

KRENICH STANISŁAW¹
BOROŃ MIROSŁAW²
LITWIN MICHAŁ³

PROJEKT I ANALIZA CHWYTAKA O STRUKTURZE PRZESTRZENNEJ Z POZYCJONOWANIEM SZCZĘK I REGULACJĄ SIŁY ZACISKU

Artykuł prezentuje projekt i analizę własności funkcjonalnych chwytaka siłowego z pozycjonowaniem położenia szczęk i regulacją siły chwytu. Zaprojektowano konstrukcję chwytaka 4-szczękowego o strukturze przestrzennej dla robota przemysłowego FANUC. Następnie opracowano układ sterowania siłą i położeniem szczęk oraz prędkością ich przemieszczania. W oparciu o wykonany prototyp przeprowadzono badania i analizę własności funkcjonalnych i użytkowych chwytaka. Badania wykazały zasadność założeń projektu, które zwiększyły znacząco uniwersalność urządzenia. Uzyskane doświadczenia mają także znaczenie dla chwytaków o bardziej skomplikowanych strukturach inspirowanych rozwiązaniami występującymi w żywych organizmach.

DESIGN AND ANALYSIS OF 3D STRUCTURE GRIPPER WITH CONTROLLED POSITION AND FORCE OF CLAMP

The paper describes the design and analysis of functional parameters of a robot gripper with control of clamp position and force. The 3-dimension structure of the 4-clamp gripper for industrial robot FANUC is developed. Then the control system of force, position and speed of clamps movement is proposed. Based on the prototype functional tests and analysis of the gripper are carried out. Studies showed the validity of the assumptions of the project, which significantly increased the versatility of the device. The experiments are also important for grippers with more complex structures inspired solutions occurring in living organisms.

1. WSTĘP

Ze względów ekonomicznych w procesach produkcyjnych wymagana jest coraz większa elastyczność stanowisk wytwarzania, przy zachowaniu wysokiej jakości oraz niskich kosztów produkcji. Wymusza to stosowanie oprzyrządowania maszyn

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04, E-mail: krenich@mech.pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04.

³ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut ITMiAP, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków,
Tel: +48 12 374 32 18, Fax: +48 12 374 32 04.

produkcyjnych, które można łatwo dostosowywać do zmiennych warunków. Dotyczy to również zautomatyzowanych systemów wytwarzania, w których jednym z podstawowych urządzeń jest robot przemysłowy. Prawie każdy robot przemysłowy jest wyposażony w chwytak lub inne narzędzie zaprojektowane do realizacji żądanych operacji wykonywanych w cyklu produkcyjnym [1, 4, 5, 7]. Należy tu podkreślić, iż chwytaki o różnych konstrukcjach stanowią największą grupę wśród elementów oprzyrządowania robota, a ich zadaniem jest uchwycenie, pozycjonowanie i transport zadanego przedmiotu [4, 5, 6, 7]. Ogromna ilość czynności manipulacyjnych wykonywanych przez roboty sprawia, że chwytaki w obecnej chwili mają bardzo zróżnicowane konstrukcje oraz wykonanie. Wykonanie chwytaka zależy zasadniczo od kształtu i właściwości przedmiotu manipulowanego a zwłaszcza od takich właściwości jak: masa, położenie środka ciężkości, kształt i parametry geometryczne, tolerancje wykonania miejsc uchwycenia, odporność na ściskanie i inne czynniki zewnętrzne. W związku z powyższym wydaje się celowe opracowanie konstrukcji, którą można dopasować do niektórych parametrach przedmiotu, przy czym podstawowe znaczenie ma siła chwytu oraz zakres rozwarcie układu szczęk. Sterowanie tymi parametrami może umożliwić chwytanie i manipulowanie przedmiotem o różnych gabarytach i twardości, w sposób nieuszkodzający przedmiotu. Cele te wymuszają pogodzenie ze sobą funkcji, jakie powinna spełniać konstrukcja chwytaka, kosztami oraz technologicznością konstrukcji.

2. KONSTRUKCJA CHWYTAKA SIŁOWEGO

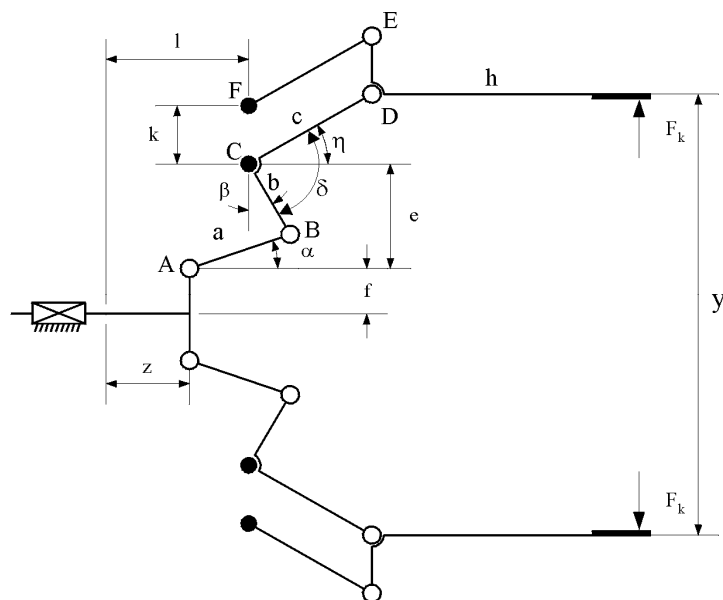
2.1 Założenia konstrukcyjne

Każda konstrukcja wymaga ustalenia założeń i wytycznych wstępnych. Dla potrzeb niniejszego badania założono opracowanie konstrukcji, zbudowanie prototypu i przetestowanie chwytaka, który będzie charakteryzował się następującymi podstawowymi cechami:

- Regulowaną siłą zacisku w zakresie minimum 100 – 3000 [N] (udźwig chwytaka będzie zależał od kształtu szczęk oraz współczynników tarcia pomiędzy szczękami a przedmiotem manipulowanym, przyspieszenia na trajektorii pracy robota).
- Równoległym prowadzeniem szczęk i ich pozycjonowaniem w dużym zakresie 0 - 280 [mm].
- Możliwość pracy obustronnej - chwytanie zewnętrzne i wewnętrzne przedmiotów o różnych kształtach.
- Napędem elektrycznym o napięciu zasilania ze względów bezpieczeństwa 12 [V].

2.2 Opracowana konstrukcja

Po analizie powyższych założeń przyjęto, iż łańcuch kinematyczny układu przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na szczęki chwytaka może być realizowany za pomocą schematu przedstawionego na rysunku 1. Schemat tego typu charakteryzuje się stałym kierunkiem siły oddziałującej na przedmiot, niezależnie od wielkości rozwarcia szczęk. Parametrami mechanizmu jest wektor wymiarów geometrycznych [a, b, c, e, f, h, k, l, δ], ponadto F_k - siła na szczękach, z - skok ogniwa napędzającego. Ze względu na fakt, iż w mechanizmach dźwigniowych chwytaków wartość siły na szczękach jest zazwyczaj silnie nieliniowa, zachodzi konieczność jej linearyzacji z powodu układu sterowania siłą. Minimalizację różnic w przebiegu siły na szczękach w całym zakresie ich rozwarcia przeprowadzono metodami optymalizacji [2, 3].



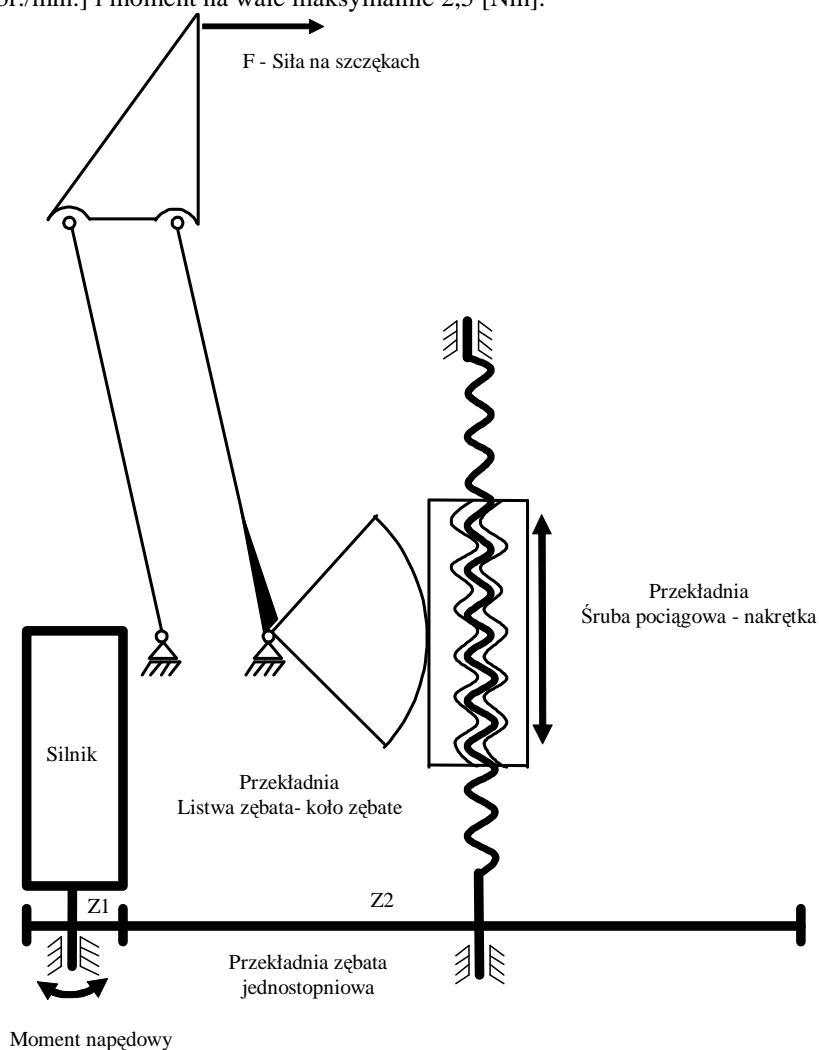
Rys. 1. Wstępny schemat kinematyczny chwytaka

Ze względu na konieczność stosowania silnika o małych gabarytach i niskim napięciu zasilania a tym samym małym momencie napędowym, zmodyfikowano schemat wprowadzając dodatkowe przekładnie redukcyjne zwiększające moment napędowy. Założono, iż układ będzie wielostopniowy i złożony z następujących elementów: przekładni zębataj, przekładni śruby pociągowej – nakrętka, przekładnia listwa zębata – koło zębata oraz mechanizmu dźwigniowego, jako elementu końcowego. Złożoność ta wynika z konieczności stosowania dużych przełożeń zarówno, co do momentu napędowego jak i prędkości obrotowej silnika oraz samohamowności łańcucha kinematycznego. Zmodyfikowany schemat łańcucha kinematycznego przedstawiono na rysunku 2. Dla przyjętego zmodyfikowanego schematu zaproponowano przełożenia i odpowiednie typy konstrukcji dla poszczególnych przekładni oraz wyznaczono przenoszone momenty i siły. Przełożenia wynoszą odpowiednio: dla przekładni jednostopniowej równe 3, dla przekładni śruba-nakrętka równe 113, dla przekładni listwa zębata – koło równe 1. Całkowite przełożenie wynosi 339. Przy założeniu momentu obrotowego na wale silnika równego 1 [Nm] otrzymujemy moment obrotowy na wejściu mechanizmu dźwigniowego równy 339 [Nm].

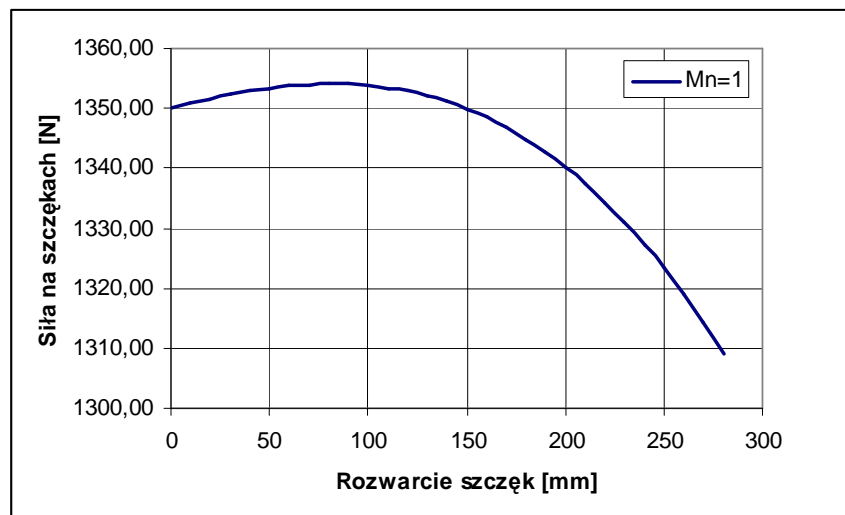
W związku z faktem, iż mechanizmy dźwigniowe chwytaków posiadają zazwyczaj silnie nieliniową charakterystykę siłową [2, 5], metodami optymalizacji przeprowadzono dobór wymiarów geometrycznych mechanizmu dźwigniowego (na rys. 1 wymiary c i h oraz zakres pracy w postaci kątów). Kryterium była stałość przebiegu siły na szczękach, ograniczenia stanowił zakres pracy w postaci zależności kątowych. Otrzymano wymiary $c=150$ [mm], $h=100$ [mm], zakres pracy: $-15^\circ < \eta < 42^\circ$. Dla uzyskanych wymiarów

i zakresów pracy charakterystyka siłowa ma przebieg przedstawiony na rysunku 3. Różnica między maksymalną i minimalną wartością siły jest niewielka i wynosi około 3,5 %.

Następnie przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe dla przekładni, wpustów, łożysk, i mechanizmu dźwigniowego obliczając elementy na naciski powierzchniowe, naprężenia dopuszczalne, tarcie. Obliczenia te uwzględniono podczas tworzenia modelu wirtualnego trzywymiarowego (3D) chwytaka. Po wykonaniu obliczeń dobrano silnik napędowy o następujących parametrach: napięcie zasilania 12 [V] DC, prąd max 10[A], zintegrowana dwustopniowa przekładnia planetarna, prędkość obrotowa maksymalna około 540 [obr./min.] i moment na wale maksymalnie 2,5 [Nm].



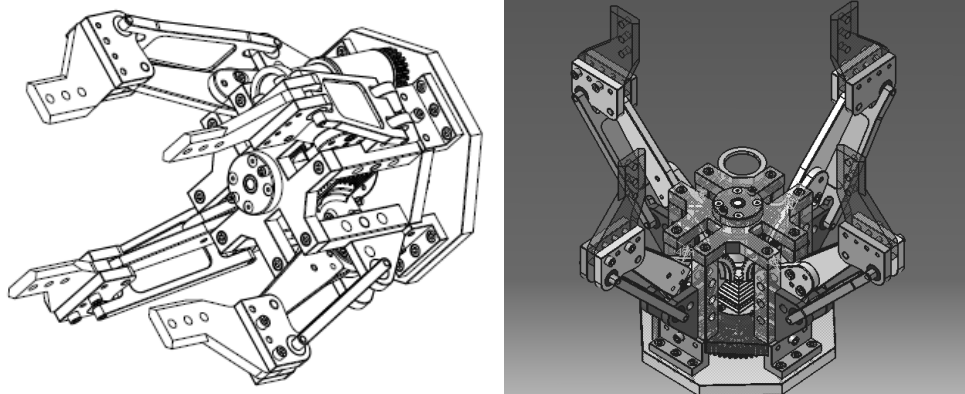
Rys. 2. Zmodyfikowany łańcuch kinematyczny chwytaka



Rys. 3 Podstawowa charakterystyka siłowa chwytaka (moment napędowy $M_n=1$ [Nm])

2.3 Model wirtualny 3D chwytaka

Na podstawie przyjętych założeń i wykonanych obliczeń zaprojektowano w aplikacji CATIA model chwytaka, przy czym przyjęto, że płaski układ dwóch szczęk zastąpiony zostanie układem przestrzennym czterech szczęk, które można odkręcać, modyfikując mechanizm. Daje to możliwość zwiększenia uniwersalności chwytaka i manipulowania przedmiotami o zróżnicowanych kształtach. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono odpowiednio wirtualny model chwytaka oraz wykonany na jego podstawie prototyp.



Rys. 4. Wirtualny model chwytaka



Rys. 5. Prototyp chwytaka siłowego

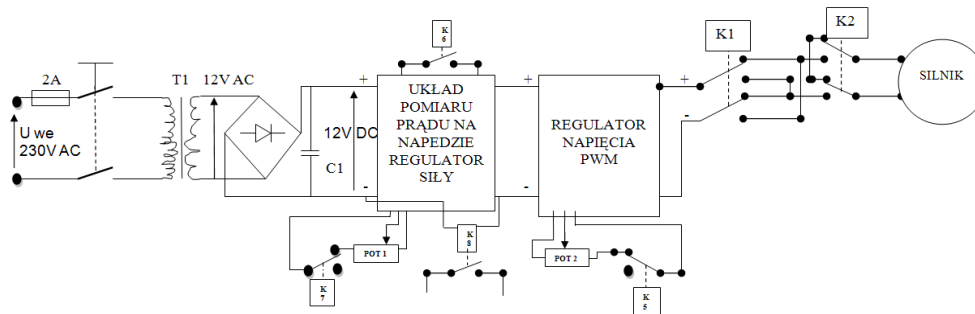
3. OPRACOWANY UKŁAD STEROWANIA CHWYTAKIEM

Do przygotowanej konstrukcji opracowano układ sterowania, przy następujących założeniach:

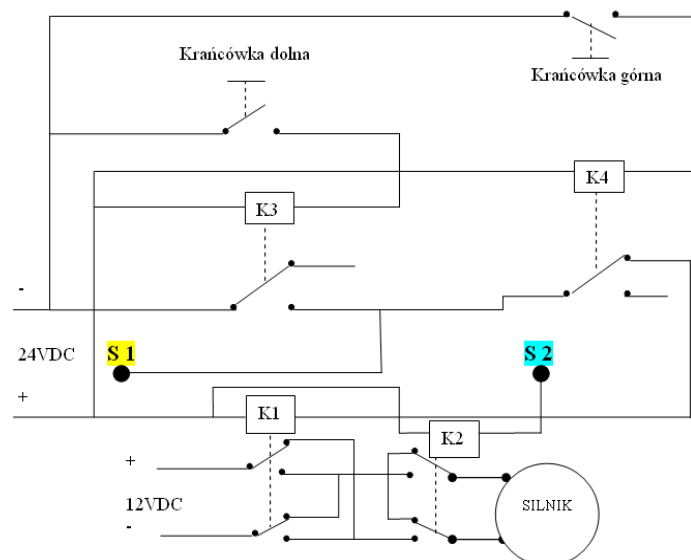
- Regulacja maksymalnej siły na szczękach w podanym w założeniach zakresie.
- Pomiar i regulacja położenia szczęk.
- Regulacja prędkości przemieszczania szczęk w zakresie od 5mm/s do 50mm/s.
- Sterowanie powyższymi parametrami ma się odbywać z poziomu panelu sterowniczego robota Fanuc S420F.
- Elementy wykonawcze i układ sterowania mają umożliwić wykonanie programu robota dla parametrów pracy chwytaka przekraczających dopuszczalne wartości.

3.1 Sterowanie siłą zacisku i prędkością szczęk chwytaka

Sterowanie siłą zacisku szczęk odbywa się poprzez pomiar i regulację wartości prądu płynącego przez napęd. Wielkość siły zacisku uzależniona jest od nastaw potencjometru zmieniającego wartość szczytową prądu. Do regulacji prędkości obrotowej napędu chwytaka a tym samym prędkości przemieszczania szczęk zastosowany został typowy regulator napięcia PWM. Modułacja szerokości impulsu jest wykonywana poprzez przełączenie tranzystorów pomiędzy stanem przewodzenia a stanem zaporowym, co pozwala na łatwość sterowania, dużą dokładność oraz małe straty. Schemat układu sterowania siłą i prędkością przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



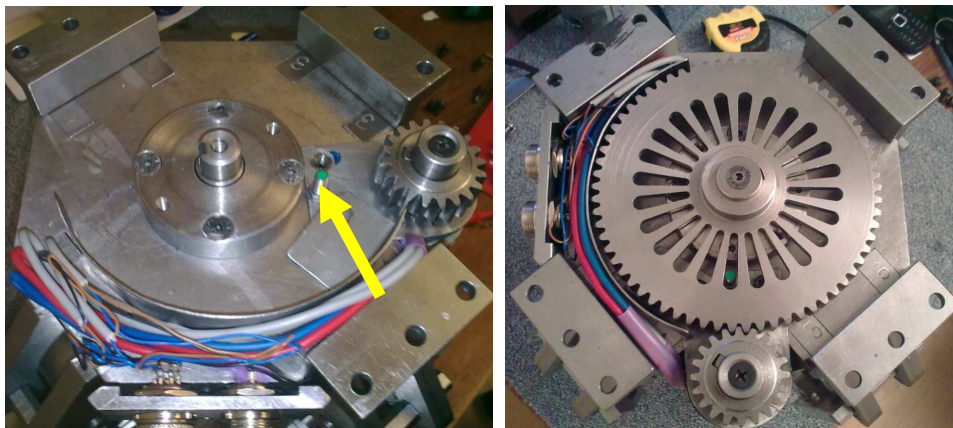
Rys. 6. Układ sterowania siłą zacisku i prędkością szczęk chwytaka



Rys. 7. Układ wykonawczy sterownika siły i prędkości

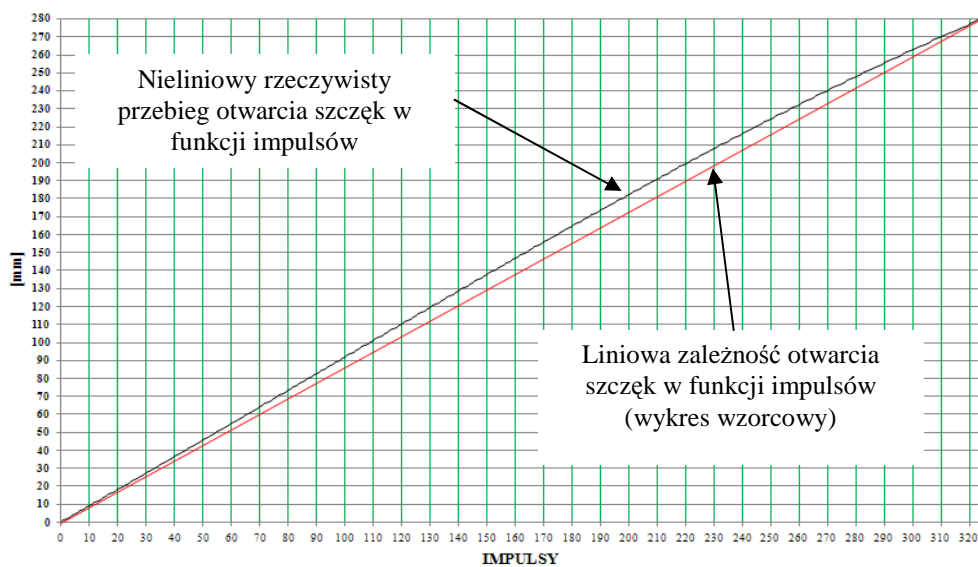
3.2 Sterowanie pozycjonowaniem szczęk.

Programowanie i regulacja pozycji szczęk jest realizowana poprzez pomiar aktualnego położenia koła zębatego Z2 w pierwszej przekładni przy pomocy czujnika indukcyjnego, na zasadzie zliczania impulsów i ich przetwarzanie w pętli sprzężenia zwrotnego w sterowniku robota Fanuc S420F. Na dużym kole Z2 nacięte są promieniowo żeberka w liczbie 18, w korpusie mocującym ramiona chwytaka zamontowany jest czujnik zbliżeniowy (rys. 8), który zlicza obracające się na kole zębatym żeberka i wysyła impulsy do sterownika robota na wejście enkodera. Z poziomu robota można zaprogramować zadane położenie szczęk.

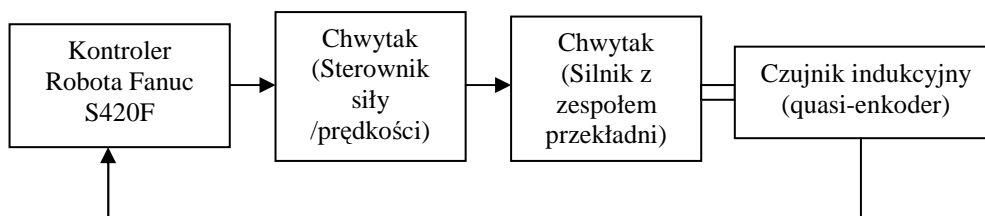


Rys. 8. Układ pomiaru obrotów - czujnik indukcyjny (zaznaczony żółtą strzałką) oraz żeberka koła zębatego

Uwzględniając przedstawione wcześniej przełożenia poszczególnych stopni reduktora, wyliczono rozdzielczość równą 324 impulsy w całym zakresie ruchu szczęk tj. 0-280 [mm]. W związku z nieliniową zależnością przemieszczenia szczęk w funkcji ruchu obrotowego napędu, uzyskujemy nieliniową dokładność pozycjonowania w zakresie od 0,31 [mm/impuls] do 0,92 [mm/impuls]. Zależności rozwarcia szczęk w funkcji impulsów enkodera przedstawiono na rysunku 9. W układzie sterowania jest realizowana rzeczywista zależność. Ogólny schemat układu sterowania pozycjonowaniem szczęk chwytaka przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 9. Wykres przemieszczenia szczęk w funkcji impulsów



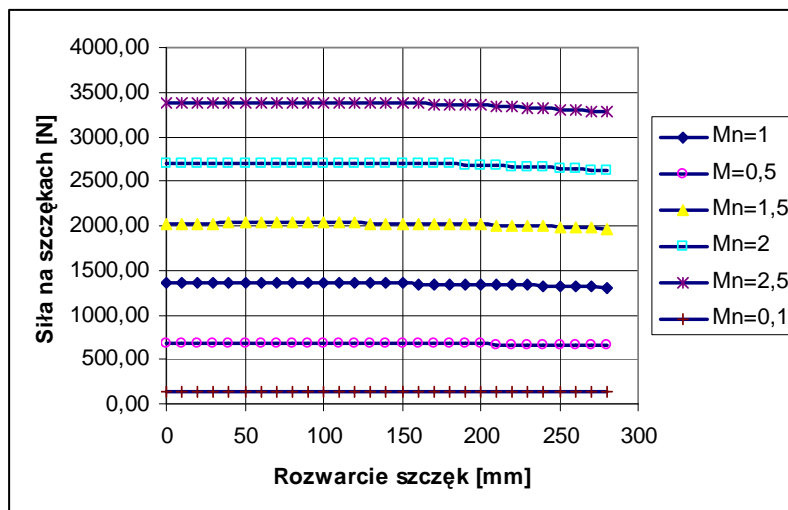
Rys. 10. Schemat układu sterowania pozycjonowaniem szczęk chwytaka

4. TESTY I BADANIA

Dla opracowanej konstrukcji przeprowadzono testy i badania na robocie Fanuc S420 F (rys. 11). Wyznaczono teoretyczne charakterystyki siłowe przy sterowaniu siłą dla różnych momentów napędowych silnika M_n [Nm], które przedstawiono na rysunku 12, a następnie przeprowadzono badania siłomierzem dynamometrycznym. Badania przeprowadzono dla wybranych położeń szczęk, co 30 [mm], przy założeniu momentów napędowych silnika na podstawie charakterystyk katalogowych. Błędy rzeczywistych wartości sił w stosunku do wyznaczonych teoretycznie nie przekraczały 5%. Pozycjonowanie szczęk zbadano czujnikiem zegarowym oraz suwmiarką dla różnych położeń szczęk, co 30 [mm] przy wielokrotnym jednostronnym najeździe na zadaną pozycję. Błędy dokładności pozycjonowania rzeczywistej pozycji w stosunku do teoretycznej nie przekraczały 1,5%. Następnie przeprowadzono próby pracą przy chwytaniu następujących przedmiotów: wałek (stalowy), kula (piłka sportowa), płyta drewniana, pudełko kartonowe, dla których dostosowywano parametry regulując siłę chwytu, prędkość oraz położenie szczęk. Przedmioty nie uległy uszkodzeniu podczas manipulacji mimo znacznych różnic cech.



Rys. 11. Badania własności chwytaka na robocie Fanuc S420F „próbą pracy”



Rys. 12. Charakterystyki siłowe przy sterowaniu siłą

5. WNIOSKI

Celem opracowania było zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie własności funkcjonalnych chwytaka o możliwie uniwersalnym zastosowaniu z pozycjonowaniem szczęk i regulowaniem siły chwytu. Poprawność wykonania prototypu potwierdziły badania parametrów funkcjonalnych. Przeprowadzone testy i badania przy chwytaniu różnych przedmiotów wskazują, iż możliwość dostosowania parametrów chwytu do przedmiotu jest bardzo przydatną cechą zwiększającą znacząco uniwersalność chwytaka. Dalsze prace będą obejmowały wprowadzenie dodatkowych sensorów, umożliwiających zastąpienie manualnego dostosowywania parametrów chwytaka do przedmiotu na realizowane w sposób automatyczny, co może mieć także znaczenie dla bardziej skomplikowanych chwytaków o strukturze naśladującej dłoń człowieka.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Honczarenko J.: *Roboty przemysłowe: budowa i zastosowanie*. WNT Warszawa 2009.
- [2] Krenich S., Osyczka A.: *Optimization of robot gripper parameters using genetic algorithm*, Thirteenth CISM-IFTOMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators-RoManSy13, Springer-Verlag, New York, 2000, str. 137-146.
- [3] Krenich S.: *Multicriteria Design Optimization of Robot Gripper Mechanisms*. IUTAM Symposium on Evolutionary Methods in Mechanics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2004, pp. 207-218.
- [4] Morecki A., Knapczyk J.: *Podstawy Robotyki*, WNT, Warszawa, 1999.
- [5] Olszewski M.: *Manipulatory i roboty przemysłowe, automatyczne maszyny manipulacyjne*. WNT Warszawa, 1992.
- [6] Spong M. W., Vidyasagar M.: *Dynamika i sterowanie robotów*. WNT Warszawa 1997.
- [7] Tomaszewski K.: *Roboty przemysłowe. Projektowanie układów mechanicznych*. WNT 1993.