

STEROWANIE ADAPTACYJNE ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO WYPOSAŻONEGO W GŁOWICĘ LASEROWĄ

Edward CHLEBUS, Krzysztof CHRAPEK, Bolesław JODKOWSKI,
Mateusz MUSIAŁ, Wojciech KIEROCIŃSKI-WĘGRZYN

Streszczenie: W artykule zaprezentowano budowę, implementację i testy algorytmu sterowania adaptacyjnego zastosowanego do utrzymywania stałej odległości od ciętego materiału głowicy laserowej zamontowanej na ramieniu robota. Program nadzorujący działanie układu sterowania adaptacyjnego pracuje na sterowniku PLC a do pomiarów odległości głowicy od powierzchni materiału wykorzystuje czujniki na niej zainstalowane.

Słowa kluczowe: Sterowanie adaptacyjne, sterowanie robotów przemysłowych, technologie laserowe, komunikacja, integracja.

1. Wstęp

Stosowanie algorytmów adaptacji w sterowaniu robotem, stanowi jedno z ciekawszych wyzwań współczesnej robotyki. Sterowanie adaptacyjne pozwala na dostosowywanie się robota do realizowanego zadania, dzięki czemu umożliwia wykorzystanie robotów w miejscach i sytuacjach, gdzie nieokreśloność środowiska zewnętrznego wymagała wykonywania pracy przez człowieka lub dostosowania go do wymagań robota [1, 2].

W projekcie realizowanym przez Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej pt.: „Linia technologiczna do recyklingu AGD” WND-POIG.01.03.01-02-046/08 współfinansowany przez fundusze Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007-2013, przewidziano wykorzystanie robota przemysłowego wyposażonego w głowicę laserową do wycinania paneli z powierzchni bocznych lodówek. Ze względu na stan techniczny sprzętu przeznaczanego do recyklingu oraz konieczność zachowania stałych parametrów procesu niemożliwe było zastosowanie stałych, typowych programów sterujących pracą robota. Przeszkadzały w tym: zwichrowanie kształtu lodówki, wgniecenia oraz trudności w dokładnym pozycjonowaniu korpusu lodówki. W efekcie konieczne było opracowanie metody sterowania adaptacyjnego pozwalającego na zniwelowanie wszelkich odchyłek od przewidzianego kształtu jakie mogłyby się pojawić podczas realizacji procesu.

Do budowy stanowiska wykorzystano: robota przemysłowego Kawasaki RS20N, Głowicę laserową Precitec Cutter System YRC Lasermatic Z oraz sterownik PLC Beckhoff – CX5020-0112. Sama głowica laserowa ma funkcjonalność pozwalającą na utrzymywanie stałej odległości od ciętej powierzchni jednak zakres regulacji położenia jest stosunkowo niewielki (około 30 mm) w związku z czym opracowano metodę dodatkowej korekcji położenia realizowaną przez ramię robota. Głowica porusza się w osi prostopadłej do płaszczyzny ciętej co wykorzystano jako bufor dla sterowania robota. Do sterowania są wykorzystywane informacje pochodzące z układów pomiarowych głowicy laserowej.

Głównym problemem technicznym była integracja wszystkich elementów stanowiska. Zagadnienie to wymagało przetestowania i wyboru właściwego algorytmu sterowania

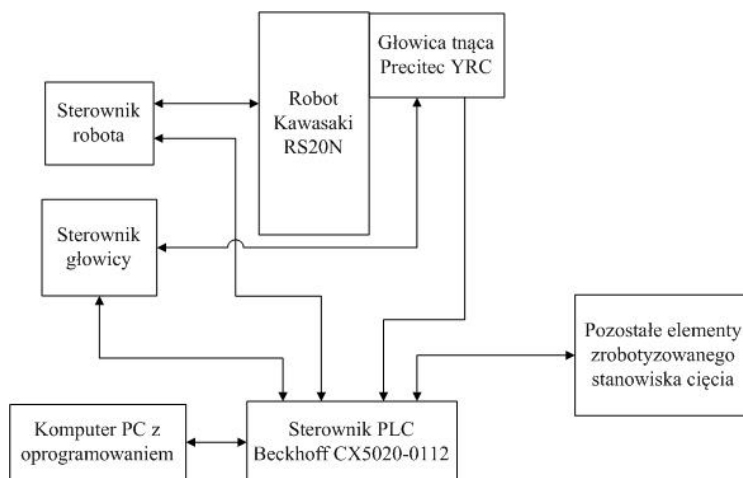
adaptacyjnego możliwego do zrealizowania z wykorzystaniem posiadanych urządzeń oraz ustalenie parametrów jego pracy.

2. Opis stanowiska

W projektowanej linii do demontażu sprzętu AGD stanowisko wycinania paneli współpracuje z innymi urządzeniami (skanowanie wymiarów lodówki, system transportowy, pozycjonujący), których praca jest sterowana przez sterownik PLC. Dlatego założono wykorzystanie tego urządzenia do pośredniczenia w przekazywaniu danych koniecznych do realizacji funkcji sterowania adaptacyjnego przez robota. Taka konfiguracja ułatwiła również przekazywanie danych pomiędzy urządzeniami ponieważ bezpośrednie połączenie układów sterowania robota i głowicy laserowej w ich obecnej konfiguracji sprzętowej nie było możliwe.

2.1. Struktura stanowiska

Stanowisko cięcia składa się z robota i głowicy wraz z ich sterownikami, układu pomiarowego, taśmociągu oraz sterownika PLC (rys.1). Zgodnie z założeniami sygnały wejścia/wyjścia robota i głowicy zostały połączone do sterownika PLC sprawującego rolę nadrzędnego sterownika wszystkich procesów.



Rys. 1. Schemat stanowiska cięcia

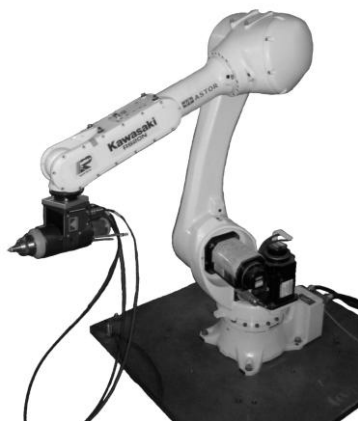
Pokazany na schemacie robot połączony jest ze sterownikiem, który realizuje instrukcje ruchu - wykonuje obliczenia i steruje pracą silników w członach. Na sterowniku robota działa program główny, wycinający zadany kształt na podstawie informacji ze skanera oraz program adaptujący instrukcje ruchu, w oparciu o sygnały ze sterownika PLC. Głowica, zamocowana na ramieniu robota, podłączona jest do swojego sterownika oraz dodatkowo do sterownika PLC. Sterownik głowicy, na podstawie informacji o odległości głowicy od powierzchni ciętej otrzymywanej z pojemnościowego czujnika odległości, odpowiednio zasila wbudowany napęd liniowy, tak aby utrzymana była stała odległość głowicy od

powierzchni ciętej. Sterowanie to przebiega w oparciu o regulator PID. Informacja o położeniu napędu liniowego, generowana przez enkoder inkrementalny, przekazywana jest dodatkowo do sterownika PLC, gdyż w oparciu o nią realizowany jest algorytm adaptacji.

Poza połączeniem z głowicą, sterownik PLC podłączony jest również do złącz wejść/wyjść logicznych sterowników robota i głowicy. Kontrola pracy sterownika oraz wgrzywanie programów odbywa się z komputera klasy PC, z oprogramowaniem TwinCAT, poprzez łącze Ethernet. Program działający na sterowniku PLC, służący do integracji sterowania robota ze sterowaniem głowicy, poza algorytmem adaptacji zawiera moduły komunikacyjne obsługujące alarmy błędów oraz przygotowujące robota i głowicę do cięcia. Ponieważ sterownik PLC steruje pracą całego stanowiska wycinania, podłączony jest również do falowników sterujących ruchem taśmociągu i napędu liniowego skanera laserowego oraz do sterownika skanera.

2.2. Robot przemysłowy

Robot Kawasaki RS20N (rys. 2) jest uniwersalnym robotem antropomorficznym pierwszej generacji. Ruch manipulatora pomiędzy pozycjami może odbywać się zarówno bez realizacji trajektorii, jak i po zadanej trajektorii – liniowej lub kołowej. Powtarzalność ruchów robota wynosi ± 0.05 milimetra.



Rys. 2. Robot Kawasaki RS20N z zainstalowaną głowicą laserową

Jednostką sterującą pracą robota jest sterownik E40. Posiada on 32 wyjścia i 32 wejścia sygnałów logicznych. Sterownik ten umożliwia obsługę najważniejszych protokołów przemysłowych (Profibus DP, DeviceNet, Ethernet/IP, Modbus/TCP, itd.). Kontroler E40 obsługuje zarówno język blokowy jak i język AS. Język AS pozwala na realizację w tle pięciu programów w trakcie wykonywania programu głównego.

2.3. Głowica Laserowa – Precitec Cutter System YRC Lasermatic Z

Głowica laserowa Cutter System YRC Lasermatic Z firmy Precitec (rys. 3) jest dedykowana do zastosowania na zrobotyzowanych stanowiskach cięcia. Współpracuje z

laserem Nd:YAG. Głowica ta umożliwia odległościowo-kontrolowane cięcie metali, gdyż wraz ze sterownikiem silnika liniowego tworzy dynamiczną i precyzyjną pętlę sterowania odległością głowicy od powierzchni ciętej.

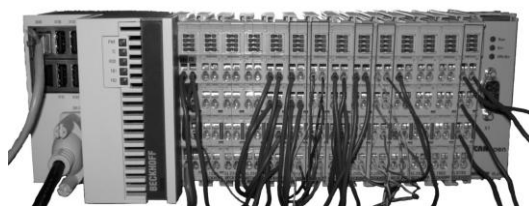


Rys. 3. Głowica laserowa Cutter System YRC Lasermatic Z firmy Precitec wraz z układem sterowania

Głowica została wyposażona w napęd liniowy oraz w pojemnościowy czujnik Lasermatic Z, znajdujący się w górnej części głowicy. Moduł czujnika Lasermatic Z, chroniony patentem, pozwala mierzyć odległość głowicy od powierzchni ciętej – w warunkach cięcia.

2.4. Sterownik PLC Beckhoff – CX5020-0112

Wykorzystany do realizacji prezentowanego zadania sterownik CX5020-0112 firmy Beckhoff, jest urządzeniem klasy Embedded PC.



Rys. 4. Sterownik PLC Beckhoff – CX5020-0112 z zaznaczonymi modułami wykorzystywanymi do realizacji opisanego zadania

Sterownik CX5020-0112 (rys. 4) wyposażony jest w wiele terminali komunikacji, zarówno cyfrowych jak i analogowych. Poniżej, wyszczególnione i omówione zostały terminale, wykorzystane podczas realizacji niniejszej pracy:

- Terminal EL1018 – terminal wejść cyfrowych 24 V,
- Terminal EL2008 – terminal wyjść cyfrowych 24 V,

- Terminal EL5152 – terminal interfejsu enkodera inkrementalnego.

Terminal EL1018 zbiera binarne sygnały sterujące z poziomu procesu i przekazuje je do sterownika CX5020-0112.

Terminal EL2008 przekazuje sygnały sterujące ze sterownika CX5020-0112, do elementów wykonawczych.

Terminal EL5152 jest interfejsem, z wejściami 24 V, pozwalającym na bezpośrednie podłączenie enkodera inkrementalnego. Terminal ten zlicza impulsy z faz A i B a następnie odejmuje lub dodaje (na podstawie kolejności sygnałów z faz odczytywany jest kierunek obrotu) ich liczbę od wartości licznika.

2.5. Komunikacja i problemy z nią związane

Pierwszym krokiem było przygotowanie sterownika PLC do pracy przy użyciu pakietu oprogramowania TwinCAT. Utworzono plik na program sterujący, w którym zadeklarowano sygnały wejściowe i wyjściowe konieczne do komunikacji z innymi urządzeniami. Następnie przypisano zadeklarowane sygnały (tab. 1, 2) do konkretnych wejść i wyjść terminali sterownika i utworzono mapę ich adresów.

Komunikacja sterownika PLC ze sterownikiem głowicy laserowej obejmuje dwa zastosowania:

- obsługa pracy głowicy – przesyłanie informacji o jej stanie i poleceń o nadzorujących jej pracę (w tym funkcje bezpieczeństwa),
- przesłanie informacji o aktualnym położeniu serwonapędu odpowiedzialnego za sterowanie adaptacyjne głowicy.

Tab. 1 Sygnały wejściowe sterownika głowicy wykorzystane przez sterownik PLC [3]

sygnał	opis
enable	sygnał aktywności
automatic	przełączanie trybów pracy głowicy pomiędzy trybem manualnym a automatycznym
prog.position	pozwała ustawić napęd liniowy głowicy w pozycji optymalnej do rozpoczęcia ruchu robota
ref.travel.	ustawia głowicę w położeniu kalibrującym licznik enkodera

Tab. 2 Sygnały wyjściowe ze sterownika głowicy wykorzystane przez sterownik PLC [3]

sygnał	opis
far	informuje, czy powierzchnia cięta nie jest poza zasięgiem sensora
tip touch	informuje o zetknięciu się dyszy elektrody z powierzchnią ciętą
pos.reached	informuje o osiągnięciu przez głowicę zadanej pozycji
/system error	sygnalizuje wszystkie błędy systemowe
ready	sygnalizuje gotowość głowicy do rozpoczęcia pracy
body touch	informuje o kolizji głowicy
lower travel limit	sygnał informujący o przesunięciu się napędu liniowego do dolnego położenia krańcowego
upper travel limit	sygnał informujący o przesunięciu się napędu liniowego do dolnego położenia krańcowego
cable cut	informacje o przecięciu lub odłączeniu przewodów sygnałowych bądź przewodu zasilającego głowicę

Uzyskanie informacji o aktualnym wysunięciu głowicy jest istotne dla działania całego układu sterowania adaptacyjnego. Napotkano tu jednak na niewielki problem – złącze interfejsu wejść/wyjść sterownika głowicy nie ma wyprowadzonych sygnałów faz A i B enkodera. Wykorzystano jednak sygnały ze złącza sygnałów sterujących.

Część programu sterownika odpowiedzialna za komunikację z głowicą realizuje zadania:

- przygotowanie głowicy do pracy automatycznej,
- prawidłowe ustawienie licznika enkodera w terminalu EL5152,
- włączenie trybu automatycznego,
- przekazywanie informacji o błędach do bloku komunikacji z robotem.

2.6. Komunikacja z robotem

Sterownik PLC wysyła do sterownika robota informacje zezwalającą na rozpoczęcie pracy oraz dane o przesunięciu w osi narzędzia. Otrzymuje jedynie informację o wstrzymaniu pracy robota w wyniku błędu lub zakończenia programu.

3. Algorytm sterowania adaptacyjnego

Algorytm sterowania ruchem robota nie pozwala na proste sterowanie poprzez zmianę on-line współrzędnych punktu docelowego co byłoby najbardziej efektywnym rozwiązaniem jednak dość trudnym i niebezpiecznym w implementacji. Programy sterujące robotem Kawasaki RS20N wykonywane są w następujących sekwencjach:

- wykonanie zgodnie z kolejnością wszelkich instrukcji nie będących a poprzedzających instrukcją ruchu,
- realizacja instrukcji ruchu – po wyznaczeniu sygnałów sterujących dla napędów robot rozpoczyna ruch i wszelkie zmiany współrzędnych punktu docelowego nie będą brane pod uwagę,
- wykonanie kolejnych instrukcji nie będących instrukcją ruchu,
- przygotowanie do realizacji kolejnej instrukcji ruchu i oczekiwanie na zakończenie poprzedniej instrukcji ruchu,
- po zakończeniu trwającego ruchu robot rozpoczyna realizację „oczekującej” instrukcji.

Możliwe jest zatrzymanie wykonywania instrukcji innych niż instrukcje ruchu przy użyciu komend BREAK, jednak wtedy sterownik nie przeliczy sygnałów sterujących dla następnego ruchu co zakłóci płynne przejście z pierwszego ruchu do drugiego.

Takie działanie algorytmu sterowania robota niesie ze sobą następujące ograniczenia:

- nie można zmienić lub korygować współrzędnych punktu docelowego ani pośrednich w trakcie realizacji ruchu bez jego przerwania,
- korekta współrzędnych dla następnej instrukcji ruchu musi być gotowa zanim zakończona zostanie aktualnie realizowana instrukcja ruchu lub konieczne będzie wstrzymanie przetwarzania programu co wpływa na mało płynną pracę programu.

Ze względu na sposób wykonywania programów robota, rozważane były różne rozwiązania adaptacji sterowania ruchem ramienia robota. Poniżej wymienione zostały trzy, które zostały sprawdzone na robocie:

- wywołanie przerwania i zmiana współrzędnych punktu docelowego,

- wywołanie przerwania i podniesienie/opuszczenie robota o zadany skok oraz zmiana współrzędnych punktu docelowego,
- własna interpolacja ruchu robota i zmienianie współrzędnych kolejnych punktów pośrednich.

W pierwszym przypadku wykorzystana została instrukcja ONI, która po załączeniu zdefiniowanego sygnału wstrzymuje wykonywanie programu, nie czekając aż robot dokończy ruch. Następnie instrukcja ONI wykonuje zdefiniowaną liniijkę kodu lub wywołuje zadany podprogram.

Rozwiązanie takie posiada dwie wady. W wyniku przerwania zatrzymywany jest ruch robota, który wznowiany jest po przeliczeniu nastaw napędów dla nowych współrzędnych. Każda zmiana położenia głowicy wymaga dwóch przerw i w efekcie ruch robota jest często przerywany. Drugą wadą całkowicie dyskwalifikującą to rozwiązanie, jest zmiana współrzędnych punktu końcowego. Przy dużej odległości pomiędzy punktem startowym i końcowym ruchu współrzędne punktu końcowego mogą się zmienić na tyle znacząco, że sterownik zgłosi błąd – punkt końcowy poza zasięgiem.

Kolejne rozwiązanie było próbą wyeliminowania głównej wady pierwszego rozwiązania. W rozwiązaniu tym, podobnie jak w poprzednim, wykorzystano instrukcję ONI, jednak zmienione zostało działanie wywoływanego podprogramu. W tym przypadku podprogram nie tylko zmienia współrzędne punktu końcowego, ale także wykonuje instrukcję ruchu korygującego położenie głowicy co zmniejsza liczbę przerwania działania programu.

Dzięki wprowadzeniu instrukcji ruchu do podprogramu i zmianie o niewielką wartość współrzędnej Y punktu końcowego, udało się wyeliminować błąd – punkt końcowy poza zasięgiem. Jednak w sytuacji dużej różnicy głębokości wgniecenia, wywołanych było by kilka przerw – kilka korekt o małą ustaloną wartość. Niestety, aby cięcie zostało wykonane prawidłowo, ruch wykonywany przez robota powinien być jak najbardziej płynny, więc rozwiązanie to również nie jest zadowalające.

W trzecim przypadku wykorzystane zostały rozwiązania z dwóch poprzednich (zmiana współrzędnych końcowego punktu ruchu, jednak o małą, ustaloną wartość), jednak wyeliminowana została komenda „ONI”. Aby zapewnić robotowi możliwość reakcji na sygnały ze sterownika, przy jednoczesnym zachowaniu płynności ruchu, odcinek który robot miał pokonać w jednym ruchu podzielony został na wiele krótszych. Dzięki temu sterownik robota, z niewielkim opóźnieniem, mógł wprowadzić korektę. W rozwiązaniu tym wszystkie instrukcje ruchu z programu głównego przeniesione zostały do podprogramu. Dzięki temu w łatwy sposób możliwe jest zastosowanie stworzonego podprogramu adaptacyjnego w każdym programie.

Ostatecznie wybrano metodę sterowanie opartą na ostatnim z testowanych rozwiązań. Wykorzystany algorytm został rozbudowany o funkcje:

- wyboru prędkości korekty ruchu robota,
- przerwania ruchu po sygnale błędów,
- korekty pozycji startowej robota.

Dla uzyskania bardziej płynnej korekty ruchu ramienia robota, zamiast sygnalizacji „odsuń/przysuń” i „korekta/brak”, zostały również użyte sygnały sterowania głowicą „odsuń/przysuń” oraz „wolno/brak” i „szybko/brak”. Pozwoliło to na użycie nie tylko maksymalnej prędkości odsuwania ale także prędkości pośredniej – do korekt niewielkich wzrostów nierówności. Algorytm, na podstawie którego sterownik PLC generuje odpowiednie sygnały, działa na zasadzie przekraczania przez napęd liniowy głowicy ustalonych progów. Jeżeli więc wartość zmiennej zliczającej impulsy enkodera zawiera się

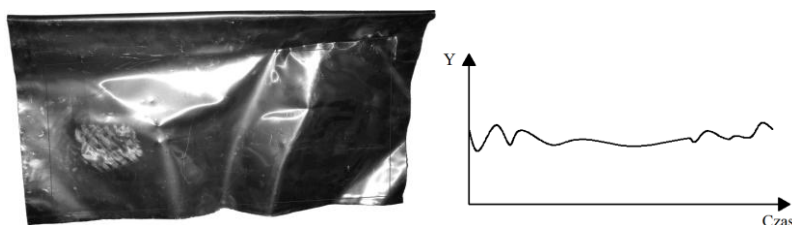
w określonym przedziale, załączane są odpowiednie wyjścia sterownika PLC. Ponieważ, całkowity zasięg napędu liniowego głowicy wynosi 30 mm, progi wolnego korygowania trajektorii robota ustalone zostały dla wartości odbiegających o 4 mm od środkowego położenia napędu a progi rozpoczęcia szybkiego korygowania ustalone zostały dla wartości odbiegających o 8 mm. Dzięki takiemu ustawieniu progów napęd głowicy miał jeszcze wystarczający zapas zasięgu do zniwelowania opóźnienia reakcji robota.

W celu zabezpieczenia głowicy, przed skutkami kolizji, wprowadzona została funkcja przerywania ruchu robota, po sygnale błędu ze sterownika PLC. Sygnał ten generowany jest w sytuacji pojawienia się jakiegokolwiek błędu głowicy – czy to zetknięcia z powierzchnią ciętą, czy uszkodzenia przewodów.

Korekta pozycji startowej została dodana w celu zapewnienia prawidłowego rozpoczęcia cięcia, w sytuacji odsunięcia powierzchni ciętej od zdefiniowanego punktu początkowego. W tym celu wykorzystano sygnały „przysun” i „auto”, z bloku komunikacji z głowicą, które przekazywane są do sterownika robota.

4. Testy i weryfikacja działania algorytmu

Dla zweryfikowania poprawności działania sterowania adaptacyjnego dla różnych parametrów, wykonano szereg prób z wykorzystaniem znacząco pociętej blachy. W tym celu napisany został program testowy wykonujący dojazd, ruch wycinania prostokąta i odsunięcie. Obwód wycinanego prostokąta miał wymiar 2588 mm, a stosunek długości jego boków wynosił około 1:2. Na rysunku 5 przedstawiono blachę wykorzystaną do testów, gdzie czerwonym prostokątem zaznaczono tor ruchu robota realizowany przez program testowy. Robot rozpoczął test w prawym, dolnym rogu zaznaczonego prostokąta.



Rys. 5 Powierzchnia wykorzystywana do testowania zaproponowanego rozwiązania: widok rzeczywisty i topografię trajektorii

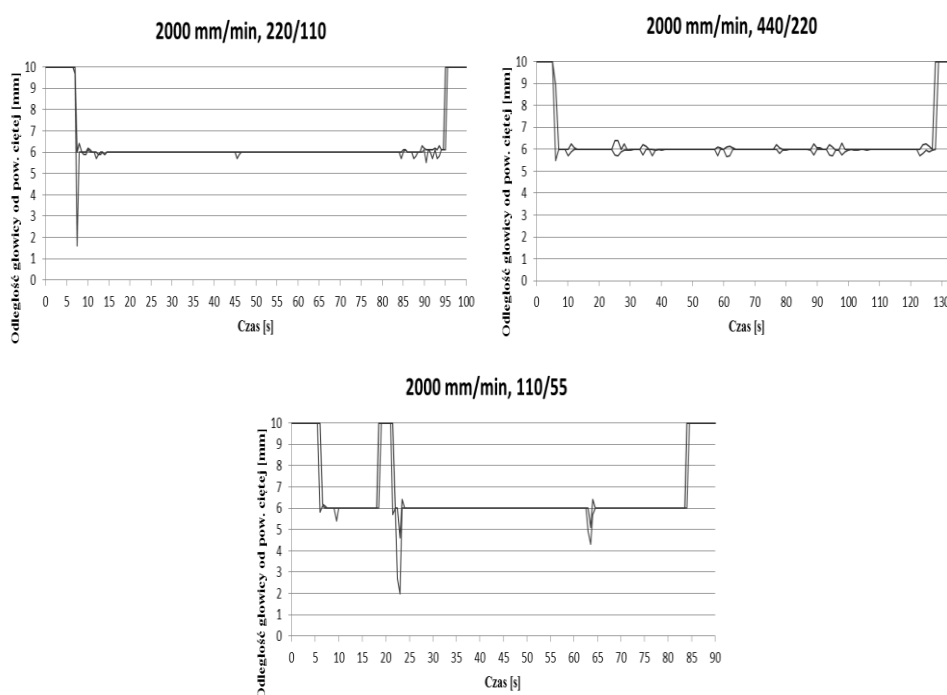
Jako wskaźnik jakości sterowania, wybrana została odległość dyszy elektrody od materiału ciętego, mierzona przez czujnik Lasermatic Z. Wartość tej odległości, podawana jest przez interfejs wejść/wyjść sterownika głowicy w formie napięcia. Przebiegi czasowe tej wartości zostały zebrane przez skopometr przemysłowy Fluke 125 a następnie pobrane na komputer PC.

Program testowy pozwala zarówno na modyfikowanie parametrów podprogramu „adaptacja”, jak również na modyfikację prędkości wykonywania ruchu. Zostało przeprowadzonych dziewięć prób z różnymi wartościami prędkości ruchu robota i liczbą kroków interpolacji.

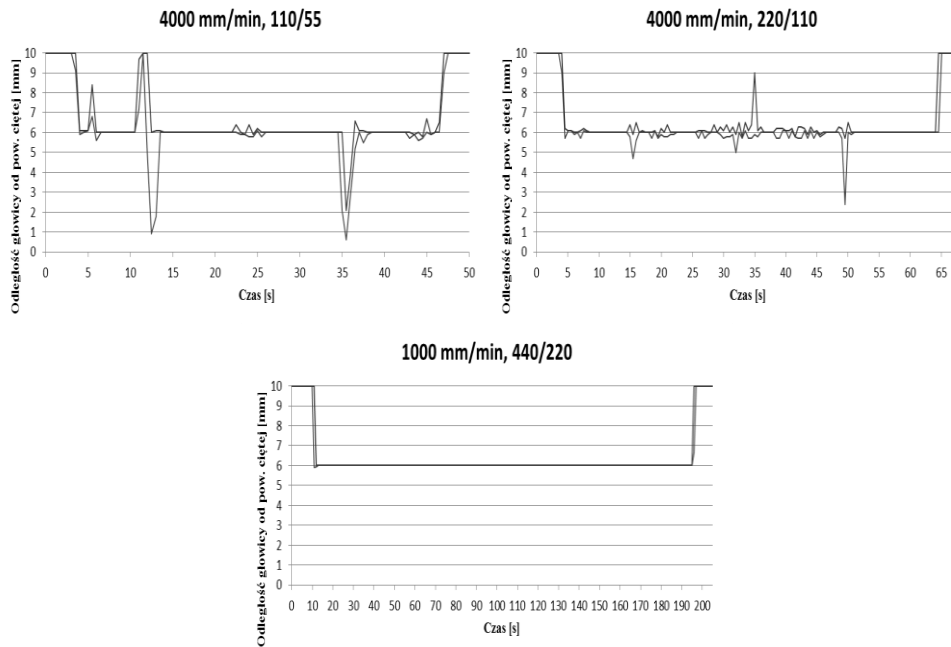
Tab. 3. Parametry przyjęte podczas testów

Numer testu	Prędkość ruchu	Liczba interpolacji
1	2000 mm/min	220/110
2	2000 mm/min	440/220
3	2000 mm/min	110/55
4	4000 mm/min	110/55
5	4000 mm/min	220/110
6	1000 mm/min	440/220
7	6000 mm/min	110/55
8	6000 mm/min	220/110
9	8000 mm/min	220/110

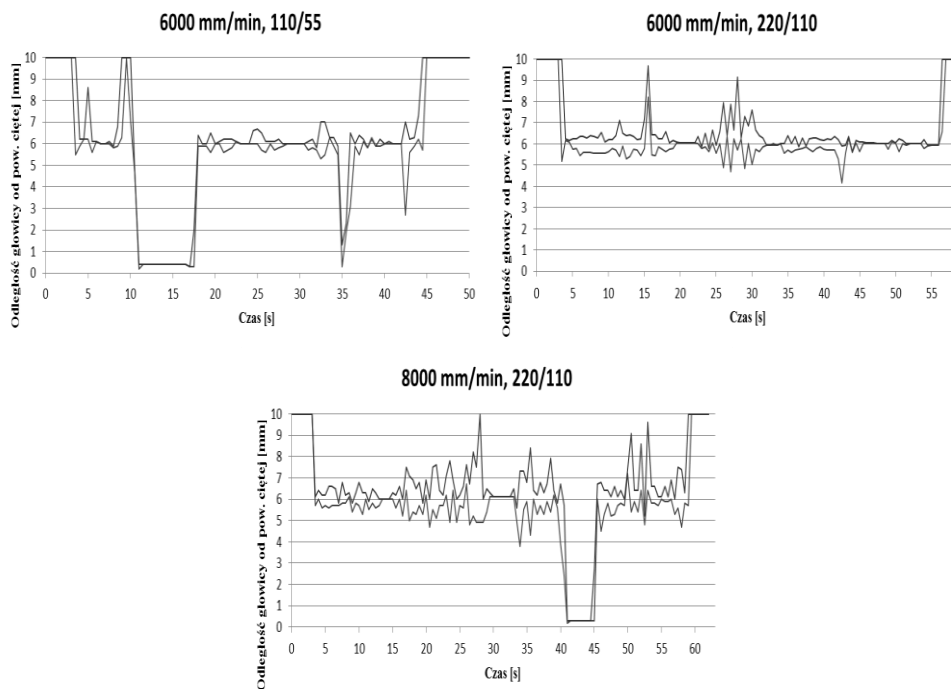
W tabeli 3 przedstawiono parametry przyjęte dla poszczególnych prób a wykresy na rysunkach 6,7,8 pokazują zmierzone dla kolejnych prób wartości odległości dyszy elektrody od materiału ciętego podczas ruchu po zdefiniowanym prostokącie. We wszystkich próbach zadaną wartością odległości dyszy elektrody od powierzchni roboczej było 6 mm. Dane uzyskane ze skopometru zawierały po dwie serie dla każdego wykresu, gdyż zapisywane były maksymalne (kolor czerwony) i minimalne (kolor niebieski) wartości odległości, między którymi oscylowała wartość mierzona. W miejscach, gdzie mierzona wartość odległości nie oscylowała, oba wykresy nakładają się.



Rys. 6. Odlegość głowicy od powierzchni dla prędkości ruchu głowicy 2000 mm/min i różnej liczby interpolowanych odcinków (testy 1, 2, 3)



Rys. 7. Odległość głowicy od powierzchni ruchu głowicy i różnej (testy 4, 5, 6)



Rys. 8. Odległość głowicy od powierzchni dla dużych prędkości ruchu głowicy i różnej liczby interpolowanych odcinków (testy 7, 8, 9)

5. Wnioski

Jak widać na powyższych wykresach na dokładność i stabilność odległości głowicy laserowej od ciętego materiału wpływają znacząco oba testowane parametry. Warto zauważyć, iż liczba interpolacji wpływała nie tylko na czas reakcji robota, ale także na szybkość wykonywanych przez niego korekt, gdyż przyrost lub spadek wartości współrzędnej Y jest stały dla odcinka interpolacji, niezależnie od jego długości. W efekcie, przy zbyt małej liczbie interpolacji robot nie tylko reagował z dużym opóźnieniem, ale też nie był w stanie wykonywać wystarczających korekt dla ekstremalnych wahań nierówności powierzchni ciętej (testy 3, 4 i 7). Interesującym jest, że nadmierna liczba interpolacji wywołuje zbyt gwałtowne korekty robota, powodujące naprzemienne odsuwanie i przysuwanie się robota do powierzchni roboczej, a w efekcie oscylację odległości głowicy od blachy (porównanie testów 1 i 2 oraz 4 i 5). Oscylacja odległości głowicy od blachy była szczególnie widoczna na odcinkach, w których wahania nierówności powierzchni ciętej były niewielkie.

Szybkość, z jaką wykonywany jest ruch, istotnie wpływa na jakość sterowania, gdyż zarówno robot jaki i głowica wraz ze wzrostem prędkości ruchu, przestają nadążać z wprowadzaniem korekt. Problem ten uwidacznia się przy prędkości rzędu 4 m/min, przy dużych zmianach powierzchni roboczej (testy 4 i 5), a przy prędkościach wyższych, widoczny jest w całym zakresie pracy robota. W skrajnych przypadkach doprowadza to, do uderzenia głowicy w powierzchnię roboczą (testy 7 i 9). Zwiększenie liczby interpolacji, przy dużych prędkościach, pomaga w niewielkim stopniu, a przy ustawieniu zbyt dużej liczby kroków ruch robota przestaje być płynny (test 8). Zmniejszenie prędkości, z jednej strony zwiększa szybkość reakcji robota (drobniejsze kroki), a z drugiej strony daje więcej czasu na wykonanie korekty przez napęd liniowy głowicy. Pozwala to, na osiągnięcie coraz lepszego sterowania, aż do bardzo dokładnego (test 6).

Należy również zauważyć, że sterownik robota potrzebuje czasu na wykonanie obliczeń i jeżeli czas przejazdu przez odcinek składowy jest zbyt krótki, sterownik zmniejsza prędkość, z jaką porusza się robot. Przy dalszym zwiększaniu liczby interpolacji, a co za tym idzie skracaniu czasu przejazdu przez odcinki składowe, ruch przestaje być płynny i robot zaczyna drżeć, a w ekstremalnych przypadkach robot robi przerwy po każdym odcinku.

Ponieważ droga, którą robot przebywał na odcinku testowym, wynosiła 2588 mm, to czas w jakim robot powinien ją pokonać, poruszając się z prędkością 2 m/min, wynosi 77,6 s. Zbliżony czas przejazdu udało się osiągnąć w teście 6, co oznacza że sterownik potrzebuje w przybliżeniu 1,7 s na krok, aby wykonać wszystkie obliczenia bez spowalniania ruchu robota. W pozostałych testach ruch robota był płynny, jednak czasy przejazdu były większe od obliczonego dla danej prędkości, od kilku do nawet kilkudziesięciu procent.

Istotnym jest podkreślenie, że testy były przeprowadzane z wykorzystaniem mocno pociętej blachy. W sytuacji cięcia powierzchni o mniejszych waniach nierówności, jakość sterowania będzie lepsza. Sytuację tę obrazują środkowe części wykresów, gdzie nierówności blachy były znacznie mniejsze, niż w początkowej i końcowej części. Wahania odległości dyszy elektrody od materiału ciętego, są w tych częściach wykresu wyraźnie mniejsze, jednak tylko w testach, w których liczba interpolacji nie była nadmierna (testy 1, 3, 4, 6 i 7).

Literatura

1. Craig J. J.: Adaptive Control of Mechanical Manipulators. Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
2. Honczarenko J.: Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
3. Precitec KG: Cutter System YRC. Technical Product Manual, 2009.

Prof. dr hab. inż. Edward CHLEBUS

Dr inż. Krzysztof CHRAPEK

Mgr inż. Bolesław JODKOWSKI

Mgr inż. MATEUSZ MUSIAŁ

Wojciech KIEROCIŃSKI-WĘGRZYN

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

Politechnika Wrocławska

50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

tel./fax: (0-71) 320 27 05

e-mail: edward.chlebus@pwr.wroc.pl

krzysztof.chrapek@pwr.wroc.pl

boleslaw.jodkowski@pwr.wroc.pl

mateusz.musial@pwr.wroc.pl