

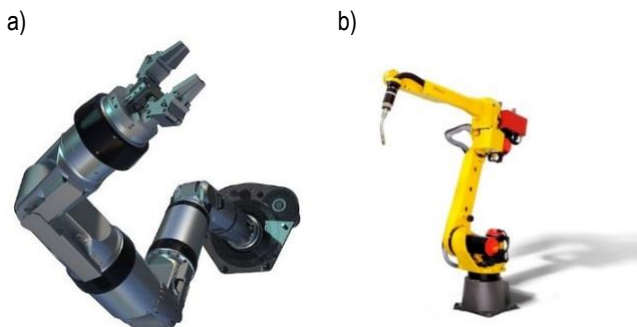
Karol CIEŚLIK, Piotr KROGUL, Kacper SPADŁO, Rafał TYPIAK

BADANIA SYMULACYJNE WYBRANYCH PARAMETRÓW HYDROSTATYCZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO MANIPULATORA ANTROPOMORFICZNEGO W KONTEKŚCIE WYKORZYSTANIA W TRANSPORCIE BLISKIM

W artykule dokonano porównania manipulatorów antropomorficznych i przemysłowych. Wskazano podstawowe różnice pomiędzy tymi konstrukcjami wynikające zarówno ze sposobu sterowania jak również struktury kinematycznej. Przedstawiono sposób opracowania struktury kinematycznej manipulatora antropomorficznego jako konstrukcji podobnej do ludzkiej kończyny górnej. Opracowano model manipulatora antropomorficznego w oparciu o przyjęte założenia dotyczące znacznego zwiększenia ludzkich możliwości roboczych w kontekście prac przeładunkowo - transportowych. Przeprowadzono badania symulacyjne na opracowanym modelu manipulatora w aspekcie określenia wybranych parametrów hydrostatycznego układu napędowego.

WSTĘP

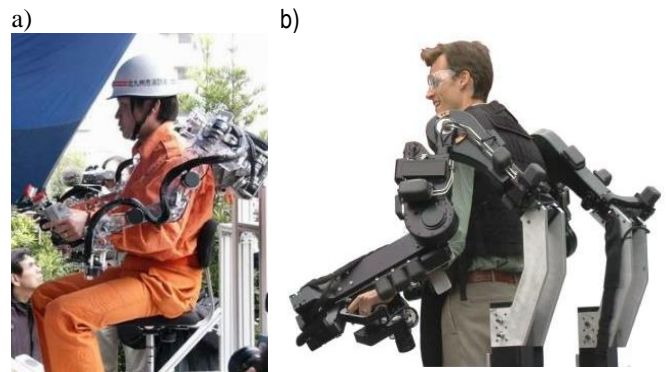
Zgodnie z definicją manipulatorem antropomorficznym nazywany jest układ podobny do kończyny człowieka pod względem kształtu w znaczeniu anatomicznym oraz fizjologicznym, a więc funkcji, czyli działania [1]. Konstrukcje te znacząco różnią się od klasycznych manipulatorów, na przykład przemysłowych. Różnice te wynikają z liczby stopni swobody jakie posiadają obie konstrukcje oraz charakteru zadań jakie wykonują. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe konstrukcje manipulatora antropomorficznego oraz przemysłowego.



Rys.1. Przykładowe konstrukcje manipulatorów; a - manipulator antropomorficzny [2], b - manipulator przemysłowy [3]

Manipulatory przemysłowe mają zaprogramowaną, znaną trajektorię ruchu efektora i trudno przystosować je do zmieniających warunków pracy, w przeciwieństwie do konstrukcji antropomorficznych. Kolejną różnicą wynika ze sposobów sterowania manipulatorami. Konstrukcje antropomorficzne mogą wykorzystywać układy kopiujące ruchy kończyn operatora (rys.2), natomiast przemysłowe posiadają zaprogramowaną trajektorie bądź sterowane są z wykorzystaniem paneli wyposażonych w joysticki i przyciski. Dzięki takiemu rodzajowi sterowania praca manipulatorami antropomorficznymi jest bardziej intuicyjna, efektywna oraz pozwala na lepsze wykorzystanie pola pracy. W transporcie bliskim bardzo istotne są zalety jakie po-

siadają manipulatory antropomorficzne. W związku z tym można zastosować je w tym rodzaju transportu przykładowo do precyzyjnych prac przeładunkowych, w których zadania są zmienne i niepowtarzające się w czasie. Od manipulatora wymaga się wtedy odpowiedniej szybkości działania, zdolności roboczych przekraczających ludzkie oraz możliwości wykonania zadania na różne sposoby czyli manewrowości.



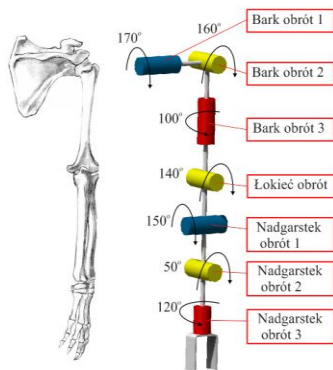
Rys.2. Układ kopiujący ruchy rąk operatora; a – system sterowania manipulatorami robota Tmsuk T-52 [4], b – system sterowania manipulatorów Raytheon Big Arm [5]

Napędy stosowane w manipulatorach antropomorficznych jak i przemysłowych zależne są o rodzaju wykonywanego zadania oraz środowiska w jakim pracują. Napęd elektryczny jest najczęściej spotykanym rodzajem napędu stosowanym w manipulatorach antropomorficznych. Związane jest to z dużą liczbą manipulatorów stosowanych powszechnie w medycynie [6]. Jednak napęd ten nie pozwala na rozwijanie tak dużych sił dyspozycyjnych jak napęd hydrostatyczny. Zastosowanie tego rodzaju napędu gwarantuje zdolność manipulatora do podejmowania dużych mas oraz pracy w środowisku o znacznej wilgotności. Na rynku można znaleźć manipulatory antropomorficzne o napędzie hydrostatycznym jednak są to konstrukcje prototypowe, poddawane licznym testom a ich producenci nie udostępniają wyników badań dotyczących rzeczywistych możliwości tych

konstrukcji, dynamiki ich działania, paramentów układu napędowego oraz ich struktur kinematycznych.

1. MODEL MANIPULATORA ANTROPOMORFICZNEGO

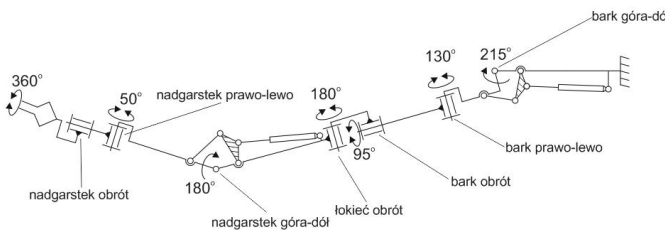
Zgodnie z definicją manipulator antropomorficzny jest kinematycznym odwzorowaniem ludzkiej kończyny. Z uwagi na obszar zastosowania manipulatora czyli prace przeładunkowo – załadowczo-transportowe przyjęto, że będzie to kończyna górna. W związku z tym struktura kinematyczna manipulatora powinna odpowiadać ludzkiej ręce (rys.3).



Rys.3. Struktura kinematyczna ludzkiej kończyny górnej

Struktura kinematyczna ręki opiera się na łańcuchu o 7 stopniach swobody i ściśle określonych możliwościach obrotu [7, 8].

Na podstawie struktur kinematycznych istniejących manipulatorów antropomorficznych oraz ludzkiej kończyny górnej opracowano strukturę kinematyczną manipulatora antropomorficznego (rys.4).



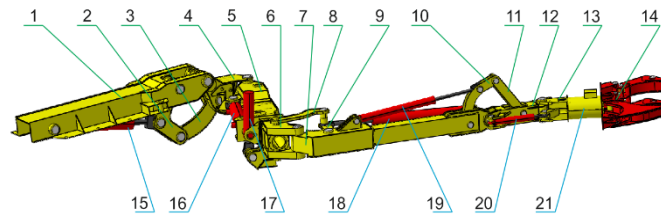
Rys.4. Struktura kinematyczna manipulatora antropomorficznego

Zwiększenie zakresu obrotu w części przegubów ma na celu poprawę manewrowości manipulatora jak również możliwości uzyskania zwartej struktury podczas transportu na nośniku. Wymiary członów składających się na manipulator odniesiono bezpośrednio do długości ich odpowiedników w kończynie górnej człowieka (tabela 1). Charakter wykonywanych przez manipulator zadań wymaga większych możliwości roboczych niż ludzkie ręce. W związku z tym przyjęto, że zostanie zastosowany napęd hydrostatyczny. Na podstawie analizy możliwości roboczych manipulatorów antropomorficznych o napędzie hydrostatycznym przyjęto, że manipulator będzie zdolny do podjęcia ładunku o masie 50kg i będzie dysponował zasięgiem 3,3m. Tym samym manipulator jest powiększony 4,5 razy w stosunku do długości ręki człowieka 50-centylowego (tab.1.). Na podstawie

Tab. 1. Wymiary podstawowych elementów manipulatora antropomorficznego w odniesieniu do kończyny górnej człowieka 50 centylowego

L.p.	Część ludzkiej ręki	Długość, mm	Element manipulatora antropomorficznego	Długość, mm	Maksymalny zasięg manipulatora, mm	Stopień powiększenia manipulatora
1	Ramię	292	Człon 1	1340	3300	4,5
2	Przedramię	254	Człon 2	1100		
3	Dłoń	191	Człon 3 Człon 4 Narzędzie robocze	860		

przyjętej struktury kinematycznej oraz wymagań odnośnie możliwości konstrukcji opracowano model 3D manipulatora antropomorficznego (rys.5).



Rys.5. Model 3D manipulatora; 1 – mocowanie manipulatora, 2,3 – elementy układu dźwigniowego 1, 4 – część pierwsza członu 1, 5 – część druga członu 1, 6 – część trzecia członu 1, 7 – człón 2, 8,9 – elementy układu dźwigniowego 2, 10,11 – elementy układu dźwigniowego 3, 12 – człón 3, 13 – człón 4, 14 – narzędzie robocze (chwytnak), 15 – siłownik 1 (bark góra-dół), 16 – siłownik 2 (bark prawo - lewo), 17 – siłownik 3 (bark obrót), 18 – siłownik 4 (łokieć), 19 – siłownik 5 (nadgarstek góra-dół), 20 – (nadgarstek prawo - lewo), 21 – siłownik obrotowy (nadgarstek obrót)

Przyjęto, że w kontekście wykorzystania manipulatora antropomorficznego w transporcie bliskim związanym z pracami przeładunkowymi materiałami o nieregularnych kształtach narzędziem roboczym będzie chwytnak.

2. BADANIA SYMULACYJNE MANIPULATORA ANTROPOMORFICZNEGO

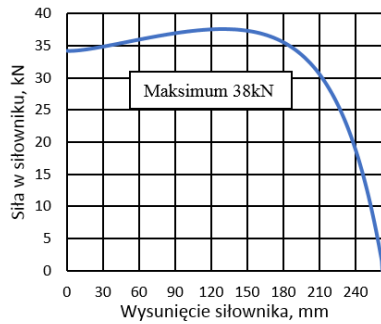
Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku do modelowania układów wieloczłonowych z wykorzystaniem opracowanego modelu. W modelu przyjęto i uwzględniono masy wszystkich elementów składających się na konstrukcję manipulatora czyli: członów, siłowników hydraulicznych, rozdzielaczy i zaworów, przewodów hydraulicznych. Przyjęto, że wszystkie elementy manipulatora są sztywne i nieodkształcalne, właściwości fizyczne manipulatora są niezmiennie w czasie, materiał konstrukcji manipulatora jest jednorodny. Przeprowadzone badania symulacyjne dotyczą podstawowych parametrów układu napędowego. Należą do nich wymagane siły użyteczne siłowników hydraulicznych wymagane chłonność siłowników w celu zapewnienia żądanej prędkości narzędzia roboczego, zidentyfikowanie siłowników głównych i uzupełniających. W związku z wieloaspektowością badań podzielono je na kilka etapów.

2.1. Wymagane siły użyteczne siłowników hydraulicznych

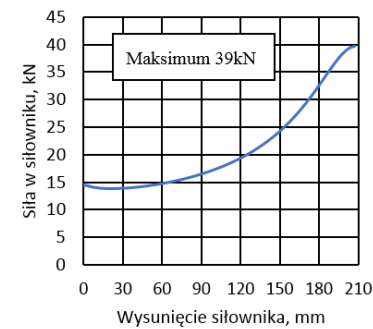
Pierwsza faza badań dotyczyła przeprowadzenia symulacji ruchu manipulatora z wykorzystaniem każdego z siłowników w pełnym zakresie. Ich celem jest dobranie siłowników hydraulicznych do przyjętej struktury kinematycznej manipulatora. W efekcie badań otrzymano przebieg siły w funkcji zmiany długości siłownika. Badania wykonano przy założeniu, że w chwytaku manipulatora umieszczony jest ładunek o masie 50kg. Podczas badań wprowadzono współczyn-

nik nadwyżek dynamicznych wynoszący 1,3. Nazewnictwo siłowników jest zgodne z rysunkiem 5. Przebiegi uzyskane dla każdego z siłowników zamieszczono na rysunku 6.

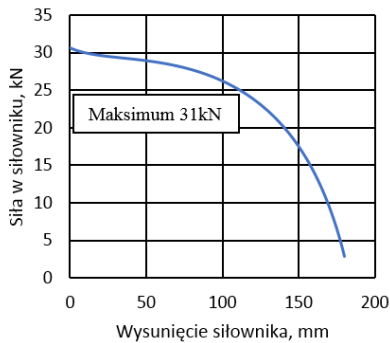
a)



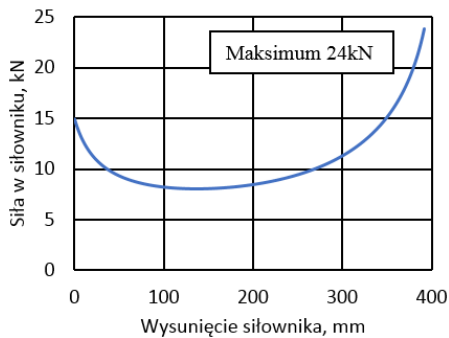
b)



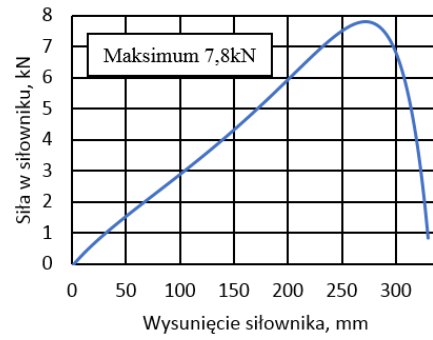
c)



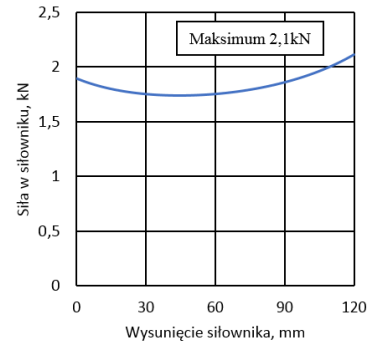
d)



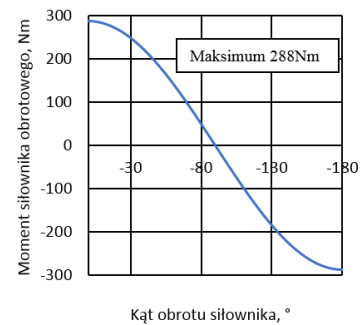
e)



f)



g)



Rys.6. Przebieg siły w funkcji skoku siłowników hydraulicznych manipulatora antropomorficznego, a – siłownik 1 (bark góra-dół), b – siłownik 2 (bark prawo - lewo), c – siłownik 3 (bark obrót), d – siłownik 4 (łokieć), e – siłownik 5 (nadgarstek góra - dół), f – siłownik 6 (nadgarstek prawo - lewo), g – siłownik 7 (nadgarstek obrót)

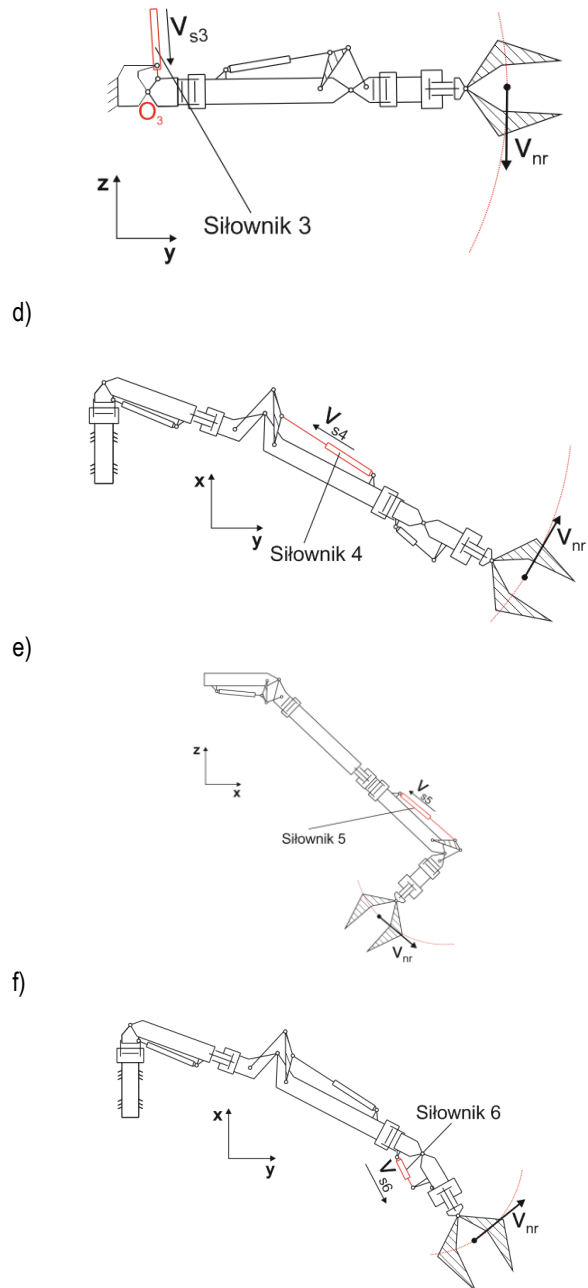
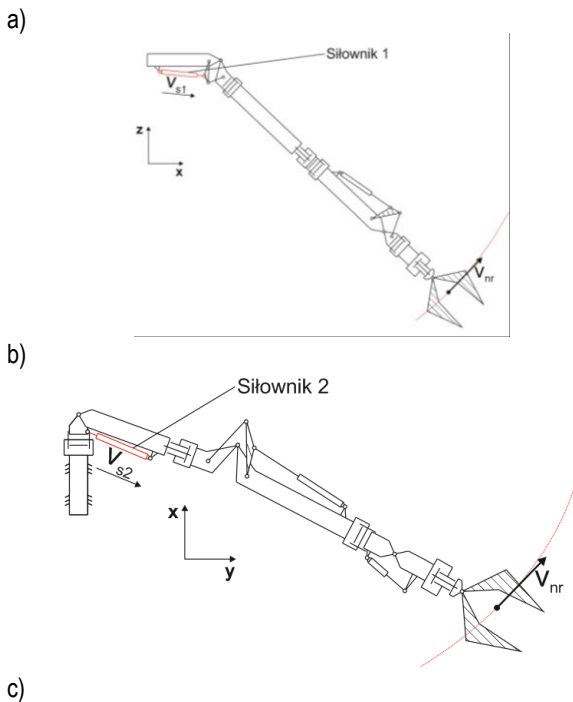
W celu doboru siłowników hydraulicznych wymuszających ruch poszczególnych członów manipulatora przyjęto, że ciśnienie robocze w układzie wynosi 20MPa. Na podstawie przeprowadzonych badań wymaganej siły użytecznej oraz przyjętego ciśnienia roboczego wyznaczono minimalne średnice siłowników hydraulicznych. Podstawowe parametry dobranych siłowników hydraulicznych zamieszczono w tabeli 2.

Tab.2. Zestawienie podstawowych parametrów siłowników hydraulicznych przyjętych do napędu manipulatora

Lp.	Nazwa elementu	Średnica tłoka, mm	Średnica tłoczy-ska, mm	Długość mini-malna, mm	Długość maksy-malna, mm	Skok, mm	
1	Siłownik 1	63	30	627	972	345	
2	Siłownik 2	63	30	530	775	245	
3	Siłownik 3	50	25	82	262	180	
4	Siłownik 4	50	25	631	1026	395	
5	Siłownik 5	32	20	529	859	330	
6	Siłownik 6	25	18	292	412	120	
7	Siłownik 7	Siłownik o ruchu obrotowym					

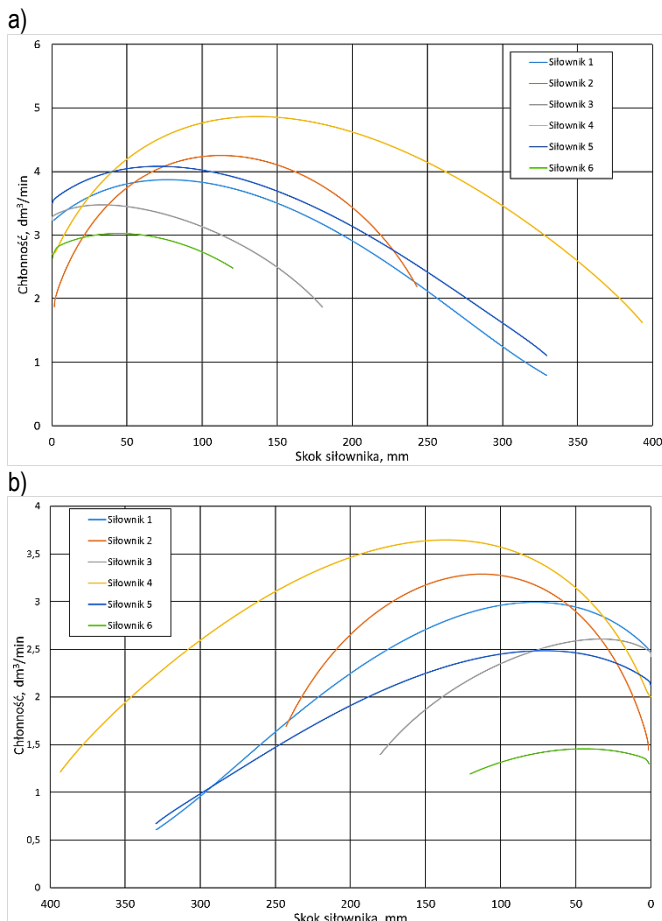
2.2. Chłonność siłowników hydraulicznych

Drugi etap badań polegał na wyznaczeniu zmian chłonności siłowników hydraulicznych w zależności od prędkości narzędzia roboczego. Znajomość wartości niezbędnej chłonności jest konieczna do określenia wydajności pompy hydraulicznej oraz średnicy przewodów hydraulicznych. Przyjęto, że prędkość narzędzia roboczego jest stała i wynosi 0,5m/s w całym zakresie ruchu. Prędkość ta jest zbliżona do uzyskiwanej w maszynach przeładunkowych [9]. Wykonano badania symulacyjne ruchu narzędzia roboczego z przyjętą wartością prędkości przy założeniu, że jego realizacja odbywa się za pośrednictwem każdego z siłowników z osobna. Zasympulowanych zostało 6 ruchów realizowanych za pośrednictwem siłowników o ruchu posuwisto - zwrotnym w pełnym zakresie ich skoku (tab. 2.). Ideowe schematy wzajemnego ustawienia członów manipulatora podczas symulacji zamieszczono na rysunku 7.



Rys.7. Schematy ustawienia członów manipulatora podczas badań symulacyjnych chłonności siłowników hydraulicznych,

Krzywe przedstawiające przebieg zmian chłonności siłowników przy zasilaniu komory beztłoczkowej i tłoczkowej zamieszczono na rysunku 8.

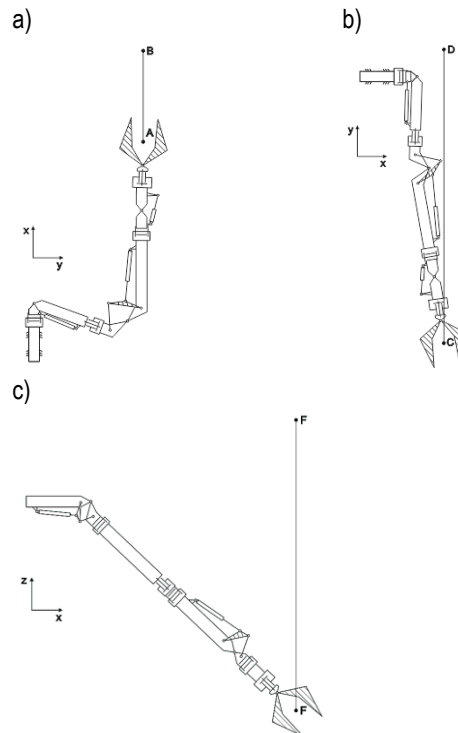


Rys. 8. Przebiegi zmian chłonności siłowników hydraulicznych dla prędkości narzędzia roboczego 0,5m/s; a - przy zasilaniu komory bezłoczyskowej; b - przy zasilaniu komory tłoczyskowej

Przebiegi przedstawione na rysunku 8 wskazują, że wydajność pompy, która zapewni ruch narzędzia roboczego z założoną prędkością nie powinna być mniejsza niż 5dm³/min przy założeniu, że ruch realizowany jest za pośrednictwem tylko jednego siłownika. W przypadku składania kilku ruchów jednocześnie wydajność pompy powinna być odpowiednio większa.

2.3. Identyfikacja siłowników głównych manipulatora antropomorficznego

Siłowniki główne określono jako lokalizujące narzędzie robocze w obszarze wykonywanego zadania. Za ich pośrednictwem możliwe jest przemieszczenie narzędzia roboczego w całym polu pracy. Pozostałe siłowniki pełnią rolę pomocniczych, które wpływają na manewrowość manipulatora oraz pozwalają na precyzyjne wykonanie zadania. W celu określenia siłowników głównych manipulatora antropomorficznego przyjęto, że za ich pośrednictwem możliwe jest wykonanie trzech prostoliniowych ruchów reprezentujących całe pole pracy (rys. 9). Badania polegały na przeprowadzeniu licznych symulacji możliwości realizacji założonych ruchów przez model manipulatora przy wykorzystaniu minimalnej liczby siłowników hydraulicznych. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 3.



Rys. 9. Ideowy schemat ruchów manipulatora przyjętych do badań, a - wzdłużny, b - poprzeczny, c - pionowy

Tab. 3. Wyniki badań minimalnej liczby siłowników hydraulicznych niezbędnych do realizacji ruchu wzdłużnego, poprzecznego oraz pionowego modelu manipulatora

L.p.	Nazwa elementu	Ruch wzdłużny	Ruch poprzeczny	Ruch pionowy
1	Siłownik 1			✓
2	Siłownik 2	✓	✓	✓
3	Siłownik 3			
4	Siłownik 4	✓	✓	✓
5	Siłownik 5			
6	Siłownik 6			

Zgodnie z wynikami badań (tab. 3) trzy siłowniki są niezbędne do wykonania założonych ruchów prostoliniowych przez manipulator. Siłowniki 1, 2 i 4 są głównymi siłownikami manipulatora. Badania wskazują na, że w czasie pracy manipulatora układ hydrauliczny powinien umożliwić jednoczesną pracę siłowników 1, 2 i 4 z maksymalną niezbędną w danym czasie chłonnością.

PODSUMOWANIE

Przeważająca większość manipulatorów antropomorficznych wykorzystuje napęd elektryczny. Manipulatory antropomorficzne o napędzie hydrostatycznym są konstrukcjami prototypowymi, które mogą być stosowane w zmieniających się znacząco zadaniach związanych z pracami przeładunkowo transportowymi. Ich możliwości robocze w znacznym stopniu przewyższają ludzkie. Analogia struktury kinematycznej do ludzkiej kończyny górnej, przy zastosowaniu odpowiedniego rodzaju sterowania sprawia, że pracować mogą nimi operatorzy o niskim doświadczeniu. Wpływa to na zmniejszenie zarówno kosztów jak i czasu szkolenia. Opracowany model manipulatora antropomorficznego jest odzwierciedleniem funkcjonalnym ludzkiej kończyny górnej. Przeprowadzono na nim badania w środowisku do modelowania układów wielocłonowych, w oparciu o, które określono

siły użyteczne w siłownikach hydraulicznych, które nie przekraczały 40kN. Badania pozwoliły na określenie dla przyjętego ciśnienia roboczego wielkości siłowników hydraulicznych. Kolejny etap badań symulacyjnych pozwolił na wyznaczenie zmian chłonności siłowników hydraulicznych w funkcji ich długości dla przyjętej struktury kinematycznej i założonej prędkości narzędzia roboczego. Jest to niezbędne przy doborze pompy hydraulicznej do układu. W ostatnim etapie badań określono, które z siłowników manipulatora odpowiadają za szybką lokalizację narzędzia roboczego w polu pracy, a które za ruchy precyzyjne. Za pośrednictwem trzech siłowników przyjęta struktura kinematyczna manipulatora o 7 stopniach swobody jest zdolna do lokalizacji narzędzia roboczego w całym polu pracy.

BIBLIOGRAFIA

1. Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K., *Teoria mechanizmów i manipulatorów*. WNT, Warszawa, Polska, 2002.
2. Broszura informacyjna produktu *Modu Man 100* firmy Nuclear
3. Online: www.fanurobotics.pl
4. Online: www.tmsuk.co.jp
5. Online: www.sarcos.com/?page_id=1409
6. Friedman Diana C. W., Doshier J., Kowalewski T., Rosen J. Hanaford B., *Automated tool handling for the trauma pod surgical robot*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Apr 10-14, 2007, Rome, Italy, pp. 1936-1941
7. Dreyfuss H., *The Measure of Man a Women Human Factors in Design*, New York (1960)
8. D. Liu and E. Todorov, *Hierarchical optimal control of a 7-DOF arm model*, IEEE Symposium on Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning 1, 50–57, 2009.
9. A. Bartnicki, P. Krogul, K. Spadło, *Influence of an EOD Engineer Robot manipulator structure on the effector's accuracy using intuitive control system*, 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, pp. 1148-1153, Miedzyzdroje, Polska 2016.

Selected parameter's simulation research in a hydrostatic drive system for anthropomorphic manipulators used in transportation

The article compares anthropomorphic and industrial manipulators. The basic differences between these constructions are indicated, resulting both from the control method as well as the kinematic structure. Presented the method of developing the kinematic structure of the anthropomorphic manipulator as a construction similar to the human upper limb. An anthropomorphic manipulator model was developed based on accepted assemblies concerning a significant increase in human working capacity in the context of reloading and transport work. Simulation studies were carried out on the manipulator model developed in the aspect of determining selected hydrostatic drive system parameters.

Autorzy:

mgr inż. **Karol Cieślik** – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, karol.cieslik@wat.edu.pl

mgr inż. **Piotr Krogul** - Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, piotr.krogul@wat.edu.pl

mgr inż. **Kacper Spadło** - Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, kacper.spadlo@wat.edu.pl

dr inż. **Rafał Typiak** – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, rafal.typiak@wat.edu.pl

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.182

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15