

BADANIA NUMERYCZNE PLATFORMY DO WIRTUALNEGO SZKOLENIA OPERATORÓW MASZYN ROBOCZYCH

W artykule omówione zostały badania numeryczne platformy zaprojektowanej jako ruchoma podstawa fotela operatora maszyny roboczej. Ruchliwość platformy i uzyskany zakres ruchów wraz z opracowanym układem napędowym pozwoliły na uzyskanie założonych parametrów kinematycznych. Wyniki badań numerycznych potwierdzają możliwość wykorzystania zaprojektowanej platformy jako elementu systemu do szkolenia operatorów maszyn roboczych z wykorzystaniem narzędzi informacyjnych i sprzętowych stosowanych w wirtualnej rzeczywistości. Uzyskane parametry kinematyczne manipulatora pozwalają na rozszerzenie obszaru zastosowań manipulatora do realizacji symulatorów bardziej wymagających niż miejsce pracy operatora maszyny roboczej.

WSTĘP

Szkolenie operatorów maszyn roboczych realizowane na obiektach rzeczywistych jest nieodzowne w kontekście wymagań jakie stawiają przepisy [1]. Podobnie jak w przypadku bardziej zaawansowanych urządzeń, np.: samolotów, szkolenie wirtualne na symulatorach jest doskonałym sposobem zarówno na skrócenie procesu szkolenia jak i istotne obniżenie jego kosztów. Aby szkolenie było efektywne, wskazane jest aby symulator nie tylko możliwie wiernie odzwierciedlał miejsce pracy operatora ale również generował oddziaływania fizyczne towarzyszące pracy maszyny i jej osprzętu roboczego. Wiąże się to, obok wizualizacji przy pomocy specjalnych okularów lub ekranów (rys. 1-2) pola pracy maszyny i jej osprzętu, z koniecznością generowania bodźców fizycznych a także akustycznych.



Rys. 1. Symulator ładowarki kołowej [2]

W opracowanym projekcie wykorzystano znaną strukturę manipulatora równoległego, platformę Stewarta, którą w stosunku do pierwowzoru nieznacznie zmodyfikowano. W celu sprawdzenia osiągnięć zaprojektowanego urządzenia, opracowaną strukturę manipulatora wraz z układem napędowym poddano numerycznej weryfikacji.

1. OPIS MANIPULATORA

Platforma Stewarta jest manipulatorem równoległym o stosunkowo prostej strukturze i dużej sztywności przy sześciu stopniach swobody. Na potrzeby realizowanego projektu dokonano nieznacznej modyfikacji typowej struktury platformy Stewarta ograniczając wymagania co do obrotu platformy wokół osi pionowej.

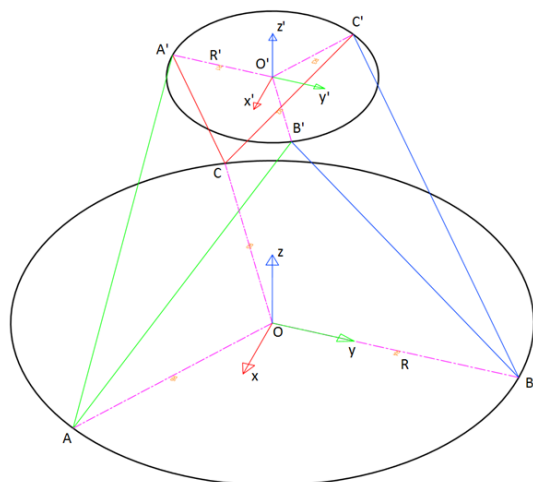


Rys. 2. Symulator szkoleniowy koparki jednoznaczyniowej Volvo EXC210 [3]

1.1. Struktura mechanizmu

Mechanizm jest manipulatorem równoległym i składa się z sześciu siłowników łączących platformę z podstawą (rys. 3). Punkty zaczepu siłowników na podstawie i platformie rozłożone są co 120° oraz są przesunięte o 60° na platformie względem podstawy. Platforma poruszana jest względem podłoża poprzez zmianę wysuwu siłowników. W projekcie zrezygnowano z wykorzystania szóstego stopnia swobody (obrót wokół osi z'). Decyzję taką podjęto ze względu na chęć uzyskania większej strefy roboczej manipulatora. Szósty stopień swobody jest dość łatwy do uzyskania poprzez zabudowę na platformie, pod fotelem mechanizmu obracającego fotel względem platformy. Uznano, że dołożenie serwosilnika wraz z przekładnią jest lepszym rozwiązaniem gdyż umożliwi nieograniczony obrót fotela operatora względem platformy (obrót wokół osi

z'). Na rysunku 1 przedstawiono schemat opracowanego mechanizmu. Punkty O i O' to środki układów odniesienia, kolejno podstawy i platformy. Okrąg o środku w punkcie O i promieniu R jest podstawą mechanizmu, opierającą się na podłożu. Punkty A, B i C są punktami zaczepienia siłowników do podstawy oraz A', B' i C' do platformy. Siłowniki oznaczone są kolejno ciągłymi liniami zielonymi, niebieskimi i czerwonymi.



Rys. 3. Schemat mechanizmu (opis w tekście)

1.2. Parametry eksploatacyjne manipulatora

Aby manipulator mógł być wykorzystywany w możliwie szerokiej gamie aplikacji założono dość wysokie wymagania:

- liczba stopni swobody efektora – 5 (z możliwością rozbudowy do 6 - pkt. 1.1), ze względu na możliwość wykonywania szerokiej gamy ruchów podczas wirtualnego szkolenia,
- obciążenie platformy – przyjęto 1500N, przewidyując łączny ciężar szkolonego oraz potrzebnego osprzętu i ewentualny naddatek na jego rozbudowę,
- stosunkowo duże wartości przyspieszenia liniowe i kątowe platformy (tab. 1) – pozwalają na generowanie większego zakresu odczuwalnych przez operatora przyspieszeń.
- duże prędkości liniowe i kątowe platformy (tab. 1) – pozwalają na generację ruchów niustalonych w szerszym zakresie.

Spełnienie wymagań odnośnie ruchliwości platformy wymagało połączenie siłowników z podstawą parami klasy drugiej a z platformą parami kinematycznymi klasy trzeciej.

Tab. 1. Założone parametry kinematyczne mechanizmu

Kierunek ruchu	Parametr		
	Zakres	Prędkość / Prędkość kątowa	Przyspieszenie / Przyspieszenie kątowe
Przemieszczenie w pionie	864 mm	762 mm/s	9800 mm/s ²
Przemieszczenie w poziomie	1524 mm	889 mm/s	9800 mm/s ²
Obrót	0,61 rad (35°)	0,49 rad/s (28°/s)	6,98 rad/s ² (400°/s ²)

1.3. Układ napędowy i ustrój nośny manipulatora

Elementy wykonawcze układu napędowego

Elementami wykonawczymi w platformie Stewarta są aktuatory liniowe. Stosunkowo mały udźwig projektowanej platformy pozwolił na zastosowanie w projektowanym urządzeniu siłowników elektrycznych. Istotny wpływ na ten wybór miały również następujące aspekty:

- łatwe zasilanie, dostępne również w przewidywanych, nieprzemysłowych warunkach eksploatacji (np.: budynki mieszkalne, biura),

- prosty sposób sterowania,
- szeroka gama produktów na rynku pozwalająca na optymalny dobór siłowników z uwagi na wymagane parametry kinematyczne (skok, prędkość i przyspieszenie) i obciążenia.

W projekcie zastosowano nowoczesne siłowniki elektromechaniczne EMC firmy BoshRexroth [4] z precyzyjnymi mechanizmami śrubowo-tocznymi. Serwisilniki stosowane w tych aktuatorach umożliwiają optymalne kształtowanie profilu prędkości przy przenoszeniu wymaganych obciążeń. W projekcie zastosowano siłowniki elektromechaniczne EMC80 i EMC100.

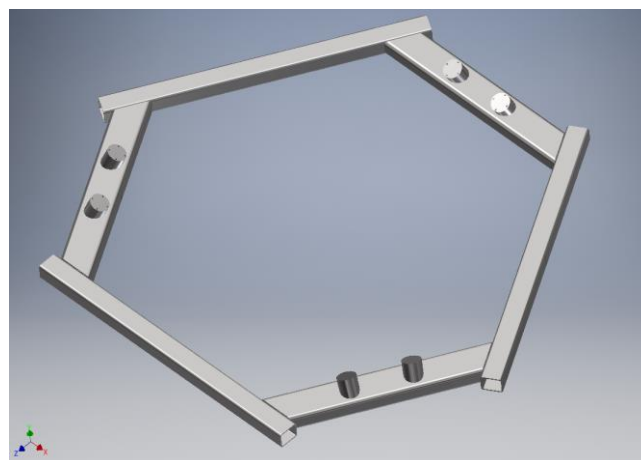
Przeguby do realizacji par kinematycznych

W celu osiągnięcia wymaganej ruchliwości (także ze względu na zalecany sposób obciążania siłowników) w układzie napędowym do połączenia siłowników z podstawą zastosowano przeguby Cardana o powiększonym kącie pracy (model 0.109.055) firmy Elbe Group [5]. Przeguby tego typu wyposażone w kołnierze pozwalają na prosty montaż do podstawy przy pomocy śrub.

Połączenie siłowników z platformą, wymagające trzech stopni swobody, zrealizowano również przy pomocy przegubów Cardana z wprowadzeniem możliwości obrotu na jednym z członów przegubu Cardana. Ze względu na wymagany zakres przemieszczeń kątowych w tych parach kinematycznych zrezygnowano z przegubów sferycznych.

Podstawa ustroju nośnego mechanizmu

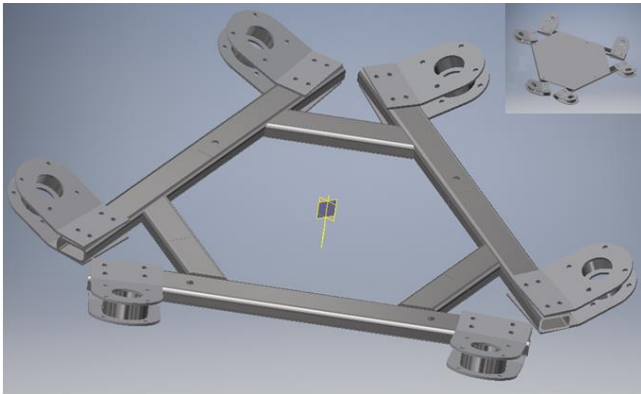
Ze względu na kryterium stateczności, zdecydowano się na podstawę w kształcie sześciokąta (rys. 4). Ramę zbudowano z pospawanych kształtowników zamkniętych o przekroju prostokątnym. Na trzech profilach ukształtowano gniazda przeznaczone do kołnierzowego montażu przegubów Cardana.



Rys. 4. Model geometryczny ramy podstawy (opis w tekście)

Platforma ustroju nośnego mechanizmu

Platformę wykonano również jako ramę spawaną z kształtowników zamkniętych o przekroju prostokątnym (rys. 5). Uchwyty do mocowania przegubów ukształtowano z blach i połączone z ramą przy pomocy połączeń śrubowych. Przymocowana do ramy blacha umożliwiła mocowanie elementów (np.: fotela) i jednocześnie usztywnia tę część ustroju nośnego.



Rys. 5. Model geometryczny platformy (opis w tekście)

2. BADANIA NUMERYCZNE MANIPULATORA

Współczesne metody i narzędzia do wirtualnego prototypowania umożliwiają przeprowadzanie szerokiej gamy badań numerycznych, które pozwalają w istotny sposób zarówno skrócić czas powstawania produktu jak i zmniejszyć koszty wdrożenia. Do typowych badań należą:

- analiza wytrzymałościowa (np.: metodą elementów skończonych) [6, 7],
- analiza kinematyczna i dynamiczna układów wielomasowych [8],
- analiza przepływu [7],
- analiza termiczna [7].

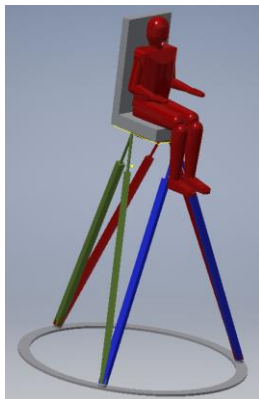
W ramach realizowanego projektu przeprowadzono analizę kinematyczną i dynamiczną manipulatora oraz analizę wytrzymałościową w ramach liniowej statyki.

2.1. Analiza kinematyczna i dynamiczna manipulatora

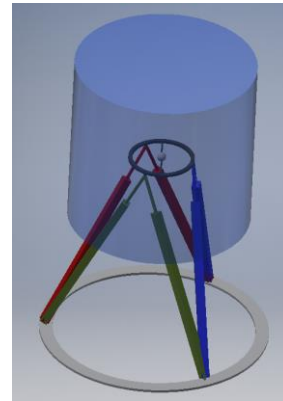
Podczas opracowania projektu manipulatora wykonano analizy kinematyki manipulatora w celu weryfikacji możliwości realizacji zakładanych osiągnięć (zakres ruchów, prędkości i przyspieszeń). Wyniki analiz dynamicznych posłużyły do zweryfikowania poprawności dobranych aktuatorów (siłowników elektromechanicznych).

Przedstawiony na rysunkach 6-8 model numeryczny manipulatora w którym zdefiniowano elementy i pary kinematyczne w sposób odzwierciedlający wymagane ruchliwości: połączenia siłowników z platformą (6 przegubów sferycznych), siłowniki (elementy o zmiennej długości), połączenie siłowników z podstawą (6 przegubów z dwoma stopniami swobody), sztywne połączenie operatora z fotelem i sztywne połączenie fotela platformą.

Na rysunku 7 przedstawiono wymaganą przestrzeń roboczą manipulatora, którą zdefiniowano jako walcowatą część strefy roboczej, w której platforma może osiągnąć każdą żądaną orientację.

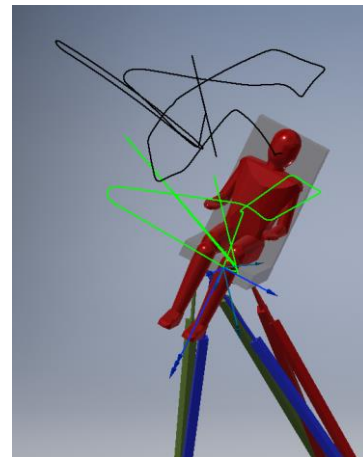


Rys. 6. Wizualizacja modelu numerycznego do analiz kinematycznych i dynamicznych



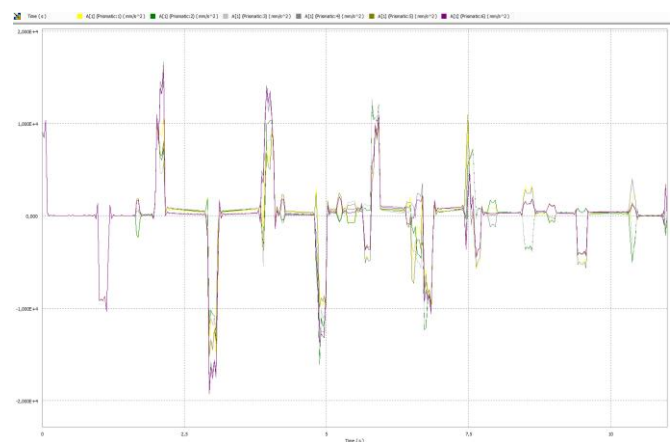
Rys. 7. Wymagana przestrzeń robocza manipulatora

Na rysunku 8 przedstawiono model manipulatora z naniesionymi trajektoriami (środką platformy i głowy operatora) uzyskanymi wskutek realizacji założonej sekwencji przemieszczeń liniowych i obrotów polegających na przemieszczaniu platformy po obwodzie prostokąta (z zaokrąglonymi narożnikami) i jednoczesnym ruchu góra-dół.

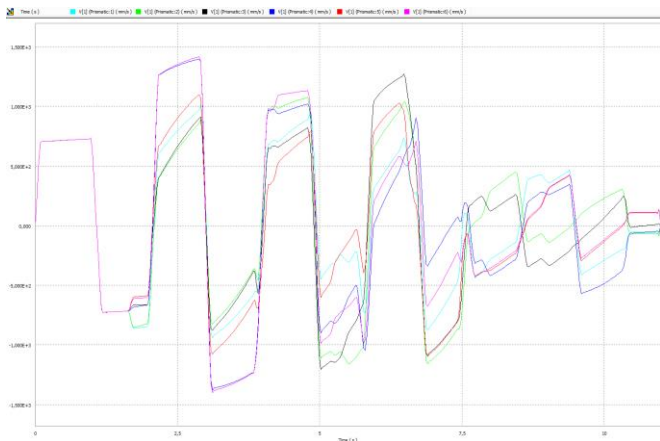


Rys. 8. Przykładowe trajektorie: głowy (kolor czarny) i platformy (kolor zielony)

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wybrane wyniki obrazujące przebiegi w czasie parametrów kinematycznych wysuwu tłoczków siłowników (prędkości i przyspieszeń).



Rys. 9. Przykładowe przebiegi przyspieszenia tłoków siłowników

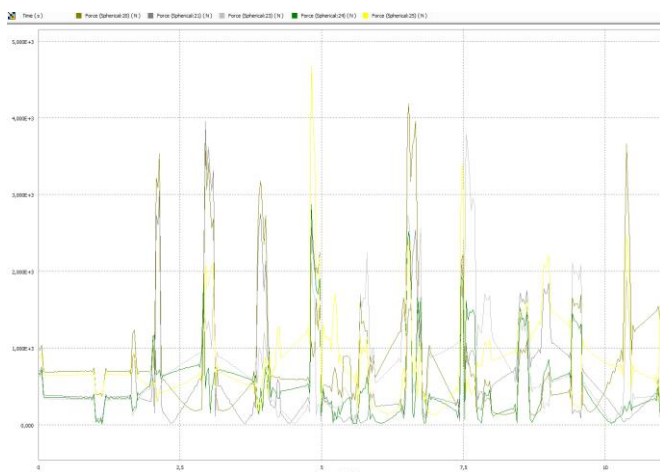


Rys. 10. Przykładowe prędkości wysuwu tłoków siłowników

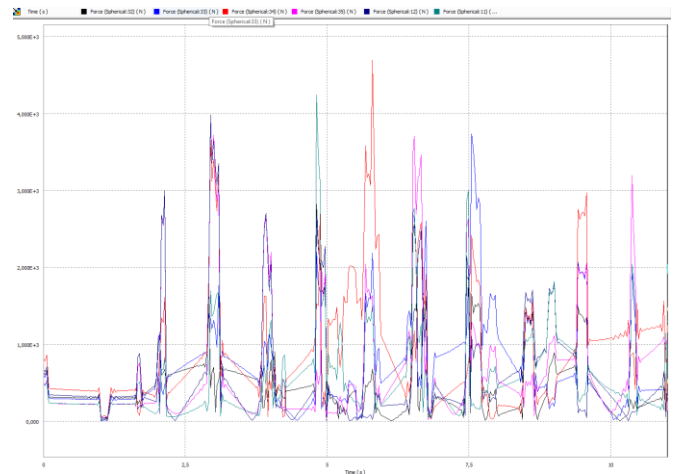
Na rysunkach 11-13 przedstawiono wybrane wyniki obrazujące przebiegi obciążeń występujących w parach kinematycznych i siłownikach manipulatora.



Rys. 11. Przebieg sił osiowych występujących w siłownikach



Rys. 12. Przebieg sił w parach kinematycznych drugiej klasy



Rys. 13. Przebieg sił w parach kinematycznych trzeciej klasy

Uzyskane wyniki analiz kinematycznych pozwoliły pozytywnie zweryfikować przyjęte wymiary geometryczne poszczególnych elementów manipulatora w kontekście realizacji założonych osiągnięć (tab. 1). Obciążenia osiowe siłowników i siły wypadkowe w parach kinematycznych nie przekraczają wartości dopuszczalnych dla użytych elementów

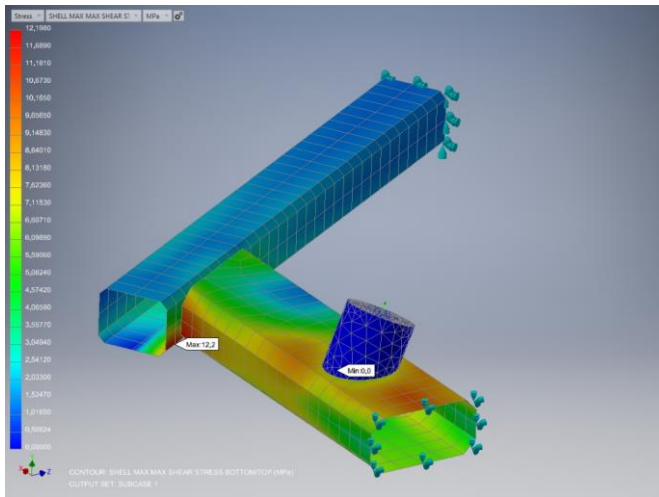
2.2. Analiza wytrzymałościowa elementów ustroju nośnego manipulatora

Analizę wytrzymałościową zrealizowano metodą elementów skończonych jako analizę statyczną. W środowisku programu Autodesk Nastran In-Cad zbudowano modele numeryczne podstawy i platformy wykorzystując zarówno elementy powłokowe (profile zamknięte oraz blachy) jak i elementy bryłowe (gniazda do mocowania przegubów Cardana). W programie zdefiniowano podstawowe parametry materiału (stal S355H): moduł Younga $E=2,05 \cdot 10^5$ MPa oraz ułamek Poissona $\nu=0,27$.

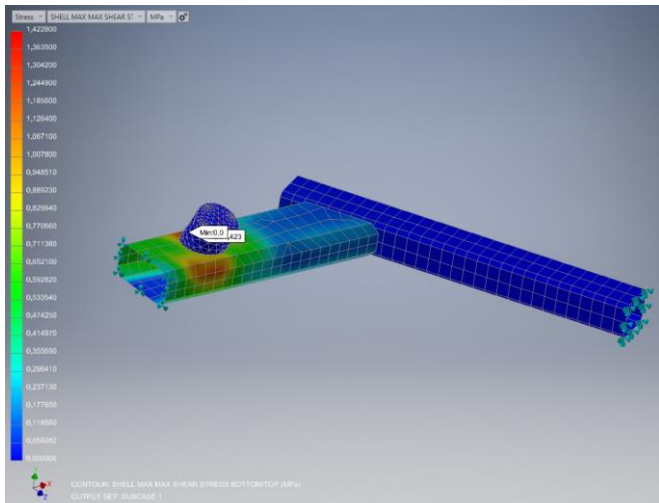
Wyniki analizy wytrzymałościowej ramy podstawy

Z uwagi na symetrię sześciokątnej ramy podstawy analizie poddano jedynie jej część, co zamodelowano poprzez odebranie na w węzłach siatki zlokalizowanych na płaszczyznach przekroju (w połowie kształtowników zamkniętych) odpowiednich stopni swobody (translacje w kierunku prostopadłym do płaszczyzny przekroju i dwie rotacje-pozostawiono rotację w płaszczyźnie symetrii). Ramę podparto na płaszczyznach dolnych kształtowników tak aby odzwierciedlić oddziaływanie podłoża.

Na rysunkach 14-15 przedstawiono wyniki (rozkłady naprężeń zredukowanych) uzyskane w wyniku obciążenia ustroju siłą skupioną pochodzącą od siłownika oraz momentem wynikającym z ramienia działania siły (przesunięcie o 52 mm). Na rysunku 16 przedstawiono wyniki dla złożonego stanu obciążenia siłą i momentem.

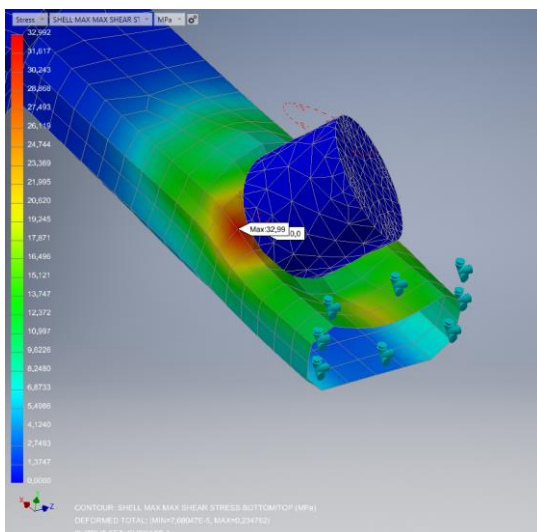


Rys. 14. Rozkład naprężeń w ramie podstawy obciążonej siłą normalną do powierzchni gniazda do mocowania przegubu siłownika ($F=5\text{ kN}$)



Rys. 15. Rozkład naprężeń w ramie podstawy obciążonej momentem ($M=260\text{ Nm}$)

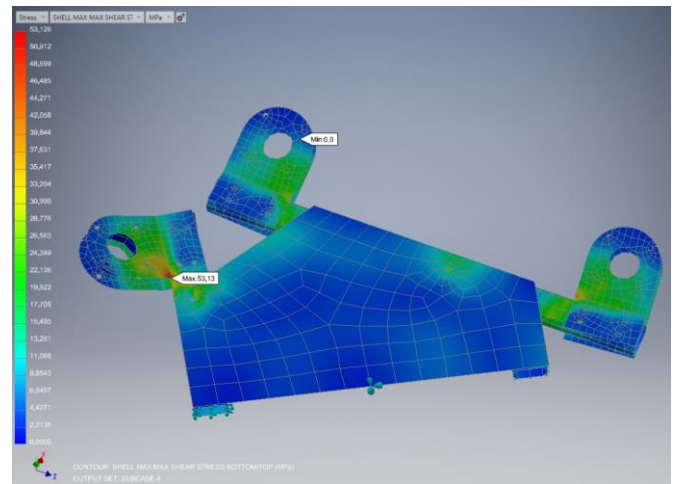
Uzyskane wyniki obliczeń na pierwszy rzut oka pozwalają na optymalizację ustroju nośnego. Uzyskane naprężenia nie przekraczają 40 MPa , jednak autorzy postanowili zachować ramę podstawy w przyjętej wstępnie postaci z uwagi na stateczność manipulatora.



Rys. 16. Rozkład naprężeń w ramie podstawy obciążonej siłą ($F=5\text{ kN}$) i momentem ($M=260\text{ Nm}$)

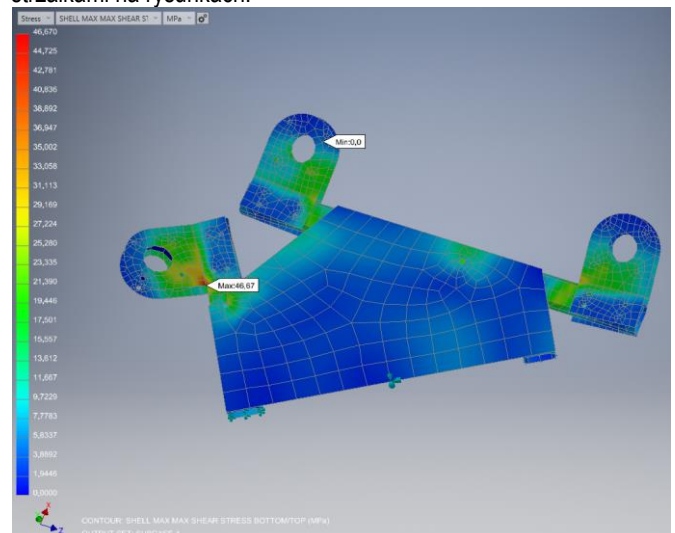
Wyniki analizy wytrzymałościowej platformy

Podobnie jak w przypadku ramy podstawy, tutaj również analizie poddano połowę struktury platformy uwzględniając warunki symetrii poprzez adekwatne odebranie stopni swobody węzłom siatki zlokalizowanym na płaszczyznach przekroju. Utwierdzenie obiektu zrealizowano poprzez odebranie wszystkich stopni swobody w węzłach rozmieszczonych w otworach gniazd przeznaczonych do mocowania przegubów siłowników. Na rysunku 17 przedstawiono rozkład naprężeń w wyniku obciążenia platformy siłą prostopadłą do płyty ($F=1,5\text{ kN}$) odzwierciedlającej ciężar operatora i osprzętu. Na rysunku 18 przedstawiono rozkłady naprężeń będące wynikiem obciążenia platformy siłą pod kątem 35 stopni do płaszczyzny platformy.

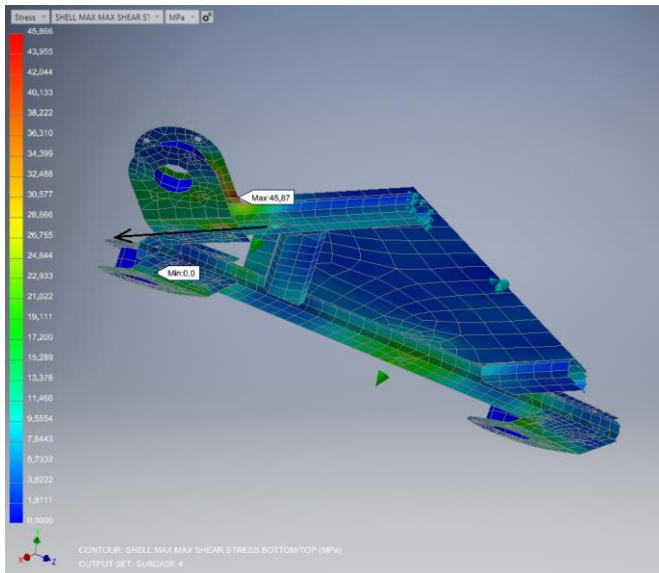


Rys. 17. Rozkład naprężeń w platformie obciążonej siłą normalną do powierzchni platformy ($F=1,5\text{ kN}$)

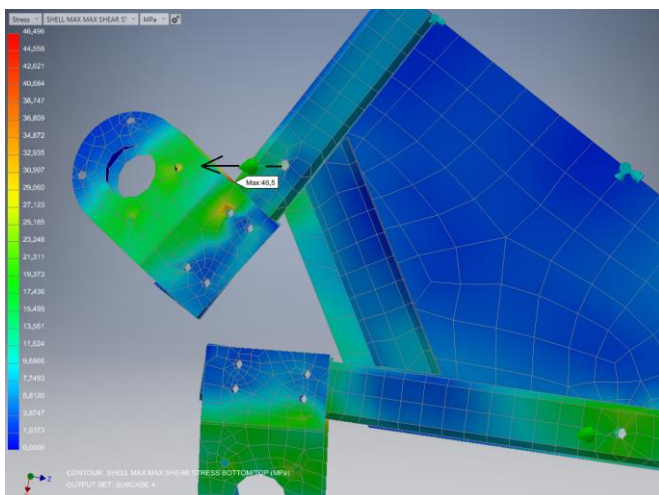
Rysunki 19-21 przedstawiają naprężenia zredukowane występujące wskutek obciążenia ustroju siłą ($F=1,5\text{ kN}$) działającą w płaszczyźnie platformy w kierunkach (i ze zwrotami) oznaczonymi strzałkami na rysunkach.



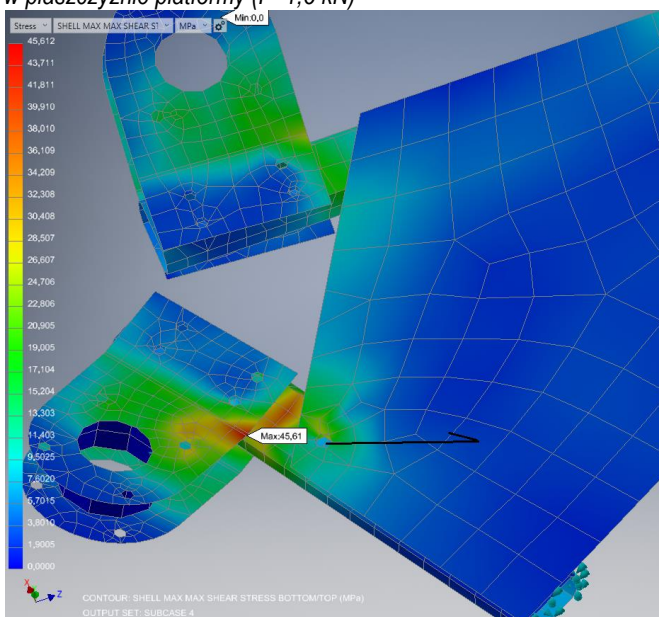
Rys. 18. Rozkład naprężeń w platformie obciążonej siłą pod kątem 35° do powierzchni platformy ($F=1,5\text{ kN}$)



Rys. 19. Rozkład naprężeń w platformie obciążonej siłą działającą w płaszczyźnie platformy ($F=1,5$ kN)



Rys. 20. Rozkład naprężeń w platformie obciążonej siłą działającą w płaszczyźnie platformy ($F=1,5$ kN)



Rys. 21. Rozkład naprężeń w platformie obciążonej siłą działającą w płaszczyźnie platformy ($F=1,5$ kN)

Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych platformy pokazują pewien zapas wytrzymałości ustroju nośnego. Uzyskane naprężenia nie przekraczają 60 MPa. Z uwagi na to, że manipulator ma być wykorzystywany do przemieszczania fotela z człowiekiem, większa wartość współczynnika bezpieczeństwa jest jak najbardziej uzasadniona.

PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań wirtualnych zaprojektowanego manipulatora z jednej strony potwierdzają założone osiągi manipulatora a z drugiej, pokazują potencjalne możliwości optymalizacji ustroju nośnego, np.: ze względu na masę urządzenia lub też poszerzenia zakresów osiąganych parametrów kinematycznych przy realizacji przemieszczeń w wybranych kierunkach ruchu w wybranych kierunkach.

BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 20 września 2001 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas eksploatacji maszyn i innych urządzeń technicznych do robót ziemnych, budowlanych i drogowych (Dz. U. Nr 118, poz.1263).
2. Materiały informacyjne firmy Caterpillar.
3. Materiały informacyjne firmy Volvo.
4. Materiały informacyjne firmy Bosh Rexroth Group.
5. Materiały informacyjne firmy Elbe Group.
6. Hutton, D., V., „Fundamentals of Finite Element Analysis, McGraw-Hill, 2003 r.
7. Reddy, J., N., Gartling, D.,K., The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics, CRC Press, 2010 r.
8. Wittenburg, J., Dynamics of Multibody Systems, Springer Berlin Heidelberg, 2008 r.

Numerical research of the platform for virtual training of machine operators

The article discusses the numerical study of a platform designed as a movable base of a working-machine operator's chair. The mobility of the platform and the resulting range of motions together with the developed drive system allowed to obtain the kinematic parameters. The results of the numerical tests confirm the possibility of using the designed platform as part of the system for the training of machine operators with the use of IT and hardware tools used in virtual reality. The obtained kinematic parameters of the manipulator allow the extension of the manipulator's area of application to make the simulators more demanding than the operator's workplace.

Autorzy:

Dr inż. **Robert Czabanowski** – Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, robert.czabanowski@pwr.edu.pl

inż. **Marcin Łopusiewicz** – Politechnika Wroclawska