

Paweł IDZIAK*
Krzysztof KOWALSKI*

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH ŚRODOWISK CAD WYKORZYSTYWANYCH W OBLICZENIACH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH

W pracy przedstawiono wyniki badań numerycznych obliczeń częstotliwości własnych wybranych elementów maszyny elektrycznej. Obliczenia przeprowadzono w dwóch środowiskach wykorzystujących metodę elementów skończonych (MES) – Autodesk Inventor oraz COMSOL. Wyniki obliczeń dla wybranych częstotliwości zaprezentowano w formie graficznej. Obliczenia wykazały, że dla stosunkowo prostych struktur w obliczeniach tego typu możliwe jest wykorzystanie modułów MES zaimplementowanych jako rozszerzenie systemów wspomagających proces projektowania CAD. Uzyskiwane wyniki są zadawalające. W przypadku konieczności dokładnego modelowania zjawisk wytrzymałościowych w konstrukcjach o złożonej strukturze i geometrii pożądaną dokładność zapewniają obliczenia prowadzone z wykorzystaniem dedykowanych pakietów.

1. WPROWADZENIE

Rosnące ceny energii, w tym przede wszystkim energii elektrycznej, skłaniają producentów wszelkich odbiorników tej właśnie energii do poszukiwania rozwiązań zapewniających powstanie wyrobu o możliwie największej sprawności. Jedną ze stosowanych dróg rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie środowisk obliczeniowych (numerycznych) pozwalających kompleksowo określić wartości wybranych najważniejszych parametrów projektowanego lub wdrażanego do produkcji wyrobu. Takie podejście w całej swej rozciągłości dotyczy również przemysłu elektromaszynowego, a dokładniej producentów maszyn elektrycznych. Większość dostępnych na rynku maszyn elektrycznych powstała dzięki wykorzystaniu, często bardzo rozbudowanych, środowisk programistycznych umożliwiających zarówno przeprowadzenie obliczeń, określenie wartości wybranych wielkości charakteryzujących wyrób a także przygotowanie przynajmniej zarysu dokumentacji wykonawczej (środowiska CAD).

Różnorodność dostępnego oprogramowania stwarza problemy przy wyborze środowiska, które w najkorzystniejszy sposób spełni oczekiwania użytkownika. W

* Politechnika Poznańska.

przypadku producenta maszyn elektrycznych coraz częściej zwraca on uwagę na możliwości prowadzenia obliczeń w obszarach obejmujących wiele oddzielnych zjawisk fizycznych (rozpatrywanie tzw. zjawisk sprzężonych). Środowiska spełniające takie wymagania są zazwyczaj bardzo kosztowne, a zatem niedostępne dla małego producenta. Ci ostatni posiłkują się zazwyczaj oprogramowaniem o ograniczonych, w sensie możliwości rozpatrywania wspomnianych procesów równocześnie, możliwościach obliczeniowych. Ograniczenia te dotyczą również możliwości tworzenia odpowiedniej dokumentacji wykonawczej. Ten ostatni element jest niezwykle istotny. Jego znaczenie rośnie w miarę jak producent zechce wprowadzać swe wyroby w zaobserwowane nisze rynkowe lub elastycznie podążać za np. modą.

W niniejszej pracy podjęto próbę porównania możliwości obliczeniowych wybranych środowisk CAD spotykanych w przemyśle elektromaszynowym. Przyjęto, że rozpatrywane programy powinny zapewnić co najmniej możliwość:

- opracowania geometrii rozpatrywanej konstrukcji,
- przeprowadzenia elementarnych obliczeń mechanicznych i wytrzymałościowych,
- sporządzenia szkiców pozwalających bezpośrednio albo poprzez eksport do innego środowiska wykonać załączki dokumentacji wykonawczej.

Przy wyborze środowiska niebagatelną rolę odegrała cena oprogramowania oraz jego rozpowszechnienie i kompatybilność z innymi środowiskami CAD (możliwość bezkonfliktowego przenoszenia wykonanych projektów z jednego środowiska do innego).

Celowo pominięto możliwość prowadzenia obliczeń elektromagnetycznych. Środowiska spełniające tę ostatnią możliwość są zazwyczaj na tyle kosztowne, że wykraczają poza możliwości finansowe małego producenta (kryterium ceny). Ponadto prowadzenie tych obliczeń wymaga wyjątkowo dużo specjalistycznej wiedzy.

Spośród znanych środowisk CAD tzn. CATI'i, ANSYS'a, ProEngineer'a, SOLIDwoks'a, SOLID Edge'a, COMSOL'a oraz Autodesk Inventor'a do analizy wybrano dwa ostatnie. Zarówno cena oprogramowania jak też możliwości obliczeniowe, wymagania sprzętowe, archiwizacyjne spełniają kryteria postawione na wstępie.

Środowisko COMSOL jest środowiskiem zdecydowanie obliczeniowym z pełną możliwością prowadzenia obliczeń dla zjawisk sprzężonych. Wymagania sprzętowe są w dużym stopniu uzależnione od obszaru prowadzonych obliczeń oraz od złożoności rozpatrywanego modelu. Wadą tego środowiska jest stosunkowo proste oprogramowanie graficzne (tzw. interface użytkownika). Opracowanie modelu, zwłaszcza modelu trójwymiarowego, wymaga od użytkownika sporego nakładu pracy. Pewnym rozwiązaniem zastępczym niwelującym tę wadę jest możliwość importowania modeli geometrycznych

opracowanych w innych bardziej przyjaznych środowiskach graficznych. Takie działanie wymaga jednak dodatkowej inwestycji.

Środowisko Autodesk Inventor stworzone zostało przede wszystkim z myślą o przyjaznym opracowywaniu geometrycznym modeli z uwzględnieniem technologii wykonania oraz z możliwością stworzenia sparametryzowanej dokumentacji wykonawczej (tzw. dokumentacja warsztatowa). Ta ostatnia cecha jest szczególnie cenna w przypadku opracowywania wyrobu przewidzianego do produkcji w wielu i bardzo wielu wersjach. Ostatnie modyfikacje tego środowiska pozwalają dodatkowo przeprowadzić analizę wytrzymałościową konstrukcji i to zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych.

Oba środowiska w obliczeniach wykorzystują metodę elementów skończonych (MES).

We wskazanych środowiskach podjęto próbę wyznaczenia częstotliwości własnych wybranych elementów konstrukcyjnych maszyny elektrycznej, a dokładniej wału silnika elektrycznego oraz pakietu wirnika silnika synchronicznego magnetoelektrycznego.

2. MODEL OBLICZENIOWY

O własnościach eksploatacyjnych współczesnych maszyn elektrycznych, zwłaszcza silników, w równej mierze decydują własności konstrukcyjne samej maszyny jak i sposób jej zasilania i sterowania jej pracą. W tym ostatnim przypadku stosowanie układów przekształtnikowych powoduje, że silnik oprócz o napięcia o oczekiwanej częstotliwości i kształcie krzywej napięcia zostaje zasilony całym szeregiem wyższych harmonicznych. Każda z tych harmonicznych wywołuje w obwodzie elektromagnetycznym maszyny określone siły. Opis tych sił jest dobrze przedstawiony w literaturze. Tak złożone oddziaływania mogą zostać poddane analizie jedynie w przypadku zastosowania zaawansowanych metod numerycznych.

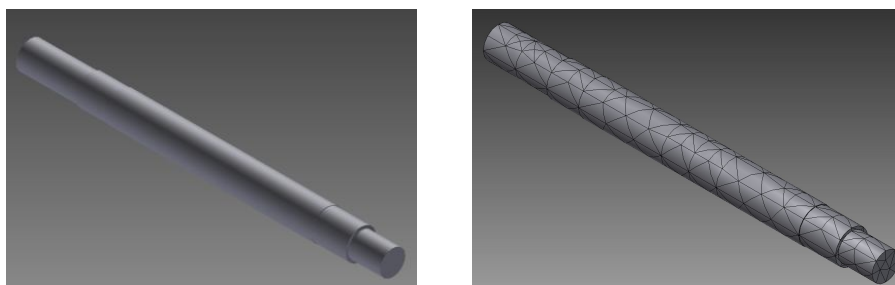
Każda ze wspomnianych harmonicznych wzniesła w strukturze maszyny określone siły magnetyczne. Te z kolei w zależności od miejsca oddziaływania mogą powodować deformacje konstrukcji oraz wywoływać momenty skręcające i zginające o określonych częstotliwościach. Ponieważ maszyna elektryczna jest tworem niejednorodnym zarówno pod względem mechanicznym jak i materiałowym, zatem taki złożony układ sił może wzniesła zjawisko rezonansu całej konstrukcji lub jego części.

Dla celów prowadzonej analizy badaniom poddano tylko wybrane elementy maszyny; jej wał oraz pakiet wirnika. Pierwszy element jest elementem litym o dość prostej konstrukcji, zazwyczaj zachowującym symetrię osiową. Jest to element występujący praktycznie we wszystkich układach napędowych o ruchu obrotowym. Od jego konstrukcji i wykonania (rodzaj materiału, rodzaj obróbki)

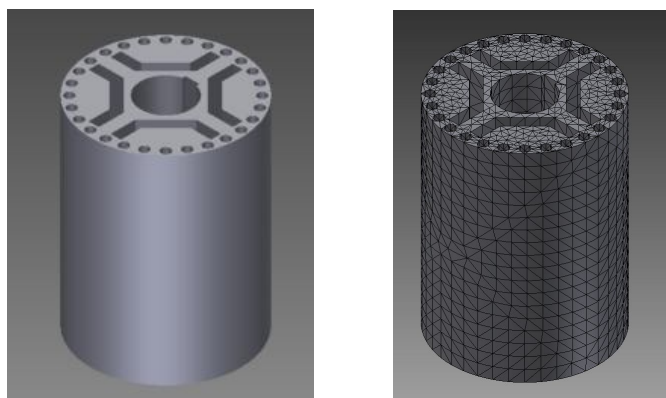
zależy zdolność maszyny do przenoszenia momentu obrotowego oraz odporność na drgania skrętne. Znajomość częstotliwości własnych tego elementu wydaje się być zatem niezbędna w procesie projektowania całego systemu napędowego (złożenie napęd – obciążenie).

Drugi z rozważanych elementów (pakiet wirnika) jest tworem złożonym zarówno pod względem geometrycznym jak też niejednorodnym materiałowo. Ponieważ jego masa stanowi znaczącą część masy całej maszyny (bywa że ok. 50%) ewentualne drgania tej części muszą oddziaływać na resztę konstrukcji. Znajomość wartości częstotliwości własnych tego elementu wydaje się też uzasadniona.

Na rysunkach 1 oraz 2. przedstawiono odpowiednio wał maszyny małej mocy i jego model węzłowy oraz pakiet wirnika silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi i jego model węzłowy. Konstrukcja wału jest prosta. Istnieje możliwość analitycznego określenia jego częstotliwości własnych. W prezentowanej pracy zrezygnowano z tego bowiem zamiarem analizy jest porównanie rezultatów obliczeń wykonanych tą samą metodą obliczeniową, ale z wykorzystaniem odmiennych solver'ów (bloków o określonych algorytmach obliczeniowych).



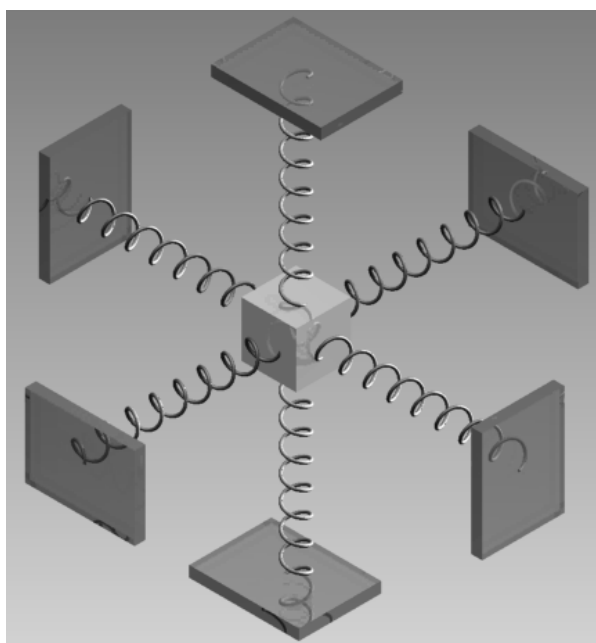
Rys. 1. Wał i jego model węzłowy



Rys. 2. Pakiet wirnika silnika synchronicznego o wzbudzeniu od magnesów trwałych

W obliczeniach wykorzystano model matematyczny zezwalający na rozpatrywanie ruchu obiektów posiadających wiele stopni swobody (rys. 3)

W mechanice zagadnienie wyznaczania częstotliwości własnych sprowadza się do określenia macierzy podatności lub macierzy sztywności oraz określenia wartości własnych równania opisującego ruch drgający rozpatrywanej bryły bez uwzględniania tłumienia.



Rys. 3. Trójwymiarowy model ciała o wielu stopniach swobody

Siły zewnętrzne działające na obiekt wywołują w nim odkształcenia (często związane z przemieszczeniem całego elementu lub jego części). W układzie ortogonalnym trójwymiarowym deformacje te można opisać układem równań [3]

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial u}{\partial y}; & \varepsilon_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial u}{\partial z}; & \varepsilon_{xz} &= \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie: ε_x , ε_y , ε_z - odkształcenia odpowiednio w kierunkach x , y , z

Na podstawie wartości odkształceń oraz znajomości macierzy sprężystości \mathbf{D} wyznaczyć można macierz naprężeń normalnych i stycznych $\boldsymbol{\sigma}$:

$$\sigma = \mathbf{D}\varepsilon \quad (2)$$

przy czym:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Macierz elastyczności \mathbf{D} określa zależność;

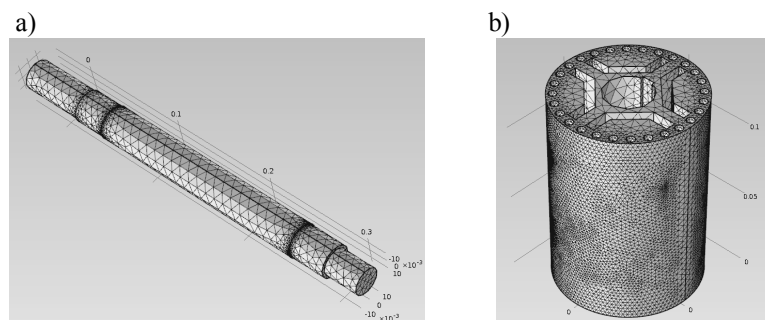
$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

W macierzy tej E oznacza współczynnik sztywności (moduł Young'a), a ν - współczynnik Poisson'a.

Dla układów liniowych tj. dla układów deformowanych do granicy sprężystości słuszne pozostaje równanie Navier'a co przy uwzględnieniu masy i parametrów materiałowych elementów konstrukcji pozwala wyznaczyć wartości własne a tym samym wartości częstotliwości drgań własnych f elementu [3, 5].

W rozpatrywanych przypadkach maszyn elektrycznych należy dodatkowo uwzględnić fakt, że elementy te wirują. Dla takiego przypadku w macierzy sztywności należy zamiast masy wprowadzić odpowiednio momenty bezwładności. Tak postawione zadanie przy dodatkowo dość złożonej geometrii pakietu wirnika jest rozwiązywalne jedynie metodami numerycznymi.

Porównywane w pracy środowiska obliczeniowe pozwalają, na podstawie wprowadzonej geometrii obiektu, automatycznie wygenerować trójwymiarowy model węzłowy (siatkowy). W przypadku programu Autodesk Inventor siatka generowana jest automatycznie bez większych możliwości jej kształtowania przez użytkownika [4]. Model węzłowy zarówno wałka jak i pakietu wirnika utworzone w tym środowisku prezentują rysunki 1 i 2 Środowisko COMSOL również tworzy siatkę dyskretyzacyjną w sposób zautomatyzowany, lecz pozwala w bardzo dużym zakresie ingerować w wielkość oczek, liczbę węzłów, kształtować współczynnik wzrostu itp. [5]. Efekt takiego działania prezentują odpowiednio rysunki 4 i 5.



Rys. 4. Modele węzłowe a) wału, b) pakietu wirnika, utworzone w środowisku COMSOL

3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Obliczenia porównawcze przeprowadzono dla wspomnianych wcześniej obiektów zachowując wszystkie dane materiałowe oraz odtwarzając w ten sam sposób węzły podpierające konstrukcję. Badania symulacyjne wału wykazały dużą zbieżność wartości częstotliwości własnych wyznaczonych w obu środowiskach. Prezentuje to tabela 1. W rozważaniach uwzględniono tylko najniższe częstotliwości. Częstotliwości wysokich rzędów nie odgrywają w praktyce inżynierskiej większej roli.

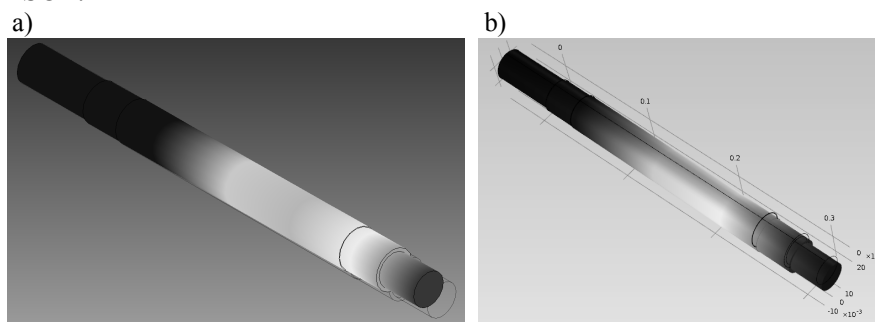
Tabela1. Wartości częstotliwości własnych wału silnika elektrycznego wyznaczone w testowanych środowiskach obliczeniowych

Lp.	Częstotliwości własne wału maszyny elektrycznej wyznaczone numerycznie	
	Środowisko Autodesk Inventor	Środowisko COMSOL
	Hz	Hz
1.	164	161
2.	1064	1051
3.	2108	2161
4.	2895	2859
5.	3600	3561
6.	5369	5305
7.	6622	6787

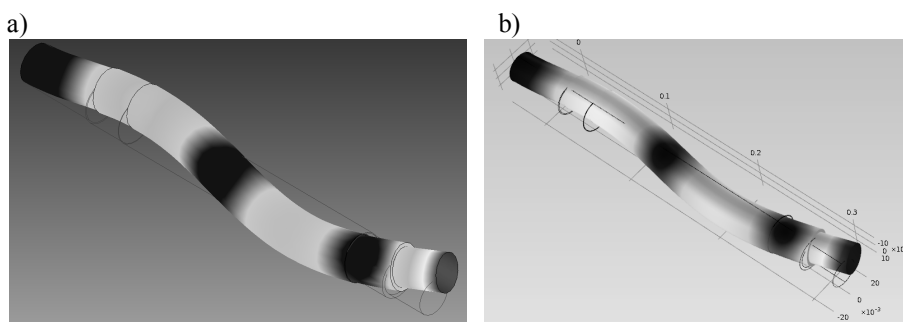
W obu przypadkach wyznaczone numerycznie częstotliwości własne są co wartości bardzo zbliżone. W przypadku tego typu eksperymentu rozbieżność rzędu kilkudziesięciu Hz jest w praktyce inżynierskiej tolerowana. Nawet w ostatnim prezentowanym przypadku stanowi to bowiem niecałe 2,5%.

Wybrane przypadki deformacji wału wywołane drganiami o wartościach odpowiadających częstotliwościom własnym przedstawiono na rysunkach 5,6 i 7.

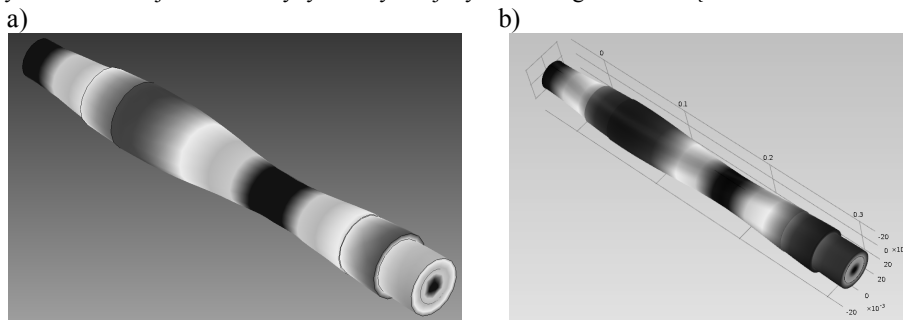
W każdym z prezentowanych przypadków rysunek a) prezentuje efekt obliczeń prowadzonych w środowisku Autodesk Inventor, a przypadek b) w środowisku COMSOL.



Rys. 5. Deformacje wału maszyny elektrycznej wywołane drganiami o częstotliwości ok. 160 Hz



Rys. 6. Deformacje wału maszyny elektrycznej wywołane drganiami o częstotliwości ok. 2890 Hz



Rys. 7. Deformacje wału maszyny elektrycznej wywołane drganiami o częstotliwości ok. 6700 Hz

Czas prowadzenia obliczeń z wykorzystaniem sprzętu o porównywalnych możliwościach obliczeniowych jest zbliżony i nie przekracza 2,5-3 min.

W przypadku obliczeń prowadzonych dla pakietu wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi wyniki obliczeń nie są już tak zgodne. W głównej mierze decyduje o tym bardzo złożona struktura samego pakietu. W obu

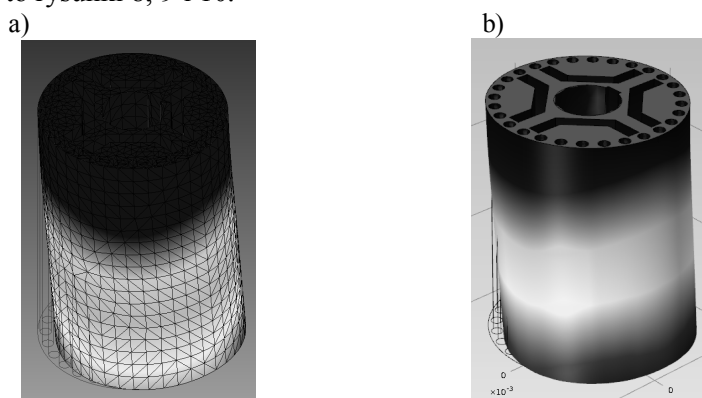
przypadkach przyjęto, że pakiet wirnika złożony zwyczajowo z pojedynczych blach zostanie dla celów eksperymentu zastąpiony elementem litym z odwzorowaniem jednak wszystkich przestrzeni niewypełnionych żelazem. Wykrój pakietu jest skomplikowany. Dobrze ilustrują to wspomniane wcześniej rysunki odpowiednio 2 i 4.

Wartości częstotliwości własnych pakietu wirnika zebrano w tabeli 2.

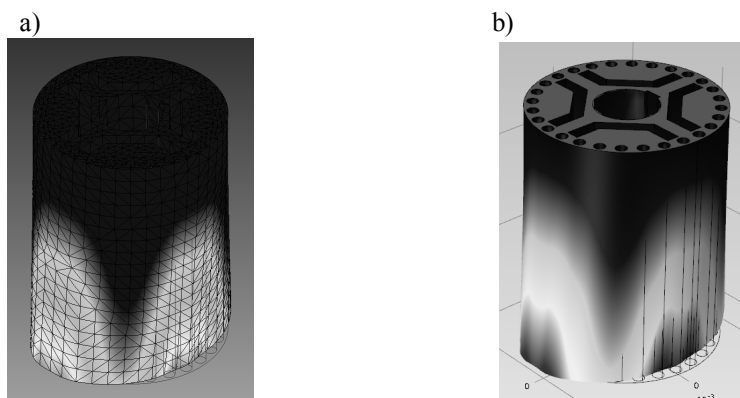
Tabela 2. Wartości częstotliwości własnych pakietu wirnika silnika synchronicznego wyznaczone w testowanych środowiskach obliczeniowych

Lp.	Częstotliwości własne pakietu wirnika silnika synchronicznego wyznaczone numerycznie	
	Środowisko Autodesk Inventor	Środowisko COMSOL
	Hz	Hz
1	2939	2919
2	4979	4924
3	5142	5107
4	6897	6550
5	9106	8995
6	9112	9000
7	12960	13000

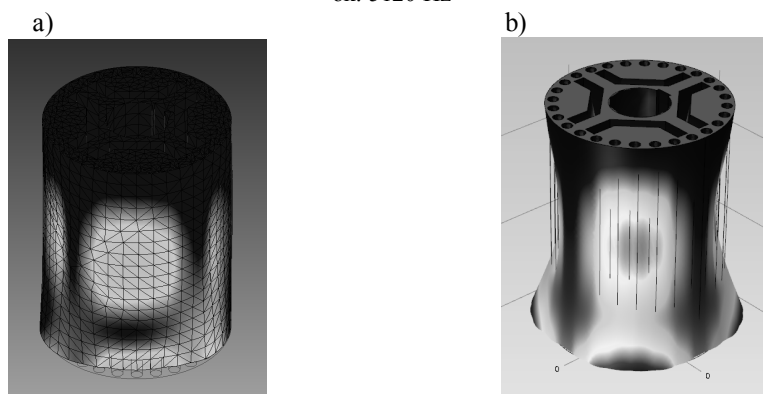
Podobnie jak w przypadku wału rozbieżności w wyznaczonych wartościach częstotliwości własnych nie są szczególnie duże i nie przekraczają 5% , ale za to różnice w formach deformacji są znaczne. Dla wybranych częstotliwości prezentują to rysunki 8, 9 i 10.



Rys. 8. Deformacje pakietu wirnika silnika elektrycznego wywołane drganiami o częstotliwości ok. 2920 Hz



Rys. 9. Deformacje pakietu wirnika silnika elektrycznego wywołane drganiami o częstotliwości ok. 5120 Hz



Rys. 10. Deformacje pakietu wirnika silnika elektrycznego wywołane drganiami o częstotliwości ok. 10300 Hz

Czas prowadzenia obliczeń z wykorzystaniem sprzętu o porównywalnych możliwościach obliczeniowych jest zdecydowanie różny. W przypadku obliczeń prowadzonych w środowisku Autodesk Inventor trwały one ok. 6 min. Obliczenia w środowisku COMSOL przebiegają w czasie ponad 10-cio krotnie dłuższym.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że dla stosunkowo prostych struktur w obliczeniach wytrzymałościowych możliwe jest wykorzystanie modułów MES zaimplementowanych jako rozszerzenie systemów wspomagających proces projektowania CAD. Uzyskiwane wyniki są zadawalające. W przypadku konieczności dokładnego modelowania zjawisk wytrzymałościowych zachodzących w konstrukcjach o złożonej strukturze materiałowej oraz złożonej

geometrii obliczenia prowadzone z wykorzystaniem wspomnianego oprogramowania są niesatysfakcjonujące. Występuje wyraźna rozbieżność w otrzymanych wynikach pomiędzy porównywanymi systemami obliczeniowymi. (patrz wizualizacja przemieszczeń – rys. 10). Z posiadanego przez autorów doświadczenia [1, 2] wynika, że obliczenia prowadzone w środowisku COMSOL charakteryzują się dużą zbieżnością wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

Środowisko Autodesk Inventor pozwala bardzo efektywnie modelować złożone struktury trójwymiarowe. Modelowanie tych struktur w środowisku COMSOL jest niezwykle pracochłonne.

LITERATURA

- [1] Idziak P., Kowalski K. Numeryczne wyznaczanie częstotliwości własnych stojana silnika synchronicznego z magnesami trwałymi., XIV Sympozjum „Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki” PPEEm 2011 Wisła 9-12 grudnia 2011 s.105-108 [in Polish].
- [2] Idziak P., Częstotliwości własne drgań wirnika silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, BOBRME – KOMEL, nr 92/2011, s. 157-161[in Polish].
- [3] Thimoshenko S., Vibration problems in engineering. D. Van Nostrand Company, Inc, Princeton, New Jersey, Toronto, New York, 1956.
- [4] Autodesk Inventor Technical Documentation.
- [5] 2011COMSOL AB Technical Documentation 2009.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SELECTED CAD ENVIRONMENTS USED FOR CALCULATIONS OF ELECTRICAL MACHINES DESIGN

This paper presents the results of numerical experiment of calculation of natural frequencies of the electrical machine selected parts. Calculations were carried out in two environments using finite element method (FEM) - Autodesk Inventor and COMSOL. The results of calculations for selected frequencies are presented in graphical form. The experiment showed that for relatively simple structures for the calculations of this type can be used MES modules implemented as an extension of systems supporting CAD design process. The results obtained are satisfactory. For accurate modeling of strength in structures with complex geometry, structure and provide the desired accuracy of calculations performed using a dedicated package.