

Adam BUKOWSKI¹

STEROWANIE I NADZOROWANIE SYSTEMU USTALANIA POŁOŻENIA PRZEDMIOTU W PRZYRZĄDZIE OBRÓBKOWYM

Politechnika Wroclawska w ramach projektu AFFIX przygotowała stanowisko pomiarowe służące do badań metod sterowania i nadzorowania procesu ustalania położenia i mocowania przedmiotu w aktywnym przyrządzie. Niniejszy artykuł koncentruje się na prezentacji algorytmów sterowania i ich aplikacji w testach laboratoryjnych, a także na dyskusji wyników otrzymanych podczas testów. Porównano cechy dwóch zrealizowanych konfiguracji przyrządu obróbkowego tj. przyrządu z dwoma i trzema siłownikami elektromechanicznymi. W dyskusji wyników zwrócono uwagę na możliwości optymalizacji procesu, zarówno od strony algorytmów sterowania, jak i użytych w procesie sił.

1. WSTĘP

Do istotnych czynników mających wpływ na wysokowydajne wytwarzanie finalnych wyrobów oraz ich zespołów należy zaliczyć dokładność, czas obróbki i czas montażu elementów składowych. Uzyskanie dużych dokładności i krótkich czasów jest szczególnie trudne do osiągnięcia w odniesieniu do złożonych geometrycznie i wiotkich elementów, z natury swojej kosztownych lub nawet bardzo kosztownych. Do takich elementów należą np. części odrzutowych silników lotniczych i inne części samolotów, a także w mniejszym stopniu samochodów. Wspomniany wysoki koszt tych elementów uzasadnia celowość stosowania przyrządów obróbkowych cechujących się bardzo dużą dokładnością ustalania położenia, niepowodującego ich odkształceń, przy zapewnieniu możliwie krótkiego czasu trwania niezbędnych czynności. Spełnienie tych warunków wymaga zapewnienia wysokiego poziomu automatyzacji z wykorzystaniem dokładnego aktywnego sterowania, diagnostyki i nadzorowania realizowanych procesów.

Od strony sprzętowej wymaga to zastosowania sensorów i siłowników bardzo czułych i o odpowiednich właściwościach statycznych i dynamicznych oraz sprawnych sterowników, umożliwiających odpowiednią diagnostykę, nadzorowanie, korekcję i kompensację błędów przedmiotów w sposób aktywny.

¹Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska, e-mail: adam.bukowski@pwr.wroc.pl

Od strony programowej, do sterowania przyrządem obróbkowym, wymagane jest stosowanie procedur szybkich i inteligentnych, realizowanych w czasie rzeczywistym oraz procedur optymalizacji, pozwalających na poprawę jakości i efektywności opracowanych algorytmów.

Istota takich przyrządów i realizowanych procesów musi być oparta o zintegrowany model mechatronicznego przyrządu obróbkowego z modelem zachowania się przedmiotu, uwzględniającego nie tylko jego geometrię, ale też zjawiska zachodzące na styku przedmiotu z ustalaczami i siłownikami. Opracowane modele uwzględniające zakłócenia statyczne, dynamiczne realizowanych procesów i modele przedmiotów wymagają weryfikacji eksperymentalnej, zarówno bez, jak i z uwzględnieniem procesu skrawania.

Prezentowana publikacja przedstawia eksperymentalną analizę cech dwóch zrealizowanych konfiguracji przyrządu obróbkowego tj. przyrządu z dwoma i trzema siłownikami elektromechanicznymi. Obydwie konfiguracje przyrządu obróbkowego są zdolne do realizacji ustalania położenia w sposób precyzyjnie sterowany przy użyciu siłowników elektromechanicznych i monitorowania procesu ustalania położenia za pomocą zestawu czujników siły i położenia. Umotywowano dobór zastosowanych czujników oraz omówiono algorytmy sterujące urządzeniem mechatronicznym. W ocenie porównawczej rozważanych konfiguracji przyrządu uwzględniono takie parametry, jak powtarzalność, rozkład sił na elementach oporowych i czas cyklu procesu. Na zakończenie omówiono możliwości optymalizacji procesu pod kątem czasu trwania cyklu ustalania położenia.

2. PROCES DOKŁADNEGO USTALANIA POŁOŻENIA

W przypadku elementów cienkościennych, proces dokładnego ustalania położenia jest wyjątkowo trudny, ponieważ siły wywierane na przedmiot mogą go nadmiernie odkształcić. Proces ustalania położenia można zarówno przyśpieszyć, jak i poprawić jego dokładność, wprowadzając do oprzyrządowania elementy wykonawcze sterowane komputerowo, a także czujniki siły w elementach ustalających i czujniki przemieszczeń w punktach bazowych. Prawidłowe i wydajne czasowo funkcjonowanie tak powstałego aktywnego, mechatronicznego przyrządu obróbkowego można zapewnić poprzez opracowanie i optymalizację sprawnych algorytmów sterowania. Dodatkowo należy przeprowadzić symulacje numeryczne (np. przy użyciu MES), aby wyznaczyć optymalne siły ustalania położenia, czyli takie, których zastosowanie nie powoduje jeszcze nadmiernych błędów wymiarów i kształtu przedmiotu, ale gwarantuje jego poprawne zamocowanie.

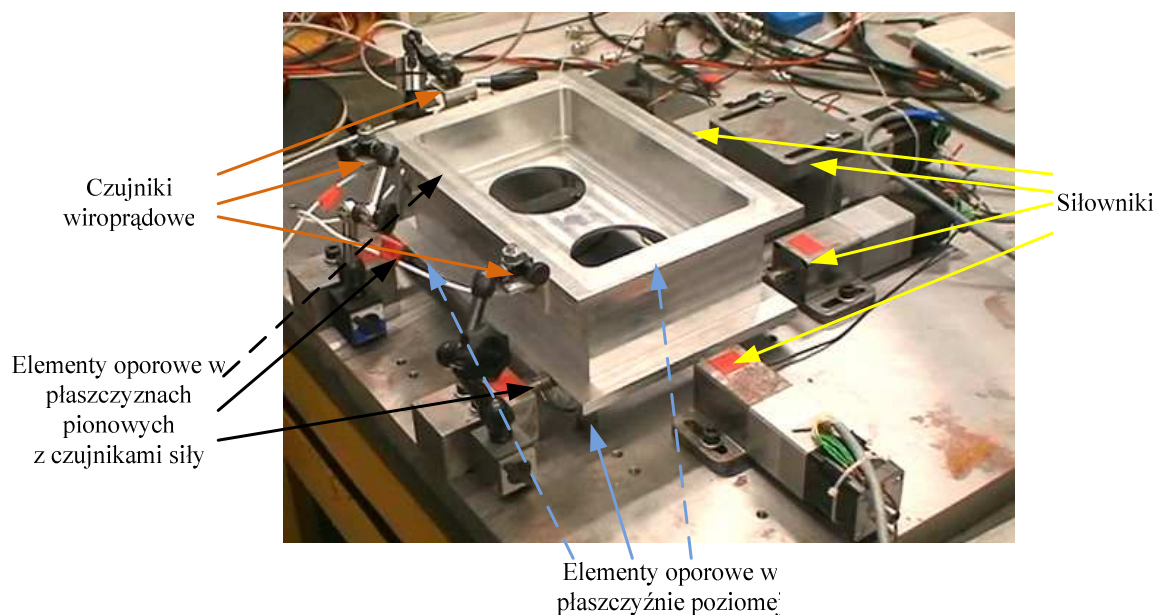
W publikacjach [1, 2] spotyka się opisy skupiające się na aspektach badania wpływu parametrów mocowania na błędy położenia przedmiotu po zamocowaniu. W pracy [1] rozważano wpływ kolejności działania docisków o stałej sile na dokładność procesu mocowania. Przedstawiono w niej model obliczeniowy, który następnie zweryfikowano eksperymentalnie dla przedmiotu w kształcie kostki prostopadłościowej. Udokumentowane w tej pracy analizy wykazały, że taki parametr, jak sekwencja zadziałań docisków rzeczywiście wpływa na dokładność pozycjonowania. Nie rozważano natomiast wpływania na wartości sił działających na przedmiot, które decydują o jego odkształceniach.

Podobnie do zagadnienia mocowania podeszli autorzy w publikacji [2], gdyż w zbudowanym stanowisku badawczym również nie przewidzieli możliwości sterowania wartościami sił działającymi na przedmiot. Postawili sobie za cel zminimalizowanie wartości sił na dociskach i nie dopuszczenie, aby którakolwiek z reakcji na elementach ustalających spadła do zera pod wpływem sił skrawania. Oznaczałoby to utratę punktu podparcia. Przeprowadzono testy obróbkowe dla założonych wartości sił docisku, aby ocenić ich prawidłowość. Wykonano także wstępne analizy odkształceń przedmiotu metodą elementów skończonych.

W niniejszej pracy posłużono się bardziej rozbudowanym stanowiskiem eksperymentalnym, pozwalającym oprócz zmiany kolejności działania elementów wykonawczych na precyzyjne sterowania całym ruchem, a w konsekwencji i siłami działającymi na elementy oporowe. Przyjęto przy tym kryteria doboru wartości sił na elementach ustalających, powiązane z tolerancją wykonawczą przedmiotu. Analizowano również przyrząd pod względem kryterium związanego z czasem mocowania przedmiotu w urządzeniu obróbkowym. Wymagało to pełnej automatyzacji wszystkich czynności realizowanych w kolejnych fazach procesu ustalania położenia.

3. OPIS STANOWISKA

Stanowisko badawcze pokazane na rys. 1 spełnia rolę modelu aktywnego przyrządu obróbkowego. Na płycie bazowej rozmieszczono elementy oporowe w płaszczyźnie poziomej i w płaszczyznach pionowych oraz elementy wykonawcze. Stosownie do potrzeb zarówno elementy oporowe jak i wykonawcze były wyposażane w piezoelektryczne czujniki

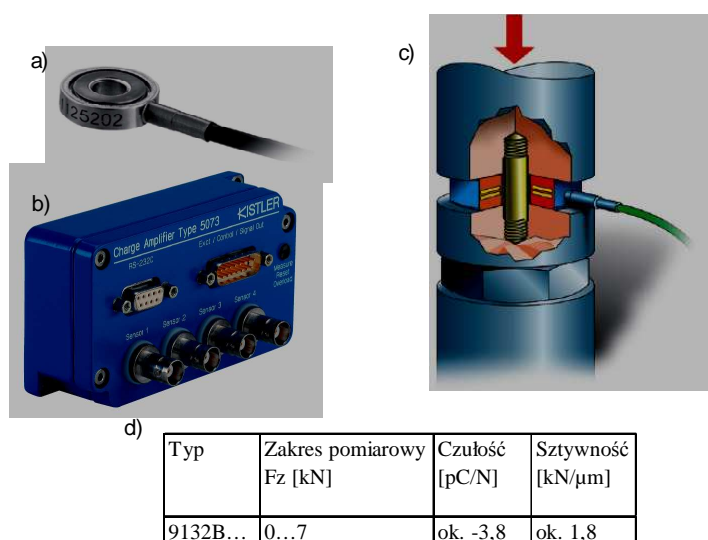


Rys. 1. Stanowisko eksperymentalne z zaznaczonymi elementami składowymi
Fig. 1. Test stand for experiments with components marked

siły. Rolę elementu wykonawczego pełnił siłownik zestawiony z silnika krokowego ze zintegrowaną przekładnią toczną, wbudowanego czujnika siły i systemu prowadzącego. System prowadzący tworzy wałek wielowypustowy z tuleją wielowypustową. Aby umożliwić sterowanie i nadzorowanie całego systemu, zastosowano dodatkowo czujniki odległości Eddy1, Eddy2, Eddy3, w płaszczyznach elementów oporowych L1, L2, L3. Ich zadaniem jest wykonywanie pomiaru odległości przedmiotu w samej płaszczyźnie. Należy zaznaczyć, iż stanowisko zostało przystosowane do realizacji procesu ustalania położenia w płaszczyźnie poziomej – zachowanie przedmiotu w kierunkach pionowych nie zostało uwzględnione. Dodatkowo, stanowisko nie zawiera elementów realizujących kolejną fazę – zacisku przedmiotu za pomocą docisków działających na dolny kołnierz nad poziomymi elementami oporowymi. Zatem nie można traktować owego stanowiska jako kompletnego przyrządu obróbkowego. Szczegółowe omówienie koncepcji tego stanowiska, wraz z elementami dociskowymi, oraz podejścia do jego modelowania, jako układu mechatronicznego, zamieszczono w publikacji [3].

4. DOBÓR CZUJNIKÓW

Z uwagi na wymaganą dużą sztywność końcówek elementów ustalających i fakt, iż czujnik siły jest częścią łańcucha sztywności w takim układzie, dobrano piezoelektryczne przetworniki siły, pokazane na rysunku 2. W skład toru pomiarowego wchodzi wzmacniacz ładunku klasy przemysłowej, zapewniający wysoki stopień podtrzymania ładunku, co pozwala na pomiar sił quasi-statycznych. W porównaniu do czujników bazujących na tensometrach, do pomiaru sił wymagane jest znacznie mniejsze odkształcenie elementu pomiarowego.



Rys. 2. Układ pomiaru siły; a) piezoelektryczny czujnik siły Kistler 9312; b) wzmacniacz ładunku Kistler 5073; c) realizacja napięcia wstępnego; d) charakterystyka czujnika [4]

Fig. 2. Force measurement system; a) piezo force sensor Kistler 9312; b) charge amplifier Kistler 5073; c) realisation of preload; d) sensor specifications [4]

Do pomiaru przemieszczeń dobrano bezdotykowe czujniki wiropądowe, pokazane na rysunku 3, pozwalające na pomiar z rozdzielczością $0,1\mu\text{m}$ w zakresie 1mm. Tor pomiarowy składa się z samego czujnika i analogowego wzmacniacza. Czujniki te charakteryzują się wysoką odpornością na działanie czynników zewnętrznych, występujących w warunkach przemysłowych.



Rys. 3. Czujnik wiropądowy eddyNCDT 3010; a) czujnik wraz ze wzmacniaczem; b) charakterystyka czujnika [5]

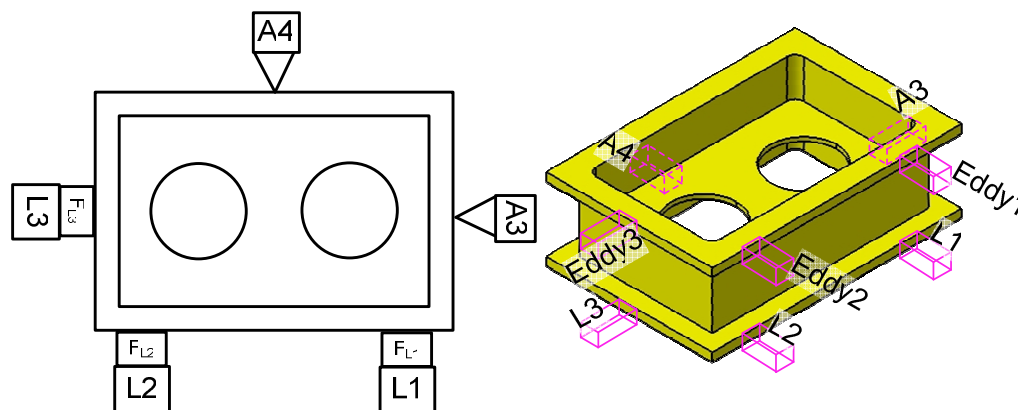
Fig. 3. Eddy current sensor eddyNCDT 3010; a) sensor with amplifier; b) sensor characteristics [5]

5. USTALANIE POŁOŻENIA PRZY POMOCY DWÓCH SIŁOWNIKÓW

Pierwsza analizowana konfiguracja stanowiska pozwoliła na przeanalizowanie procesu ustalania położenia przy pomocy elementów ustalających o rozmieszczeniu 3-2-1, czyli 3 elementy oporowe w płaszczyźnie poziomej pod elementem (nie zaznaczone na rysunku), dwa w płaszczyźnie pionowej na dłuższej stronie przedmiotu – L1 i L2, oraz dwóch elementów wykonawczych - siłowników. Aby umożliwić sterowanie procesem oraz jego nadzorowanie, elementy oporowe zostały wyposażone w piezoelektryczne czujniki siły, a dodatkowo ustawiono trzy bezdotykowe czujniki przemieszczeń mierzące odległość płaszczyzn bazowych przedmiotu mocowanego od elementów oporowych (patrz rys. 4).

Dla celów sterowania procesem ustalania położenia opracowano algorytm, przedstawiony na rysunku 5, w postaci schematu blokowego.

Zmiennymi "proximity1" i "proximity2" ustawia się wartości, przy których kończy się ruch szybki siłowników, a zaczyna posuw precyzyjny. Zmienna "low_force" przechowuje najmniejszą wartość siły, która z dużym współczynnikiem ufności wskazuje na wystąpienie kontaktu między przedmiotem a elementem ustalającym.



Rys. 4. Schemat stanowiska testowego do badań procesu ustalania z użyciem dwóch siłowników, gdzie:
 A3, A4 – siłowniki realizujące proces ustalania; L1, L2, L3 – stałe elementy oporowe;
 Eddy1, Eddy2, Eddy3 – wiropiętrowe bezdotykowe czujniki przemieszczeń; F_{L1} , F_{L2} , F_{L3} – czujniki siły w elementach oporowych

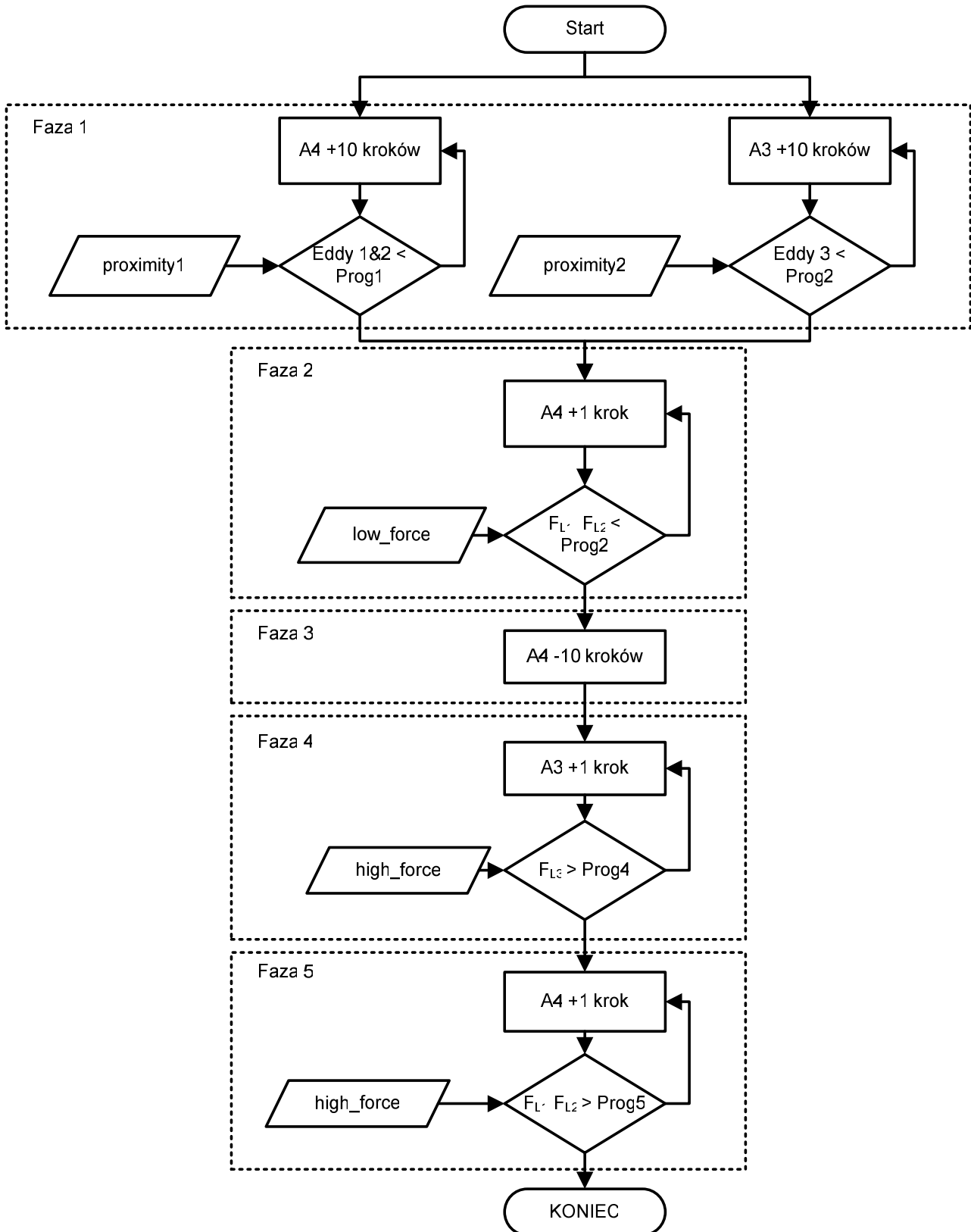
Fig. 4. Schematics of a test stand for investigating alignment process with the use of two actuators;
 A3; A4 – actuators realising alignment process; L1, L2, L3 – fixed locators;
 Eddy1; Eddy2; Eddy3 – eddy-current non-contact distance transducers; F_{L1} , F_{L2} , F_{L3} – force sensors in locators

Zmienna „high_force” oznacza ostateczną siłę ustalania, której osiągnięcie na trzech elementach oporowych L1, L2, L3 jest celem procesu, a której wartości należy ustalić przy pomocy obliczeń numerycznych. Dla konfiguracji przyrządu z dwoma siłownikami jest to z konieczności wartość wspólna dla elementów oporowych L1, L2 i może być różna od ostatecznej siły działającej na element L3. Wartości zmiennych „high_force” muszą zagwarantować dokładność ustalania, lecz powinny być na tyle niskie, aby nie wprowadzić odkształceń przedmiotu przekraczających dopuszczalne tolerancje. Sterowanie siłownikami, które realizują proces ustalania położenia, odbywa się na podstawie sygnałów zebranych z wyżej wymienionych czujników. Zrealizowano to opracowując algorytm, przedstawiony na rysunku 5, w postaci schematu blokowego.

Podczas pierwszej fazy procesu, obydwaj siłowniki wykonują ruch z maksymalną prędkością, przesuując przedmiot w kierunku elementów oporowych. Siłownik A4 zwalnia i zatrzymuje się w momencie, gdy czujniki wiropiętrowe Eddy1 i Eddy2 wskażą wartość oznaczającą, że przedmiot znalazł się blisko elementu oporowego (0-1mm, konkretna wartość jest ustalana zmienną „proximity1”), podczas gdy siłownik A3 zatrzymuje się gdy czujnik Eddy3 wskaże bliskość przedmiotu (wartość ustalana zmienną „proximity2”). Po zakończeniu ruchu przez obydwaj siłowniki, program przechodzi do fazy 2.

Podczas fazy 2 siłownik A4 wykonuje ruch przy małej prędkości i wywiera na przedmiot małą siłę wstępnego ustalania. Gdy wskazania z obu czujników siły na elementach oporowych L1 i L2 osiągną minimalną wartość siły wstępnej (określonej przez zmienną „low_force”), program przechodzi do fazy 3.

W fazie 3 siłownik A4 wycofuje się o niewielką odległość, aby wyzerować siłę wywieraną na przedmiot, co umożliwi mu swobodne przesuwanie w osi siłownika A3 i elementu oporowego L3. Gdy zakończy się ten z góry założony ruch, program przechodzi do fazy 4.



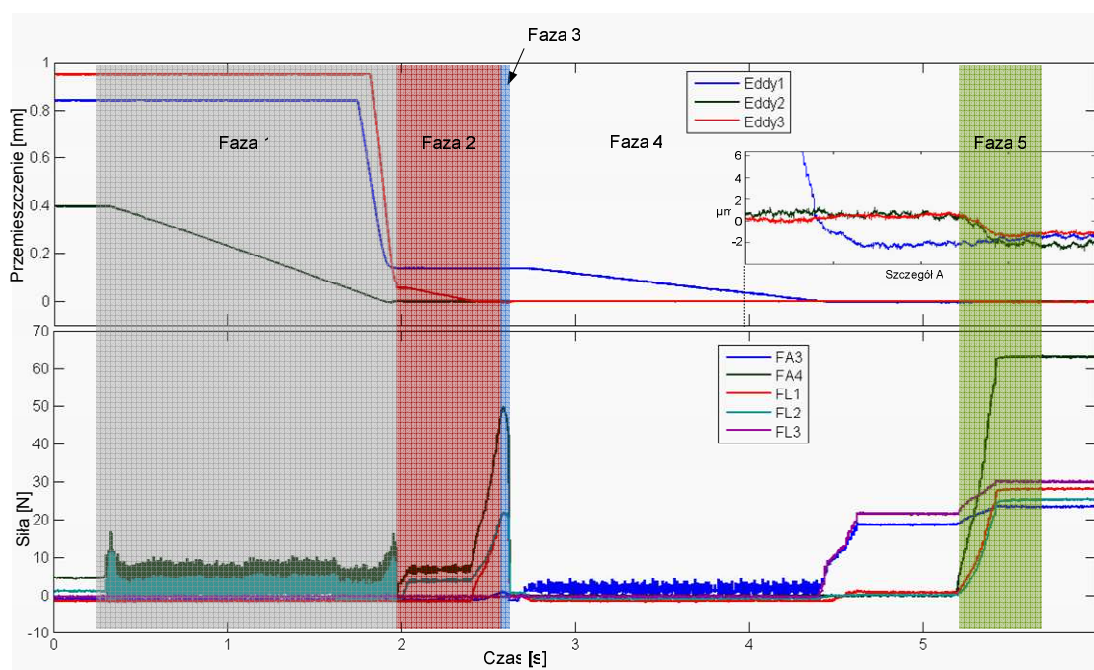
Rys. 5. Algorytm sterowania procesem ustalania położenia dla konfiguracji z dwoma elementami wykonawczymi

Fig. 5. Algorithm for controlling the alignment process utilising two actuators

Podczas fazy 4 siłownik A3 porusza się z małą prędkością, aż wywrze na przedmiot siłę taką, aby na czujniku w elemencie oporowym L3 pojawiła się zaprogramowana maksymalna wartość siły ustalania położenia (zmienna „high_force”), gdy do tego dojdzie, program przechodzi do fazy 5.

Faza 5 polega na ruchu siłownika A4 w celu wywarcia siły ostatecznego ustalania położenia. Po tym, jak czujniki w elementach oporowych L1 i L2 wskażą wartości sił narzucone przez zmienną „high_force”, proces zostaje zakończony.

Rysunek 6 przedstawia dane pobrane z czujników podczas prób eksperymentalnych stanowiska, które było sterowane zgodnie z algorytmem pokazanym na rys. 5. Ponieważ przedmiot został umieszczony w urządzeniu w taki sposób, że już na początku procesu (faza 1) oparł się o element oporowy L2, który stanowił dla niego oś obrotu, gdy zbliżał się on do pozycji równoległej do płaszczyzny elementów oporowych L1-L2. Kontakt z przedmiotem zarówno ustalacza L2, jak i końcówki siłownika A4 objawia się na wykresie drganiem mierzonymi na ich czujnikach siły FL2 i FA4.



Rys. 6. Wyniki badań eksperymentalnych procesu ustalania położenia dla konfiguracji przyrządu z dwoma elementami wykonawczymi

Fig. 6. Experimental research results from the alignment process in configuration with two actuators

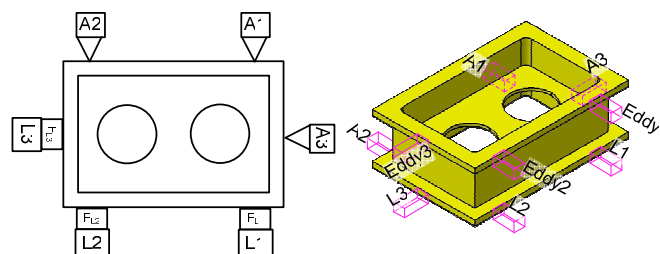
Na wykresie faza 2 objawia się wzrostem siły FA4 na czujniku siłownika A4, a także sił FL1, FL2 na elementach oporowych L1 i L2. Siły te są następnie zmniejszane do zera przez odpowiednie wycofanie się siłownika A4 (faza 3). Podczas fazy 4 obserwowane są drgania mierzone na końcówce siłownika A3, rejestrowane przez czujnik siły FA3, wynikające z przesuwania przedmiotu w kierunku elementu oporowego L3. Faza 4 trwa do momentu, gdy na elemencie oporowym L3 osiągnięta zostanie siła ustalania położenia narzucona przez zmienną „high_force”. Siłownik A4 w trakcie fazy 5 wywiera nacisk na

przedmiot, aby uzyskać ostateczną wartość siły na L1 i L2. Bardzo małe przemieszczenia przedmiotu zachodzące podczas fazy 4 i 5 pokazuje szczegół „A” na rys. 6. Po zakończeniu procesu ustalania położenia wyniosły one $Eddy1=1\mu\text{m}$, $Eddy2=2\mu\text{m}$, $Eddy3=1\mu\text{m}$, którym odpowiadają końcowe siły na ustalaczach $FL1=28\text{N}$, $FL2=25\text{N}$, $FL3=30\text{N}$. Na szczególe „A” widać także, iż dokładność pozycjonowania ograniczają zakłócenia pomiaru przemieszczenia czujnikami wiropądowymi, zmniejszające dokładność pomiaru z teoretycznej wynoszącej $0,1\mu\text{m}$ do ok. $1\mu\text{m}$. Zakłócenia te są głównie spowodowane pracą silników krokowych i ich sterowników, gdzie regulacja prądu na uzwojeniach realizowana jest w sposób impulsowy. Eksperyment wskazał na potrzebę ulepszenia ekranowania tychże elementów.

Zróźnicowanie przemieszczeń i sił na elementach ustalających może być niekorzystne dla dokładności przedmiotu cienkościennego o złożonych kształtach. Uzasadnia to potrzebę rozpatrzenia konfiguracji przyrządu z trzema siłownikami, zwłaszcza w sytuacjach, gdy siły mocujące będą większe.

6. USTALANIE POŁOŻENIA PRZY POMOCY TRZECH SIŁOWNIKÓW

Aby zapewnić równomierne rozłożenie sił reakcji w płaszczyźnie poziomej na wszystkie trzy elementy oporowe L1, L2, L3, należało wprowadzić dodatkowy siłownik. Konfigurację przyrządu z trzema siłownikami przedstawiono na rysunek 7.



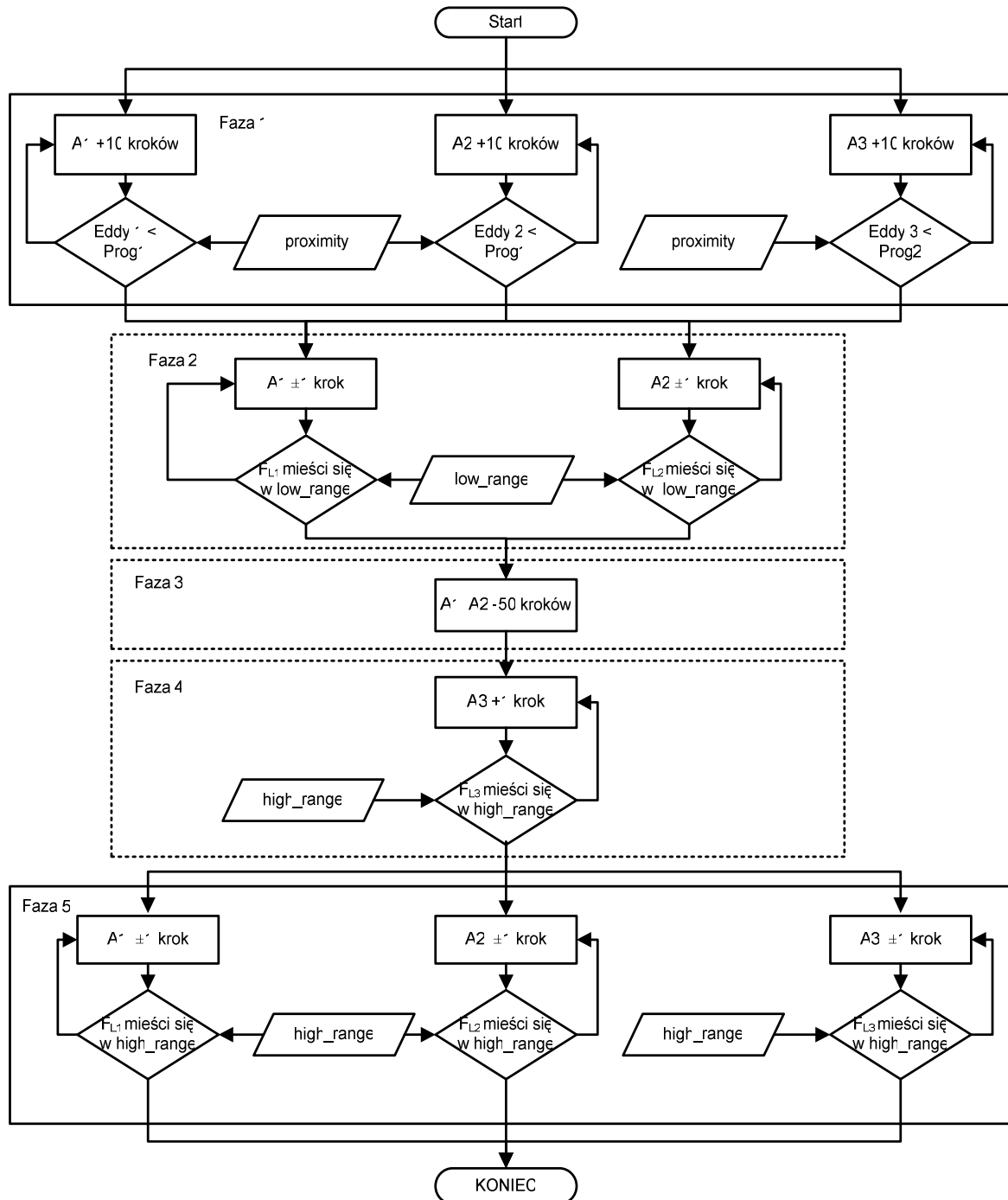
Rys. 7. Schemat stanowiska testowego do badań procesu ustalania z użyciem trzech siłowników, gdzie: A1, A2, A3 – siłowniki realizujące proces ustalania; L1, L2, L3 – stałe elementy oporowe; Eddy1, Eddy2, Eddy3 – wiropądowe bezdotykowe czujniki przemieszczeń; F_{L1} , F_{L2} , F_{L3} – czujniki siły w elementach oporowych

Fig. 7. Schematics of a device for part alignment, where:
A1; A2; A3 – actuators realising alignment; L1, L2, L3 – fixed locators;
Eddy1; Eddy2; Eddy3 – eddy-current non-contact distance transducers; F_{L1} , F_{L2} , F_{L3} – force sensors in locators

Zmiana konfiguracji przyrządu wymagała opracowania nowej, rozbudowanej wersji algorytmu sterującego, oraz zaimplementowania go w środowisku programowania graficznego LabVIEW. Rozbudowany algorytm sterujący trzema siłownikami przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 8.

Podczas pierwszej fazy procesu wszystkie trzy siłowniki A1, A2, A3 wykonują ruch przy maksymalnej prędkości, przesuując przedmiot w kierunku elementów oporowych.

Każdy z siłowników kończy ruch szybki i przechodzi do ruchu dokładnego, gdy odpowiadający mu (leżący naprzeciwko) czujnik wiroprowadowy wskaże odległość mniejszą od progu zdefiniowanego w zmiennej o nazwie „proximity”. Po zakończeniu ruchu szybkiego przez oba siłowniki, program przechodzi do fazy 2.



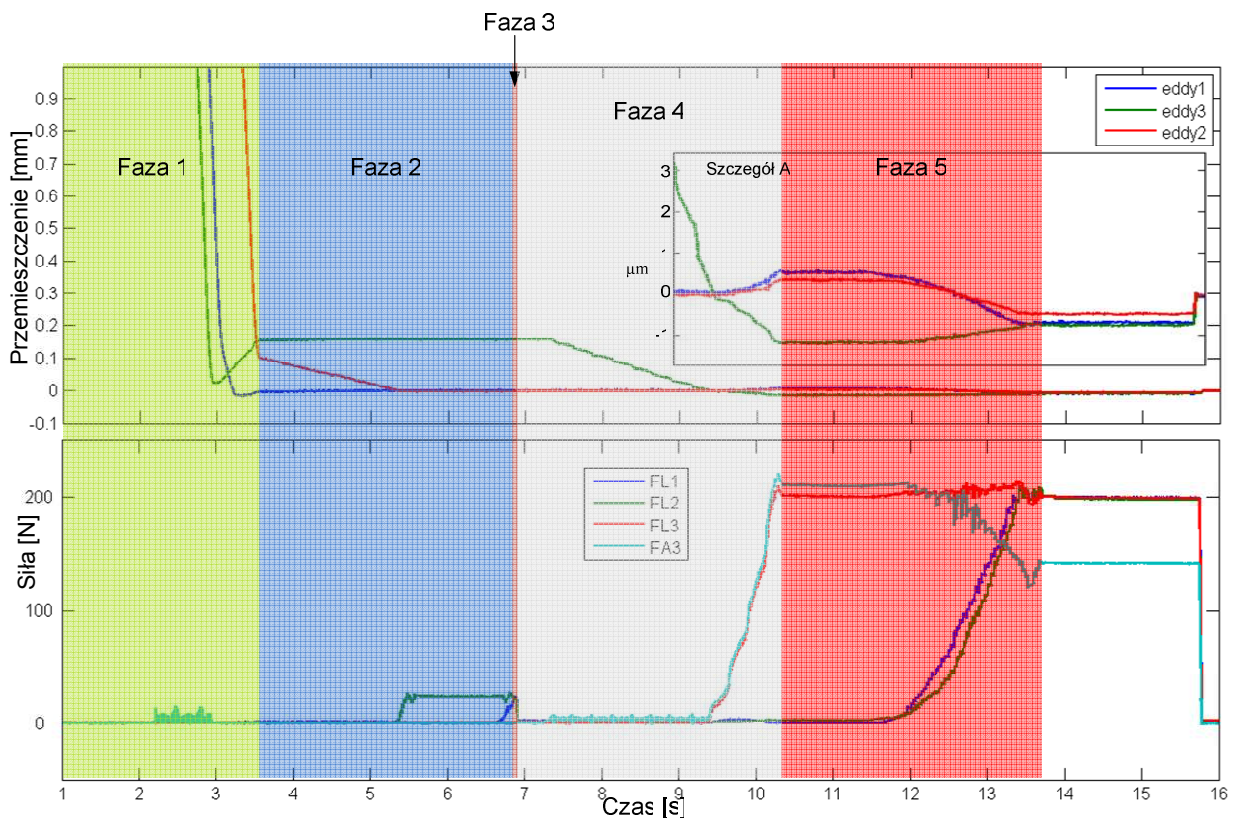
Rys. 8. Algorytm sterowania procesem ustalania położenia dla konfiguracji z trzema elementami wykonawczymi

Fig. 8. Control algorithm for the alignment process utilising three actuators

W fazie 2 siłowniki A1 i A2 pracując przy niskiej prędkości wywierają wstępną, małą siłę ustalającą. Gdy wskazania z czujników siły rozmieszczonych na elementach ustalających L1 i L2 znajdują się w tolerowanej odległości od zdefiniowanej wartości niskiej siły wstępnego ustalania "low_range", program przechodzi do fazy 3.

W fazie 3 elementy wykonawcze A1 i A2 zostają nieznacznie wycofane, aby wyzerować siły z jakimi działają na przedmiot, a także ograniczyć nacisk przedmiotu na elementy ustalające. W ten sposób zmniejsza się opory ruchu przy przesuwaniu przedmiotu w osi elementów wykonawczego A3 i ustalającego L3. Gdy ten wstępnie zdefiniowany ruch elementów wykonawczych zostanie zakończony, program przechodzi do fazy 4.

W fazie 4 element wykonawczy A3 porusza się z niską prędkością do momentu osiągnięcia siły ustalania FL3 równą "high_range" na elemencie ustalającym L3. Po wykonaniu tego zadania, program przechodzi do fazy 5.



Rys. 9. Wyniki badań eksperymentalnych procesu ustalania położenia dla przyrządu z trzema elementami wykonawczymi

Fig. 9. Experimental research results from the alignment process in configuration with three actuators

Podczas fazy 5 element wykonawczy w dalszym ciągu pozostaje aktywny i utrzymuje wartość ostatecznej siły ustalania na elemencie oporowym L3 bliską sile "high_range", a jednocześnie dołączają się do niego siłowniki A1, A2 i zadają siły FL1, FL2 na elementach oporowych L1 i L2. Praca trzech elementów wykonawczych równocześnie trwa

do momentu, aż na wszystkich elementach oporowych siła będzie się mieścić w zakresie „high_range” tj. wymagana siła ustalania położenia \pm tolerancja. Założenie zbyt wąskiej tolerancji dla siły wymaganej może spowodować problemy z zakończeniem procesu ustalania położenia. Gdy wszystkie siły na elementach oporowych mieszczą się w zakresach „high_range”, proces zostaje zakończony.

Rysunek 9 przedstawia dane zmierzone dla jednego z cykli eksperymentalnych procesu ustalania położenia. Zaznaczono na nim wyżej opisane fazy 1-5. Podobnie, jak w przypadku eksperymentów z dwoma elementami wykonawczymi, widoczne są zwiększone drgania końcówek tych elementów, które wykonują ruch w sytuacji, gdy nastąpił już styk przedmiotu z elementami ustalającymi lub wykonawczymi. Podczas fazy 1 ma to miejsce między 2 a 3 sekundą cyklu, a podczas fazy 4 między 7 a 9 sekundą.

Prędkość przesuwania elementu za pomocą siłowników w trybie dokładnym jest ograniczona przez fakt, iż pomiar sił dokonywany jest po każdym pojedynczym kroku. Użycie karty pomiarowej, która reagowałaby szybciej na wysłanie zapotrzebowania na jedną próbkę z danego kanału, przyśpieszyłoby ten proces.

W fazie 5 W sekundach od ok. 12 do ok. 14 widoczny jest proces regulacji siły – wartość siły na elemencie oporowym L3 nie ulega istotnej zmianie, pomimo iż siłowniki 1 i 2 wywierają siłę na przedmiot. Uzyskane jest to dzięki wycofywaniu się siłownika 3, co widoczne jest jako spadek siły mierzonej na jego końcówce. Widoczne na rys. 9 drgania w fazie 5 są związane z procesem regulacji. Dla utrzymania siły FL3 na niezmiennym poziomie podczas wzrostu sił FL1, FL2, siła wywierana przez siłownik A3 musi ulec zmianie, co widoczne jest pod koniec fazy 5. Gdy wszystkie siły zbliżą się do wartości docelowych, następuje okres niestabilności związany z oscylacją trzech zmiennych sprzężeń zwrotnych wokół ich wartości docelowych. Po krótkim czasie ich wartości się ustalają i proces ustalania położenia może się zakończyć. Krótki czas ustalania się tych zmiennych wskazuje na dobrze dobrane wartości parametrów procesu. Ponieważ czujniki przemieszczeń zostały wyzerowane w momencie, gdy przedmiot dotykał elementów oporowych L1, L2 i L3, lecz nie był obciążony siłownikami, przemieszczenia ze znakiem ujemnym można traktować jako odkształcenia w strefie styku przedmiotu z elementami oporowymi oraz odkształcenia geometryczne samego przedmiotu. Odkształcenia te, widoczne na wykresie podczas procesu regulacji wynoszą maksymalnie ok. 1 μm , a po zakończeniu procesu ustalania odkształcenia przedmiotu w punktach oporowych wynoszą mniej niż 0,7 μm .

W tym wariacie konfiguracji stanowiska użyto innych sterowników silników krokowych, co skutkowało zmniejszeniem zakłóceń pomiaru przemieszczeń. Odczyt wartości możliwy był z dokładnością wynoszącą wartość powtarzalności statycznej dla czujnika, czyli 0,1 μm .

7. WYMAGANIA OPTYMALIZACJI

Optymalizację zaprezentowanych wariantów procesu ustalania przedmiotu można prowadzić w dwóch aspektach: dokładności i czasu cyklu. Optymalizacja dokładności

bazuje na doborze ostatecznych sił ustalania położenia w taki sposób, aby gwarantowały one poprawne położenie punktów/powierzchni bazowych, lecz nie deformowały nadmiernie przedmiotu oraz nie wprowadzały odkształceń plastycznych w obrębie styku elementów oporowych i powierzchni przedmiotu. Ten problem należy rozwiązać za pomocą modelowania i symulacji układu przedmiot–urządzenie, przeprowadzonych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Wartości tych optymalnych sił ustalania położenia można wprowadzić do systemu sterowania w postaci zmiennych „high_force” i „high_range”, w zależności od wariantu konfiguracji.

W przypadku optymalizacji czasu cyklu, należy przeprowadzić serię eksperymentów w celu dobrania optymalnych wartości parametrów procesu. W przypadku zmiennych „proximity”, zbyt wysokie wartości powodują zbyt wczesne zatrzymanie się siłownika, co sprawia, że dłuższy dystans musi on pokonać w trybie ruchu wolnego, co w konsekwencji wydłuża czas cyklu. Zbyt niska wartość może spowodować, że siłownik nie zdąży zwolnić w odpowiednim momencie, a przedmiot wtedy uderza w element ustalający. Wartość siły przechowywana w zmiennej „low_force” służy tylko do definicji minimalnej wartości zmierzonej siły, którą z dużym poziomem ufności można zinterpretować jako styk przedmiotu z elementem ustalającym. Im niższa ta wartość, tym krótszy czas wstępnego ustalania położenia. Jednakże musi być ona wystarczająco wysoka, aby nie ginęła w zakłóceniach zbieranych przez czujniki siły. Dla cykli eksperymentalnych, z których przedstawiono wyniki, ostateczna siła ustalania położenia wynosiła 200N (wartość demonstracyjna, której dobór nie został uzasadniony analizą MES), a pozostałe parametry zostały dobrane tak, aby zapewnić krótki czas cyklu i płynną pracę urządzenia. Tak wysoka siła była podyktowana dużą sztywnością przedmiotu.

8. PODSUMOWANIE

Zalety pierwszej zrealizowanej i omówionej w artykule konfiguracji przyrządu mocującego z dwoma siłownikami, to krótki czas procesu ustalania położenia w porównaniu do wersji z trzema siłownikami i stosunkowo prosta konstrukcja przyrządu. Do wad należy zaliczyć brak możliwości manipulacji siłami na każdym elemencie oporowym z osobna. Po zakończeniu procesu ustalania wartości sił na elementach oporowych różnią się od siebie nawet o 25%, co jest niekorzystne dla dokładności wiotkiego przedmiotu obrabianego. Powtarzalność ustalania położenia jest dla tej konfiguracji przyrządu wysoka i wynosi $\pm 2\mu\text{m}$, czyli tyle, na ile pozwala poziom zakłóceń w torach pomiarowych przemieszczeń oraz rozdzielczość sterowania silnikami krokowymi napędzającymi siłowniki.

Wyniki badań drugiej konfiguracji przyrządu z trzema siłownikami pokazują, że możliwe jest uzyskanie prawie jednakowych sił na wszystkich elementach oporowych. Ponadto dopuszczalne są pewne odchyłki geometrii przedmiotu, które w poprzedniej konfiguracji skutkowały niekorzystną zmianą wartości sił działających na elementy oporowe. Powtarzalność procesu ustalania położenia jest porównywalna z osiąganą w konfiguracji z dwoma siłownikami, jednakże czas procesu ustalania położenia wydłuża

się prawie 3 krotnie. Jednakże nawet taki czas cyklu jest krótki w porównaniu do ręcznej realizacji procesu w przypadku elementów cienkościennych.

W dalszym etapie prac przewidziano stworzenie modelu numerycznego stanowiska, łączącego w sobie odwzorowanie zachowania elementów mechanicznych z modelowaniem sterowania, nadając mu cechy modelu mechatronicznego. Metody integracji modelowania mechaniki i sterowania w oprogramowaniu do analiz metodą elementów skończonych zostały już opracowane i przedstawione w pracach [6] i [7].

Aby stanowisko spełniało wszystkie funkcje przyrządu obróbkowego, należy wyposażyć je dodatkowo w dociski działające w kierunku pionowym w osi elementów ustalających znajdujących się na płaszczyźnie poziomej. Pozwoli to na analizę zachowania się przedmiotu w przestrzeni trójwymiarowej oraz na zamocowanie przedmiotu w sposób umożliwiający jego obróbkę. Jest to przewidziane jako kontynuacja prac badawczych dotyczącej niniejszej tematyki.

Praca powstała w ramach projektu AFFIX – „Aligning, Holding and Fixing of Flexible and Difficult to Handle Components” trwającego w latach 2006-2010 przy wsparciu z funduszy w ramach Szóstego Ramowego Programu Badawczego Unii Europejskiej (FP6-2004-NMP-NI4) oraz dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu „Ustalanie, chwytanie i mocowanie elementów elastycznych i trudnych do manipulowania”.

LITERATURA

- [1] RAGHU A., MELKOTE S.N., 2004, *Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44/373-382.
- [2] WANG Y.F., WONG Y.S., FUH J.Y.H., 1999, *Off-line modelling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39/253-271.
- [3] BUKOWSKI A., KWASNY W., JĘDRZEJEWSKI J., 2008, *Mechatronic approach to the development of an intelligent fixturing device test-bed*, Journal of Machine Engineering, 8/1/84-93.
- [4] Karta katalogowa czujnika Kistler 9123B21, http://www.kistler.com/mediaaccess/9132B21__000-110e-10.09.pdf (ostatni dostęp: 09.11.2010).
- [5] Karta katalogowa czujnika EddyNCDT 3010, <http://www.micro-epsilon.com/download/products/dat--eddyNCDT-3010--en.pdf> (ostatni dostęp: 09.11.2010).
- [6] GROCHOWSKI M., BUKOWSKI A., 2010, *Modelling of workpiece-fixture system, focusing on active compensation of displacements*, 21st International Conference on Computer-Aided Production Engineering, CAPE 2010, Edynburg.
- [7] GROCHOWSKI M., BUKOWSKI A., 2009, *Modelling the compensation of mechanical and nonmechanical disturbances in mechatronic systems*, Journal of Machine Engineering, 9/3/88-101.

CONTROL AND MONITORING OF PART ALIGNMENT SYSTEM IN A FIXTURING DEVICE FOR MACHINE TOOLS

Wrocław University of Technology, as a part of their activity in the AFFIX project, has built a test-stand for experimental investigations of control methods in part alignment and fixing processes accomplished by an active device. This paper concentrates on the presentation of control algorithms and their application in experimental investigations, as well as on the discussion of results obtained during such tests. The discussion is focused on the possibilities of process optimisation, both in scope of control algorithms and forces used in the alignment process.