DOI: https://doi.org/10.53052/9788366249974.18

Sebastian HAŃDEREK[1], Daniel JANCARCZYK

Opiekun naukowy: Daniel JANCARCZYK[2]

BADANIE I ANALIZA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z BEZSZCZOTKOWYM SERWOSILNIKIEM

Streszczenie: Tematyka podjęta w artykule skupia się wokół zagadnień dotyczących bezszczotkowych serwosilników, zasady ich działania, sposobów sterowania oraz podstawowych trybów pracy. Pierwsza część artykułu to wprowadzenie teoretyczne. Kolejno opisano wykonany projekt stanowiska badawczego. Trzecia część odnosi się do programu sterującego trybami pracy serwosilnika. W ostatniej części przedstawiono badania oraz analizę układu napędowego.

Słowa kluczowe: serwosilnik, serwonapęd, układ napędowy, automatyka, sterowanie

STUDY AND ANALYSIS OF A DRIVE SYSTEM WITH A BRUSHLESS SERVO MOTOR

Summary: The subject of the article focuses on brushless servo motors, principles of their operation, control methods and basic operating modes. The first part of the article is a theoretical introduction. The completed design of the test stand is described successively. The third part relates to the program that controls the operating modes of the servo motor. The last part presents the research and analysis of the drive system..

Keywords: servo motor, servo drive, control system, automation

1. Wprowadzenie

Serwonapędy są układami wykonawczymi stosowanymi w automatyce służącymi do realizowania ruchów obrotowych lub liniowych, w których wymagane jest precyzyjne pozycjonowanie i przemieszczanie się między konkretnymi punktami, a także tam, gdzie potrzebne jest sterowanie prędkością lub momentem obrotowym. Serwonapędem nie jest jedno urządzenie, lecz ich zestaw, który składa się z serwosilnika, serwowzmacniacza oraz enkodera. Serwowzmacniacz otrzymuje

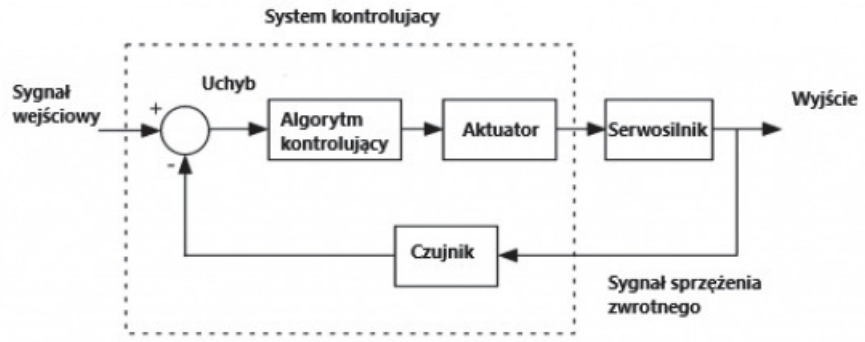
[1] Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, e-mail: shanderek@gmail.com

[2] dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, e-mail: djancarczyk@ath.bielsko.pl

niskonapięciowe sygnały, które zależnie od typu aplikacji są komendami pozycji, prędkości czy momentu obrotowego. Na podstawie takich informacji oraz danych uzyskanych z enkodera generuje on wzmocnione sygnały zrozumiałe dla serwosilnika w celu uzyskania wymaganego efektu np. uzyskaniu zadanej prędkości wału silnika. Enkodery monitorują aktualne położenie wału silnika, dzięki czemu pozwalają na kompensację pozycji wału i tym samym zapobieganie utracie synchronizacji przez silnik np. w momencie nagłych zmian obciążenia. Serwosilnik jest elementem wykonawczym realizującym ruchy o odpowiednich przemieszczeniach i przyspieszeniach na podstawie informacji otrzymanych z serwowzmacniacza. Kiedyś serwosilniki pełniły rolę napędów pomocniczych skonstruowanych do zastosowań w obrabiarkach. Nazwa serwosilnik wywodzi się od słowa w języku łacińskim „servus", które przetłumaczone na język polski oznacza „sługę" [1].

Obecnie w przemyśle znajdują się różne typy serwosilników. Dużą popularnością cieszą się silniki prądu przemiennego z magnesami trwałymi i enkoderami o wysokiej rozdzielczości. Serwosilniki posiadają dużą ilość zastosowań, napędy znajdują zastosowanie tam, gdzie wymagane są szybkie i powtarzalne ruchy, wysoka dynamika pracy, precyzja czy synchronizacja kilku osi np. w robotach przemysłowych.

Praca serwonapędu odbywa się w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Sygnał wyjściowy serwomechanizmu (prędkość, położenie lub moment obrotowy) jest mierzony i porównywany z zadanym sygnałem odniesienia na wejściu. W wyniku ich porównania obliczany jest występujący uchyb. Ten z kolei pozwala na precyzyjną korekcję powstałych odchyłek spowodowanych zakłóceniami czy też bezwładnością układów mechanicznych wchodzących w skład systemu ruchowego. Sprzężenie zwrotne jest realizowane np. za pomocą zamontowanego na wale serwosilnika enkodera, który wykrywa zmiany położenia kątowego wału i przekazuje informacje do serwowzmacniacza. Ten w czasie rzeczywistym dokonuje zmian parametrów tak, aby serwonapęd kompensował uchyb i spełniał żądane wymagania [2, 3]. Schemat blokowy serwomechanizmu został przedstawiony na rys. 2.



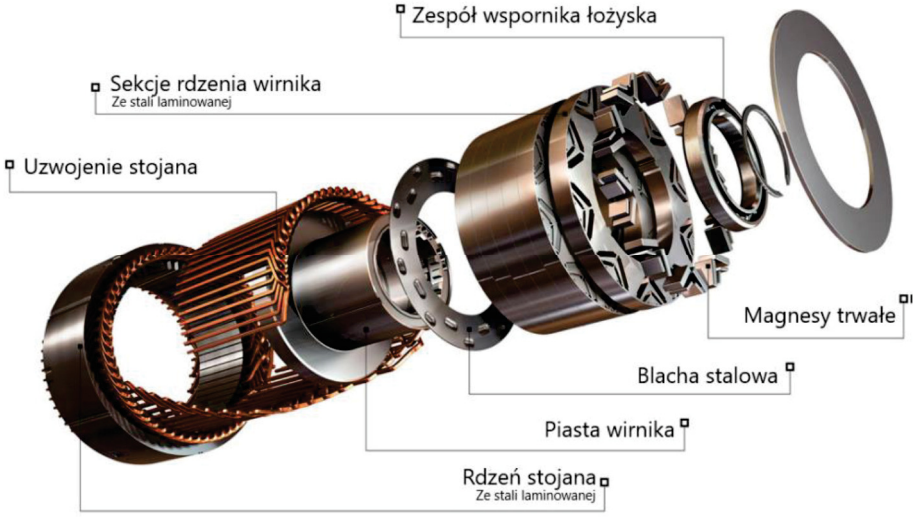
Rysunek 1. Schemat blokowy serwomechanizmu [4]

Podstawowa architektura serwomechanizmu zawiera [5]:

- sterownik ruchu, generujący wartości nastaw i zamyka pętle sprzężenia zwrotnego pozycji lub położenia,
- wzmacniacz, przekształcający sygnał kontrolny sterownika ruchu na sygnał prądowy lub napięciowy,

- element wykonawczy, będący najczęściej silnikiem elektrycznym,
- element pomiarowy, wykorzystywany do sprzężenia zwrotnego taki jak np. enkoder lub resolwer,
- elementy mechaniczne do przekształcania ruchu wykonawczego takiej jak przekładnie.

Silnik synchroniczny to jeden z najpopularniejszych typów silników stosowanych do budowy serwonapędów. Jest to silnik prądu przemiennego, w którym wał wirnika w stanie ustalonym obraca się z prędkością obrotową równą prędkości wirującego pola magnetycznego wytworzonego przez nieruchome uzwojenia stojana. Jednym z wariantów takiego silnika jest silnik z wbudowanymi magnesami trwałymi (z ang. PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor). Ten typ silnika posiada magnesy zamontowane na wirniku oraz uzwojenie twornika umieszczone na stojanie. Zatem prąd twornika nie jest przekazywany przez pierścienie ślizgowe i szczotki lub komutator. Te z kolei są elementami silników elektrycznych, które wymagają najwięcej kontroli, ponieważ w 90% procedura konserwacji silników dotyczy połączenia ślizgowego. W silnikach komutatorowych prądu stałego straty mocy występują przede wszystkim na wirniku, co ogranicza przenoszenie ciepła, a w konsekwencji gęstość prądu uzwojenia twornika. W przypadku silników z magnesami trwałymi praktycznie wszystkie straty mocy występują w stojanie, gdzie ciepło może być w łatwy sposób odprowadzone poprzez żebrową ramę lub w większych maszynach - chłodzenie wodne [6-8].



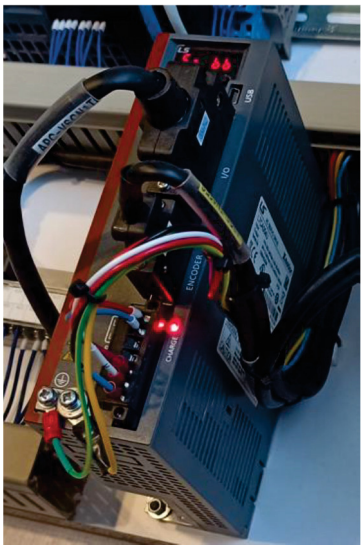
Rysunek 2. Konstrukcja wnętrza silnika synchronicznego z magnesami trwałymi [11]

Charakterystycznym dla silników PMSM jest płynny ruch w całym zakresie prędkości obrotowej, pełna kontrola momentu obrotowego przy zerowej prędkości, a także możliwość szybkiego przyspieszania i zwalniania. W celu optymalizacji sterowania silnikami z magnesami trwałymi stosuje się technologie sterowania wektorowego nazywane często sterowaniem zorientowanym polowo. Podstawową ideą stojącą za tym algorytmem sterowania to rozdzielenie prądu stojana na część generującą pole

magnetyczne oraz część generującą moment obrotowy. Po rozdzieleniu, każdym ze składników można sterować oddzielnie [9, 10].
Budowa wnętrza silnika synchronicznego z magnesami trwałymi została przedstawiona poniżej na rys. 1.

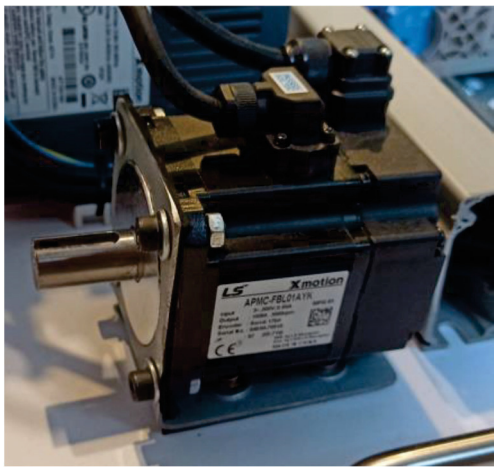
2. Stanowisko badawcze

Zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze składa się z: serwowzmacniacza L7CA00U firmy LS Mecapion Co, serwosilnika APMC-FBL01AYK firmy LS Mecapion Co, sterownika PLC Siemens S7-1200 oraz panelu HMI Siemens KTP400. Zastosowany serwowzmacniacz posiada czytelny i intuicyjny interfejs użytkownika, który w połączeniu z dedykowanym oprogramowaniem DriveCM sprawiają, że jest łatwy w obsłudze, konfiguracji i parametryzacji, a zarazem gwarantuje dynamikę działania i precyzję. Spora ilość wbudowanych funkcji pozwala na wprowadzanie wysokiego standardu automatyzacji procesu przy zachowaniu konkurencyjnego stosunku ceny do jakości. Poglądowe zdjęcie zamontowanego i podłączonego do układu serwowzmacniacza przedstawiono na rys. 3.



Rysunek 3. Zamontowany i podłączony do układu serwowzmacniacz [opracowanie własne]

Użyty serwosilnik (rys. 4.) jest kompatybilny z wyżej wymienionym serwowzmacniaczem. Jego moc znamionowa wynosi 100 W, z kolei prędkość znamionowa to 3000 obr/min. Wbudowany absolutny magnetyczny enkoder pozwala na precyzyjne pozycjonowanie wału silnika. Enkoder ten jest 17 bitowy co daje rozdzielczość, aż do 131072 impulsów na obrót.

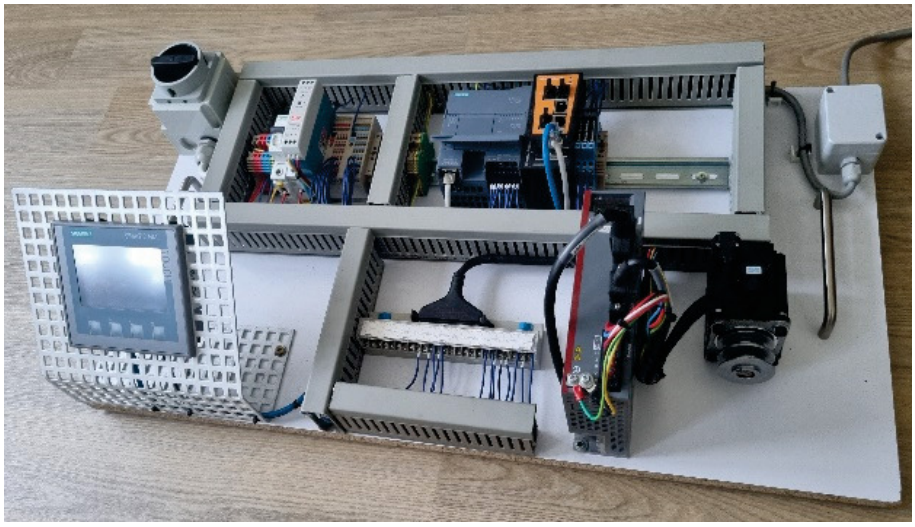


Rysunek 4. Widok zastosowanego serwosilnika [opracowanie własne]

Do sterowania serwosilnikiem zastosowano sterownik PLC SIMATIC S7-1200 z jednostką centralną CPU 1212C DC/DC/DC (rys. 5.). Jego prostota, niewielkie gabaryty oraz łatwość w programowaniu są wystarczające do wykorzystania go w projekcie, a także wykonania algorytmu sterującego. Wykorzystany 4 calowy panel dotykowy KTP 400 Basic (rys. 5.) czyni sterowanie łatwiejszym i bardziej intuicyjnym. Za pomocą utworzonej wizualizacji można zmieniać poszczególne parametry, wybierać tryb pracy oraz odczytywać aktualne stany zmiennych.

Rysunek 5. Widok sterownika PLC oraz panelu HMI [opracowanie własne]

Postać finalna wykonanego stanowiska przedstawiona została na rys. 6.



Rysunek 6. Wykonane stanowisko badawcze [opracowanie własne]

3. Algorytm sterujący

Badany serwowzmacniacz posiada trzy sposoby sterowania pracą serwosilnika. Pierwszym z nich jest detykowane oprogramowanie DriveCM, które umożliwia połączenie się z kontrolerem za pomocą interfejsu USB. Metoda ta pozwala na konfigurację i parametryzację silnika i kontrolera, a ponadto dzięki bardzo czytelnemu i intuicyjnemu interfejsowi jest to najłatwiejszy sposób na testowanie i wykonywanie prostych ruchów ręcznych o zadanych parametrach. Drugim ze sposobów jest wykorzystanie złącza I/O. Sygnały z serwowzmacniacza wyprowadzone są na specjalną płytkę sygnałową, posiadającą 50 zacisków, z których większość ma przypisane programowalne funkcje. Dzięki takiemu rozwiązaniu można regulować pracę serwa za pomocą konfigurowalnych wejść i wyjść dwustanowych, czy również sygnałów analogowych. Trzecim ze sposobów sterowania jest wykorzystanie komunikacji szeregowej RS-422, która pozwala zarówno na parametryzację serwa, bez konieczności podłączania się komputerem jak i zadawanie sygnałów sterujących.
W prezentowanym stanowisku zdecydowano się na zastosowanie drugiej metody sterowania, z wykorzystaniem dedykowanego złącza I/O. W tym celu wykorzystano następujące sygnały cyfrowe:
Wejścia cyfrowe DI:

- DI-1 – SV_ON - załączenie serwonapędu. Silnik staje się operacyjny w momencie, gdy wysterowany jest ten sygnał. Jego wyłączenie powoduje przejście w stan biegu jałowego,
- DI-2 – SPD1 - żądanie prędkości w zależności od stanu wejść SPD1, SPD2 i SPD3 w trybie prędkościowym. Zasadę działania przedstawia tabela prawdy (tabela 1.) poniżej,
- DI-3 – SPD2 - tak samo jak w przypadku SPD1,

- DI-4 – JSTART - start silnika w trybie JOG,
- DI-5 – JDIR - zmiana kierunku obrotów wirnika w trybie JOG,
- DI-6 – A-RST - wyłączenie alarmów serwowzmacniacza.

Wyjścia cyfrowe DO:

- DO-1 – Alarm - sygnalizacja wystąpienia alarmu serwonapędu,
- DO-2 – TGON - sygnalizacja przekroczenia ustawionej prędkości,
- DO-3 – ZSPD - sygnalizacja osiągnięcia prędkości zerowej – zatrzymanie się silnika.

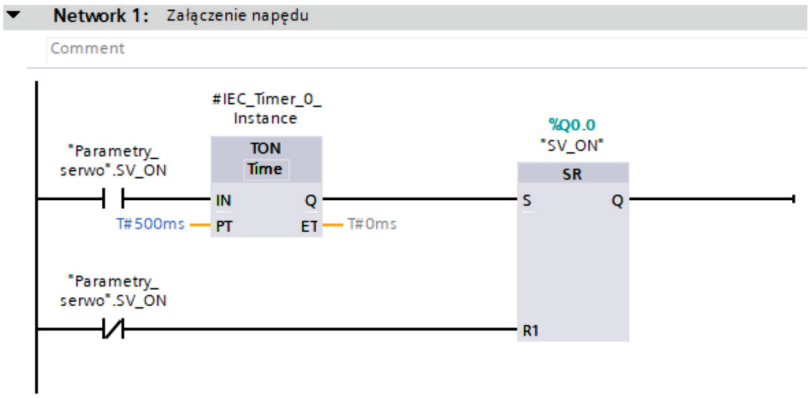
W tabeli 1 została przedstawiona tabela prawdy sterowania trybem prędkościowym.

Tabela 1. Tabela prawdy trybu prędkościowego [opracowanie własne]

Stany wejść			Prędkość obrotowa
SPD3	SPD2	SPD1	[obr/min]
0	0	0	0
0	0	1	500
0	1	0	2000
0	1	1	4000
1	0	0	rezerwa
1	0	1	rezerwa
1	1	0	rezerwa
1	1	1	rezerwa

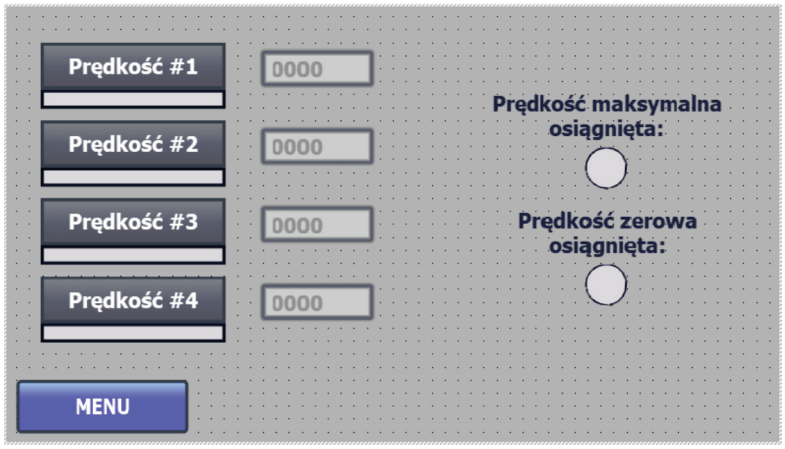
Z uwagi na ograniczoną liczbę wyjść cyfrowych sterownika PLC wykorzystano tylko dwa wejścia sterujące SPD, których kombinacje pozwalają na wysterowanie czterech różnych prędkości. Prędkości te można dowolnie ustawiać w programie konfiguracyjnym.

Algorytm sterujący serwonapędem został napisany w środowisku TIA Portal V15.1. Obejmuje on zarówno sterowanie z poziomu sterownika PLC jak i obsługę panelu HMI. Oprogramowani to pozwala na pisanie programów w językach: LAD, FBD czy SCL, a dzięki prostemu i intuicyjnemu interfejsowi umożliwia użytkownikowi szybkie wdrożenie się w środowisko programistyczne. Fragment kodu odpowiadający za włączenie napędu przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 7.).



Rysunek 7. Network 1 – włączenie napędu [opracowanie własne]

Zgodnie z rys. 7. pierwszy network bloku funkcyjnego Sterowanie odpowiada za załączenie napędu. Zmienna SV_ON została przypisana do wyjścia sterownika %Q0.0, a to z kolei połączone jest z uprzednio skonfigurowanym pierwszym wejściem cyfrowym DI-1 na płytce I/O serwowzmacniacza. Załączanie i wyłączanie odbywają się z poziomu panelu HMI. Po wysterowaniu zmiennej „Parametry_serwo".SV_ON następuje uruchomienie bloku timera zliczającego 500 ms. Po upływie tego czasu SV_ON zmienia swój stan z 0 na 1. Wyłączenie napędu na panelu powoduje jego natychmiastowe zatrzymanie i przejście silnika w stan wolnego wybiegu. Zastosowanie timera zapobiega możliwości zbyt częstego przełączania stanów napędu, które w konsekwencji mogłoby spowodować uszkodzenie serwowzmacniacza.
W trybie prędkościowym prędkość silnika ustalana jest w zależności od stanów bitów SPD. Istnieje możliwość wybrania, aż do 8 różnych kombinacji możliwych wartości w zależności od tabeli prawdy (Tabela 1.). Z poziomu panelu HMI użytkownik ma możliwość wyboru odpowiedniej wartości zadanej prędkości obrotowej. Dodatkowo ruch silnika odbywa się tylko w jednym uprzednio ustawionym kierunku i rozpoczyna się w momencie, gdy co najmniej jeden z bitów SPD przyjmuje wartość 1. Zatrzymanie silnika następuje w momencie, kiedy wszystkie te bity wynoszą 0. Widok ekranu HMI umożliwiającego sterowanie prędkością przedstawiono na rysunku (rys. 8.).



Rysunek 8. Tryb prędkościowy - wizualizacja [opracowanie własne]

4. Badanie i analiza pracy serwonapędu

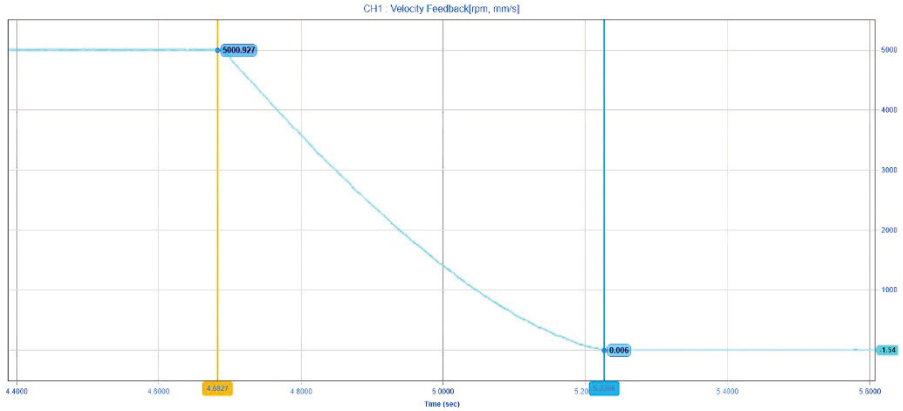
Pierwszym wykonanym badaniem było porównanie prędkości obrotowej silnika zmierzonej za pomocą specjalistycznego czujnika do pomiaru prędkości – tachometru, prędkości wskazywanej w czasie rzeczywistym przez serwowzmacniacz oraz prędkości zadanej. Do wykonania pomiaru prędkości wykorzystano tachometr PeakTech2795. Jego zakres pomiarowy wynosi 2-199999 obr/min, dokładność pomiaru 0,05 %, a z kolei rozdzielczość pomiaru to 0,001 obr/min. Wyniki pomiarów zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Pomiar prędkości obrotowej wału silnika [opracowanie własne]

Prędkość zadana	**Wskazanie serwowzmacniacza**	**Wskazanie tachometru**
[obr/min]		
50	50	49
100	100	99
200	201	200
500	502	499
1000	1000	1000
1500	1501	1499
2000	2000	2000
2500	2500	2500
3000	2997	3000
3500	3501	3500
4000	4002	4000
4500	4497	4500
5000	5005	5000

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że prędkości odczytywane z oprogramowania po osiągnieciu przez wał silnika prędkości zadanej oscylują wokół prędkości docelowej, z kolei pomiary z tachometru są niemalże identyczne jak prędkości zadane. Pomimo, lekkich oscylacji pomiaru programowego daje on w dalszym ciągu bardzo zbliżone do rzeczywistości wyniki i można przyjąć je za prawdziwe.

Kolejnym przeprowadzonym badaniem był pomiar czasu zatrzymania awaryjnego serwosilnika z wykorzystaniem hamulca dynamicznego. Hamowanie dynamiczne serwosilnika to metoda gwałtownego hamowania silnika poprzez spowodowanie zwarcia elektrycznego co najmniej dwóch faz. Obwody hamulca dynamicznego są zintegrowane z serwowzmacniaczem, dlatego hamowanie można w łatwy sposób wykonać z poziomu programu DriveCM. Pomiary czasu zostały wykonane dla następujących prędkości obrotowych: 500, 1000, 2000, 4000 oraz 5000 obr/min. Dla każdej z prędkości wykonano po trzy pomiary, a następnie uśredniono je. Ponadto zbadano w jaki sposób na czas zatrzymania się serwosilnika wpływa obciążenie. W tym celu, na wale umieszczono koło pasowe o masie 300g. Procedura hamowania została zaprogramowana jako stan alarmowy wyzwalany naciśnięciem wyłącznika awaryjnego. Sposób przeprowadzania pomiarów przy pomocy oprogramowania DriveCM przedstawiono poniżej (rys. 9.). Po wyznaczeniu charakterystyki hamowania na wykresie umieszcza się dwa markery. Pierwszy z nich znajduje się przy zboczu odpadającym prędkości zadanej, z kolei drugi w momencie powrócenia do prędkości zerowej. Różnica między tymi dwoma markerami jest badanym czasem zatrzymania się awaryjnego serwosilnika.



Rysunek 9. Metoda pomiaru czasu zatrzymania silnika przy hamowaniu dynamicznym [opracowanie własne]

Wyniki pomiarów umieszczone zostały w tabeli 3.

Tabela 3. Pomiar czasu zatrzymania awaryjnego z wykorzystaniem hamulca dynamicznego [opracowanie własne]

Prędkość obrotowa	**Nr pomiaru**	**Czas zatrzymania awaryjnego**	
		Bez obciążenia	**Z obciążeniem**
[obr/min]	**-**	**[ms]**	
500	T1	15	18
	T2	13	17
	T3	14	19
	Tśr	**15,00**	**18,00**
1000	T1	15	31
	T2	19	34
	T3	16	32
	Tśr	**16,67**	**32,33**
2000	T1	21	65
	T2	23	57
	T3	20	62
	Tśr	**21,33**	**61,33**
4000	T1	47	133
	T2	48	138
	T3	51	132
	Tśr	**48,67**	**134,33**
5000	T1	59	191
	T2	64	187
	T3	55	200
	Tśr	**59,33**	**192,67**

Z tabeli 3 można odczytać, że hamowanie z wykorzystaniem hamulca dynamicznego jest na tyle krótkie, że czas ten można wyrazić w milisekundach. Zatrzymanie serwosilnika przy prędkości 500 obr/min trwa tylko 14 ms, gdy wał silnika nie jest obciążony. Dołożenie do niego koła pasowego wydłuża czas hamowania do 18 ms. Wraz ze wzrostem prędkości czasy te zwiększają się. Przykładowo dla prędkości 2000 obr/min czasy hamowania wynoszą odpowiednio 21 ms i 61 ms dla pomiarów bez oraz z założonym obciążeniem. Maksymalna prędkość jaką może osiągnąć badany serwosilnik to 5000 obr/min. Przy takiej prędkości hamowanie nieobciążonego silnika w dalszym ciągu daje imponujący wynik, zaledwie 59 ms. Z kolei zatrzymanie serwosilnika z kołem pasowym, w takim przypadku trwa już 193 ms. Zauważyć można, że dołożone obciążenie przy prędkości 1000 obr/min wydłuża czas hamowania prawie dwukrotnie, a przy jeszcze większych prędkościach nawet trzykrotnie i więcej.

5. Podsumowanie i wnioski

Opisane w artykule stanowisko do badania serwosilników obecnie pełni funkcję stanowiska dydaktycznego w laboratorium Katedry Informatyki i Automatyki. Wykorzystywane jest zarówno do nauki programowania sterowników PLC, paneli HMI, jak i programowania układów napędowych z bezszczotkowymi serwosilnikami. Przeprowadzone badania serwosilnika dowiodły, że można nim sterować z wysoką dokładnością. Serwonapęd dąży do wykonania zadanych mu poleceń. Badanie trybu prędkościowego wskazało, że prędkości rzeczywiste serwosilnika są niemalże identyczne do tych otrzymywanych jako informacje zwrotne z serwowzmacniacza, a minimalne oscylacje wokół prędkości zadanej spowodowane są czułością enkodera. Badanie zatrzymania awaryjnego udowodniło natomiast, że czas hamowania serwosilnika może wynosić od kilkunastu milisekund przy małych prędkościach bez obciążenia, aż do 300 milisekund przy maksymalnych obrotach i obciążeniu wału silnika. Dla porównania, czas hamowania serwosilnika przy pomocy wolnego wybiegu z prędkości maksymalnej wynosi ok. 3 sekundy. Można więc stwierdzić, że czas zatrzymania awaryjnego z zastosowaniem metody hamowania dynamicznego badanego serwosilnika jest znacząco krótszy.

LITERATURA

1. Serwis internetowy: *https://www.sew-eurodrive.pl/produkty/silniki/silnikiserwo/servomotoren_3.html, 14.06.2022*.
2. KRYKOWSKI K.: Silniki PB BLDC, BTC, Legionowo, 2015, 50-75.
3. Serwis internetowy: *https://www.elmark.com.pl/blog/co-to-jest-serwonaped, 23.06.2022.*
4. Serwis internetowy: https://www.mphysicstutorial.com/2021/01/servomechanism-in-control -system-advanced-electronics.html, *02.07.2022.*
5. BUDZIŁOWICZ A.: Zastosowanie Silników BLDC we współczesnych napędach elektrycznych i w motoryzacji, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, R.16, nr6, 2015, 49-52.

6. SHCHUR I., JANCARCZYK D.: Electromagnetic Torque Ripple in Multiple Three-Phase Brushless DC Motors for Electric Vehicles, Electronics 2021, 10, 3097.
7. GORYCA Z.: Metody sterowania silników BLDC, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Vol. 66, nr 32, t. 1, 2012, 32-47.
8. DOMORACKI A., KRYKOWSKI K.: Silniki BLDC - klasyczne metody sterowania, Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe, Nr 72, 2005, 155.
9. SIKORA A., ZIELONKA A.: Stanowisko do badania silnika BLDC z możliwością zadania prędkości i momentu obciążenia, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały 2012/66/32, 2012, 291-297.
10. Serwis internetowy: *https://pl.farnell.com/motor-control-permanent-magnet-sync-motor-pmsm-technology, 12.06.2022.*
11. Serwis internetowy: *https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm, 17.06.2022.*