

Stefan DOMEK¹
Krzysztof PIETRUSEWICZ¹
Łukasz URBAŃSKI¹

HYBRYDOWA REGULACJA ODPORNA NAPĘDU POSUWU OBRABIARKI STEROWANEJ NUMERYCZNIE

Przedstawiono wyniki prac nad sterowaniem liniowymi silnikami synchronicznymi w osiach posuwowych obrabiarki CNC za pomocą inteligentnego cyfrowego serwonapędu. Obejmują one prace koncepcyjne nad otwartym systemem sterowania serwonapędem oraz rezultaty identyfikacji modeli dynamicznych stanowiska badawczego z otwartym systemem sterowania CNC. Omówiono zalety układów regulacji odpornej w porównaniu do sterowania klasycznego. Zaproponowano hybrydowe predykcyjne podejście do odpornej regulacji prędkości stolika X-Y frezarki oraz omówiono wyniki badań symulacyjnych regulatorów.

1. WPROWADZENIE

W ramach, realizowanego przez autorów, projektu badawczego „Opracowanie konstrukcji i badania doświadczalne mechatronicznego obrabiarkowego zespołu posuwowego z napędem sterowanym inteligentnym modułowym układem wykonawczym”, projekt MNiSW nr N N502 336936 o kryptonimie M.A.R.I.N.E. (*multivariable hybrid Modular motion controller*) budowane jest stanowisko badawcze inteligentnego cyfrowego serwonapędu. Jednym z celów projektu M.A.R.I.N.E. jest opracowanie serwonapędu, którego algorytm sterowania uwzględnia inne wielkości, aniżeli jedynie aktualne położenie. Mogą to być wielkości dostępne pomiarowo podczas procesu obróbki skrawaniem, takie jak sygnały przyspieszeń czy hałasu. Wyznaczenie głównej składowej sterowania wymaga opracowania odpornej algorytmu regulacji prędkości, bazującego na modelu. Wyznaczenie modelu osi posuwu obrabiarki CNC nie jest jednak zadaniem trywialnym, ze względu na jego silnie nieliniowy charakter, który wynika zarówno ze złożonych zjawisk fizycznych związanych m.in. z tarcieniem, ale również z ograniczeń parametrów ruchu.

Algorytmy sterowania bazujące w swej strukturze na modelu obiektu nazywane są w literaturze sterowaniem *model-based control* [2],[3],[5],[15]. Od wielu lat algorytmy te

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37,
70-313 Szczecin, stefan.domek@zut.edu.pl, krzysztof.pietrusewicz@zut.edu.pl, lukasz.urbanski@zut.edu.pl

cieszą się uznaniem [6], z uwagi na jawne wykorzystanie modelu obiektu, w przeciwieństwie do większości znanych algorytmów regulacji, które choć nie wykorzystują modelu obiektu w swojej strukturze, to i tak wymagają jego znajomości w celu optymalizacji struktury bądź doboru nastaw.

Algorytm sterowania nazywany jest algorytmem odpornym (ang. *robust control*), jeżeli jakość regulacji zależy jedynie w niewielkim stopniu od zmiany parametrów obiektu bądź pojawienia się dodatkowych zakłóceń w układzie regulacji. Zalety odpornego algorytmu regulacji o dwóch stopniach swobody opisano m.in. w pracy [16]. Odporna regulacja prędkości silnika DC, będąca podstawą do badania algorytmów regulacji odpornej silników innych typów została opisana w pracach [13],[14].

W prezentowanym artykule zaproponowano rozwinięcie odpornego algorytmu bazującego na modelu o hybrydowy mechanizm predykcyjny [1]. Zadaniem hybrydowego mechanizmu predykcyjnego jest zapewnienie odporności na nieliniowości obiektu powodowane zmiennym położeniem stolika X-Y w obszarze pracy.

Pętla sterowania została dodatkowo uzupełniona o blok korekcyjny, który kompensuje wpływ zmiany obciążenia stolika masą przedmiotu obrabianego – masa przedmiotu obrabianego zmniejsza się w czasie ze względu na ubytkowy charakter obróbki skrawaniem.

2. ODPORNA REGULACJA MASZYN TECHNOLOGICZNYCH DO OBRÓBKI METALI

Prawo sterowania w syntezie układów adaptacyjnych wyznaczone jest na podstawie obserwacji zmian właściwości sterowanego obiektu [20]. Uwzględnienie tych zmian na etapie tworzenia algorytmu sterowania i poszerzenie ich o założony margines bezpieczeństwa pozwala stworzyć odporny algorytm sterowania.

Odporność układu sterowania napędami osi posuwu obrabiarek jest bezsprzecznie wymagana nie tylko ze względu na wymagania dotyczące jakości obróbki ale także ze względów bezpieczeństwa.

Stała wysoka jakość obróbki skrawaniem wymaga od układów regulacji napędów posuwu, aby były niewrażliwe na wymienione niżej czynniki:

- zmiany warunków środowiskowych (drgania, zmiany temperatury),
- zmiany parametrów obróbki skrawaniem (wartość prędkości posuwu, która jest złożeniem prędkości poszczególnych osi, przyspieszenia osi, profile ruchu, itp.),
- nieliniowości wybranych modułów maszyny (tarcie, luzy),
- błędy geometryczne maszyny.

Układ regulacji napędów posuwu, który jest niewrażliwy na powyższe czynniki jest układem odpornym. Jeżeli układ sterowania obrabiarki CNC wylicza korekty na podstawie modeli wpływu tych czynników, nazywa się go układem adaptacyjnym. Zastosowanie adaptacyjnego układu sterowania jest sposobem na podniesienie ogólnej odporności układu sterowania, jednak nie jest to z definicji układ odporny.

Opracowanie odpornego lub adaptacyjnego algorytmu sterowania napędami jest trudne w klasycznym podejściu do projektowania maszyn, w myśl którego w pierwszej kolejności

projektuje się konstrukcję maszyny a dopiero w dalszej kolejności system sterowania tą maszyną. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej w przypadku maszyn z napędem bezpośrednim z silnikami liniowymi. Efektywna implementacja „inteligentnych” funkcji sterujących możliwa jest dzięki podejściu mechatronicznemu, w którym projektowanie układu napędowego obrabiarki odbywa się na wielu poziomach jednocześnie, zarówno po stronie konstrukcji, jak i samego systemu sterowania.

Projekt układu napędowego obrabiarki wymaga ustalenia następujących specyfikacji:

- specyfikacja kinematyki maszyny (osie poziome czy pionowe, maszyna mikro/typowa/duża),
- specyfikacja rodzaju użytych w napędach posuwu silników (obrotowe czy liniowe),
- specyfikacja wymagań technologicznych, co do parametrów obróbki, a tym samym parametrów ruchu w poszczególnych osiach (maszyna „typowa”, maszyna do szybkościowego skrawania, maszyna bardzo precyzyjna).

Powyższe specyfikacje wpływają bezpośrednio na wymagania odnośnie komponentów sprzętowo-programowych platformy sterowania układem napędowym. Do wymagań tych zaliczamy:

- specyfikację co do sposobu realizacji pomiaru położenia/prędkości w układzie sterowania, jak również rozdzielczości i zakładanej dokładności tego pomiaru,
- specyfikację w zakresie protokołów komunikacyjnych pomiędzy jednostką centralną system CNC a modułami napędowymi (dla maszyn „typowych” może to być sieć CAN, MODBUS, niedeterministyczny protokół Ethernet TCP/IP dla celów wymiany danych z warstwą biurową przedsiębiorstwa, lub w przypadku wieloosiowych aplikacji o wysokiej precyzji – wyłącznie Ethernet przemysłowy czasu rzeczywistego: EtherCAT, Ethernet Powerlink, SERCOS, Ethernet/IP, ProfiNet czy MODBUS-IDA),
- specyfikację architektury programowej w zakresie: czasów próbkowania, wymogu pracy w rygorze czasu rzeczywistego w tym sposobu rozdziału obliczeń na wiele rdzeni procesorów lub samych procesorów pracujących niekiedy w sieci, zaawansowania algorytmów regulacji z uwagi na planowany poziom precyzji danego urządzenia, poziom integracji funkcji monitorowania warunków pracy obrabiarki i jej aktywnego wspierania, czy wreszcie w zakresie fuzji sprzętowej bądź programowej dotyczącej informacji z dodatkowych czujników pomiarowych.

Określenie wszystkich powyższych specyfikacji jest warunkiem koniecznym do podjęcia decyzji o wyborze platformy sterowania układem napędowym przy czym może zostać wybrane rozwiązanie dostępne na rynku lub – z uwagi na wymogi aplikacji – może zaistnieć konieczność opracowania autorskiego rozwiązania.

Na decyzję w zakresie konstrukcji i systemu sterowania obrabiarki wpływają także czynniki ekonomiczne i strategia wytwórcy, ale zagadnienia te nie są przedmiotem niniejszej publikacji.

W kolejnym rozdziale zostanie opisana idea algorytmu odpornej regulacji o wielu stopniach swobody, który w swej strukturze wykorzystuje nominalny model obiektu. Nominalnym modelem obiektu jest w tym przypadku model osi posuwu obrabiarki zidentyfikowany na podstawie przeprowadzonych badań.

3. ODPORNA REGULACJA TYPU MODEL-FOLLOWING

Odporność jest właściwością systemu sterowania, która zapewnia stałą wysoką jakość regulacji w obecności zewnętrznych zakłóceń/zmian obciążenia, ale również nieznanymi, lecz ograniczonymi zmianami parametrów sterowanego procesu [16],[17]. Jeżeli zmiany te mogą zostać wyrażone w postaci matematycznej, nazywa się je perturbacjami.

W literaturze spotykanych jest kilka opisów perturbacji [18], jednakże powszechnie uważa się, że opis multiplikatywny z wykorzystaniem transmitancji dyskretnych najbardziej uwydatnia zalety odpornościowe algorytmów regulacji:

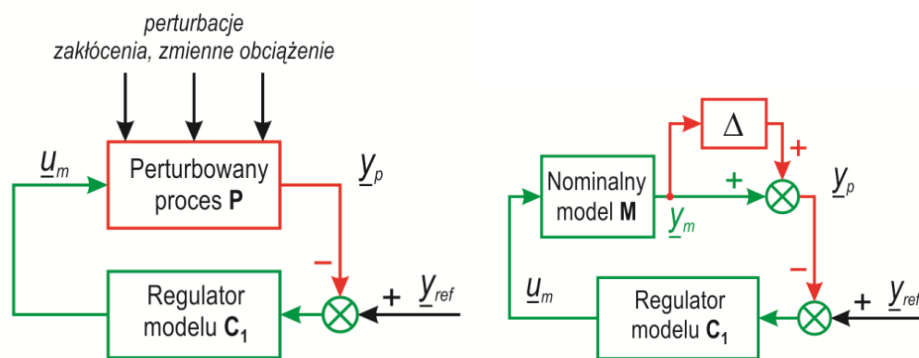
$$\mathbf{P}(z^{-1}) = \mathbf{M}(z^{-1})[\mathbf{I} + \Delta(z^{-1})] \quad (1)$$

W klasycznej jednopętłowej strukturze układu regulacji (rys. 1) regulator modelu $\mathbf{C}_1(z^{-1})$ steruje nominalnym, znanym dokładnie (perturbacje wynoszą zero) modelem $\mathbf{M}(z^{-1})$ procesu $\mathbf{P}(z^{-1})$, wyjście sterowanego procesu dane jest równaniem:

$$\underline{y}_m(k) = \underline{y}(k) \Big|_{\substack{\Delta=0 \\ d(k)=0}} = [\mathbf{I} + \mathbf{M}(z^{-1})\mathbf{C}_1(z^{-1})]^{-1} [\mathbf{M}(z^{-1})\mathbf{C}_1(z^{-1})] \underline{u}_m(k) \quad (2)$$

Wyjście perturbowanego procesu w klasycznej jednopętłowej strukturze regulacji z regulatorem PID opisuje równanie:

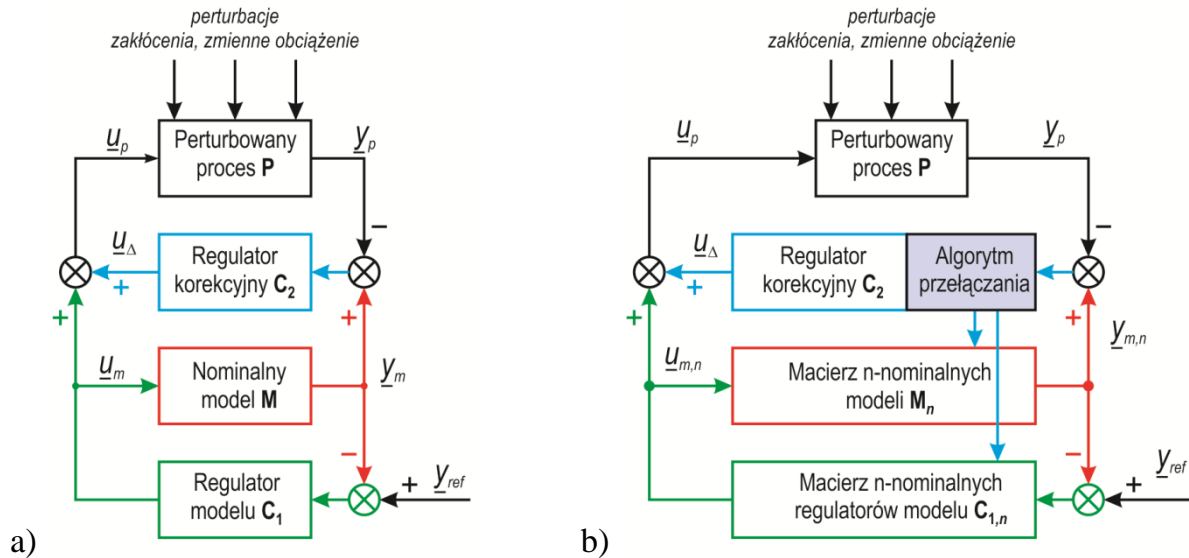
$$\underline{y}_p(k) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}(z^{-1})\mathbf{C}_1(z^{-1})]^{-1} [\mathbf{I} + \Delta(z^{-1})] [\mathbf{I} + \mathbf{M}(z^{-1})\mathbf{C}_1(z^{-1})] \underline{y}_m(k) \quad (3)$$



Rys. 1. Pojęcie perturbacji multiplikatywnej w klasycznej regulacji PID
Fig. 1. Multiplicative perturbation in classical PID control system

Na rysunku 2a przedstawiono zaproponowaną w pracy [15] strukturę odpornego układu regulacji PID o dwóch stopniach swobody typu *model-following control* (MFC). W pracach [16],[17] szczegółowo wykazano wysokie właściwości odpornościowe tego typu regulacji. Odtwarzanie wyjścia modelu nominalnego dane jest wzorem:

$$\underline{y}_p(k) = \frac{\mathbf{P}(z^{-1}) \mathbf{I} + \mathbf{M}(z^{-1})\mathbf{C}_2(z^{-1})}{\mathbf{M}(z^{-1}) \mathbf{I} + \mathbf{P}(z^{-1})\mathbf{C}_2(z^{-1})} \underline{y}_m(k) \quad (4)$$



Rys. 2. Regulator typu *model-following control* (MFC) (a) oraz jego hybrydowa wersja (b)
Fig. 2. Model-Following Control algorithm (a) and its hybrid version (b)

W pracy [7] opisano warunki, jakie muszą spełniać regulatory $\mathbf{C}_1(z^{-1}), \mathbf{C}_2(z^{-1})$, aby zapewnić istotnie lepsze właściwości odpornościowe.

4. PROGRAMOWANIE CYFROWYCH SERWONAPĘDÓW

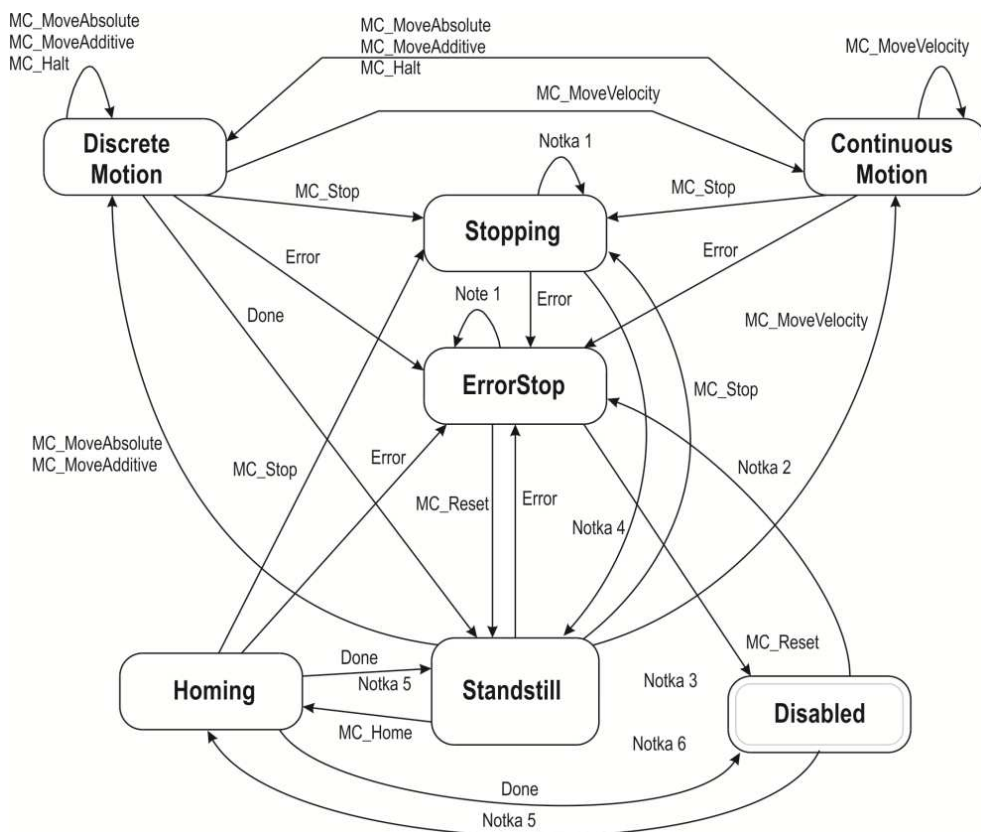
Programowanie cyfrowych serwonapędów coraz częściej możliwe jest w zunifikowany sposób, za pomocą bloków funkcyjnych opisanych w normie PLCopen Motion Control. Automat hybrydowy dany tą normą przedstawiono na rysunku poniżej. Do podstawowych ruchów, realizowanych przez maszyny technologiczne zaliczamy: ruch dyskretny do zadanego położenia podanego w sposób absolutny bądź względny, ruch ciągły w kierunku dodatnim bądź ujemnym z zadaną prędkością, ruch synchronizowany (funkcjonalność nadążania jednej osi ruchu za inną).

Na rysunku 3 zaprezentowano opisany w przywołanej normie diagram stanów sterowania cyfrowym serwonapędem.

Poszczególne stany odzwierciedlają sytuację, w jakiej znajduje się dana oś ruchu:

- *Disabled* – regulator napędu jest wyłączony,
- *Standstill* – napęd nie wykonuje ruchu – oczekuje na akcję, oś silnika utrzymywana jest w aktualnej pozycji,
- *Homing* – bazowanie – w przypadku enkoderów absolutnych nie wywołuje procedury ruchu w kierunku najbliższego wyłącznika krańcowego, jednakże bazowanie konieczne jest z uwagi na inicjalizację osi numerycznych,

- *ErrorStop* – stan wstrzymania po wystąpieniu błędu, konieczne jest potwierdzenie wszystkich błędów,
- *Stopping* – wstrzymywanie aktualnie wykonywanego ruchu,
- *Discrete Motion* – ruch do zadanego położenia, ruch ze zdefiniowanym punktem końcowym,
- *Continuous Motion* – ruch bez określonego położenia zadanego, ruch bez punktu końcowego.



Rys. 3. Maszyna stanów PLCopen Motion Control
Fig. 3. PLCopen Motion Control state diagram

Przejście pomiędzy stanami odbywa się poprzez wywołanie odpowiednich funkcji, takich jak np. `MC_MoveAbsolute` (ruch absolutny), czy `MC_MoveAdditive` (ruch relatywny w określonym kierunku).

Aby zapewnić stałą jakość pozycjonowania w każdym z możliwych trybów ruchu konieczna jest optymalizacja pracy układu regulacji napędów. Zagadnienie to jest złożone, bowiem wymaga analizy wszystkich trybów pracy napędów, wymagań stawianych napędowi w czasie ich wykonywania i opracowania procedur optymalizacji parametrów układu regulacji napędu.

Kolejny rozdział przybliży zagadnienie hybrydowej regulacji predykcyjnej w połączeniu ze zwiększającym odporność układu regulacji podejściem typu *model-following*.

5. HYBRYDOWY REGULATOR PREDYKCYJNY

Na rysunku 2b przedstawiono nową koncepcję układu regulacji obiektów nieliniowych, opracowaną w wyniku doświadczeń ze stosowania układu z rysunku 2a do tej klasy układów. Okazuje się, że o ile własności odpornościowe układu MFC o dwóch stopniach swobody są znakomite w sterowaniu obiektami liniowymi bądź w niewielkim stopniu nieliniowymi, o tyle w sytuacji, gdy na sygnały sterujące nałożone są silne ograniczenia a nieliniowości są znaczne, konieczne staje się poszukiwanie innych rozwiązań. Regulacja predykcyjna [4],[5] jest jednym z niewielu rozpowszechnionych w przemyśle rozwiązań pozwalających zaprojektować układ regulacji z uwzględnieniem ograniczeń sygnałów sterujących, sygnałów wyjściowych obiektu oraz ograniczeń zmiennych stanu [11]. Stosunkowo młodą dziedziną wiedzy jest hybrydowe podejście do regulacji predykcyjnej [1],[9],[10],[12], uwzględniające w algorytmie sterowania np. przedziałami liniowe modele nieliniowej dynamiki złożonych obiektów sterowania, a także powiązanie ciągłego opisu dynamiki z dyskretnym przełączaniem pomiędzy stanami, w jakich znajduje się obiekt.

5.1. PRZEDZIAŁAMI AFINICZNA APROKSYMACJA ORAZ HYBRYDOWA REGULACJA PREDYKCYJNA UKŁADÓW NIELINIOWYCH Z OGRANICZENIAMI

Układy przedziałami afiniczne są jednym z najprostszych rozszerzeń układów liniowych, dzięki którym możliwe jest modelowanie złożonej dynamiki układów nieliniowych:

$$\begin{aligned}
 \underline{x}(k+1) &= \mathbf{A}_i \underline{x}(k) + \mathbf{B}_i \underline{u}(k) + \underline{f}_i \\
 \underline{y}(k) &= \mathbf{C}_i \underline{x}(k) + \mathbf{D}_i \underline{u}(k) + \underline{g}_i \\
 \text{dla } \begin{bmatrix} \underline{x}(k) \\ \underline{u}(k) \end{bmatrix} &\in \mathbf{P}_i, i = 1, \dots, N \\
 \text{guard} X_i \underline{x}(k) + \text{guard} U_i \underline{u}(k) &\leq \text{guard} C_i \\
 y_{\min} &\leq \underline{y}(k) \leq y_{\max} \\
 u_{\min} &\leq \underline{u}(k) \leq u_{\max} \\
 \Delta u_{\min} &\leq \underline{u}(k) - \underline{u}(k-1) \leq \Delta u_{\max}
 \end{aligned} \tag{5}$$

gdzie \mathbf{P}_i to wielościan wypukły w przestrzeni zmiennych stanu i wejść, opisujący zakres zmian tych zmiennych, w którym dany liniowy submodel dynamiczny jest wystarczająco dokładny do opisu działania modelowanego nieliniowego procesu. Zakres zmian zmiennych stanu i wejść nazywany jest regionem aktywacji i -tej dynamiki przedziałami liniowego modelu nieliniowego procesu. Krawędzie wielościanu \mathbf{P}_i opisuje skończona liczba nierówności liniowych, nazywanych liniami przełączeń (ang. *guard lines*). Zmienne $\underline{u}(k) \in \mathbf{R}^m$, $\underline{x}(k) \in \mathbf{R}^n$, $\underline{y}(k) \in \mathbf{R}^l$ opisują odpowiednio wektor wejść, stanu oraz wyjść, w dyskretnych chwilach czasu.

Jeżeli spełnione są warunki $\underline{f}_i = \underline{0}$, $\underline{g}_i = \underline{0}$, $\mathbf{D} = \mathbf{0}$ to równania (5) przedstawiają przedziałami liniowy model dynamiczny. W niniejszej pracy zdecydowano się na tego typu opis obiektu nieliniowego z uwagi na fakt przyszłej implementacji zaprojektowanych algorytmów w cyfrowych urządzeniach sterujących czasu rzeczywistego.

Konieczność zapewnienia odpowiedniej jakości regulacji prędkości w całej przestrzeni ruchu stolika X-Y frezarki (pętla modelu) oraz jednoczesna konieczność minimalizacji wpływu zmian obciążenia stolika (pętla korekcyjna) wymagała zastosowania struktury MFC. Pętla modelu bazuje w tym przypadku na przedziałami liniowym modelu sterowanym przez hybrydowy regulator predykcyjny. Regulator korekcyjny bazuje natomiast na tradycyjnym modelu liniowym.

Problem projektowania regulatora modelu głównego w układzie MFC został sformułowany dla skończonego horyzontu predykcji N oraz sterowania N_c przy minimalizacji kwadratowego wskaźnika jakości:

$$\min_{u(0), \dots, u(N-1)} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\underline{u}(k)^T \mathbf{R} \underline{u}(k) + \underline{x}(k)^T \mathbf{Q} \underline{x}(k) + \left[\underline{y}(k) - \underline{y}_{ref}(k) \right]^T \mathbf{Q}_y \left[\underline{y}(k) - \underline{y}_{ref}(k) \right] \right] \quad (6)$$

oraz ograniczeniach nałożonych na sygnały $\underline{u}(k)$, $[\underline{u}(k) - \underline{u}(k-1)]$, $\underline{y}(k)$, $\underline{x}(k)$.

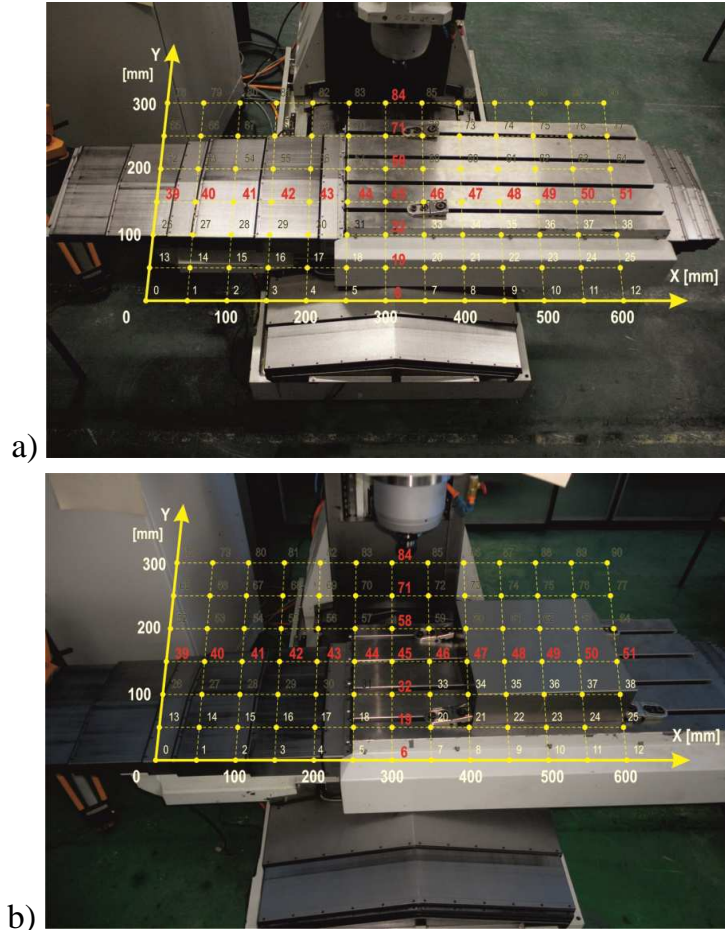
W pracach [5, 7] zaprezentowano warunki, dla których układ typu *model-following* lepiej nadąża za nominalną pętlą układu regulacji. Warunki te należy zapewnić dla każdej kombinacji i -tego modelu oraz lokalnego regulatora modelu.

6. MODELOWANIE DYNAMIKI NAPĘDU POSUWU

W literaturze spotykanych jest wiele teoretycznych metod modelowania dynamiki układu napędowego osi posuwu obrabiarek, zarówno z napędem śrubowym kulkowo-tocznym [19], jak i z napędem bezpośrednim z silnikiem liniowym [8]. Badania prowadzone przez autorów nad nowymi algorytmami regulacji położenia/prędkości prowadzone były na obiektach rzeczywistych, tj. stolikach X-Y z napędami liniowymi. Stoliki te zostały zbudowane w ramach projektu O.C.E.A.N. (projektu mającego na celu m.in. opracowanie prototypowego stanowiska badawczego z otwartym układem sterowania obrabiarki CNC), realizowanego przez Centrum Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Pierwszym etapem prac nad nowymi algorytmami regulacji była identyfikacja modeli dynamicznych opisujących działanie osi posuwu, nie w wyniku analizy teoretycznej, ale poprzez eksperyment praktyczny opisany poniżej.

Na rysunku 4 przedstawiono siatkę pomiarową eksperymentu identyfikacyjnego, którego algorytm opracowano i zaimplementowano w otartym systemie sterowania CNC. Eksperyment przygotowano dla celów wyznaczenia modelu MIMO stolika X-Y. W niniejszym artykule zaprezentowano jedynie modele dynamiki napędu posuwu osi w środkach zakresu ich ruchu, tj. w przypadku stanowiska z rysunku 4 dla osi X przy położeniu osi Y = 150 mm, zaś w przypadku osi Y dla położenia X = 300 mm. Z 91 punktów pomiarowych do opracowania

modelu wybrano dla osi X punkty od 39 do 51, zaś w przypadku osi Y były to punkty pomiarowe nr 6, 19, 32, 45, 58, 71 oraz 84. Model MIMO będzie uwzględniał wszystkie punkty pomiarowe.



Rys. 4. Widok zidentyfikowanego obiektu
Fig. 4. View of the identified objects

Badania przeprowadzono dla przypadków, w których na stoliku frezarki nie było żadnego obciążenia oraz gdy na stoliku umieszczono blok stalowy o masie blisko 90 kilogramów, który reprezentował przedmiot obrabiany. Dodatkowa masa znacząco wpłynęła na bezwładność poszczególnych osi, dlatego algorytm regulacji prędkości powinien uwzględniać ten fakt.

Zidentyfikowano modele liniowe typu *grey-box* o założonej strukturze macierzy **A, B, C** w torze prąd – prędkość, co z punktu widzenia późniejszego sterowania jest najodpowiedniejszym sposobem zobrazowania właściwości sterowanego obiektu tj. osi ruchu stolika frezarki. W wyniku identyfikacji dla osi X oraz Y wyznaczono przedziałami liniowe modele dynamiczne postaci (5).

W przedstawionym modelu zmienną dzielącą przestrzeń stanu jest zmienna $x_1(k)$ – położenie w osi ruchu [mm], zaś zmienna $x_2(k)$ oznacza prędkość liniową osi ruchu [mm/s],

wyznaczoną na podstawie znajomości prędkości obrotowej wałka silnika oraz skoku śruby napędowej.

Modele w poszczególnych osiach przełączane są zależnie od zmiennej $x_1(k)$ w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 X_axis: \underline{x}_{1,i}(k) \Big|_{i=1..13} &= \left\{ \begin{array}{l} \langle -25 \dots 25 \rangle_{X,39}, \langle 25 \dots 75 \rangle_{X,40}, \langle 75 \dots 125 \rangle_{X,41}, \langle 125 \dots 175 \rangle_{X,42}, \\ \langle 175 \dots 225 \rangle_{X,43}, \langle 225 \dots 275 \rangle_{X,44}, \langle 275 \dots 325 \rangle_{X,45}, \\ \langle 325 \dots 375 \rangle_{X,46}, \langle 375 \dots 425 \rangle_{X,47}, \langle 425 \dots 475 \rangle_{X,48}, \\ \langle 475 \dots 525 \rangle_{X,49}, \langle 525 \dots 575 \rangle_{X,50}, \langle 575 \dots 625 \rangle_{X,51} \end{array} \right\} \\
 Y_axis: \underline{x}_{1,i}(k) \Big|_{i=1..7} &= \left\{ \begin{array}{l} \langle -25 \dots 25 \rangle_{Y,6}, \langle 25 \dots 75 \rangle_{Y,19}, \langle 75 \dots 125 \rangle_{Y,32}, \langle 125 \dots 175 \rangle_{Y,45}, \dots \\ \langle 175 \dots 225 \rangle_{Y,58}, \langle 225 \dots 275 \rangle_{Y,71}, \langle 275 \dots 325 \rangle_{Y,84} \end{array} \right\}
 \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: zapis $\langle -25 \dots 25 \rangle_{X,39}$ w przypadku osi X oznacza zakres zmienności $x_{1,39}(k) \in \langle -25 \dots 25 \rangle$ (położenie w zakresie obowiązywania modelu w przedziale między -25 milimetrów a 25 milimetrów).

Wyznaczono przedziałami liniowe dyskretne modele (czas próbkowania równy 2.4 milisekundy) poszczególnych osi ruchu zarówno bez dodatkowego obciążenia stolika, jak i z zamocowaną na nim masą. (rys. 4.b). Indeksy od 0 do 90 oznaczają, iż wyznaczono po 91 lokalnych modeli zarówno dla osi X, jak i osi Y, bez obciążenia i z obciążeniem masą. Model wynikowy powstały ze złożenia modeli lokalnych będzie podstawą opracowania, w następnych etapach, odpornego algorytmu dwuosowego regulatora położenia/prędkości.

Przykładowo, model w punkcie pomiarowym nr 45 , bez obciążenia stolika i z obciążeniem opisany jest macierzami:

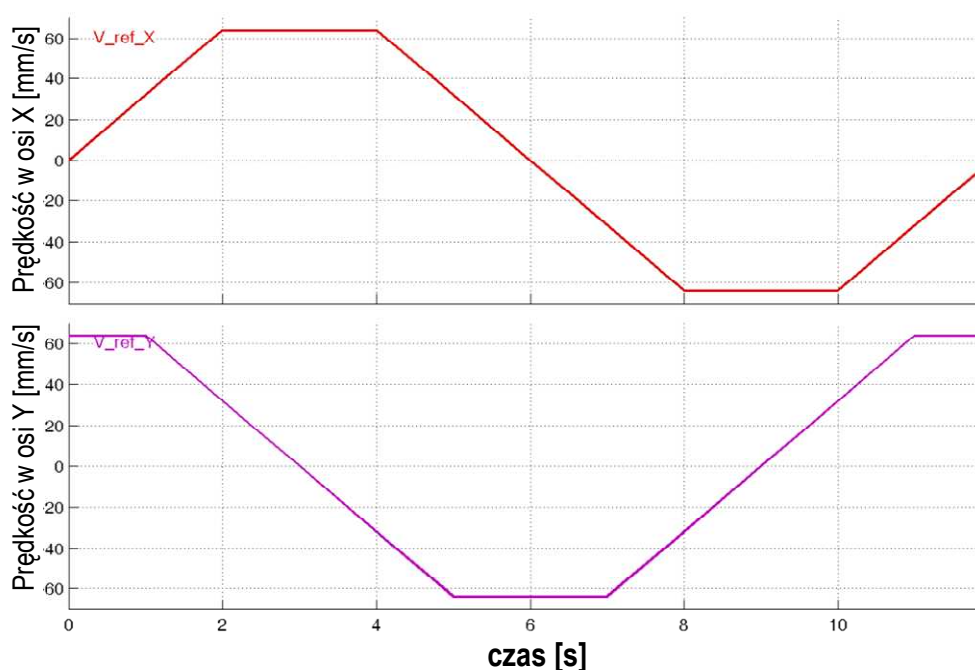
$$\begin{aligned}
 A_{X,45} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.002378755808256 & 3.1455287813e-005 \\ 0 & 0.982308479314894 & 0.026090092764928 \\ 0 & -0.009138185537298 & 0.989667595503954 \end{bmatrix} \\
 B_{X,45} &= \begin{bmatrix} 0.000722669483042 \\ 0.601103192907749 \\ 0.148440583401762 \end{bmatrix}, \quad C_{X,45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (8)$$

oraz ograniczeniami:

$$\begin{aligned}
 guardX_{X,45} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 guardC_{X,45} &= \begin{bmatrix} -275 \\ 325 \end{bmatrix} \\
 guardX_{X,45} \underline{x}(k) &\leq guardC_{X,45}
 \end{aligned} \quad (9)$$

Dla zwiększenia pewności identyfikacji modelu, w każdym punkcie siatki pokazanej na rysunku 4, trzykrotnie powtarzano rejestrację, zaś dla każdej z nich wyznaczono liniowy model dyskretny o ustalonej postaci macierzy C z czasem próbkowania równym 2.4 milisekundy (metoda *zero order hold*). Założono, że liczba modeli dla całego zakresu ruchu wynosić będzie 91 ponieważ taka była ilość punktów pomiarowych. Idea hybrydowej regulacji odpornej przewiduje optymalizację liczby lokalnych modeli, jednak tematyka ta nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

Na rysunkach od 6 do 10 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych testu kołowości z zastosowaniem trapezowego profilu prędkości z rysunku 5. Profile zadanego położenia osi wynikały z pojedynczego całkowania profilu prędkości.



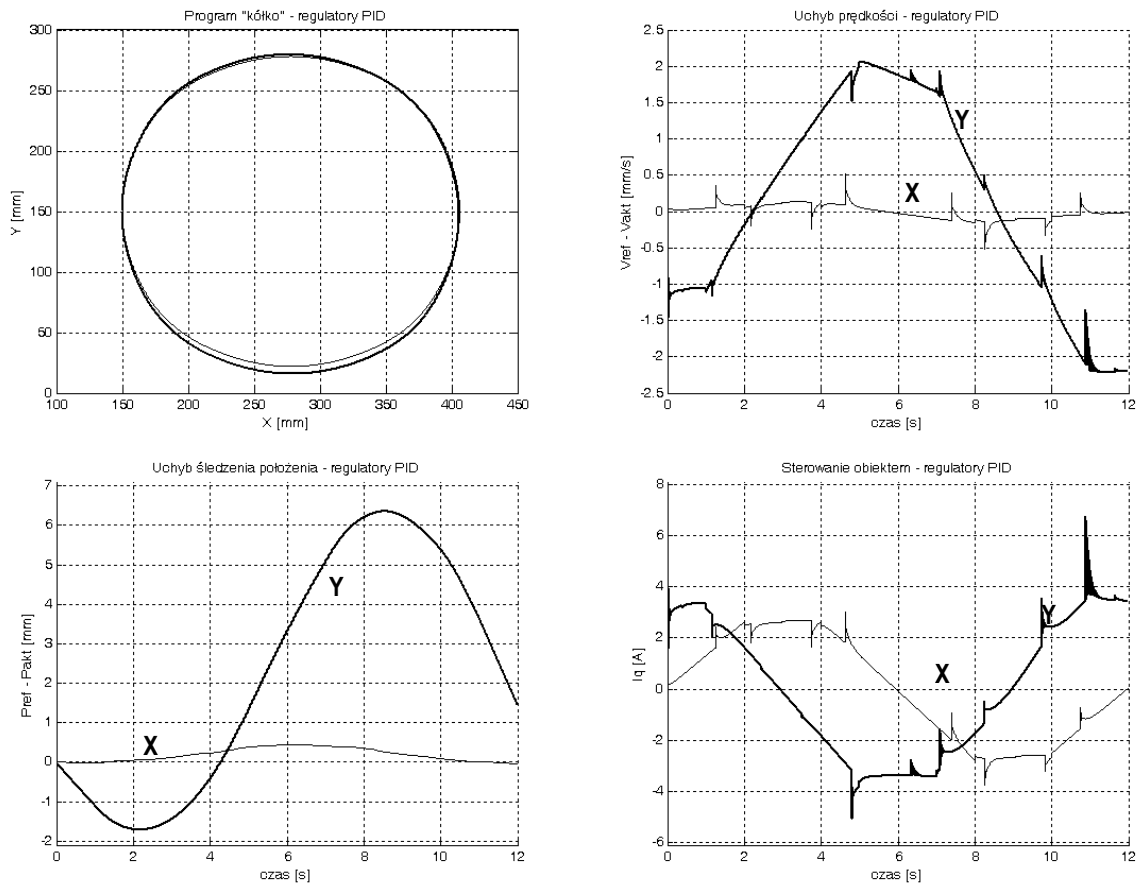
Rys. 5. Profile prędkości zadanych w teście kołowości [mm/s]

Fig. 5. Reference velocity profiles within the circular test

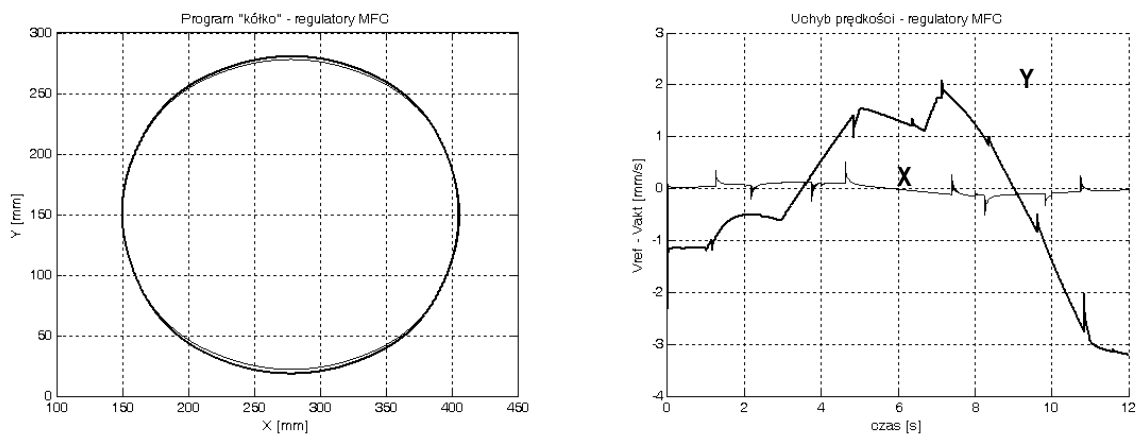
Poniżej przedstawiono porównanie klasycznej jednopętlowej struktury regulacji z regulatorem PID, układu z regulatorem MFC oraz zaproponowanego w niniejszym artykule hybrydowego predykcyjnego regulatora odpornej. Odporność każdego z wymienionych algorytmów regulacji została przetestowana w taki sposób, że nastawy każdego z regulatorów zostały dobrane dla modelu stolika X-Y nieobciążonego masą, zaś regulatory te miały sterować modelem stolika z obciążeniem. Nastawy regulatorów w strukturze klasycznej i MFC były dobierane na podstawie eksperymentu symulacyjnego, po uprzednim wstępnym (metodycznym) doborze nastaw.

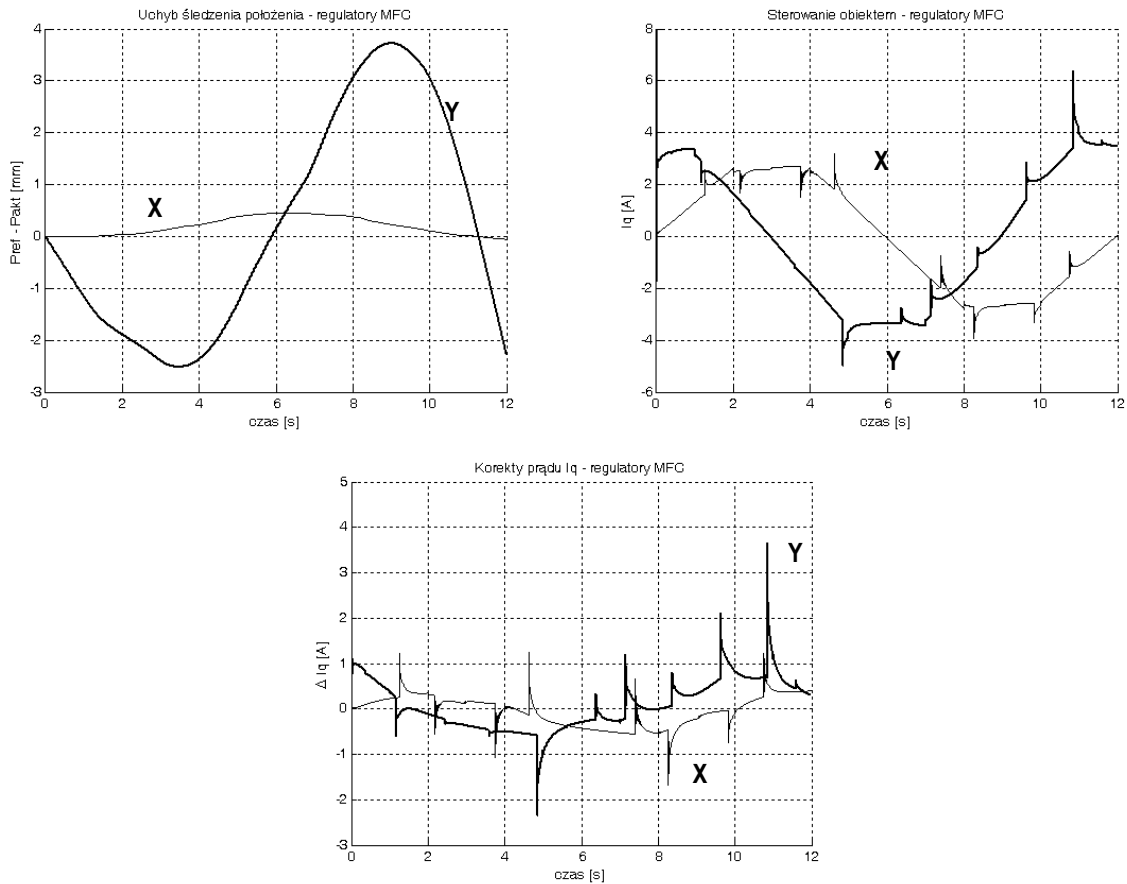
Ponieważ regulatory PID (rys.1.b) w poszczególnych osiach ruchu klasycznego, jednopętlowego układu regulacji zostały dostrojone na podstawie liniowych modeli aproksymujących dynamikę napędu posuwu w osiach ruchu, oczywiste jest, że odpowiednio wysoka jakość regulacji nie może zostać zapewniona.

Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki testu dla układu o strukturze *model-following control*. W pętłach modelu (rys. 2.a) zastosowano liniowe modele całego zakresu ruchu, co powoduje, że nieliniowy obiekt nadąża za liniową aproksymacją – zgodnie z założeniami sterowania typu *model-following control*.



Rys. 6. Wyniki badań symulacyjnych: regulacja PID
Fig. 6. PID control simulation results





Rys. 7. Wyniki badań symulacyjnych: regulacja MFC
Fig. 7. MFC simulation results

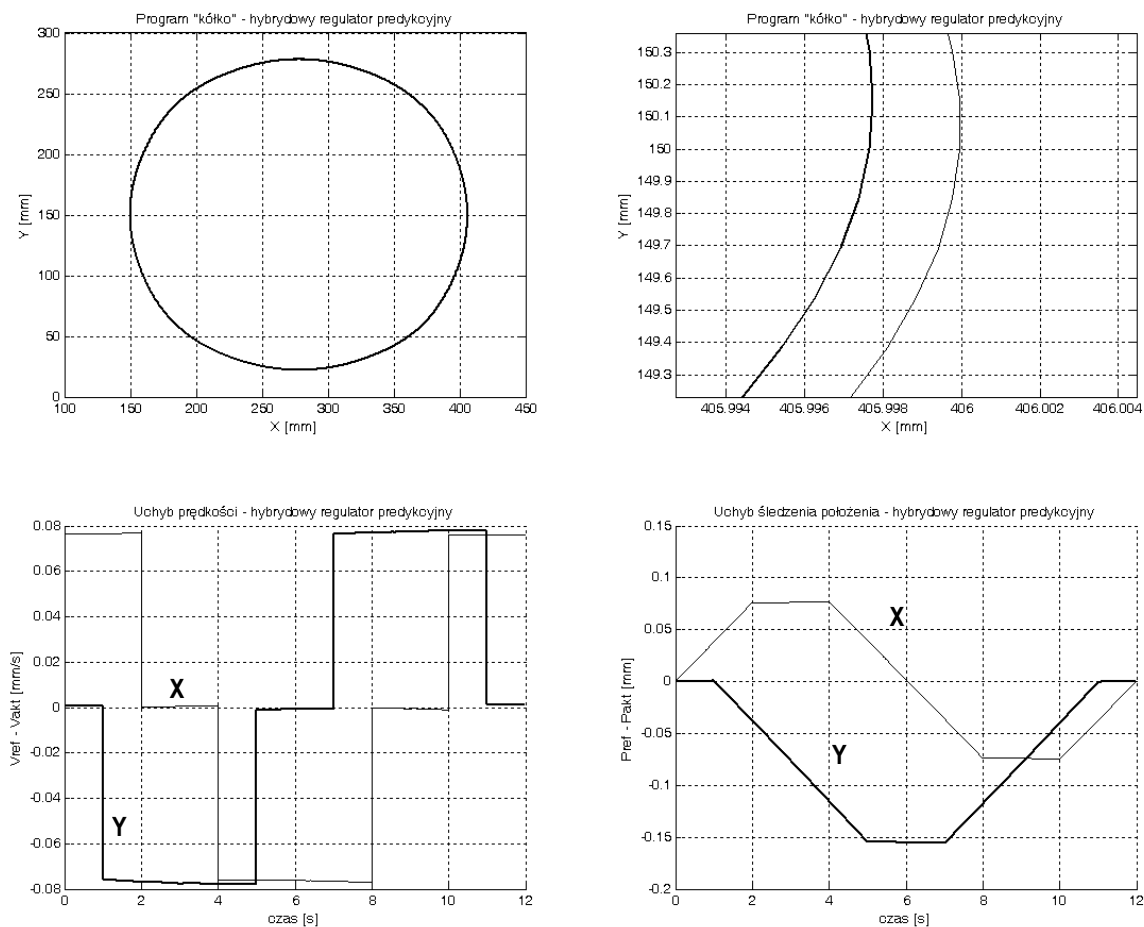
Kolejne dwa rysunki pokazują wyniki zastosowania hybrydowego regulatora predykcyjnego do sterowania stolikiem X-Y. Hybrydowy regulator predykcyjny zaprojektowano dla przedziałami liniowych modeli osi ruchu. Cały zakres roboczy osi X został opisany za pomocą trzynastu modeli, natomiast zakres osi Y siedmioma modelami.

Ustalono krótkie, jednakowe horyzonty predykcji i sterowania $N = N_c = 2$. Macierze wagowe zostały dobrane tak, aby minimalizować uchyb w torach położenia oraz prędkości.

Z uwagi na zapas sterowania w obiekcie, który był tutaj modelowany, dopuszczono w minimalizowanym wskaźniku jakości (6) wystąpienie gwałtownych sterowań:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_y = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [0.01] \quad (10)$$

Na rysunku 8 pokazano wyniki sterowania stolikiem X-Y w teście kołowym, gdy nie był on obciążony masą, zaś na rysunku 9 przedstawiono sytuację, w której zaprojektowany dla nominalnych warunków (bez obciążenia) hybrydowy regulator predykcyjny steruje obiektem obciążonym.

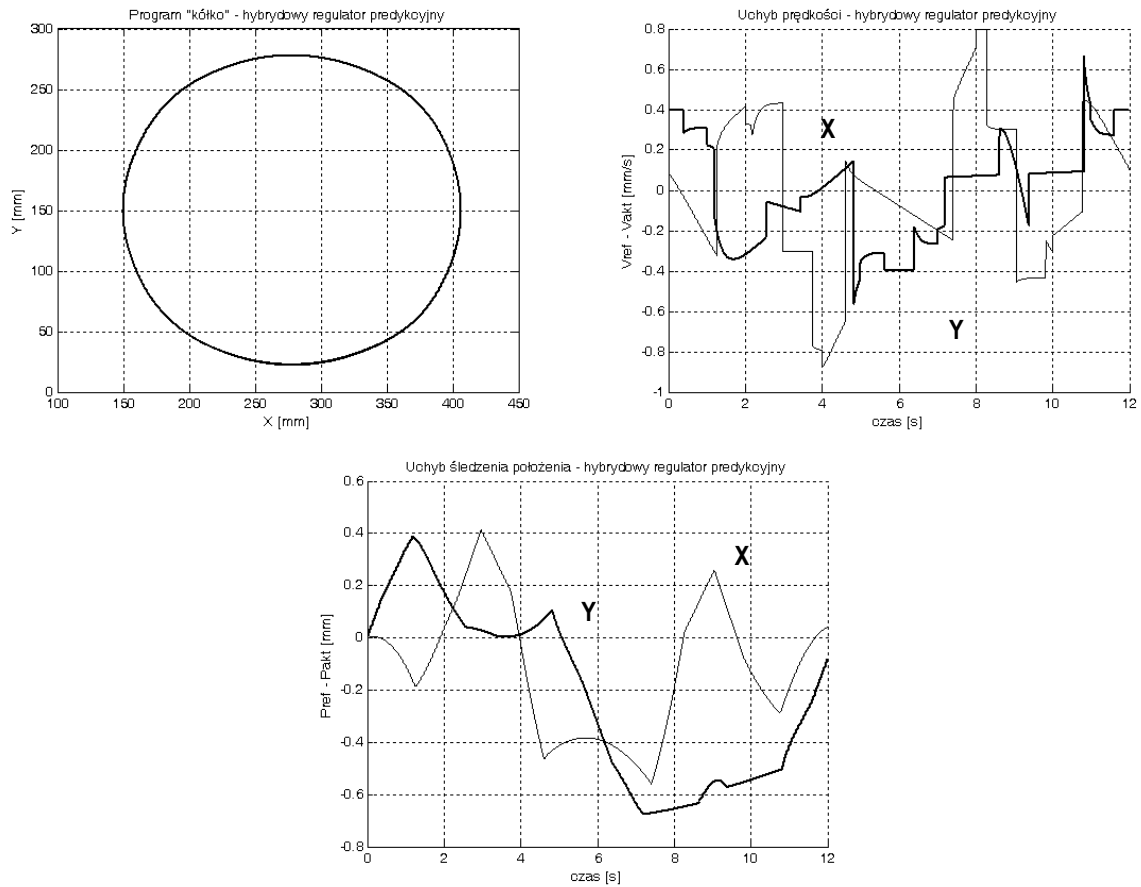


Rys. 8. Wyniki badań symulacyjnych: hybrydowa regulacja predykcyjna (stolik bez obciążenia)
 Fig. 8. Hybrid predictive control results (no mass on the table)

Na rysunku 9 zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych dla sytuacji, w której regulator hybrydowy, zaprojektowany dla przedziałami liniowego modelu stolika X-Y nieobciążonego masą, steruje perturbowanym modelem stolika, to znaczy wyznaczonym dla warunków, w których był on obciążony.

Gdy w modelu osi ruchu zostanie uwzględnione tarcie statyczne, które wprowadza do układu dodatkową nieliniowość przy małych prędkościach wtedy jakość regulacji hybrydowego regulatora predykcyjnego, zaprojektowanego dla modelu bez tarcia pogarsza się. Dodatkowy regulator korekcyjny, zaproponowany na rysunku 2.b, wyliczy dodatkową wartość prądu sterującego, upodabniając tym samym warunki pracy do sytuacji z modelem bez tarcia spoczynkowego. Algorytm projektowania regulatora korekcyjnego jest aktualnie w końcowym etapie opracowania.

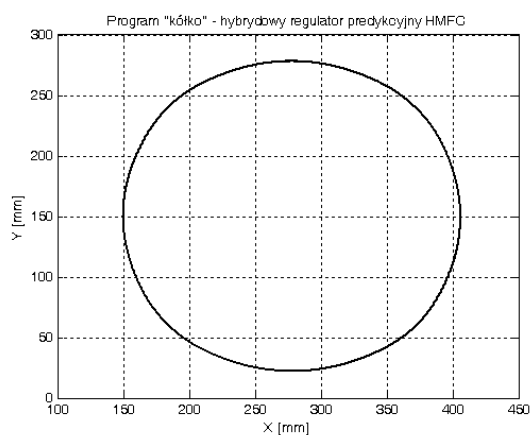
Uzyskane, w przypadku zastosowania hybrydowego regulatora predykcyjnego, wartości dokładności pozycjonowania w teście kołowości nadal nie satysfakcjonują autorów i nie odzwierciedlają nakładu pracy potrzebnego na identyfikację lokalnych modeli osi obrabiarki. W kolejnym etapie badań konieczne będzie zatem zastosowanie dodatkowego stopnia swobody w torze regulacji prędkości/położenia. Zaprezentowane wyniki regulacji z wykorzystaniem idei MFC potwierdzają słuszność stosowania takich struktur do sterowania obiektami nieliniowymi.



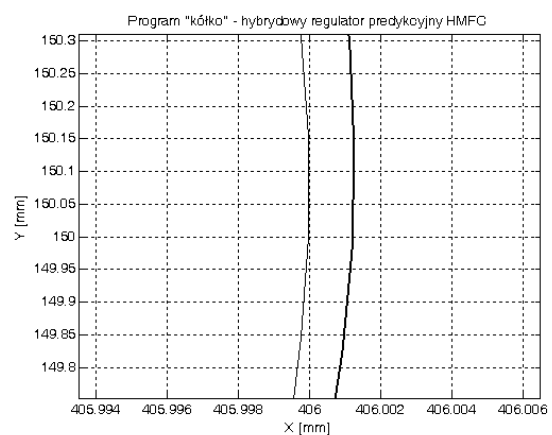
Rys. 9. Wyniki badań symulacyjnych: hybrydowa regulacja predykcyjna (stolik z obciążeniem)
 Fig. 9. Hybrid predictive control results (table with mass on it)

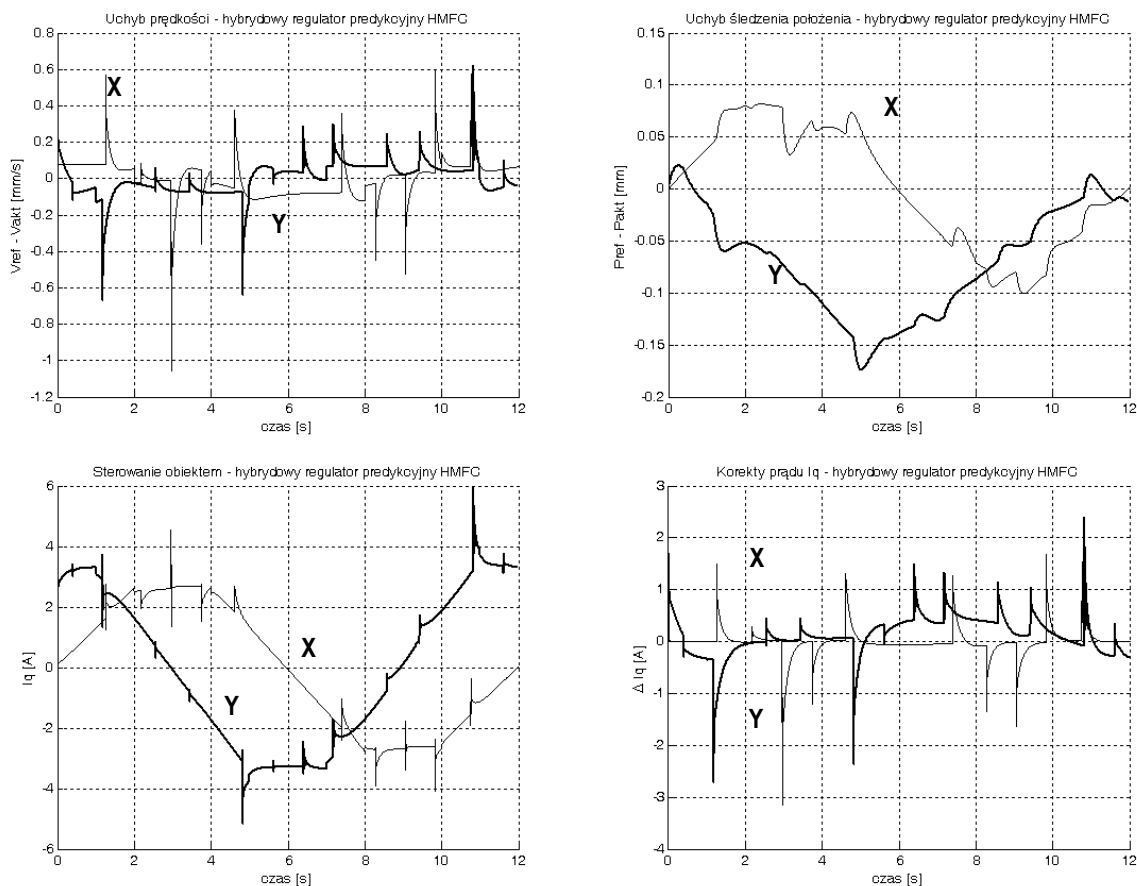
Na rysunku 10 przedstawiono wyniki działania układu HMFC (hybrydowego układu predykcyjnego typu MFC) dla sytuacji, w której zaprojektowany regulator główny steruje modelem wyznaczonym dla stolika X-Y bez obciążenia, zaś obiektem jest układ stolika z zamocowaną na nim masą.

a)



b)





Rys. 10. Wyniki badań symulacyjnych: hybrydowa regulacja predykcyjna typu MFC

Fig. 10. MFC type hybrid predictive control results

Wyniki badań symulacyjnych pokazują, że możliwe jest wyeliminowanie wpływu perturbacji tego typu (w tym przypadku zmiennej masy przedmiotu obrabianego) w odpornym sterowaniu położeniem/prędkością.

7. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wyniki aktualnie prowadzonych prac w ramach projektu „Opracowanie konstrukcji i badania doświadczalne mechatronicznego obrabiarkowego zespołu posuwowego z napędem sterowanym inteligentnym modułowym układem wykonawczym” (projekt MNiSW nr N N502336936). Dotyczą one rozwoju koncepcji przedziałami liniowego odpornego sterowania bazującego na hybrydowych algorytmach z grupy *model-based control*. Wydaje się, że metody te rokują olbrzymie nadzieje w drodze do podniesienia odporności sterowania złożonych obiektów mechatroniki, jakimi są osie posuwu współczesnych cyfrowo sterowanych maszyn do obróbki ubytkowej metali.

Zapewnienie wysokiej, niezmiennej jakości sterowania prędkością posuwu osi ruchu obrabiarek podczas realizacji programu obróbki, stanowi istotne wyzwanie w czasach, gdy wymagania odnośnie prędkości posuwu (ruchy robocze) rosną, zaś napędy obrotowe

w rozwiązaniach o wysokich parametrach stopniowo wypierane są przez rozwiązania z silnikami liniowymi z magnesami trwałymi.

Kolejne etapy prac związane będą z implementacją opracowanych algorytmów w układach FPGA w ramach „inteligentnej” architektury cyfrowego serwonapędu oraz integracją z otwartym systemem sterowania o akronimie *O.C.E.A.N.*

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*, 2009, Cambridge University Press.
- [2] AGACHI P.S., NAGY Z.K., CRISTEA M.V., IMRE-LUCACI Á., 2006, *Model based control: case studies in process engineering*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [3] COLEMAN B. BABU J., 2002, *Techniques of model-based control*, Prentice Hall PTR.
- [4] DOMEK S., 2002, *Robust predictive model following control for uncertain nonlinear systems*, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Szczecin, Poland, 787-92
- [5] DOMEK S., 2006, *Odporna regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin.
- [6] DOYLE J., FRANCIS B., TANNENBAUM A., 1990, *Feedback control theory*, Macmillan Publishing Co.
- [7] DWORAK P., PIETRUSEWICZ K., DOMEK S., 2009, *Improving stability and regulation quality of nonlinear MIMO processes*, Proceedings of the 14th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics - MMAR 2009, Kaszyński R., Pietrusewicz K., Eds. Międzyzdroje, Poland, 1-6.
- [8] KIONG T.K., HENG L.T., SUNAN H., 2008, *Precision motion control: design and implementation*, Springer-Verlag.
- [9] KVASNICA M., 2009, *Real-time Model Predictive Control via Multi-Parametric Programming: theory and tools*, VDM Verlag.
- [10] LIBERZON D., 2003, *Switching in systems and control*, Birkhäuser Boston.
- [11] MACIEJOWSKI J.M., 2002, *Predictive control with constraints*, Prentice Hall.
- [12] NECOARA I., 2008, *Model predictive control for hybrid systems. Piecewise affine and max-plus-linear systems*, VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG.
- [13] PIETRUSEWICZ K., 2008, *Odporny układ MFC-V w regulacji prędkości silnika DC*, Wiadomości Elektrotechniczne, 4/8-9.
- [14] PIETRUSEWICZ K., DWORAK P., Broel-Plater B., 2007, *Robust Model-Following Control for the DC servo drive*, Advances in Manufacturing Science and Technology, 31/3/45-62.
- [15] SKOCZOWSKI S., 1999, *Odporny układ regulacji z wykorzystaniem modelu obiektu*, Pomiar Automatyka Kontrola, 9/2-4.
- [16] SKOCZOWSKI S., DOMEK S., PIETRUSEWICZ K., BROEL-PLATER B., 2005, *A method for improving the robustness of PID control*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52/6/1669-1676.
- [17] SKOCZOWSKI S., OSYPIUK R., PIETRUSEWICZ K., 2006, *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*, Wydawnictwo Naukowe PWN - MIKOM.
- [18] SKOGESTAD S., POSTLETHWAITE I., 1996, *Multivariable feedback control: analysis and design*, Wiley.
- [19] VAHID-ARAGHI O., GOLNARAGHI F., 2011, *Friction-induced vibration in lead screw drives*, Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London.
- [20] YOUSSEF H.A., 2008, *Machining technology: machine tools and operations*, CRC Press.

HYBRID ROBUST CONTROL FOR CNC MACHINE TOOL FEED-DRIVE

The article presents a selection of results from the research and development of the prototype of digital servodrives with permanent magnet synchronous motors within the CNC machine tool feed-drive. Paper describes thoroughly the identification process of dynamic models of machine feed axes. The strong points of the robust control over classical one-loop control were shown in simulations. New hybrid predictive controllers for robust control of machine tool axes were introduced and analyzed.