

*obrabiarki sterowane numerycznie,  
integracja funkcji diagnostycznych, sterowanie serwonapędów PMSM  
otwarta architektura systemu sterowania*

Michał BONISŁAWSKI, Rafał PAJDZIK, Krzysztof PIETRUSEWICZ\*

## **SZYBKIE PROTOTYPOWANIE ALGORYTMÓW STEROWANIA NAPĘDAMI ZESPOŁÓW POSUWOWYCH STOLIKA X–Y FREZARKI Z SILNIKAMI SYNCHRONICZNYMI PRĄDU ZMIENNEGO ZE WZBUDZENIEM OD MAGNESÓW TRWAŁYCH**

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych nad stanowiskiem do prototypowania algorytmów sterowania (testowania regulatorów prędkości, położenia, algorytmów dwuosioowego generowania trajektorii) zbudowanym w ramach projektu badawczego MNiSW nr N N502 336936 „Opracowanie konstrukcji i badania doświadczalne mechatronicznego obrabiarkowego zespołu posuwowego z napędem sterowanym inteligentnym modułowym układem wykonawczym”.

Stanowisko to, realizując ideę szybkiego prototypowania pozwala (z zastosowaniem otwartego interfejsu użytkownika oprogramowania Matlab/Simulink) m.in. na integrację funkcji diagnostycznych procesu obróbki skrawaniem w ramach algorytmu regulacji prędkości i/lub położenia. Stanowisko pozwala również na implementację autorskich rozwiązań z obszaru regulacji prądu. W opracowanym stanowisku możliwe jest monitorowanie temperatury elementów korpusowych obrabiarki, drgań, sygnałów wibroakustycznych oraz innych sygnałów, dzięki którym serwonapędy w osiach posuwu informacje na temat sterowanego obiektu mogą uwzględniać w wypracowywanym prawie sterowania silnikami.

### **1. DYNAMICZNY UKŁAD OUPN**

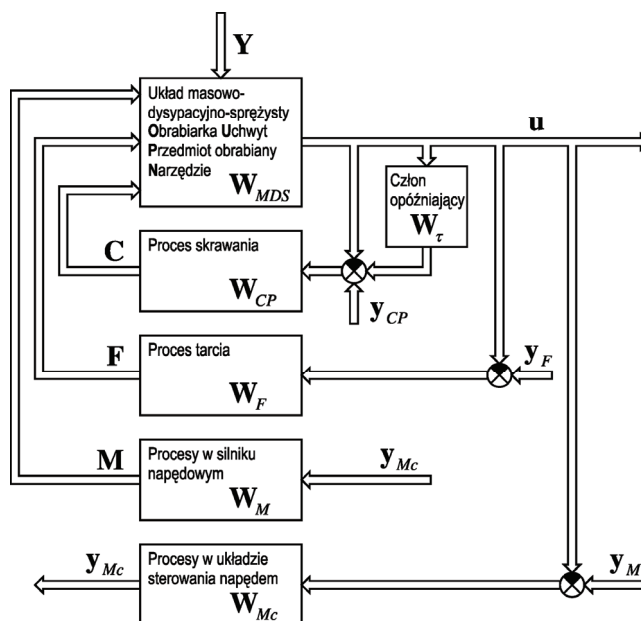
#### **1.1. SCHEMAT BLOKOWY DYNAMICZNEGO UKŁADU OUPN Z UWZGLĘDNIENIEM NAPĘDU ZESPOŁU POSUWOWEGO**

Na rysunku 1 przedstawiono główne komponenty układu OUPN [8] z uwzględnieniem struktury zastosowanego podsystemu sterowania układem napędowym zespołu posuwowego obrabiarki. W dynamicznym układzie OUPN sygnały wejściowe jak

---

\* Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin.

i wyjściowe mają charakter wektorowy, zaś sam układ jest układem wielowymiarowym.



Rys. 1. Dynamiczny układ OUPN z uwzględnieniem podsystemu sterowania napędami  
Fig. 1. Dynamical Machine Tool-Workpiece-Tool System with the motion control taken into account

W pracach [9, 10] wiele uwagi poświęcono zagadnieniu wibrostabilności układu z rysunku 1 – stabilności procesu skrawania, na który składają się następujące elementy: transmitancja procesu skrawania  $W_{CP}$ , transmitancja członu opóźniającego  $W_\tau$ , które wspólnie służą zamodelowaniu obróbki skrawaniem z tzw. regeneracją śladu. Na sterowanie wielowymiarowym obiektem dynamicznym  $W_{MDS}$  mają wpływ: siła skrawania  $C$ , siły pochodzące od zachodzących w maszynie procesów tarcia  $F$ , oraz najistotniejsza z punktu widzenia niniejszej pracy siła wytwarzana przez układ napędowy zespołów posuwowych  $M$ . Obiekt poddawany jest również wpływowi zewnętrznych zakłóceń ( $Y$ ) i/lub perturbacji parametrów modelu.

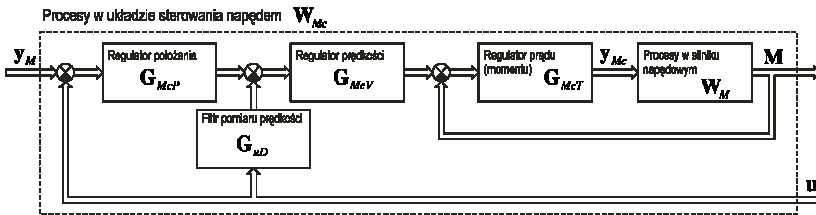
Równanie, opisujące działanie układu z rysunku 1 (w torze sterowania napędami zespołów posuwu) dane jest w następującej formie:

$$u = \{I + W_{MDS}[W_{CP}(I - W_\tau) + W_F + W_M W_{MC}]\}^{-1} W_{MDS} W_M W_{MC} y_M + \{I + W_{MDS}[W_{CP}(I - W_\tau) + W_F + W_M W_{MC}]\}^{-1} Y \quad (1)$$

Na rysunku 2 zamieszczono typową spotykaną w serwonapędach obrabiarek sterowanych numerycznie strukturę sterowania (położenie – prędkość – prąd).

## 1.2. MOŻLIWOŚCI POPRAWY JAKOŚCI GEOMETRYCZNO-RUCHOWEJ OBRABIARKI

Celem opracowania przedstawionego tutaj stanowiska badawczego cyfrowego serwonapędu w strukturze sterowania układem dynamicznym OUPN było wskazanie możliwych (i technologicznie współcześnie dostępnych) sposobów poprawy jakości geometryczno-ruchowej nowych i modernizowanych obrabiarek. Interfejs zbudowanego układu napędowego zapewnia otwartość interfejsu, pozwalającą na implementację dowolnych funkcji diagnostycznych i/lub sterujących, zarówno z poziomu procesora głównego, jak i zewnętrznych systemów kontrolno-pomiarowych.



Rys. 2. Typowa struktura kaskadowa serwonapędu obrabiarki  
Fig. 2. Typical cascaded structure of the machine tool servodrive

### 1.2.1. ZAPEWNIENIE ODPORNOŚCI REGULACJI PRĘDKOŚCI

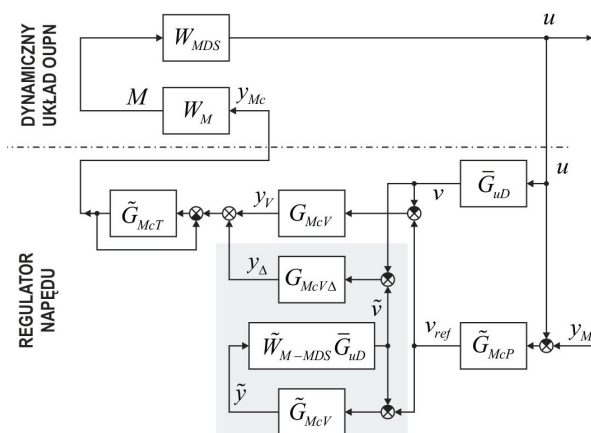
Prace nad regulacją odporną o wielu stopniach swobody prowadzone są przez zespół projektowy od blisko 14 lat [18]. Zapewnienie wysokiej jakości prędkości ruchu podczas obróbki skrawaniem stanowi [6, 15] kluczowy powód dla podjęcia prac nad dostosowaniem algorytmu typu model-following control do sterowania napędami zespołu posuwowego obrabiarki [5, 12, 13], również zgodnie z podejściem charakterystycznym dla sterowania złożonymi obiektami nieliniowymi [1, 3, 4, 11]. Poniżej przedstawiono modyfikację rozwiązania MFC, pozwalającą na implementację algorytmu poprawiającego jakość regulacji prędkości w istniejących systemach sterowania serwonapędami, o ile pozwalają w sposób cykliczny przysyłać addytywną korektę wartości zadanej prądu w osi  $q$  do regulatora prądu.

Wartość prędkości nominalnej w układzie z rysunku 3 wyliczana jest na podstawie informacji o nominalnym modelu obiektu, zaś regulator korekcyjny „pomaga” regulatorowi głównemu (którego nie trzeba w żaden sposób modyfikować) osiągnąć zadaną prędkość ruchu, pomimo różnic, jakie występują pomiędzy modelem a sterowanym obiektem.

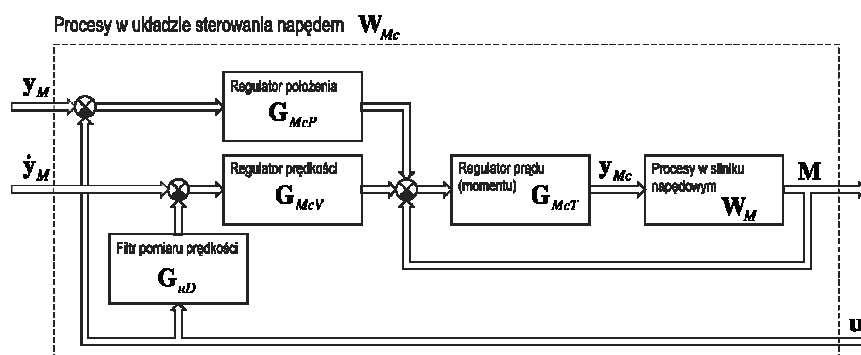
Analogicznie do addytywnej korekty prądu można zastosować podejście, w myśl którego uzmiennia się parametry regulatora, np. w funkcji położenia i/lub prędkości ruchu. Zmiana parametrów jak również addytywnych wartości sygnałów zadanych (położenia, prędkości, prądu) może być realizowana również na podstawie dodatkowych informacji pomiarowych (z czujników temperatury, czujników przyspieszeń, czujników wibroakustycznych).

### 1.2.2. ROZDZIELENIE TORÓW ZADAWANIA POŁOŻENIA/PRĘDKOŚCI

Znacznie lepsze warunki pracy serwonapędu obrabiarki można zapewnić, dokonując zrównoleglenia podukładów regulacji położenia oraz prędkości (rysunek 4). W takim rozwiązaniu regulator prędkości „widzi” czego od niego oczekuje generator trajektorii ruchu, uniezależniając swoje działanie od dynamiki (w tym parametrów) regulatora położenia.



Rys. 3. Modyfikacja regulatora prędkości (przypadek 1-wymiarowy)  
Fig. 3. Modification of the velocity controller (one-dimensional case)

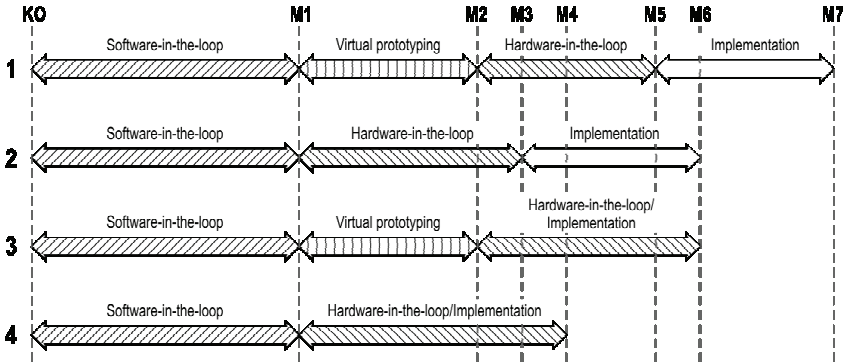


Rys. 4. Proponowa równoległa struktura serwonapędu obrabiarki  
Fig. 4. Proposed parallel structure of the machine tool servodrive

## 2. SZYBKIE PROTOTYPOWANIE ALGORYTMÓW STEROWANIA

Szybkie prototypowanie jako technika opracowywania nowych algorytmów sterowania znane jest od lat [14, 16, 17], i z powodzeniem stosowana w projektach

z obszaru mechatroniki, głównie z uwagi na skrócenie czasu pomiędzy opracowaniem koncepcji a wdrożeniem do testów finalnych. Na rysunku 5 przedstawiono 4 najpopularniejsze współcześnie scenariusze projektowania z zastosowaniem techniki szybkiego prototypowania. Na rynku pojawiły się obecnie rozwiązania umożliwiające podjęcie badań HIL (w urządzeniach docelowych) tuż po zakończeniu badań symulacyjnych. Opisujący tutaj projekt realizowany jest zgodnie ze scenariuszem nr 2.



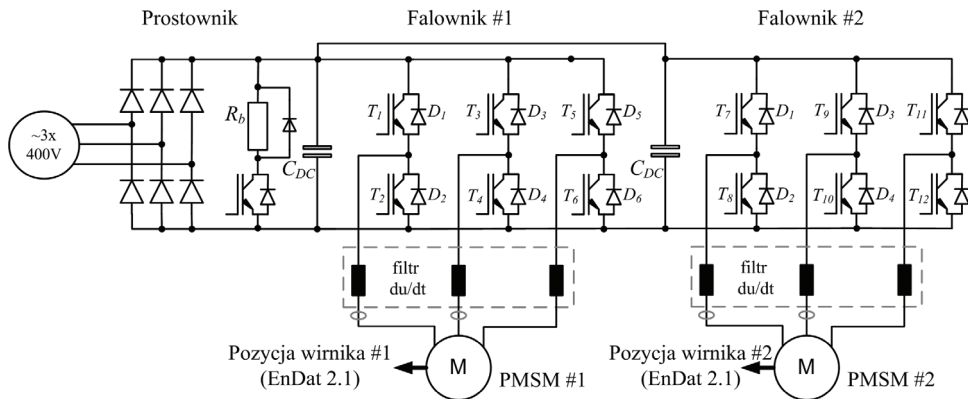
Rys. 5. Scenariusze projektowania mechatronicznego  
(KO – początek projektu, M1 ... M7 – etapy projektu)

Fig. 5. Mechatronic design scenarios (KO – kick-off, M1 ... M7 – milestones)

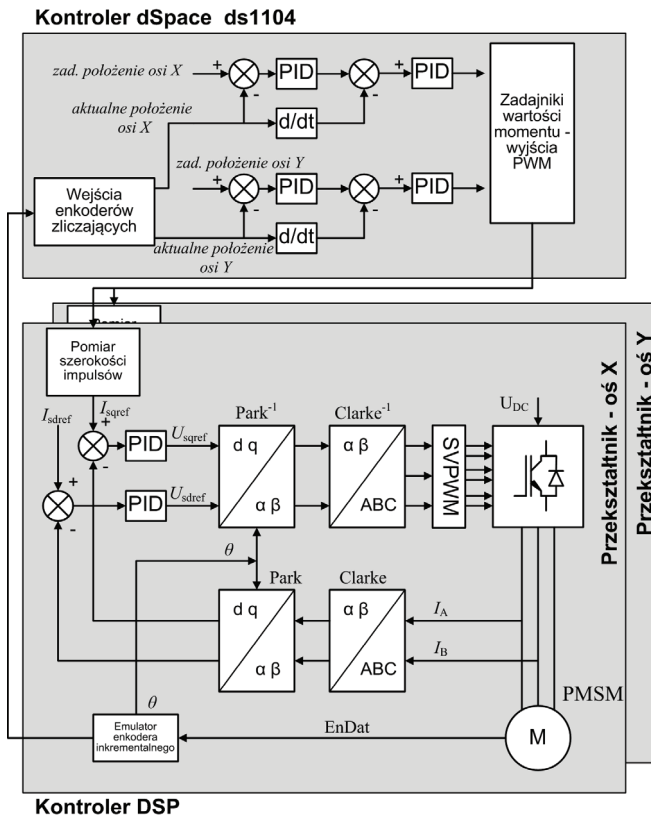
### 3. PROTOTYPOWE STANOWISKO BADAWCZE

Układ zasilania napędów stolika obrabiarki składa się z dwóch niezależnie sterowanych, dedykowanych przekształtników napięcia, zasilanych z wspólnej szyny prądu stałego (rys. 6). Jako klucze przełączające zastosowano szybkie tranzystory IGBT (IGW15N120H3) a jako diody zwrotne użyto nowoczesne elementy, oparte o węgiel krzemu (SiC, IDH08S120). Przyrządy te umożliwiły zwiększenie częstotliwości przełączenia kluczy przekształtnika (do ponad 20 kHz), przy zachowaniu odpowiedniego poziomu strat komutacyjnych [2]. Inną korzyścią wynikającą z użycia diod SiC jest zmniejszenie generowania zakłóceń EMI.

Główną jednostką sterującą i nadzorującą pracę dwóch przekształtników jest zmiennoprzecinkowy procesor sygnałowy rodziny C2000 firmy Texas Instruments: TMS320F28335. Jego charakterystyczne cechy, szczególnie istotne w aplikacjach sterowania i przetwarzania energii to m.in.: duża ilość elastycznie konfigurowalnych wyjść PWM, duża szybkość przetwarzania (150 MHz) + FPU, szybki 16-kanalowy, 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, wejścia precyzyjnego pomiaru szerokości impulsów (eCapture), zaawansowana emulacja pracy oraz dodatkowe zabezpieczenia (Watchdog, obsługa sytuacji awaryjnych – Trip Zone itd.).



Rys. 6. Układ zasilania napędów stolika obrabiarki  
 Fig. 6. Supply subsystem of the feed-drive machine tool table



Rys. 7. Struktura funkcjonalna stanowiska badawczego  
 Fig. 7. Functional setup of the test-stand

Podstawowym założeniem opisywanego podukładu była możliwość implementacji oraz weryfikacji działania różnych algorytmów sterowania. W układzie testowym, dla każdej osi zaimplementowany został algorytm sterowania z pośrednim, wektorowym sterowaniem prądu stojana z zachowaniem stałego kąta mocy  $\pi/2$  [7;19], którego chwilowe nastawy komponentów (przekształceń i regulatorów) można rejestrować, a także modyfikować w trybie on-line. Pozwala to na szybką diagnostykę i analizę pracy napędów obrabiarki. Na rysunku 8 zaprezentowano stanowisko badawcze, składające się z korpusu obrabiarki sterowanej numerycznie, z napędem śrubowym kulo-tocznym (obiektom jest tutaj stolik frezarki w układzie X-Y).



Rys. 8. Stanowisko badawcze  
Fig. 8. Test stand

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule stanowisko badawcze umożliwia praktyczną weryfikację zaproponowanych sposobów poprawy jakości geometryczno-ruchowej obrabiarki (frezarki) sterowanej numerycznie z poziomu zespołu napędu posuwu o otwartej ar-

chitekturze funkcjonalnej. Z uwagi na zastosowane rozwiązania (pomiar absolutny położenia, integracja pomiarów drgań) prezentowane rozwiązanie jest unikalne w tym obszarze badawczym.

*Badania zrealizowano w ramach projektu MNiSW nr N N502 336936 „Opracowanie konstrukcji i badania doświadczalne mechatronicznego obrabiarkowego zespołu posuwowego z napędem sterowanym inteligentnym modułowym układem wykonawczym” o akronimie M.A.R.I.N.E. (multivariable hybrid ModulAR motIon coNtrollEr).*

#### LITERATURA

- [1] *Handbook of hybrid systems control*, Cambridge University Press, 2009.
- [2] BONISŁAWSKI M., HOŁUB M., *Effects of space vector modulation strategy on hybrid (Si-SiC) inverter losses*, Archives of Electrical Engineering, 2012, Vol. 61, No.1, 69–75.
- [3] DOMEK S., DWORAK P., PIETRUSEWICZ K., *Hybrid Model-Following Control algorithm within the motion control system*, W: Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, 2009, 1476–1481.
- [4] DOMEK S., PIETRUSEWICZ K., URBAŃSKI Ł., *Hybrydowa regulacja odporna napędu posuwu obrabiarki sterowanej numerycznie*, Inżynieria Maszyn, 2011, Vol. 16, No. 1–2, 50–66.
- [5] DWORAK P., PIETRUSEWICZ K., *A fuzzy-logic based tuning for a velocity controller of the DC servo drive*, Solid State Phenomena, vol. Mechatronic systems and materials, 2009, No. 147–149, 179–184.
- [6] KOSMOL J., *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*, WNT, Warszawa 1998.
- [7] KRISHNAN R., *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [8] MARCHELEK K., *Dynamika obrabiarek*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
- [9] MARCHELEK K., PAJOR M., POWAŁKA B., *Vibrostability of the Milling Process Described by the Time-Variable Parameter Model*, Journal of Vibration and Control, 2002, Vol. 8, 467–479.
- [10] PARUS A., MARCHELEK K., DOMEK S., HOFFMANN M., *Podniesienie wibrostabilności w procesie skrawania z zastosowaniem eliminatora piezoelektrycznego*, Modelowanie inżynierskie, 2010, Vol. 39, No. 8, 159–170.
- [11] PIETRUSEWICZ K., *Multi-degree of freedom robust control of the CNC X-Y table PMSM-based feed-drive module*, Archives of Electrical Engineering, 2012, Vol. 61, No. 1, 15–31.
- [12] PIETRUSEWICZ K., DWORAK P., *Robust Model-Following Control for the DC servo drive*, [w:] Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2008, 1–6.
- [13] PIETRUSEWICZ K., DWORAK P., BROEL-PLATER B., *Robust Model-Following Control for the DC servo drive*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 2007, Vol. 31, No. 3, 45–62.
- [14] PIETRUSEWICZ K., DWORAK P., MISZTAL H., *Szybkie prototypowanie złożonych struktur układów regulacji temperatury w sterownikach programowalnych – implementacja odpornego układu MFC*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Elektryka, 2009, Vol. 1046, No. 118, 63–70.
- [15] PRITSCHOW G., *On the influence of the velocity gain factor on the path deviation*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1996, Vol. 45, No. 1, 367–371.
- [16] ROSARIO J.M., DUMUR D., MACHADO J.A.T., *Control of a 6-DOF Parallel Manipulator through a Mechatronic Approach*, Journal of Vibration and Control, 2007, Vol. 13, No. 9–10, 1431–1446.



- [17] RUBAAI A., CASTRO-SITIRICHE M.J., OFOLI A.R., *Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives: an integrated environment for rapid control prototyping*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, Vol. 44, No. 4, 1090–1097.
- [18] SKOCZOWSKI S., *Odporny układ regulacji z wykorzystaniem modelu obiektu*, Pomiary Automatyka Kontrola, 1999, No. 9, 2–4.
- [19] ZAWIRSKI K., *Sterowanie silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.

#### RAPID PROTOTYPING OF THE CONTROL ALGORITHMS WITHIN THE PMSM-BASED FEED-DRIVE MODULE FOR $X$ - $Y$ TABLE OF THE MILLING MACHINE TOOL

The paper presents the results of researchwork on the development of rapid-prototyping test-stand for testing: servo control algorithms, trajectory generation, algorithms for increasing overall quality of the feed-drive modules within two axis ( $X$ - $Y$ ) table of the milling machine. Open architecture interface of the prepared control system lets the potential user test functionality of integration of diagnostic tools within the motion controller – directly, without taking into account communication with top-level CNC system.