

STRUKTURALNA OPTYMALIZACJA WEKTOROWA NARZĘDZIA ROBOTA MEDYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

STRUCTURAL VECTORIAL OPTIMIZATION OF MEDICAL ROBOT'S TOOL USING FINITE ELEMENT METHOD

Grzegorz Ilewicz*¹, Zbigniew Nawrat^{2,3}

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,
Katedra Mechatroniki i Automatyki, 35-310 Rzeszów, ul. Pignonia 1

² Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii, 41-800 Zabrze, ul. Wolności 345a

³ Śląski Uniwersytet Medyczny, 41-800 Zabrze, ul. Szpitalna 2

*e-mail: gilewicz@ur.edu.pl

STRESZCZENIE

Praca przybliży analizy strukturalne z wykorzystaniem algorytmu metody elementów skończonych, która a priori daje prawidłowe wyniki dla układów o skomplikowanej geometrii, dla której trudno jest uzyskać rozwiązanie analityczne lub dla której przeprowadzenie testów fizycznych jest utrudnione. Eksperymenty numeryczne zostały przeprowadzone dla narzędzia robota kardiochirurgicznego Robin Heart 1, który został przetestowany podczas operacji na zwierzętach. W artykule pokazano wyniki analizy deformacji, częstotliwości drgań własnych oraz optymalizację wektorową mającą na celu określenie ekstremum w oparciu o algorytm genetyczny. Wykorzystano również metodę powierzchni odpowiedzi, globalny front Pareto i metodę elementów skończonych. Zaprezentowany model optymalizacji wielokryterialnej umożliwia uzyskiwanie struktury o minimalnej masie i maksymalnej sztywności oraz odstrajanie układu od częstotliwości bliskich rezonansowym. Przy minimalnym wzroście masy, co skutkuje minimalizacją amplitudy drgań podczas ruchu narzędzia. Celem pracy jest wyjaśnienie zjawiska rezonansu dla wyznaczonych częstotliwości drgań własnych narzędzia do serwisowania sztucznego narządu i wektorów własnych, które przedstawiają kształty deformacji przy pojawieniu się tego negatywnego zjawiska.

Słowa kluczowe: narzędzie robota medycznego, zjawisko rezonansu, optymalizacja wektorowa, powierzchnia odpowiedzi, metoda elementów skończonych

ABSTRACT

The work explains structural analysis using algorithm of finite element method, which gives a priori correct results for systems with complicate geometry for which it is difficult to obtain analytical solution or when conducting physical tests is hampered. Numerical experiments were performed for endoscopic tool of cardiosurgical robot Robin Heart 1, which was tested during the operating experiment on animals. The article shows the results of the analysis of deformation, natural frequency of vibrations, and vectorial optimization aiming at calculations of

extremum on the basis of genetic algorithm. Response surface method, global Pareto front, and finite element method were also used. The presented model of vectorial optimization allows to obtain the structure with minimal mass and maximal stiffness and tuning away from frequency that are close to resonant frequency. At minimum mass increase which results in minimizing the amplitude of vibration during movement of the tool. The aim of the work is also to explain of the phenomenon of resonance for the designated vibration natural frequencies of the tool for servicing an artificial organ and eigenvectors which show shapes of deformation as a result of this negative phenomenon.

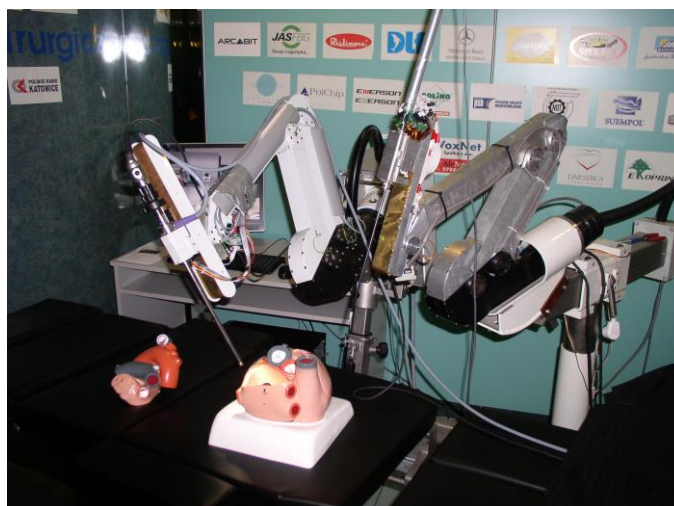
Keywords: medical robot tool, phenomenon of resonance, vectorial optimization, response surface, finite element method

1. Wstęp

Roboty medyczne są obecnie wykorzystywane do wykonywania operacji na ludzkim organizmie w sposób minimalnie inwazyjny, to znaczy taki, który nie powoduje nadmiernego urazu tkanek zdrowych, natomiast zoperowane zostają tkanki patologicznie znajdujące się wewnątrz ciała człowieka [1, 2]. Omawiane operacje są wykonywane przez niewielkie porty dostępowe, których średnica jest z reguły mniejsza od 1 cm. Stosowane konstrukcje robotów medycznych posiadają strukturę otwartą lub zamkniętą, co ma swoje konsekwencje jeżeli rozważa się ich kinetykę oraz kształt przestrzeni roboczej [3, 4]. Najczęściej stosowanym klinicznie robotem medycznym na świecie jest Da Vinci. Chociaż używano również z powodzeniem robota Zeus także w polskich szpitalach do operacji tkanki miękkiej.

W Fundacji Rozwoju Kardiologii w Zabrze realizowany jest projekt Robin Heart budowy robota do operacji kardiologicznych [5]. Do tej pory przeprowadzono również spektakularną operację na zwierzętach, przy użyciu robota Robin Heart 1, z pozytywnym skutkiem przy udziale osób opinotwórczych w polskiej kardiologii [6].

Oprócz wykorzystania robotów medycznych do operowania tkanki zmienionej chorobowo, można przytoczyć użycie tych urządzeń do serwisowania sztucznych narządów [4, 7]. Na rysunku 1 pokazano robota kardiologicznego Robin Heart 1 przeznaczonego do wykonywania operacji w kardiologii.



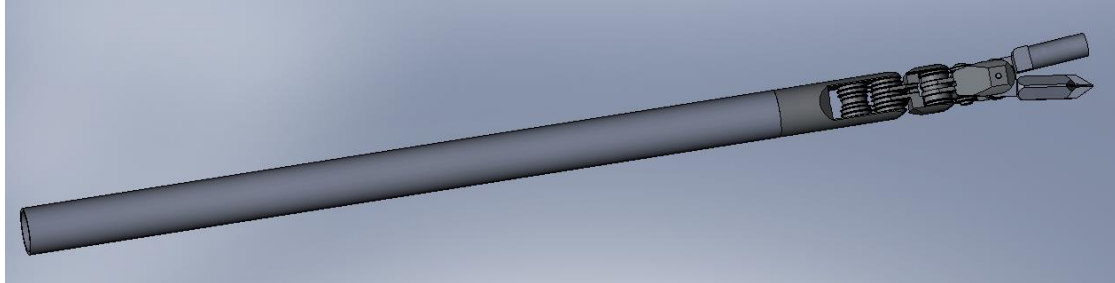
Rys. 1. Robot medyczny Robin Heart wraz z instrumentarium używanym w kardiologii podczas warsztatów chirurgicznych w Fundacji Rozwoju Kardiologii im. prof. Zbigniewa Religi

Robot Robin Heart posiada konfigurację, której głównym elementem jest mechanizm stałopunktowy. Oznacza to, że operacja odbywa się w przestrzeni roboczej mającej kształt niepełnej półsfery po przejściu narzędzia przez port dostępowy z trokarem [4].

Robot Robin Heart jest wyposażony w narzędzie, które posiada możliwości w wykonywaniu ruchu jakiego posiada ludzki nadgarstek. Dzięki temu jest w pełni funkcjonalne. Przy jego zastosowaniu można

w pewny sposób zoperować serce człowieka.

Rysunek 2 ilustruje model narzędzia robota Robin Heart 1 przeznaczony do serwisowania sztucznego narządu. Jest to jedno z ważnych zadań jakie realizuje robot medyczny wykazując się wtedy pewną autonomią. Takie narzędzie może służyć na przykład do naprawy sztucznego serca lub innego organu i z tego względu ma specjalistyczne zakończenie.



Rys.2 Narzędzie robota Robin Heart 1 przeznaczone do wykorzystania podczas serwisowania sztucznego narządu

Poprzednie nasze prace przedstawiały analizy deformacji mechanizmu stałopunktowego robota Robin Heart 1 z wykorzystaniem metody elementów skończonych [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Wykorzystano również metodę powierzchni odpowiedzi i algorytm genetyczny do uzyskania optymalnej geometrii pojedynczych ogniw z uwzględnieniem reakcji w złączach oraz sił bezwładności [8]. Przyjęto wtedy kryteria, którymi były masy, współczynnik bezpieczeństwa oraz przemieszczenie. Badano też zakresy w jakich robot mógłby teoretycznie ulec zjawisku wyboczenia [9]. Model optymalizacji jednokryterialnej z wykorzystaniem metaheurystycznej metody symulowanego wyżarzanie Monte Carlo pokazano w pracy [4]. Do tworzenia powierzchni odpowiedzi, w tych pracach, wykorzystano aproksymację metodą regresji kwadratowej [8Error! Bookmark not defined.].

Celem niniejszej pracy jest zbudowanie modelu optymalizacji wektorowej dla kryteriów którymi są: częstotliwość drgań własnych oraz masa. Częstotliwość drgań własnych dla robota daje informację o wartościach, przy których wymuszenie harmoniczne będzie powodowało znaczny wzrost amplitudy drgania i utratę trajektorii efektora (dochodzi wtedy do rezonansu). Kryterium masy natomiast powinno być zawsze minimalne ze względu na siły bezwładności w ruchu postępowym i obrotowym. Mają one szczególne znaczenie w przypadku mechanizmów stałopunktowych stosowanych w konstrukcji Robin Heart. Dowiedziono tego w pracy [4].

Wynikiem przeprowadzonego eksperymentu numerycznego będzie pozytywny wzrost wartości pierwszej częstości drgań własnych przy zachowaniu optymalnej masy.

W pracach [14, 15, 16, 17, 18] przedstawiono analizy mające na celu wyznaczenie częstości drgań własnych struktur robotów o otwartym łańcuchu kinematycznym i łańcuchu zamkniętym oraz określenie ich sztywności. Zastosowanie metody elementów skończonych do wyznaczenia częstości drgań własnych pokazano w pracy [19]. Stwierdzono czy konstrukcja jest bezpieczna dla zadanych warunków brzegowych. Wykorzystanie algorytmu genetycznego i metody elementów skończonych do optymalizacji częstości drgań własnych przeanalizowano w pracy [20].

Niniejsza praca jest podyktowana koniecznością zdobycia wiedzy o drganiach rezonansowych narzędzia konstrukcji prototypowej robota Robin Heart 1 (obiektu rzeczywistego) ze względu na serwonapęd pierwszego złącza mechanizmu stałopunktowego generujący wysokie częstości w konstrukcji ramienia i końcówce operacyjnej. Zostaną pokazane kształty drgań podczas zjawiska rezonansu dla odpowiednich wyznaczonych częstości oraz zostanie zbudowany model optymalizacyjny umożliwiający odstrajanie narzędzia od niebezpiecznych obszarów rezonansowych. Dodatkowo model będzie minimalizował masę, wobec czego siły bezwładności podczas ruchu robota będą miały minimalną wartość.

2. Obiekt badań numerycznych

Dokonano syntezy elementów składowych narzędzia robota w taki sposób, że po utworzeniu modelu dyskretnego (siatkowego) nie będą występowały regiony o niewłaściwym pokryciu siatką (ang.

cleaning geometry). Wykorzystano do tego głównie operacje typu Boolean oraz skorygowano kształty narzędzia.



Rys.3 Model bryłowy narzędzia po operacji *cleaning geometry*

Powyższe powoduje skrócenie czasu obliczeń ze względu na zmniejszenie liczby węzłów modelu dyskretnego. Ma to zasadnicze znaczenie w przypadku analiz długotrwałych na przykład wyboczenia, ale również optymalizacyjnych. Końcowy model rozwiązuje się ok. 1 minuty w stosunku do ok. 12 minut w przypadku obliczeń dla modelu bez operacji *cleaning geometry*. Obliczenia modeli wykonano na procesorze i5 trzeciej generacji, 2,5 GHz i 8 GB RAM.

3. Metoda badań numerycznych – metoda elementów skończonych

Metoda elementów skończonych jest metodą rozwiązania zjawiska fizycznego opisanego układem równań różniczkowych [11]. Można tą metodą z powodzeniem uzyskiwać wyniki numeryczne bliskie wynikom z wykorzystaniem badań eksperymentalnych dla ośrodków stałych, ciekłych i gazowych [11]. Równanie opisujące analizę strukturalną wykonaną z wykorzystaniem metody elementów skończonych ma postać:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [B] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (1)$$

gdzie:

$[M]$ – macierz bezwładności,

$[B]$ – macierz tłumienia,

$[K]$ – macierz sztywności,

$\{u\}$ – wektor przemieszczeń węzłowych,

$\{F\}$ wektor zewnętrznych sił węzłowych.

Obiekt matematyczny (1) umożliwia przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych uwzględniającej historię deformacji [13]. Nie uwzględniając czynnika tłumiącego w postaci tłumienia Rayleigha można uzyskać równanie, którego rozwiązanie określa problem drgań swobodnych tzn. takich, w których ruch jest powodowany siłą, ale siła ta nie podtrzymuje drgania:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \{\dot{u}\}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \{u\}} = [M] \cdot \{\ddot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = 0 \quad (2)$$

gdzie L oznacza Lagranżjan.

Ogólne rozwiązanie równania (2) ma postać:

$$u(t) = u_A \cdot \cos(\omega t) + u_B \sin(\omega t) \quad (3)$$

Druga pochodna wektora przemieszczenia może być zapisana jako:

$$\frac{d^2 u(t)}{dt^2} = -\omega^2 \{u\} \quad (4)$$

Dokonując podstawienia do (2) otrzymuje się:

$$-\omega^2 [M] \cdot \{u\} + [K] \cdot \{u\} = [0] \quad (5)$$

Przekształcając równanie (5) uzyskuje się równanie opisujące problem własny:

$$([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \{u\} = [0] \quad (6)$$

gdzie:

ω – wektor wartości własnej będąca częstotliwością własną narzędzia,

u – wektor własny opisujący kształt drgań.

Typowa analiza wytrzymałościowa natomiast bazuje na równaniu:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (7)$$

Macierz $[K]$ jest nazywana macierzą sztywności.

Wynik obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych jest zależny od dokładności przyjętego modelu dyskretnego, który należy rozumieć jako model siatkowy o odpowiednim pokryciu struktury to znaczy takim, które daje wynik poprawny dla ocenianego zjawiska [11]. Przedstawione w pracy badania zostały przeprowadzone w oparciu o dyskretyzację czworobocianym dziesięciowęzłowym elementem bryłowym.

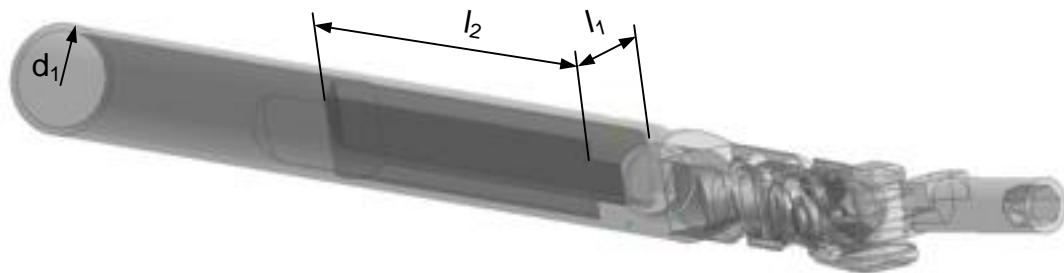
4. Optymalizacja wektorowa narzędzia robota

Optymalizacja narzędzia robota polega na znalezieniu takich wartości zmiennych decyzyjnych d (wymiary geometryczne), dla których określone zostanie optimum wielokryterialnej funkcji celu, która ma postać:

$$f(d) = \{f_1(d), f_2(d)\} \quad (8)$$

gdzie: $f_1(d)$ – masa [kg], $f_2(d)$ – częstotliwość [Hz], $d = \{d_1, l_1, l_2\}$ [m]

Wymiary geometryczne zostały dobrane w sposób nie wykluczający funkcjonalności narzędzia. Wymiary stanowiące zmienne decyzyjne zostały przedstawione na rysunku 4.



Rys.4 Narzędzie do serwisowania sztucznego narządu z zaznaczeniem wymiarów geometrycznych

Ograniczenia na zmienne decyzyjne określono jako:

$$0,7 \leq d_1 \leq 0,9 \text{ [cm]}$$

$$0,3 \leq l_1 \leq 0,4 \text{ [cm]}$$

$$1 \leq l_2 \leq 5 \text{ [cm]}$$

Proces optymalizacji przeprowadzono w oparciu o metodę powierzchni odpowiedzi i algorytm genetyczny [8, 21].

Powierzchnia odpowiedzi jest przybliżoną analityczną zależnością pomiędzy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, która zastępuje złożony model obliczeniowy i jest stosowana w procedurze optymalizacyjnej, po to, aby zminimalizować czas obliczeń. Powierzchnię odpowiedzi określa się również jako metamodel analityczny, który jest określany przez dopasowanie funkcji

aproxymujących do zbioru punktów pochodzących z eksperymentu numerycznego. Zmiana liczby punktów eksperymentu numerycznego (np. zależności wymiaru geometrycznego od wielkości pierwszej częstotliwości własnej) zmienia dokładność powierzchni odpowiedzi, która zależy również od wyboru funkcji aproxymującej oraz od wyboru punktów eksperymentu. Istnieją wielkości statystyczne, które określają dokładność dopasowania powierzchni odpowiedzi do punktów eksperymentu. Omawiana metoda została podana przez Boxa i Wilsona (1951) [21].

W niniejszej pracy powierzchnie odpowiedzi utworzono metodą Krigingu (interpolacji przestrzennej). Poszukiwano własności ciągłej z wykorzystaniem jedynie n danych z eksperymentu numerycznego.

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \beta_i y_i(x) + \varepsilon(x) \quad (9)$$

Model powierzchni odpowiedzi (9), określany przy użyciu Krigingu, jest podany przez sumę wielomianu i składnika błędu będącego odchyleniem wyników eksperymentu od założonego modelu matematycznego [22]. Błąd $\varepsilon(x)$ jest określany jako wynik procesu stochastycznego o wartości średniej równej 0 i kowariancji między dwoma punktami przestrzeni a i b [22]:

$$\text{cov}(a,b) = \sigma^2 R(a,b) \quad (10)$$

gdzie: σ^2 – wariacja procesu, $R(a,b)$ korelacja.

Kryteriami optymalizacji narzędzia robota są: pierwsza częstotliwość drgań własnych oraz masa. Optymalizacja ma na celu taką zmianę geometrii, aby masa układu była zminimalizowana, a pierwsza częstotliwość drgań własnych maksymalna. Będzie to skutkowało wysoką sztywnością układu. Przyjęty model optymalizacyjny umożliwia przyjmowanie ograniczeń na kryteria. Istotne to jest w przypadku dostrajania modelu do zadanej częstotliwości własnej.

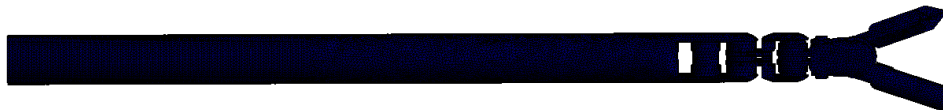
Znalezienie rozwiązania optymalnego polega na wykorzystaniu algorytmu genetycznego MOGA (ang. *multi objective genetic algorithm*) opierającego się o schematy krzyżowania i mutacji. Zastosowany algorytm uwzględnia optymalność w sensie Pareto, czyli uwzględnia rozwiązania niezdominowane i daje rozwiązanie w postaci globalnego frontu Pareto.

Rozwiązanie optymalne modelu optymalizacyjnego uzyskuje się podając zbiór rozwiązań niezdominowanych w sensie Pareto, to znaczy takich, że wybór jednego z nich w miejsce innego spowoduje pogorszenie wartości jednego kryterium i polepszenie innego. Intuicyjnie można powiedzieć, że wartość wymiaru geometrycznego ogniwa narzędzia robota daje optimum funkcji celu jeżeli żadne kryterium nie może zostać polepszone bez pogorszenia innego.

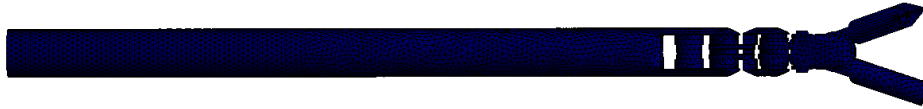
Konwergencję wyniku algorytmem MOGA uzyskuje się w wyniku uzyskania określonego procentowego udziału punktów Pareto w liczbie próbek w danej iteracji. Wartość procentową udziału punktów Pareto w liczbie próbek ustawiono na 70% a liczbę iteracji na 100%.

5. Wyniki badań numerycznych

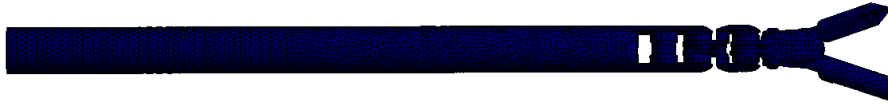
Rysunki 4, 5 i 6 ilustrują siatkowy model dyskretny o zmniejszającym się rozmiarze elementu skończonego. Biorąc pod uwagę liczbę węzłów modelu pokazano cztery siatki (modele dyskretny) elementów odniesione do wartości pierwszej częstotliwości drgań własnych.



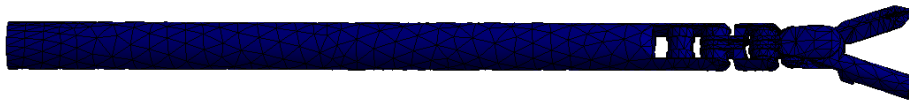
Rys. 5. Siatkowy model dyskretny narzędzia robota do serwisowania sztucznego narządu o liczbie stopni swobody równej 477013. Wartość pierwszej częstości wynosi 218,75



Rys. 6. Siatkowy model dyskretny narzędzia robota do serwisowania sztucznego narządu o liczbie stopni swobody równej 111340. Wartość pierwszej częstości wynosi 218,83



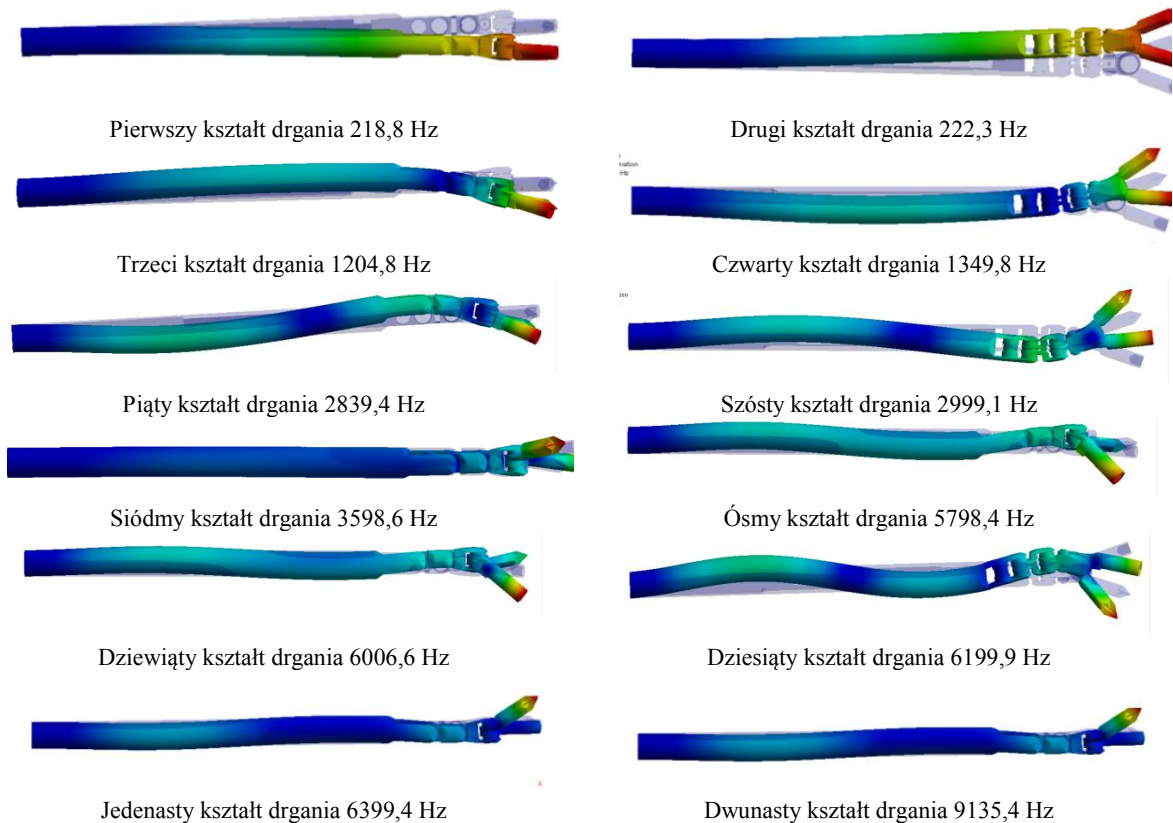
Rys. 7. Siatkowy model dyskretny narzędzia robota do serwisowania sztucznego narządu o liczbie stopni swobody równej 89727. Wartość pierwszej częstości wynosi 218,85



Rys. 8. Siatkowy model dyskretny narzędzia robota do serwisowania sztucznego narządu o liczbie stopni swobody równej 21084. Wartość pierwszej częstości wynosi 220,9

Pokazana na rysunku 5 siatka elementów skończonych jest używana we wszystkich obliczeniach ponieważ wynik analizy numerycznej częstotliwości drgań własnych nie ulega zmianie dla większej liczby węzłów modelu niż 477013.

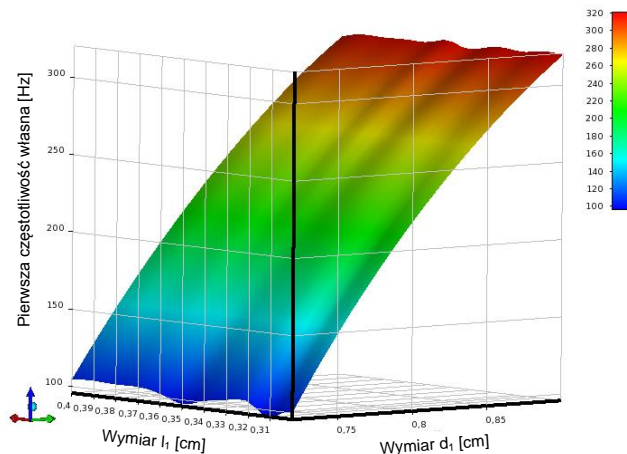
Rysunek 9 ilustruje kształty deformacji dla kolejnych dwunastu częstotliwości drgań własnych narzędzia. Przy zastosowaniu modelu dyskretnego pokazanego na rysunku 5. Pokazano drgania giętne w dwóch płaszczyznach oraz drgania skrętne końcówki operacyjnej.



Rys. 9. Kształty deformacji końcówki robota dla kolejnych częstotliwości własnych

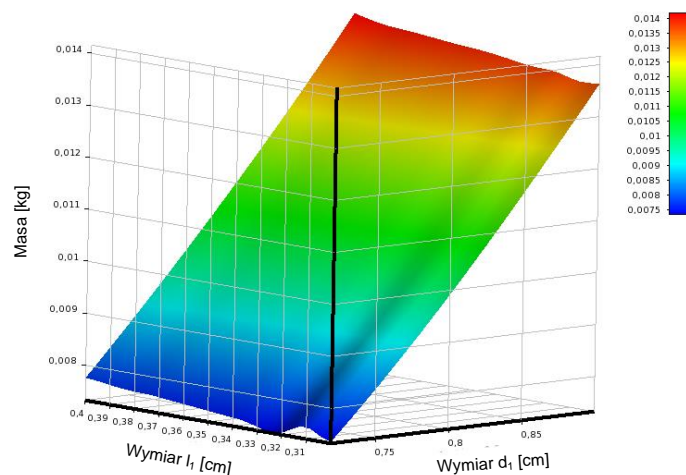
Kształty deformacji pokazane na rysunku 9 ilustrują w jaki sposób będzie drgała końcówka operacyjna podczas zjawiska rezonansu. Przykładowo dla pierwszej częstotliwości równej 218,8 Hz pojawią się drgania giętne w jednej płaszczyźnie. Dla drugiej częstotliwości występują również drgania giętne, ale w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny drgania przy pierwszej częstotliwości. Podobna sytuacja odpowiada częstotliwości trzeciej i czwartej oraz piątej i szóstej. Przy częstotliwości siódmej równej 3598,6 Hz pojawiają się drgania skrętne. Pozostałe kształty mają już bardziej skomplikowany charakter.

Rysunek 10 ilustruje powierzchnię odpowiedzi jako zależność dwóch wymiarów geometrycznych d_1 i l_1 końcówki operacyjnej od wartości pierwszej częstotliwości drgań własnych. Powierzchnia odpowiedzi ilustruje ewidentny wzrost wartości pierwszej częstotliwości wraz ze wzrostem wymiaru d_1 . Wpływ zmiany wymiaru l_1 na rozważaną częstotliwość jest niewielki (pofalowania powierzchni odpowiedzi), co zaobserwowano na omawianej charakterystyce przestrzennej.



Rys. 10. Powierzchnia odpowiedzi zależności pierwszej częstotliwości własnej od zmiennych wymiarowych

Na rysunkach 10 i 11 pokazano powierzchnię odpowiedzi jako egzemplifikację zależności pierwszej częstotliwości własnej i masy od wymiarów geometrycznych narzędzia. Na wykresie obserwuje się ewidentny wzrost masy narzędzia wraz ze wzrostem wymiaru d_1 i na podstawie otrzymanej powierzchni można oceniać, jak zmienia się masa wraz ze zmianą wymiarów geometrycznych narzędzia. Obydwie uzyskane charakterystyki mogą posłużyć doborowi masy i pierwszej częstotliwości własnej bez wykorzystania modelu optymalizacyjnego, co jest dużą zaletą metamodelu analitycznego.



Rys.11. Powierzchnia odpowiedzi zależności masy od zmiennych wymiarowych

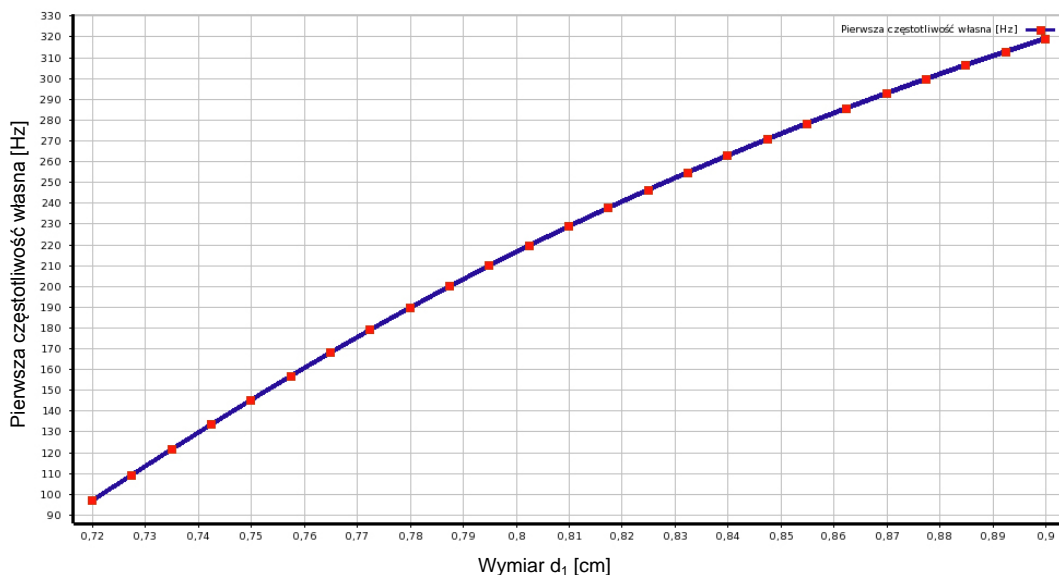
Ocenę dokładności powierzchni odpowiedzi przeprowadzono w oparciu o następujące statystyczne współczynniki dopasowania do punktów eksperymentu numerycznego:

- współczynnik korelacji R^2 dla obydwóch kryteriów osiąga najlepszą możliwą wartość i jest równy 1,
- maksymalne względne residuum jest równe 0 dla obydwóch kryteriów,
- pierwiastek błędu średniokwadratowego jest bliski 0 dla obydwóch kryteriów,
- względny pierwiastek błędu średniokwadratowego jest równy 0 dla obydwóch kryteriów,
- względny maksymalny błąd bezwzględny jest równy 0 dla obydwóch kryteriów,
- względny średni błąd bezwzględny jest równy 0 dla obydwóch kryteriów.

Opis powyższych statystycznych współczynników dopasowania wraz z odpowiednimi formułami matematycznymi zawiera [23]. Według przyjętych współczynników można stwierdzić, że powierzchnie odpowiedzi cechują się bardzo dobrym stopniem dopasowania do danych z eksperymentów numerycznych.

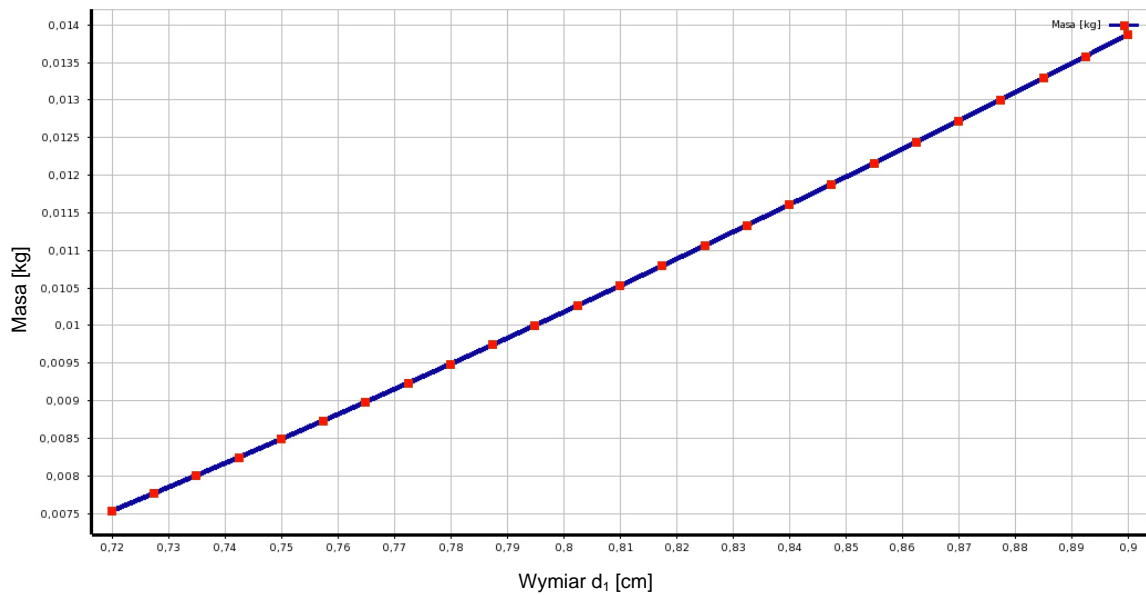
Na podstawie wygenerowanych wyników przeprowadzono proces optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego i uzyskano zbieżność rozwiązania w trzynastej iteracji. Uzyskano maksymalną wartość częstotliwości własnej równą 306,07 Hz oraz minimalną wartość masy wynoszącą 0,0011 kg dla wymiarów geometrycznych $d_1=0,88$ cm, $l_1=1,46$ cm, $l_2=0,33$ cm.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdza się, że podstawowym parametrem wymiarowym umożliwiającym zwiększanie częstotliwości drgań własnych jest grubość ścianki tulei narzędzia, co potwierdza wykres na rysunku 12.



Rys. 12. Wykres zależności pierwszej częstości drgań własnych od wymiaru d_1

Dodawanie masy wewnątrz tulei w niewielkim zakresie zwiększa sztywność końcówki operacyjnej do serwisowania sztucznego narządu.

Rys.13 Wykres zależności masy od wymiaru średnicy zewnętrznej tulei d_1

6. Podsumowanie

Praca przedstawia zbudowany model numeryczny końcówki robota Robin Heart 1 przeznaczonej do serwisowania sztucznego narządu. Model umożliwia określenie wytrzymałości konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Numeryczna analiza modalna została wykonana w celu określenia częstotliwości drgań własnych i do oceny kształtów drgania podczas rezonansu. Dzięki temu można wnioskować o zachowaniu się końcówki operacyjnej podczas tego negatywnego zjawiska, które może powstać na skutek pracy serwo mechanizmu pierwszego złącza prototypowej konstrukcji Robin Heart 1. Metamodel analityczny (powierzchnia odpowiedzi) został zbudowany metodą Krigingu w celu ograniczenia pola poszukiwań dla algorytmu optymalizacyjnego i cechuje się bardzo dobrym dopasowaniem do punktów eksperymentu numerycznego. Optymalizacja wektorowa przy użyciu algorytmu genetycznego została wykonana w celu zminimalizowania masy i zwiększenia pierwszej częstotliwości własnej, co zwiększyło sztywność narzędzia do serwisowania sztucznego narządu. Zbudowany model optymalizacyjny umożliwia również zmianę wartości częstotliwości w kierunku rosnącym lub malejącym w zależności od pojawiających się niebezpiecznych częstotliwości rezonansowych wymuszeń pochodzących od układów napędowych. Określony model optymalizacyjny jest przydatnym narzędziem do uzyskiwania struktury narzędzia charakteryzującej się drganiami o małych amplitudach w przypadku zmian w konstrukcji prototypu Robin Heart 1. Na koniec warto wspomnieć, że metoda powierzchni odpowiedzi znacznie redukuje czas obliczeń.

LITERATURA

- [1] P. Gomez (red.): *Medical robotics, Minimally invasive surgery*, Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [2] Z. Dobrowolski, R. Tadeusiewicz: *Robotyka urologiczna*, Wydawnictwo Lettra-Graphic, Kraków 2014
- [3] G. Ilewicz: *Systematyzacja struktury mechanizmu stałopunktowego*, Wokół mechatroniki, Rzeszów 2014
- [4] G. Ilewicz: *Wytrzymałościowy dyskretny model optymalizacyjny mechanizmu stałopunktowego*, Mechanika w medycynie, Rzeszów 2014
- [5] Z. Nawrat: *Co robią roboty w medycynie*, Wiadomości Elektrotechniczne – Czasopismo Stowarzyszenia Elektryków Polskich, s. 31–35, 2007.
- [6] Z. Nawrat, P. Kostka, W. Dybka, K. Rohr, L. Podsędkowski, J. Śliwka, R. Cichoń, M. Zembala, G. Religa: *Pierwsze eksperymenty na zwierzętach robota chirurgicznego Robin Heart*, Pomiary Automatyka Robotyka, vol. 14, 2010, s. 539–545.
- [7] G. Ilewicz, Z. Nawrat, J. Śliwka: *Modelowanie sterowalnego teleoperatora medycznego*, Materiały Konferencyjne Analiza Ruchu Teoria i praktyka w zastosowaniach klinicznych, Instytut Pomnik Centrum Zdrowia Dziecka, Warszawa

- 2014
- [8] G. Ilewicz, Z. Nawrat: *Optymalizacja robota medycznego z wykorzystaniem algorytmu genetycznego i metody powierzchni odpowiedzi*, Materiały konferencyjne, Medical Robots, Zabrze 2016.
 - [9] G. Ilewicz, Z. Nawrat: *Wyboczenie liniowe robota medycznego obliczane metodą elementów skończonych*, Roboty medyczne 2014
 - [10] G. Ilewicz: *Modelowanie drgań swobodnych urządzenia mechatronicznego metodą elementów skończonych*, Postępy Akustyki, Rzeszów 2013, s. 498–506.
 - [11] G. Ilewicz: *Metoda elementów skończonych w modelowaniu przepływowych i wytrzymałościowych zjawisk fizycznych*, Wokół mechatroniki tom. IV, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2015, s. 111–128.
 - [12] G. Ilewicz: *Natural frequencies and multi-objective optimization of the model of medical robot with serial kinematical chain*, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 519, Springer, Switzerland 2017 s. 371–379.
 - [13] G. Ilewicz, L. Leniowska: *Dynamika robota medycznego z otwartym łańcuchem kinematycznym w stanach niustalonych z zastosowaniem metody elementów skończonych*, Materiały konferencyjne Międzynarodowej Konferencji, BioMedTech Silesia, Fundacja Rozwoju Kardiologii, Zabrze 2016.
 - [14] J. K'Nevez, M. Cherif, M. Zapciu, A. Gerard: *Experimental characterization of robot arm rigidity in order to be used in machining operation*, Proceedings in Manufacturing Systems, vol. 5, 2010.
 - [15] C. Germain, S. Briot, S. Caro, P. Wenger: *Natural Frequency Computation of Parallel Robots*, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol.10, 2015.
 - [16] J. Prades, F. Jourdan, O. Company, S. Krut, F. Pierrot: *Dynamics Effects on Natural Frequencies in modal analysis of PKMs*, MMAR: Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzydroje, 2015.
 - [17] C. Bisu, M. Cherif, A. Gerard, J. K'Nevez: *Dynamic Behavior Analysis for a Six Axis Industrial Machining Robot*, ICASAAM 2011, Romania, 2011.
 - [18] A. Abdulhady Jaber, R. Bicker: *A Systematic Strategy to Find the Natural Frequencies of an Industrial Robot*, Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering - AMRE, 2013.
 - [19] G. Yadav, A. Pirjade, M. Jadhav, V. Patil: *Design analysis and optimization of robot pedestal*, International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), 2016
 - [20] C.W. Lin: *Optimization of Bearing Locations for Maximizing First Mode Natural Frequency of Motorized Spindle-Bearing Systems Using a Genetic Algorithm*, Applied Mathematics, vol. 5, 2014, s. 2137–2152
 - [21] G. Box, K. Wilson: *On the Experimental Attainment of Optimum Conditions*, Journal of the Royal Statistical Society B, vol. 13, 1951, s.1–45.
 - [22] A. Wymysłowski: *Numeryczne metody projektowania termomechanicznego w montażu elektronicznym*, WPW, Wrocław 2007.
 - [23] www.ansys.com (Goodness of Fit)

otrzymano / submitted: 23.11.2016
 zaakceptowano / accepted: 22.12.2016