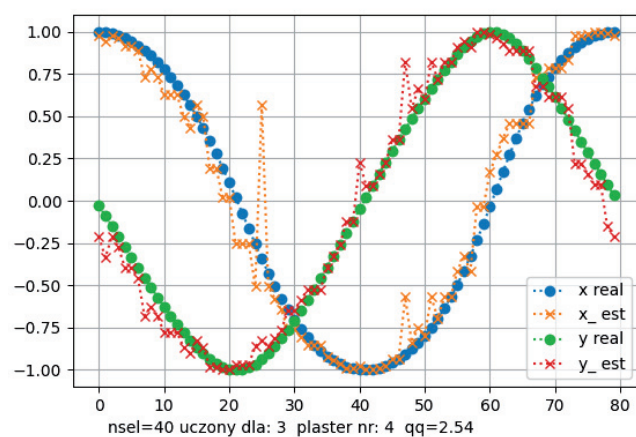
Przykład odtwarzania położenia gotowego systemu przedstawiają rysunki 8-10, dla sekwencji nr 3 jako danych (hodografów) wzorcowych i sekwencji nr 4 jako danych mierzonych, dla liczby cech $\{4, 10, 40\}$. Wielkości oznaczone jako x_{real} i y_{real} to wartość rzeczywista sinusa i cosinusa położenia, a wielkości x_{est} i y_{est} są wartościami odtworzonymi sinusa i cosinusa położenia. Oś x oznacza indeks wykrytego sektora (80 sektorów – obrazów wzorcowych). Poprawne działanie układu odtwarzania położenia z zadowalającą dokładnością jest widoczne, chociaż można zauważyć pewną liczbę wartości odstających. Ich ograniczenie lub eliminacja jest aktualnie jednym z problemów wymagających rozwiązania. Ponieważ pomiar kąta wyznaczany jest z ograniczoną rozdzielczością, miarą jakości może być dokładność wyznaczenia odpowiedniego sektora, czyli



Rys. 8. Sinus i cosinus położenia odtworzonego i rzeczywistego dla 4 cech dla zestawu uczącego nr 3 i zestawu testowego nr 4

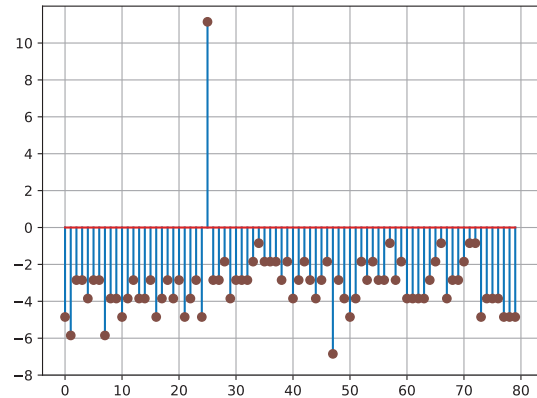


Rys. 9. Sinus i cosinus położenia odtworzonego i rzeczywistego dla 10 cech dla zestawu uczącego nr 3 i zestawu testowego nr 4



Rys. 10. Sinus i cosinus położenia odtworzonego i rzeczywistego dla 40 cech dla zestawu uczącego nr 3 i zestawu testowego nr 4

wyбір prawidłowego obrazu wzorcowego (lub obrazu wzorcowego znajdującego się w pobliżu). Rysunek 11 przedstawia przykład wizualizacji błędu odtwarzania położenia wału jako błędu odtwarzania sektora. W tym podejściu błąd jest interpretowany jako liczba oznaczająca, o ile sektorów jest przesunięte odtworzone położenie



Rys. 11. Błąd wyznaczania sektora dla dla 4 cech dla zestawu uczącego nr 3 i zestawu testowego nr 4 (dane z rys. 8)

względem poprawnie wyznaczonego sektora, dla każdego spośród wszystkich 80 sektorów, uwzględniając znak przesunięcia. Wartości te odpowiadają danym z rysunku 8.

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano koncepcję odtwarzania położenia wału PMSM dla zakresu prędkości zerowej z wykorzystaniem metody PCA. Dla zarejestrowanych w trakcie pracy systemu hodografów prądu, wyznacza się kierunki maksymalnej wariancji w danych oraz rzutuje na nową podprzestrzeń. Odpowiednio przetworzone można interpretować jako pojedyncze punkty w przestrzeni wielowymiarowej i znaleźć przetworzenie obrazu wzorcowego, do którego odległość jest najmniejsza. W ten sposób następuje dopasowanie aktualnego hodografu prądu do obrazu wzorcowego, który powiązany jest z sinusem i cosinusem położenia. Zastosowana koncepcja została pozytywnie zweryfikowana z użyciem danych eksperymentalnych. Metoda ta wykorzystuje nieintencjonalną zmienność indukcyjności w funkcji położenia wału, która może być wykorzystana do klasyfikacji sektora położenia wału. Dane wejściowe powinny być poddane wstępnemu przetworzeniu, m.in. skalowaniu i odrzuceniu wartości odstających.

Dalsze badania będą obejmować wprowadzenie wstępnego przygotowania danych wejściowych w celu wyeliminowania silnie zakłóconych sygnałów, co powinno wpłynąć na poprawę dokładności odtwarzania. Kolejnym zadaniem będzie weryfikacja działania układu odtwarzania położenia podczas pracy napędu.

Dodatek

Wybrane parametry badanej maszyny:

$$R_s = 0,72 \Omega$$

$$L_s = 0,40 \text{ mH}$$

$$\Psi = 4,6 \text{ V}@1000 \text{ obr/min}$$

$$U_{max} = 40 \text{ V}$$

$$U_{zas} = 24 \text{ V}$$

$$n_n = 6000 \text{ obr/min}$$

$$M_n = 0,274 \text{ Nm}$$

$$I_n = 7,1 \text{ A.}$$

Autorzy: dr hab. inż. Konrad Urbański, dr inż. Dariusz Janiszewski, Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej, Politechnika Poznańska, Pl. Marii Skłodowskiej - Curie 5, 60-965 Poznań, email: konrad.urbanski@put.poznan.pl, dariusz.janiszewski@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Baek S.-W. and Lee S. W., "Design optimization and experimental verification of permanent magnet synchronous motor used in electric compressors in electric vehicles," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 9, 2020. [web page] <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3235>
- [2] Qiu Z., Chen Y., Lin X., Cheng H., Kang Y., and Liu X., "Hybrid carrier frequency modulation based on rotor position to reduce sideband vibro-acoustics in pmsm used by electric vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 3, 2021. [web page] <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/3/100>
- [3] Łebkowski A., "Design, analysis of the location and materials of neodymium magnets on the torque and power of in-wheel external rotor pmsm for electric vehicles," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018. [web page] <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2293>
- [4] Vas P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, ser. Monographs in electrical and electronic engineering. Oxford ; New York: Oxford University Press, 1998, no. 42.
- [5] Siwek P. and Urbanski K., "Improvement of the Torque Control Dynamics of the PMSM Drive Using the FOC-Controlled Simple Boost QZSDMC Converter," in *2018 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*. Miedzydroje: IEEE, Aug. 2018, pp. 29–34. [web page] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8486123/>
- [6] Wang Z., Lu Q., Ye Y., Lu K., and Fang Y., "Investigation of PMSM Back-EMF Using Sensorless Control with Parameter Variations and Measurement Errors," *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 88, no. 8, pp. 182–186, 2012.
- [7] Nair S. V., Hatua K., Prasad N. V. P. R. D., and Reddy D. K., "A Quick I-f Starting of PMSM Drive With Pole Slipping Prevention and Reduced Speed Oscillations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6650–6661, Aug. 2021. [web page] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9130898/>
- [8] Corley M. J. and Lorenz R. D., "Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 4, pp. 784–789, 1998.
- [9] Schroedel M., "Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the "INFORM" method," in *Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96*, vol. 1. IEEE, Oct. 1996, pp. 270–277 vol.1.
- [10] Zentai A. and Daboczi T., "Improving INFORM calculation method on permanent magnet synchronous machines," in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007*. IEEE, May 2007, pp. 1–6.
- [11] Abry F., Zgorski A., Lin-Shi X., and Retif J. M., "Sensorless position control for SPMSM at zero speed and acceleration," in *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*. IEEE, 2011, pp. 1–9.
- [12] Urbanski K. and Janiszewski D., "Position estimation at zero speed for PMSMs using artificial neural networks," *Energies*, vol. 14, no. 23, 2021. [web page] <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/8134>
- [13] Turk M. and Pentland A., "Eigenfaces for Recognition," *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 3, no. 1, pp. 71–86, Jan. 1991.
- [14] Dagher I. and Nachar R., "Face recognition using IPCA-ICA algorithm," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 28, no. 6, pp. 996–1000, Jun. 2006. [web page] <http://ieeexplore.ieee.org/document/1624362/>
- [15] He R., Hu B., Zheng W., and Kong X., "Robust Principal Component Analysis Based on Maximum Correntropy Criterion," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 20, no. 6, pp. 1485–1494, Jun. 2011. [web page] <http://ieeexplore.ieee.org/document/5680649/>
- [16] Siwek K. and Osowski S., "Autoencoder versus PCA in face recognition," in *2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Kutna Hora: IEEE, Sep. 2017, pp. 1–4. [web page] <http://ieeexplore.ieee.org/document/8093043/>
- [17] Rondon C. V. N., Carvajal D. A. C., Delgado B. M., Casadiego S. A. C., and Ibarra D. G., "Component Dimensionality Reduction in Dermoscopic Images using a Machine Learning Technique with Validation By Similarity Metrics," in *2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT)*. Mumbai, India: IEEE, Apr. 2022, pp. 1–6. [web page] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9824665/>
- [18] Matzen T. N. and Rasmussen P. O., "Modelling magnetic saturation effects in IPMSMs for use in sensorless saliency based methods," in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Sep. 2007, pp. 1–8.
- [19] Beltran-Pulido A., Aliprantis D., Billionis I., Munoz A. R., Leonardi F., and Avery S. M., "Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis in a Nonlinear Finite-Element Model of a Permanent Magnet Synchronous Machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 4, pp. 2152–2161, Dec. 2020. [web page] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9115850/>
- [20] Vieira P., Bobi M. A. S., Gomes C. R., Gomes H. S., and Nascimento M. P. d., "Vibration monitoring of electric generators without sensor dedicated," in *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mar. 2010, pp. 451–456.
- [21] Ebrahimi B. M., Roshtkhari M. J., Faiz J., and Khatami S. V., "Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 2041–2052, Apr. 2014.
- [22] Cattell R. B., "The scree test for the number of factors," *Multivariate behavioral research*, vol. 1, no. 2, pp. 245–276, 1966.