

Dr inż. Piotr WILK, prof. dr hab. inż. Jan KOSMOL

Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, e-mail: piotr.wilk@polsl.pl

Porównanie metod optymalizacji bazujących na prymitywach i wstępnym modelu geometrycznym

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie dwóch metod optymalizacji korpusów maszyn. Obie metody wykorzystują zarówno metodę elementów skończonych jak i algorytm ewolucyjny. Pierwsza z nich zakłada, że znany jest model wstępny obiektu i wówczas należy użyć tylko optymalizacji parametrycznej. Natomiast w drugim przypadku, kiedy nie ma żadnych informacji o modelu obiektu należy zastosować zarówno optymalizację topologiczną jak i parametryczną. Ta druga metoda wykorzystuje prymitywy, jako modele wstępne obiektu. W artykule zamieszczono wyniki porównania obu metod dla wybranego korpusu obrabiarki. Porównaniu podlegały optymalne rozwiązania w postaci: wskaźników sztywności, ich rozrzutu, masy korpusów i częstotliwość drgań własnych. Wyniki tych porównań są dosyć oczywiste: metoda optymalizacji, bazująca na prymitywach daje korzystniejsze efekty niż metoda bazująca na projekcie wstępnym. Dotyczy to w szczególności masy zoptymalizowanego korpusu, która może być nawet o 10 mniejsza.

COMPARISON OF OPTIMISATION METHODS BASING ON PRIMITIVES AND INITIAL GEOMETRIC MODELS

Abstract. The paper presents comparison of two optimisation methods of machine frames. Both methods use Finite Element Methods and Evolutionary Algorithm simultaneously. The first of the method assumes that the initial model of the body is known and in such situation the parametric optimisation should be applied only. In the second case when one has no information about the object's model, the Topology optimisation and Parametric optimisation should be applied. The second method uses Primitives as preliminary model of object. The paper presents results of comparison of both methods applied to an example frame. Such parameters were compared: coefficients of stiffness, dispersion of stiffness, masses of frames, free frequency of vibration. Results of comparison are very obvious: method of optimisation based on primitives gives better results than method based on initial project. First of all it concerns on the mass of optimised frame, which may be even 10% smaller.

1. WPROWADZENIE

Rozwój metod sztucznej inteligencji oraz dostępność komercyjnych programów obliczeniowych umożliwiających modelowanie i symulację metodami elementów skończonych stwarza nowe możliwości w poszukiwaniu optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Od wielu maszyn i urządzeń, którym stawia się określone wymagania eksploatacyjne, jak: wytrzymałość, sztywność, trwałość itp. na ogół oczekuje się też możliwie niskiej ceny. Na cenę wytworu składa się wiele czynników, w tym koszty materiałowe. Ewentualne obniżenie kosztów materiałowych można osiągnąć na drodze stosowania tańszych materiałów lub na drodze zmniejszania ich masy. W tym drugim przypadku znaczącym ograniczeniem stają się wymagania eksploatacyjne, np. sztywność obiektu, ponieważ, zazwyczaj zmniejszeniu masy towarzyszy pogarszająca się sztywność czy wytrzymałość mechaniczna. Pojawia się, zatem problem optymalizacyjny, tzn., do jakiej wartości można obniżyć masę obiektu, przy której zmiany właściwości eksploatacyjnej są jeszcze akceptowane.

W niniejszym artykule dyskutowany jest problem optymalizacji korpusów maszyn pod kątem minimalizacji ich masy z równoczesnym zagwarantowaniem pożądaných właściwości eksploatacyjnych. Sposób rozwiązania zagadnienia zostanie przedstawiony na przykładzie korpusów obrabiarek do metali, gdzie wymagania odnośnie sztywności znacznie przekraczają inne wymagania me-

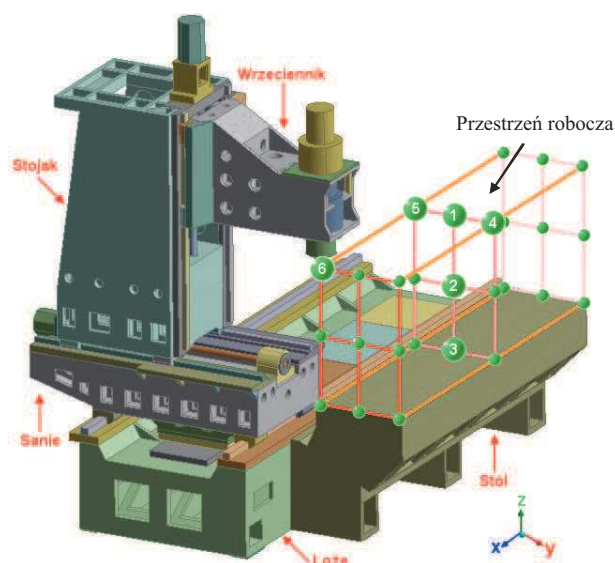
chaniczne, np. wytrzymałościowe. W wielu wypadkach korpusy obrabiarkowe należą do grupy obiektów ruchomych, tzn. poruszających się z określoną prędkością czy przyspieszeniem i wówczas minimalizacja ruchomych mas staje się wymogiem nie tylko ekonomicznym, ale i technicznym.

2. OBIEKT BADAŃ

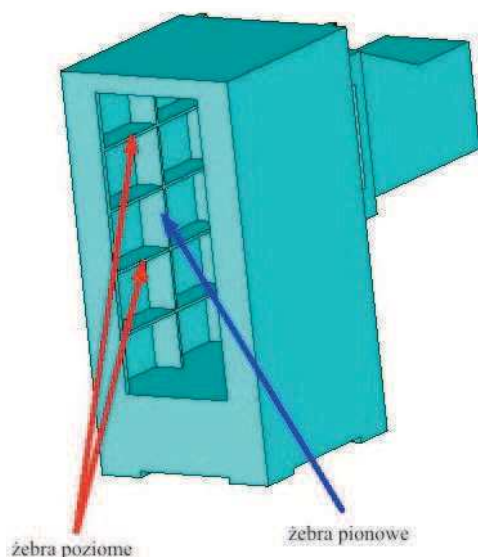
Zagadnienie optymalizacji korpusów zostanie przedstawione na przykładzie nowo zbudowanego centrum obróbkowego, dla którego zastosowano opisane w dalszym ciągu metody optymalizacji. Na Rys. 1 przedstawiono widok takiej maszyny.

Przykładowa maszyna zawiera 3 ruchome korpusy (wrzeciennik, stojak i sanie), napędzane od indywidualnych silników, którym to korpusom stawia się wymagania m.in. wysokich własności dynamicznych, tzn. możliwe wysokie wartości przyspieszeń w stanach przejściowych (nawet do 1g). Spełnienie tych oczekiwań wymaga stosowania albo silników o dużej mocy (kosztowne rozwiązanie) albo minimalizacji napędzanych mas. Z drugiej strony, ze względu na oczekiwaną dokładność obróbki przedmiotów na takiej maszynie, wymaga się wysokiej sztywności tych korpusów. Pojawia się, więc typowy problem optymalizacyjny.

Trudność w optymalizacji obiektów typu korpus obrabiarki wynika przede wszystkim ze złożonej struktury



Rys. 1. Widok centrum obróbkowego będącego przykładowym obiektem badań



Rys. 2. Widok typowego korpusu obrabiarkowego

samego korpusu. Jest to obiekt silnie uźebrowany, o przestrzennym rozmieszczeniu żeberek, o zmiennej grubości ścianek (Rys. 2). Poszukiwanie optymalnej konstrukcji wymaga w takim przypadku specjalnych metod optymalizacyjnych.

3. METODY OPTIMALIZACJI

Zagadnienia optymalizacji należą, obok zagadnień modelowania do najczęściej spotykanych w literaturze. Metod optymalizacji jest bardzo wiele. Optymalizacja konstrukcji obiektów o złożonej strukturze wymaga rozwiązania, co najmniej dwóch problemów: sformalizowanej metody opisu konstrukcji, która umożliwi łatwe

i szybkie jej modyfikowanie, oraz metody pozwalającej na szybkie znalezienie rozwiązania optymalnego z spośród dziesiątek tysięcy i więcej możliwych rozwiązań (obiekt o konstrukcji podobnej do przedstawionej na Rys. 2 zawiera, co najmniej kilkadziesiąt parametrów geometrycznych, które mogą pełnić rolę zmiennych decyzyjnych, jak: grubości ścianek, grubości i wymiary gabarytowe żeberek, współrzędne rozmieszczenia żeberek, średnice otworów itd. Teoretycznie, możliwe jest utworzenie wielu tysięcy korpusów, różniących się tymi parametrami. Znalezienie rozwiązania optymalnego jest w takim przypadku zagadnieniem czasochłonnym.

W ramach przeprowadzonych badań zdecydowano o zastosowaniu połączonych metod elementów skończonych i metod sztucznej inteligencji w postaci algorytmów ewolucyjnych do optymalizacji obiektów klasy korpus. Metoda elementów skończonych pozwala na szczegółową reprezentację konstrukcji korpusu i na stosunkowo szybką ocenę zmian cech geometrycznych na wybrane wskaźniki kryterialne. Natomiast metoda algorytmów ewolucyjnych umożliwi poszukiwanie najlepszego rozwiązania spośród tysięcy i więcej możliwych rozwiązań, w rozsądnym czasie. Cała szczegółowa procedura optymalizacji korpusów z zastosowaniem połączonych metod została opracowana przez dr P. Wilka w ramach Jego pracy doktorskiej [1].

4. WYBÓR METODY REPREZENTACJI CECH GEOMETRYCZNYCH KORPUSU

Na Rys. 3 przedstawiono w sposób schematyczny dwie ścieżki optymalizacyjne, bazujące na odmiennym sposobie reprezentacji geometrycznych cech konstrukcyjnych na etapie rozpoczynania procesu optymalizacji.

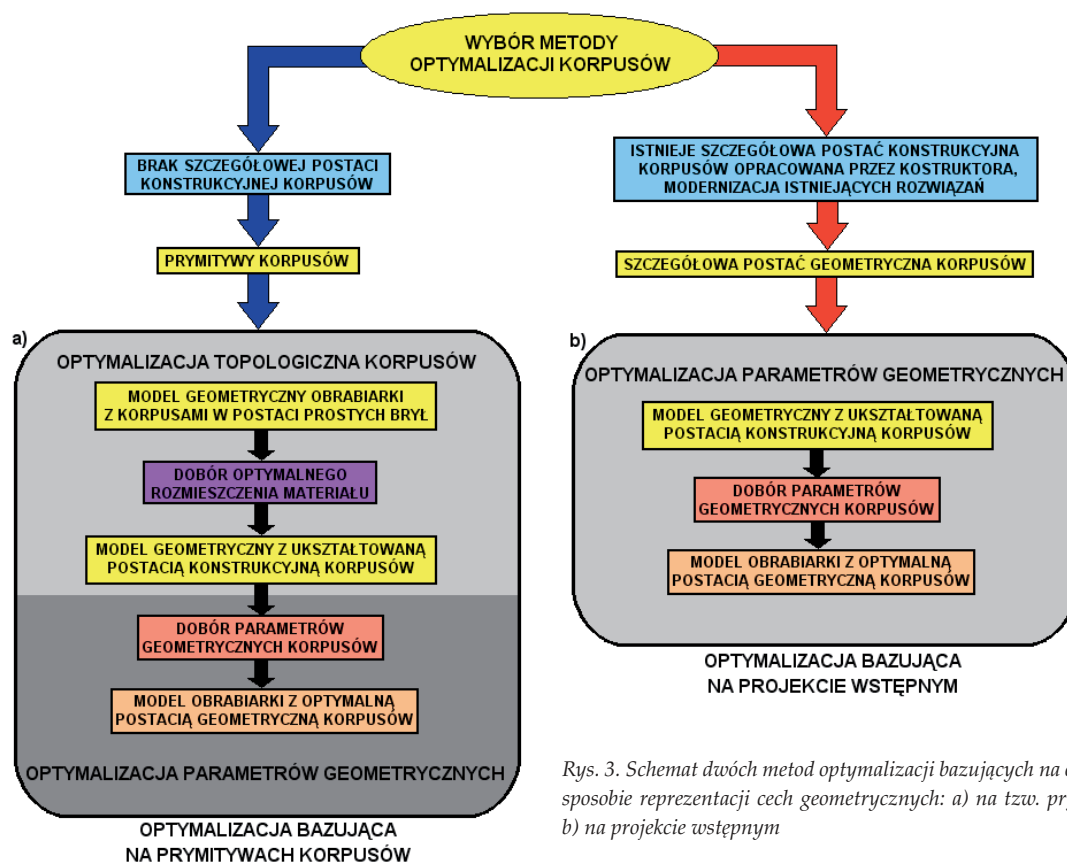
Punktem wyjścia do działań optymalizacyjnych jest postać geometryczna korpusu. W najogólniejszym przypadku, możemy spotkać się z dwoma rozwiązaniami:

1. kiedy nie mamy prawie żadnej wiedzy o postaci geometrycznej obiektu, poza wymiarami gabarytowymi, w których korpus powinien się zmieścić. W dalszym ciągu, będziemy mówili o metodzie wykorzystującej prymitywy geometryczne, jak np. prostopadłościan, walec, stożek, kula i inne.

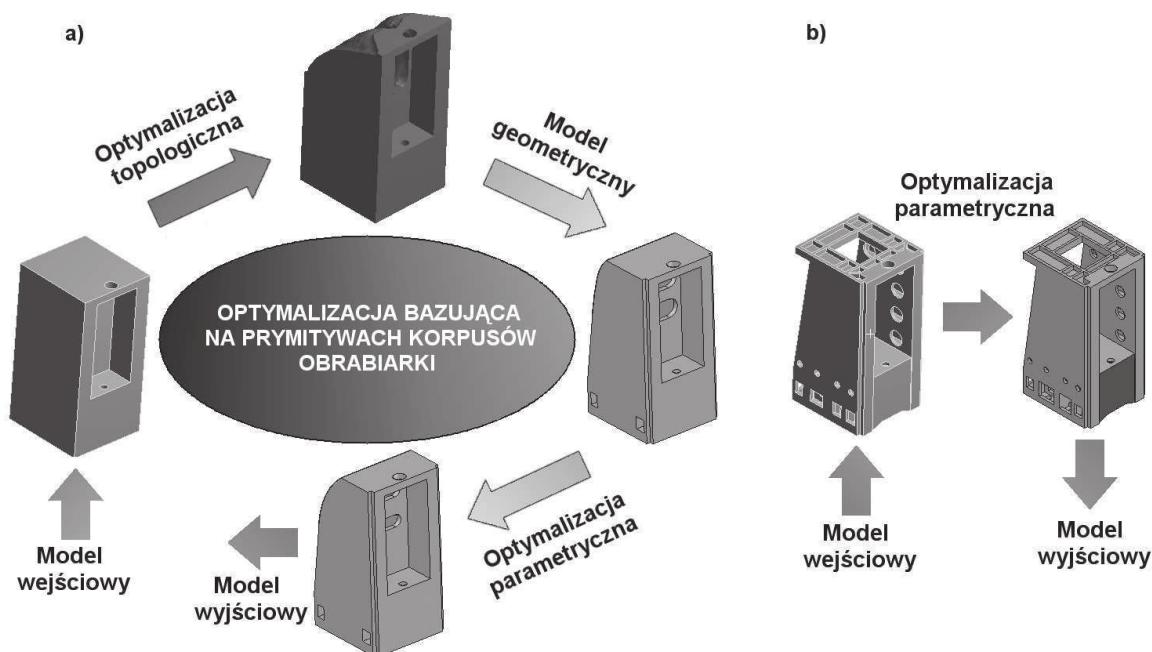
2. kiedy posiadamy szczegółową wiedzę o postaci i cechach konstrukcyjnych obiektu, np. pozyskaną od konstruktora, który taki korpus zaprojektował. W dalszym ciągu, będziemy mówili o metodzie wykorzystującej wstępny model geometryczny.

Jest zrozumiałe, że w obu przypadkach metody optymalizacyjne będą się różniły, a nawet intuicyjnie można sformułować pogląd, że metoda oparta o wstępny model będzie szybsza i prostsza. Na Rys. 4 przedstawiono w sposób symboliczny przebieg procesu optymalizacji dla obu przypadków.

W przypadku, kiedy zastosowana zostanie metoda bazująca na prymitywach optymalizacji będzie podlegać zarówno postać geometryczna obiektu jak i cechy konstrukcyjne. Wilk [1] zaproponował równoczesne zastosowanie optymalizacji topologicznej (dla wyboru postaci



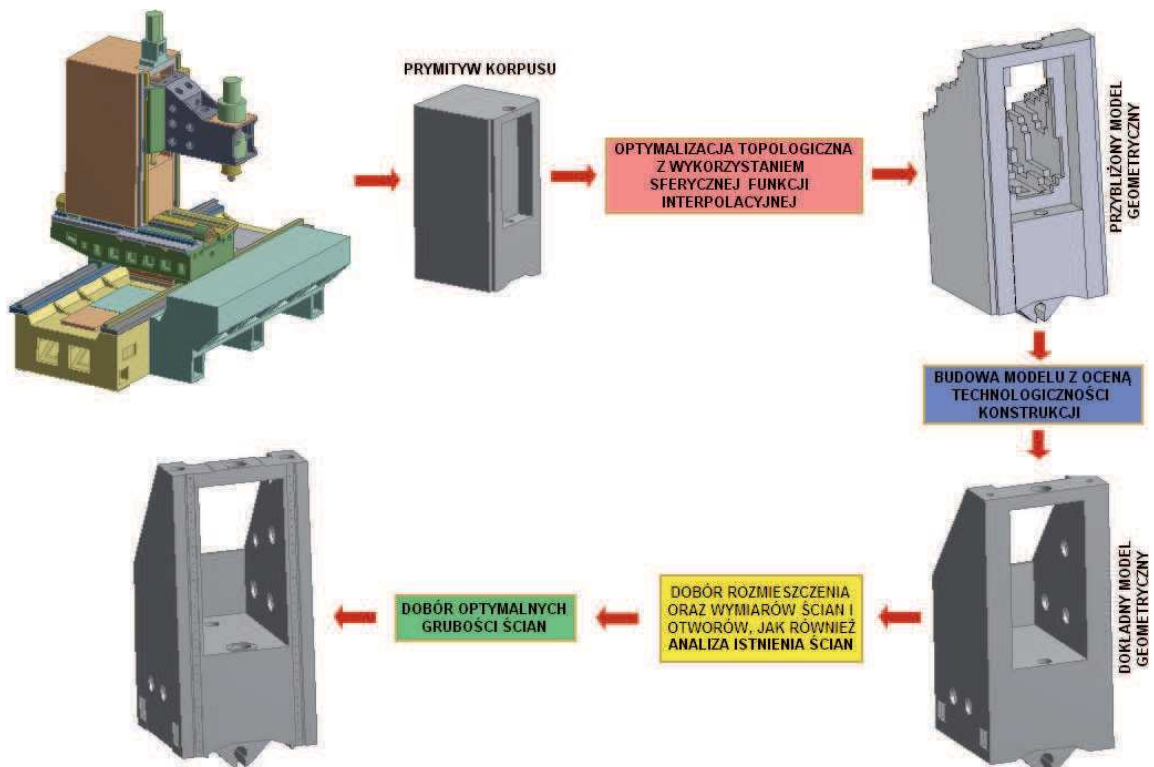
Rys. 3. Schemat dwóch metod optymalizacji bazujących na odmiennym sposobie reprezentacji cech geometrycznych: a) na tzw. prymitywach, b) na projekcie wstępnym



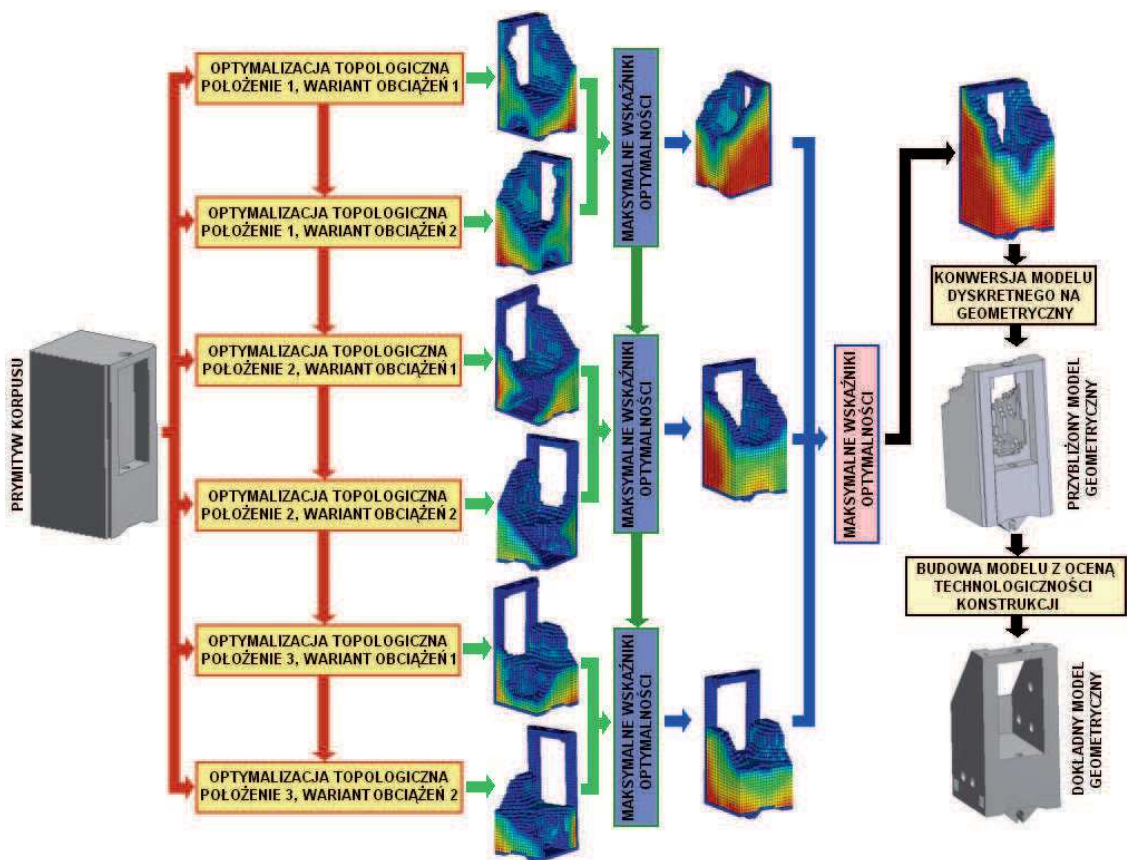
Rys. 4. Obrazowy przebieg procesów optymalizacji bazującej na prymitywach (a) i wstępnym modelu geometrycznym

geometrycznej) i optymalizacji parametrycznej (dla wyboru cech konstrukcyjnych takich jak grubości ścianek, żeber, wymiarów żeber itp.). Na Rys. 5 przedstawiono schemat przebiegu takie optymalizacji.

W tej propozycji procesu optymalizacji najpierw optymalizuje się postać geometryczną (topologię) w efekcie, której otrzymuje się wstępny model geometryczny obiektu. Ten model poddaje się ocenie technologicznej (real-



Rys. 5. Przebieg procesu optymalizacji dla przypadku zastosowania prymitywów jako wstępnego modelu geometrycznego obiektu



Rys. 6. Szczegółowy przebieg procesu optymalizacji topologicznej

ności jego wytworzenia) w rezultacie, czego otrzymujemy, tzw. dokładny model geometryczny obiektu. W następnym kroku tak pozyskany model geometryczny poddaje się optymalizacji parametrycznej, która dotyczy cech geometrycznych jak grubości ścianek, żeber, średnice otworów itp.

Kiedy stosujemy optymalizację bazującą na modelu wstępnym (Rys. 4b) wykorzystujemy tylko optymalizację parametryczną, ponieważ postać konstrukcyjna, w tym rozmieszczenie żeber, są już zdefiniowane. Dla przybliżenia optymalizacji topologicznej skorzystamy z Rys. 6.

Przed przystąpieniem do procesu optymalizacji należy zdefiniować obszar roboczy (Rys. 1) w którym optymalizacja będzie prowadzona. Rzecz w tym, że w obszarze roboczym niektóre właściwości eksploatacyjne maszyny ulegają zmianie, np. sztywność mierzona w punkcie, w którym narzędzie skrawające styka się z przedmiotem obrabianym silnie zależy od punktu pracy. Dlatego w procesie optymalizacji zdefiniowana kilka punktów charakterystycznych (punktów pracy) i proces optymalizacji powtarzano dla każdego z nich. Na rysunku 6 oznaczono to, jako Położenie 1, Położenie 2 i Położenie 3.

Podobnie rzecz się ma z obciążeniem. Obciążenie od sił skrawania zależy od warunków obróbki a te mogą się zmieniać w szerokich granicach. Dlatego optymalizację przeprowadzono dla kilku wariantów obciążenia (na Rys. 6 oznaczono to jak Wariant obciążenia 1 i Wariant obciążenia 2).

W proponowanej metodzie optymalizacji w pierwszym kroku przeprowadzono optymalizację dla wybranych kombinacji: Położenia i Wariantu obciążenia. Z 6 wyników optymalizacji wybrano trzy a następnie z tych trzech wybrano najlepszy, kierując się maksymalizacją wskaźnika optymalności [1]. Tak pozyskany wynik uznawano za rezultat optymalizacji topologicznej.

Proces optymalizacji parametrycznej został szczegółowo opisany w [1]. Jako główne kryterium optymalizacji przyjęto funkcję celu, jak ważoną sumę lokalnych kryteriów, mianowicie:

$$F(K_x, K_y, K_z) = \frac{1}{2} K_x + \frac{1}{3} K_y + \frac{1}{3} K_z \quad (1)$$

gdzie: F – funkcja celu; K_x , K_y , K_z – lokalne wskaźniki kryterialne.

Lokalne wskaźniki kryterialne zostały zdefiniowane, jako:

$$K_i = \frac{m}{j_i} \quad i = x, y, z \quad (2)$$

gdzie: j_i – wskaźnik sztywności statycznej w i-tym kierunku; m – masa korpusu.

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Celem przeprowadzonych badań była ocena porównawcza obu metod optymalizacji. Ocena ta miała dać odpowiedź na pytanie: czy zastosowanie dużo bardziej złożonej metody optymalizacji, wymagającej sporo wiedzy

Tabl. 1. Porównanie wyników optymalizacji stojaka otrzymanych za pomocą metody opartej na projekcie wstępnym korpusu oraz prymitywie

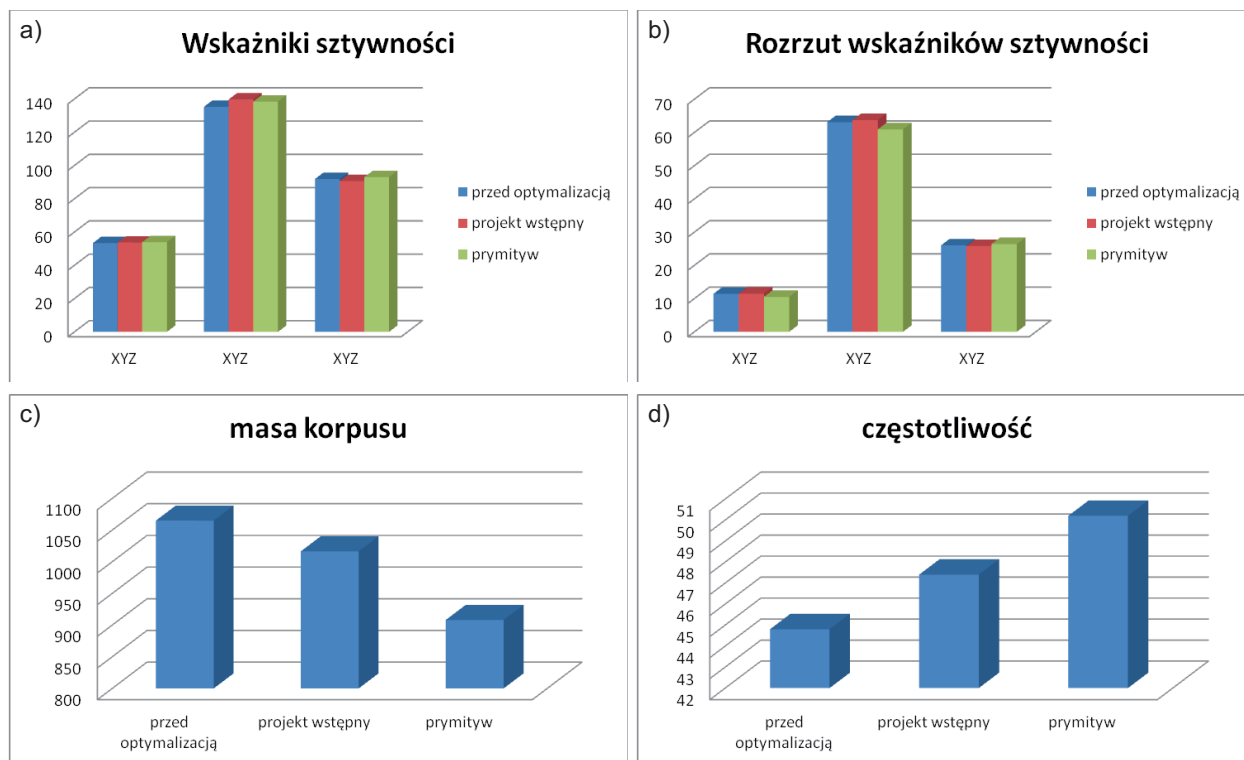
Kryteria / Częstotliwości drgań własnych frezarki	Jednostka	Model przed optymalizacją	Optymalizacja bazująca na projekcie wstępnym		Optymalizacja bazująca na prymitywie		
			Wartość kryterium	Zmiana parametru %	Wartość kryterium	Zmiana parametru %	
Położenia 1÷6	Średnia sztywność – oś x	kN/mm	53,4	53,7	0,5	53,9	0,8
	Średnia sztywność – oś y	kN/mm	135,3	139,7	3,2	138,4	2,2
	Średnia sztywność – oś z	kN/mm	91,9	90,7	-1,3	93	1,2
	Rozrzut sztywności – oś x	kN/mm	11,4	11,5	0,2	10,5	-8,1
	Rozrzut sztywności – oś y	kN/mm	63,1	63,7	0,9	60,9	-3,6
	Rozrzut sztywności – oś z	kN/mm	26	25,8	-0,6	26,4	1,8
	Masa stojaka	kg	1064,8	1016,3	-4,5	908	-14,7
Położenie 1	1 częstotliwość własna	Hz	44,2	46,7	5,7	49,2	11,3
	2 częstotliwość własna	Hz	45,6	48,3	6,1	49,6	8,9
	3 częstotliwość własna	Hz	97,1	99,4	2,4	98,1	1
	4 częstotliwość własna	Hz	98,2	104	5,9	110,4	12,5
	5 częstotliwość własna	Hz	155,7	160,4	3	163,6	5,1
	6 częstotliwość własna	Hz	182,1	182,2	0,1	181,3	-0,5
Położenie 2	1 częstotliwość własna	Hz	48,3	51,4	6,4	52,6	9
	2 częstotliwość własna	Hz	48,9	52,3	6,9	55,7	13,8
	3 częstotliwość własna	Hz	99,8	101,6	1,9	100,2	0,4
	4 częstotliwość własna	Hz	99,9	106,2	6,3	114,8	14,9
	5 częstotliwość własna	Hz	156,7	161,8	3,2	165,3	5,4
	6 częstotliwość własna	Hz	183,9	187,8	2,1	192,8	4,8

teoretycznej jest opłacalne, czy efekty takiej optymalizacji będą wyraźnie korzystniejsze niż metody parametrycznej? Czy wykorzystanie rozwiązań konstrukcyjnych opracowanych przez doświadczonych projektantów jest bliskie czy też dalekie od optymalnych?

Nie oceniano natomiast czasu niezbędnego do przeprowadzenia optymalizacji, jako że oczywistym jest, iż optymalizacja bazująca na projekcie wstępnym, czyli

Dla lepszego zobrazowania wyników optymalizacji i ich porównania na Rys. 7 przedstawiono graficzną wersję takiego porównania. Obejmuje ona porównanie wskaźników sztywności (Rys. 7a), rozrzutu wskaźników sztywności (Rys. 7b), masy korpusu (Rys. 7c) i częstotliwości drgań własnych (Rys. 7d).

Wnioski wynikające z Rys. 7 i z Tabl. 1 są dosyć oczywiste:



Rys. 7. Porównanie wyników optymalizacji na przykładzie wskaźników sztywności (a), rozrzutu tych wskaźników (b), masy (c) i częstotliwości drgań (d)

optymalizacja parametryczna, wymaga znacznie mniej czasu niż optymalizacja bazująca na prymitywach.

Dla oceny porównawczej przyjęto takie same wskaźniki, jakie wchodziły w skład lokalnych wskaźników kryterialnych, tzn. wskaźniki sztywności i masę korpusu.

Analizę porównawczą przeprowadzono dla wszystkich trzech korpusów oznaczonych na Rys. 1, natomiast w artykule zamieszczono jedynie wyniki dotyczące jednego korpusu, tj. stojaka.

W Tabl. 1 zestawiono wyniki porównania dla obu metod optymalizacji. Uwzględniono w niej wskaźniki sztywności statycznej, rozrzut tych wskaźników, wynikający ze zdefiniowanego obszaru roboczego, masę korpusu i jeden wariant (Położenie 2) dotyczący częstotliwości drgań własnych korpusu. Tablica 1 zawiera wartości wskaźników przed optymalizacją, po optymalizacji wykorzystując projekt wstępny i po optymalizacji z wykorzystaniem prymitywów. W tablicy 1 podano zarówno wartości bezwzględne poszczególnych wskaźników jak i procentowe odchylenia od wartości przed optymalizacją.

— metoda optymalizacji nie wpływa w sposób istotny na wskaźniki sztywności korpusu. Wartości tych wskaźników po optymalizacji i przed optymalizacją są zbliżone.

— podobny wniosek można wysnuć pod adresem rozrzutu wskaźników sztywności.

— natomiast wpływ metody optymalizacji na masę korpusu jest już wyraźniejszy. W przypadku metody bazującej na prymitywach (najkorzystniejszy wynik optymalizacji), masa może być mniejsza nawet o ok. 10% w stosunku do masy przed optymalizacją. Ponieważ w omawianym przykładzie masa korpusu była na poziomie 1100-1200 kg, to oszczędność na kosztach materiałowych sięga ok. 110-120 kg.

— podobny wniosek można wysnuć oceniając kryterium częstotliwości drgań własnych.

Zoptymalizowany korpus metodą optymalizacji całkowitej (metodą topologiczną i parametryczną) pozwala na podniesienie częstotliwości drgań własnych o 10% i więcej.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono, na przykładzie korpusów obrabiarkowych dwie metody optymalizacji takich obiektów. Jedna z nich bazuje na znanej postaci konstrukcyjnej obiektu (na modelu wstępnym) a druga na tzw. prymitywach. Optymalizacja pierwszego przypadku ogranicza się do poszukiwania optymalnych cech konstrukcyjnych, tj. takich parametrów jak grubość ścianek, żeber, wymiarów żeber czy średnic otworów. Optymalizacja w drugim przypadku wymaga najpierw znalezienia najlepszej postaci konstrukcyjnej (optymalizacja topologiczna) a w następnym kroku optymalnych cech konstrukcyjnych. Ta metoda wymaga znacznie większej wiedzy nie tylko o metodach optymalizacji.

Przeprowadzone badania symulacyjne na przykładowym korpusie wykazały że wybór metody optymalizacji jest istotny z punktu widzenia wyniku optymalizacji. Zastosowanie tylko metody parametrycznej pozwala na osiągnięcie korzystniejszego wyniku w stosunku do obiektu niezoptymalizowanego, ale poprawa wskaźników kryterialnych jest na poziomie poniżej 10% a nawet tylko 5%. Oznacza to również, że projekt wstępny opracowany przez doświadczonego konstruktora może być bliski optymalnemu. Natomiast metoda bazująca na prymitywach, jako obiektach wstępnych daje korzystniejsze wyniki optymalizacji, które w odniesieniu np. do masy lub częstotliwości drgań własnych mogą dawać efekty korzystniejsze o 10% i więcej w stosunku do obiektu wyjściowego (prymityw).

Wyniki badań zaprezentowane w artykule należy traktować w kategoriach jakościowych. Zdefiniowane funkcje celu były stosunkowo proste (jednakowe wagi dla wszystkich kierunków). W odniesieniu do konkretnego obiektu może zająć konieczność innego zdefiniowania funkcji celu, w tym wag. W przykładowej funkcji celu wzięto pod uwagę tylko wskaźniki sztywnościowe i masę korpusu. Natomiast na podstawie wyników symulacji (Rys. 7d) można sądzić, że są jeszcze inne, niemniej ważne wskaźniki kryterialne, np. częstotliwość drgań własnych. Wówczas wyniki symulacji będą się różniły od przedstawionych w artykule.

LITERATURA

- [1] Wilk P. Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i metody elementów skończonych w optymalizacji korpusów obrabiarek. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn* Nr 1/2011, Z. nr 31, Gliwice, 2011 r., ISSN1427-9347, s.207
- [2] Wilk P., Kosmol J. Próba optymalizacji korpusu stojaka frezarki z wykorzystaniem algorytmów genetycznych i metody elementów skończonych. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn* Nr 1/2006, Z. nr 24, Gliwice, 2006 r., ISSN 1427-9347, s.7-22
- [3] Wilk P., Kosmol J.: Optimisation of Frames of a Milling Machine Tool Using Genetic Algorithm and The Finite Element Method. *Proceedings of the Ninth International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structure and Environmental Engineering*, St. Julians – Malta, 2007