

Bartłomiej Będkowski

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ANALIZA KONSTRUKCJI MODELOWEGO ELEKTROWIBRATORA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

THE STRUCTURE ANALYSIS OF THE PERMAMENT MAGNETS ELECTRO VIBRATOR MODEL

Streszczenie: Praca prezentuje analizę konstrukcji modelowego elektrowibratora z magnesami trwałymi. Analiza została przeprowadzona na przygotowanych przestrzennych modelach obliczeniowych z wykorzystaniem narzędzi do obliczeń *MES* i *CFD* firmy *Autodesk*. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych określono trwałość łożyskowania, wytrzymałość wału, konstrukcji wirnika i kadłuba, wyznaczono częstotliwości drgań własnych wirnika i kadłuba, oraz przeprowadzono analizę termiczną maszyny. Wykonana analiza pozwoliła na ocenę nowej konstrukcji elektrowibratora na etapie modelu, przed wykonaniem rzeczywistej maszyny.

Abstract: The structure analysis of the permanent magnet electro vibrator model is presented in the work. The analysis was carried out on prepared spatial computational models using *Autodesk's MES* and *CFD* calculation tools. As a result of the simulation tests, bearing durability, shaft, rotor and body structure strength, the rotor and body vibrations frequencies, and thermal analysis of the machine was carried out. The analysis made possible to evaluate the new design of the electro vibrator at the model stage before the actual machine was made.

Słowa kluczowe: *MES, CFD, obliczenia mechaniczne, obliczenia cieplne, analiza modalna, elektrowibrator*
Keywords: *FEM, CFD, mechanical calculations, thermal calculations, modal analysis, electro vibrator*

1. Wstęp

W latach 2015-2018 w *Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL* oraz w firmie *DEMATRIX Sp. z o.o Sp. k* realizowano prace badawcze nad nowym typem wysokosprawnych napędów elektrycznych dla przemysłowych maszyn elektrowibracyjnych. Prace te były dofinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach trzeciej edycji Programu Badań Stosowanych. W wyniku realizacji projektu opracowano modelowy, dwusilnikowy napęd elektrowibracyjny, generujący drgania liniowe, charakteryzujący się szeregiem zalet w stosunku do dostępnych obecnie na rynku rozwiązań [1].

W dotychczasowych rozwiązaniach napędów elektrowibracyjnych dla przemysłu stosowane są elektrowibratory z silnikami indukcyjnymi. W nowym rozwiązaniu napędu zastosowano wysokosprawne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (*PMSM*), zasilane z dedykowanego przemiennika częstotliwości.

Istotnymi zaletami wynikającymi z zastosowania w urządzeniach elektrowibracyjnych nowych napędów z silnikami *PMSM* są [1]:

- zdecydowanie poprawiona kultura pracy napędu elektrowibracyjnego, poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie niepożądanych, niekontrolowanych drgań i hałasu urządzeń wibracyjnych w trakcie ich rozruchu i zatrzymania, z uwagi na zapewnienie, dzięki pełnemu sterowaniu, w pełni przeciwbieżnej pracy napędu dwusilnikowego od startu aż do zatrzymania,
- poprawione bezpieczeństwo użytkowania i obsługi urządzeń wibracyjnych,
- zwiększona trwałość napędzanych urządzeń wibracyjnych,
- nowa funkcjonalność napędów elektrowibracyjnych z silnikami *PMSM*:
 - możliwość zmiany kierunku generowanych drgań liniowych,
 - możliwość regulacji prędkości obrotowej napędu wibracyjnego w szerokim zakresie (zmiana częstotliwości drgań i tym samym parametrów przesiewania, szybkości transportu materiału),
 - możliwość zadawania cyklu pracy napędu wibracyjnego, z uwzględnieniem zmian prędkości napędu i kierunku generowa-

nych drgań, możliwość zaprogramowania i wywoływania z pamięci sterownika różnych wcześniej zaprogramowanych cykli pracy napędu,

- możliwość zmniejszenia gabarytu i masy napędzanych przemysłowych urządzeń wibracyjnych,
- znaczące zmniejszenie energochłonności urządzeń wibracyjnych, zwłaszcza pracujących w ruchu ciągłym,
- możliwość zastosowania nowych funkcjonalności napędu wibracyjnego (wymienionych wyżej) dla materiałów trudnoodsiewalnych, gdzie klasyczne napędy wibracyjne są mało efektywne (zwiększenie wydajności przesiewania dla pewnej grupy materiałów).

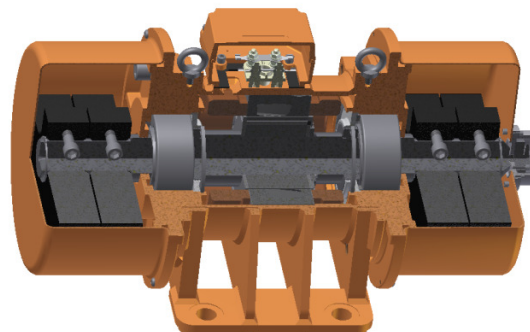
Opisane rozwiązanie napędu wibracyjnego dwusilnikowego, bazujące na zastosowaniu silników *PMSM* zasilanych z dedykowanego przemiennika częstotliwości, jest przedmiotem zgłoszenia patentowego. W oparciu o to rozwiązanie, Instytut *KOMEL* wraz z firmą *DEMETRIX* mogą opracować i wykonać przemysłowe urządzenia wibracyjne dostosowane do specyficznych wymagań klienta, charakteryzujące się lżejszą konstrukcją i zmniejszonymi wymiarami gabarytowymi oraz znacznie wyższą sprawnością napędu elektrowibracyjnego w stosunku do rozwiązań dostępnych obecnie na rynku.

Aby opracować taki napęd na etapie prac projektowych silnika wykorzystano najnowocześniejsze metody i narzędzia obliczeniowe. Poniżej przedstawiono wybrane aspekty konstrukcji mechanicznej, które zostały poddane analizie na etapie projektowym, poprzedzającym wykonanie modelowego napędu.

2. Konstrukcja mechaniczna prototypu elektrowibratora

Konstrukcja mechaniczna modelowego elektrowibratora oparta została w dużej mierze na sprawdzonych podzespołach pracujących w rozwiązaniach konkurencyjnych. Dodatkowo ideą było opracowanie takiej konstrukcji, która byłaby zamienna z dostępnymi na rynku urządzeniami, a charakteryzowała się mniejszą masą. Dzięki zastosowaniu silnika *PMSM*, który oferuje większą gęstość mocy niż standardowy silnik klatkowy [5,6], możliwe było skrócenie długości obwodu elektromagnetycznego. Modelowy elektrowibrator (rys.1) składa się, ze standardowych tarcz łożyskowych, typowych mas wirujących wraz z osłonami i nowo opracowa-

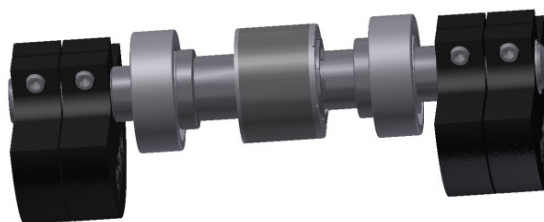
nego skróconego wirnika oraz spawanego lżejszego kadłuba. Na etapie projektowym, dzięki zaawansowanym narzędziom obliczeniowym, nowe elementy (wirnik, kadłub) oraz obciążenie termiczne poddano wnikliwej analizie.



Rys. 1. Konstrukcja modelowego elektrowibratora typu *SMwsk112S6*

3. Analiza mechaniczna wirnika modelowego elektrowibratora

Na rysunku 2 przedstawiono widok wirnika modelowego elektrowibratora. Składa się on z wału, na którym osadzony jest pakiet blach elektrotechnicznych z umieszczonymi wewnątrz magnesami, łożysk i mas wirujących.



Rys. 2. Widok wirnika modelowego elektrowibratora typu *SMwsk112S6*

3.1. Analiza łożyskowania

Łożyskowanie do elektrowibratora zostało dobrane na podstawie konstrukcji łożyskowania elektrowibratora, z którego wykorzystano gotowe podzespoły (tarcze łożyskowe, masy wirujące) pozwalające na budowę elektrowibratora modelowego. Trwałość dobranej konstrukcji łożyskowania została obliczona przy wykorzystaniu kreatora łożysk dostępnego w programie *Autodesk Inventor* i porównana z wartościami podanymi przez producenta dla elektrowibratora, z którego pochodzą główne elementy konstrukcyjne. W kreatorze została użyta metoda obliczeń zgodna z *SKF AG*. W programie podano wartości obciążeń łożyskowania, które pochodzą od wirujących mas ($19275N$ - siła odśrodkowa pochodząca od mas). Łożyska użyte w konstrukcji klasycznej oraz w elektrowibra-

torze modelowym to łożyska walcowe typu *SKF NJ2311/NUP2311* o deklarowanej przez producenta elektrowibratora żywotności: 100%:13635h, 80%:28687h, 50%:>100000h. Żywotność obliczona w kreatorze łożysk to 98%:15428h. Obliczenia trwałości przeprowadzono dla łożysk o podwyższonej trwałości (typu *EXPLORER* - do zastosowań w maszynach pracujących z dużym obciążeniem łożyskowania), ponieważ tylko taki typ łożyskowania jest stosowany przez czołowych producentów elektrowibratorów, i co potwierdzają obliczenia, tylko taki typ łożyskowania pozwala zapewnić 2-letni okres bezawaryjnej pracy urządzeń, przy założeniu ciągłej pracy i niezawodności powyżej 90%.

3.2. Analiza wytrzymałości blach wirnika

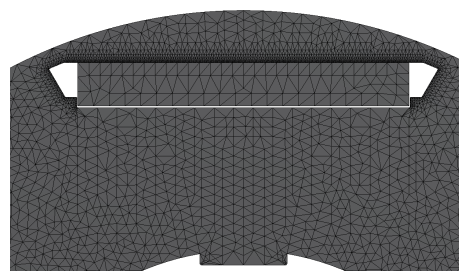
W opracowywanym innowacyjnym rozwiązaniu elektrowibratora budowa wirnika różni się tym, że w konwencjonalnym rozwiązaniu (klatkowy silnik indukcyjny) wirnik ma budowę monolityczną, natomiast w maszynie z magnesami trwałymi wirnik również jest zwarty, jednak jego konstrukcja nie jest monolitem, składa się z pakietu blach, w których są otwory pod magnesy trwałe, które osłabiają konstrukcję (rys. 3).



Rys. 3. Widok blachy wirnika modelowego elektrowibratora

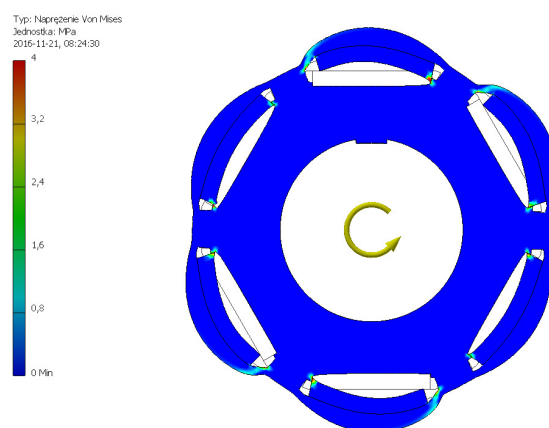
W tym celu rozkrój blach tak dobrano, aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość przy optymalnym doborze otworów pod magnesy trwałe, co zapewni ich optymalną objętość. Wytrzymałość blach obliczano za pomocą *Metody Elementów Skończonych* przy użyciu oprogramowania *Autodesk Inventor*. Do tego typu obliczeń zastosowano analizę statyczną 2D. Wykorzystano powtarzalność modelu i analizie poddano wycinek zamiast całego pakietu, dyskretyzacji modelu dokonano za pomocą elementów tarczowych trójkątnych z uwzględnieniem płas-

kiego stanu odkształcenia (*PSO*). W otworach blachy uwzględniono dodatkowe objętości odpowiadające magnesom trwałym, jako obciążenie zadano prędkość obrotową wirnika (1500obr/min). Do obliczeń przyjęto własności wytrzymałościowe blachy elektrotechnicznej *M400-50A* użytej do budowy wirnika modelowego elektrowibratora. Model dyskretny pokazano na rysunku 4.

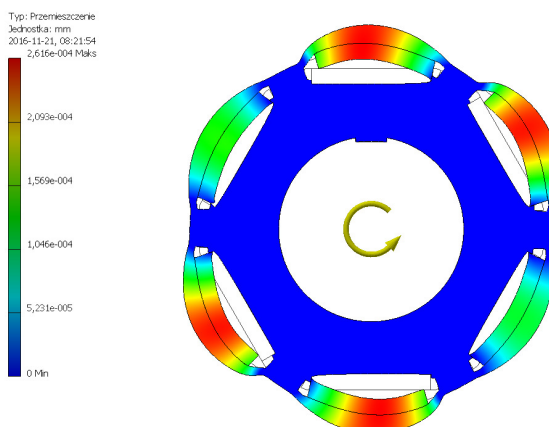


Rys. 4. Model dyskretny

Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że konstrukcja wirnika posiada bardzo dużą wytrzymałość, co potwierdza rozkład naprężeń (rys. 5) oraz sztywność, co obrazuje rysunek 6.



Rys. 5. Otrzymane naprężenia zredukowane dla założonego obciążenia

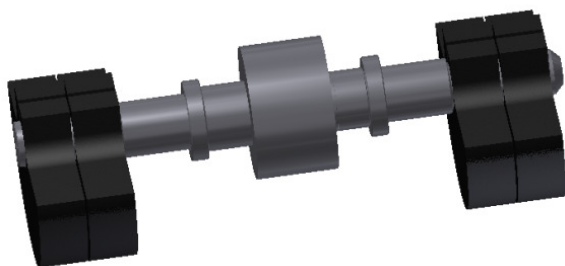


Rys. 6. Otrzymane przemieszczenia dla założonego obciążenia

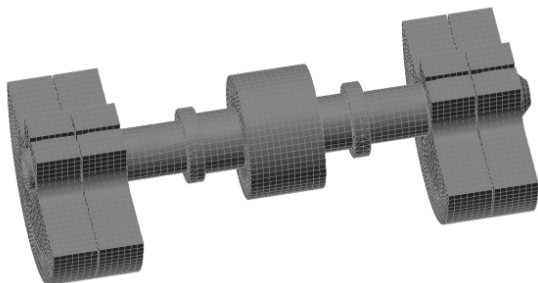
Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że konstrukcja wirnika posiada bardzo dużą wytrzymałość, co potwierdza rozkład naprężeń (rys. 5) oraz sztywność co obrazuje rysunek 6. Osiągnięty współczynnik bezpieczeństwa równy 15 znacznie przekracza założony na początkowym etapie projektu bezpieczny współczynnik wynoszący 3. Wartości te potwierdzają spełnienie wymagań odnośnie wytrzymałości analizowanego rozkroju blach wirnika.

3.3. Analiza wytrzymałości wału wirnika

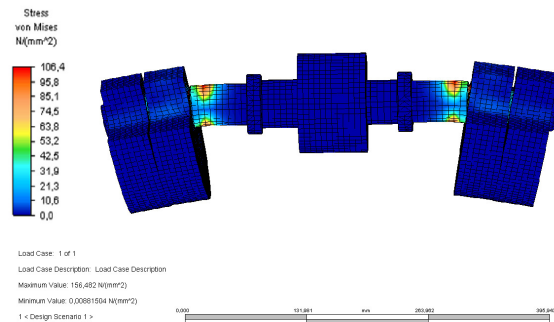
W elektrowibratorach głównym źródłem obciążenia jest siła odśrodkowa pochodząca od wirujących mas. Obciążenie to musi przenieść wał, łożyskowanie oraz kadłub. Poniżej przedstawiono obliczenia sprawdzające wał wirnika. W tym celu przygotowano uproszczony model geometryczny (rys. 7), który następnie poddano dyskretyzacji (rys.8). Następnie przeprowadzając analizę statyczną, obliczono naprężenia (rys. 9) i przemieszczenia (rys. 10) wału modelowego elektrowibratora) przy prędkości 1500obr/min i utwierdzeniu w węzłach łożyskowych.



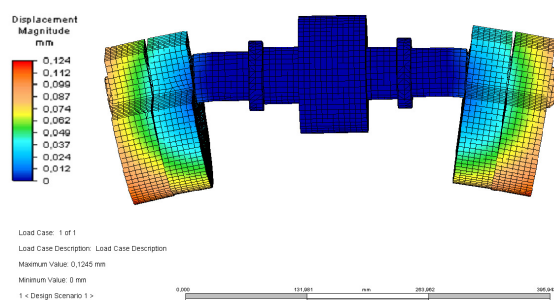
Rys. 7. Uproszczony model do analizy wytrzymałościowej wirnika modelowego elektrowibratora typu SMwsk112S6



Rys. 8. Dyskretny model do analizy modalnej i wytrzymałościowej wirnika przygotowany w programie Autodesk Multiphysics



Rys. 9. Naprężenia zredukowane otrzymane dla prędkości obrotowej 1500 obr/min



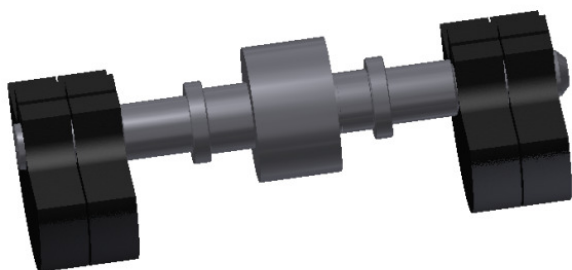
Rys. 10. Przemieszczenia otrzymane dla prędkości obrotowej 1500 obr/min

Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że wał wirnika posiada wystarczającą wytrzymałość (co potwierdza rozkład naprężeń (rys. 9), oraz sztywność (maksymalne przemieszczenie 0,12mm), co obrazuje rysunek 10. Osiągnięte naprężenia maksymalne wynoszące 103MPa są poniżej dopuszczalnych naprężeń na gięcie obustronne (k_{go}) w wale wirnika wynoszących 130MPa dla stali 40HM-T. Wartości te potwierdzają spełnienie wymagań odnośnie wytrzymałości analizowanego wału wirnika.

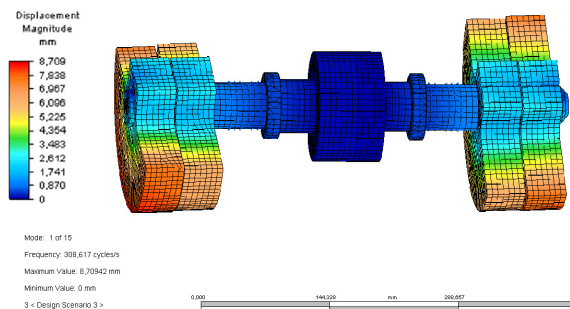
3.4. Analiza modalna wirnika

Większość wirujących maszyn elektrycznych działa w ustalonych warunkach działania. Zmienne warunki występują zwykle wtedy, gdy zmianie ulega obciążenie maszyny lub prędkość obrotowa, co najczęściej ma miejsce w trakcie rozruchu lub wybiegu maszyny, podobnie jest w elektrowibratorach. Podczas działania maszyny w zmiennych warunkach występują wymuszenia o zmiennym charakterze, przy czym źródłem wymuszenia jest sama maszyna, a siły wymuszające pochodzą od wirujących mas szczałkowego niewyrównowazenia wirnika, zatem główne składowe częstotliwości wymuszających odpowiadają częstotliwości obrotów wirnika i jej harmonicznym. Pojawienie się destrukcyjnych drgań związane jest z wystą-

pieniem rezonansu, który pojawi się w chwili, gdy częstotliwość obrotowa wirnika pokryje się z częstotliwością drgań własnych układu wirnik – łożyska – podpora [4]. Częstotliwość ta nazywana jest też częstotliwością krytyczną wirnika. Należy unikać tej częstotliwości, w tym celu należy sprawdzić częstotliwości drgań własnych wirnika i ewentualnie skorygować konstrukcję maszyny lub zmienić jej prędkość obrotową. Poniżej (rys. 11) przedstawiono model do analizy modalnej przy konfiguracji mas dla największej siły wymuszającej elektrowibratora. Rysunek 12 przedstawia natomiast postać drgań własnych wirnika dla częstotliwości 308Hz. Pierwsze 15 częstotliwości drgań własnych wirnika pokazano na rysunku 13.



Rys. 11. Model do analizy modalnej wirnika przy konfiguracji mas dla największej siły wymuszającej elektrowibratora



Rys. 12. Postać drgań własnych wirnika przy 308Hz

Analogiczne obliczenia przeprowadzono także dla pozostałych konfiguracji mas. Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że częstotliwości własne wirnika dla badanych konfiguracji mas nie pokrywają się z częstotliwością 25Hz wynikającą z prędkości obrotowej elektrowibratora, zatem nie ma zagrożenia wystąpienia niebezpiecznego zjawiska rezonansu.

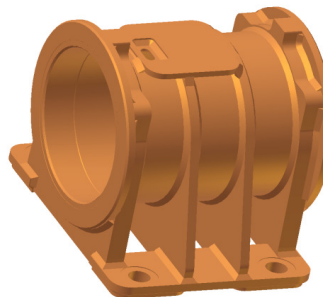
mode number	circular frequency (rad/sec)	frequency (Hertz)	period (sec)
1	1.93991E+03	3.0862E+02	3.2402E-03
2	2.8837E+03	4.5895E+02	2.1789E-03
3	2.8873E+03	4.5953E+02	2.1761E-03
4	3.0390E+03	4.8368E+02	2.0675E-03
5	3.2040E+03	5.0993E+02	1.9611E-03
6	6.3497E+03	1.0106E+03	9.8952E-04
7	7.1755E+03	1.1420E+03	8.7565E-04
8	7.7249E+03	1.2294E+03	8.1337E-04
9	7.7894E+03	1.2397E+03	8.0663E-04
10	7.8518E+03	1.2497E+03	8.0022E-04
11	7.9764E+03	1.2695E+03	7.8772E-04
12	8.5100E+03	1.3544E+03	7.3833E-04
13	1.2170E+04	1.9369E+03	5.1629E-04
14	1.2201E+04	1.9419E+03	5.1496E-04
15	1.3923E+04	2.2160E+03	4.5127E-04

Rys. 13. Pierwsze 15 częstotliwości drgań własnych wirnika

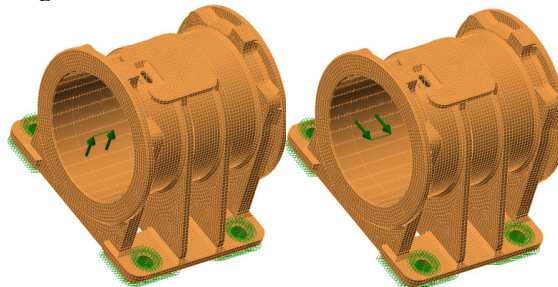
4. Analiza mechaniczna kadłuba modelowego elektrowibratora

4.1. Analiza wytrzymałości kadłuba

W elektrowibratorach kadłub musi przenieść obciążenie od siły odśrodkowej pochodzącej od wirujących mas na konstrukcję, do której elektrowibrator jest mocowany. Poniżej przedstawiono obliczenia sprawdzające kadłuba wirnika. W tym celu przygotowano uproszczony model geometryczny (rys. 14), który następnie poddano dyskretyzacji (rys.15).



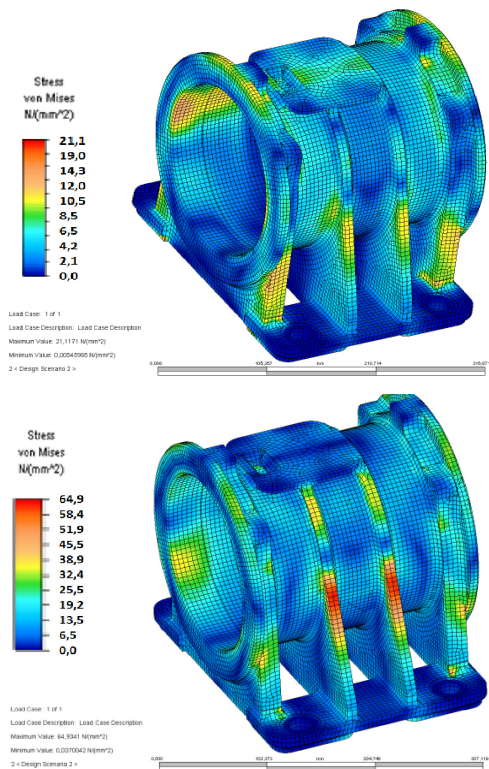
Rys. 14. Uproszczony model kadłuba modelowego elektrowibratora



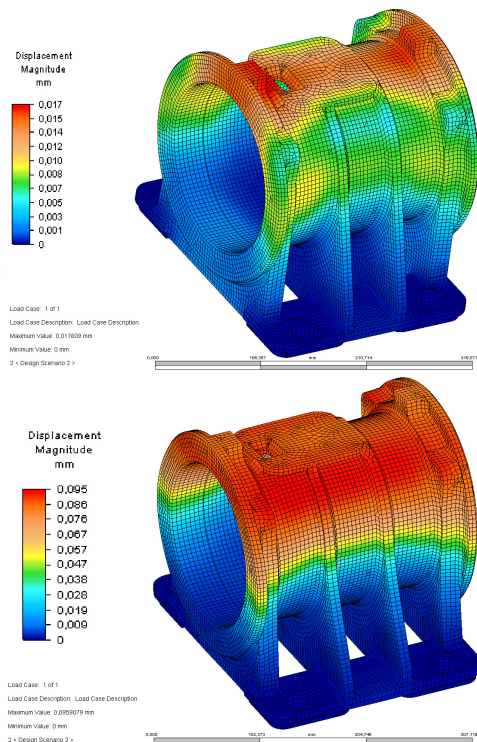
Rys. 15. Model dyskretny kadłuba modelowego elektrowibratora z zaznaczonymi warunkami brzegowymi obciążenia i utwierdzenia

Następnie przeprowadzając analizę statyczną, obliczono naprężenia (rys. 16) i przemieszczenia (rys. 17) kadłuba modelowego elektrowi-

bratora przy obciążeniu pochodzącym od wirujących mas z prędkością 1500 obr/min (19275 N od pary obciążników). Obciążenie to przyłożono w 2 kierunkach jak pokazano na rys. 15.



Rys. 16. Naprężenia zredukowane przy obciążeniu siłą pochodzącą od wirujących mas

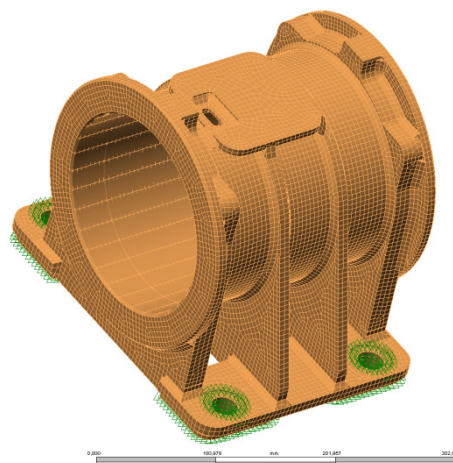


Rys. 17. Przemieszczenia przy obciążeniu siłą pochodzącą od wirujących mas

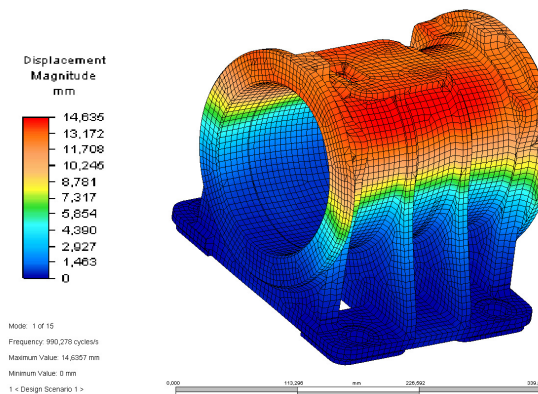
Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że kadłub wirnika posiada wystarczającą wytrzymałość, co potwierdza rozkład naprężeń (rys. 16) oraz sztywność, co obrazuje rysunek 17. Osiągnięte naprężenia maksymalne wynoszące 65 MPa są poniżej dopuszczalnych naprężeń na rozciąganie i ściskanie obustronnie tętnące (k_{rc}) wynoszących ($0,35Re$) 125 MPa dla stali $S355JR$. Wartości te potwierdzają spełnienie wymagań odnośnie wytrzymałości analizowanego kadłuba.

4.2. Analiza modalna kadłuba

Poniżej (rys. 20), podobnie jak dla wirnika przedstawiono model do analizy modalnej kadłuba modelowego elektrowibratora. Rysunek 19 przedstawia natomiast postać drgań własnych wirnika dla częstotliwości 990 Hz . Obliczone częstotliwości drgań własnych kadłuba pokazano na rysunku 20.



Rys. 18. Model dyskretny kadłuba modelowego elektrowibratora



Rys. 19. Przykładowa postać drgań własnych kadłuba przy 990 Hz

Frequencies = 5			
mode	circular		
number	frequency (rad/sec)	frequency (Hertz)	period (sec)
1	6.2221E+03	9.9027E+02	1.0098E-03
2	6.7154E+03	1.0688E+03	9.3563E-04
3	1.0151E+04	1.6155E+03	6.1899E-04
4	1.2350E+04	1.9656E+03	5.0875E-04
5	1.2807E+04	2.0383E+03	4.9061E-04

Rys. 20. Częstotliwości drgań własnych wirnika w zakresie do 3000Hz

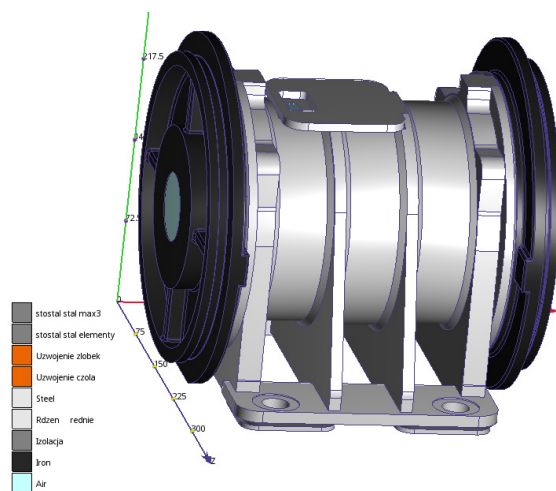
Analizując wyniki obliczeń możemy stwierdzić, że częstotliwości własne kadłuba modelowego elektrowibratora nie pokrywają się z częstotliwością 25Hz wynikającą z prędkości obrotowej elektrowibratora, zatem nie ma zagrożenia wystąpienia niebezpiecznego zjawiska rezonansu.

5. Obliczenia cieplne modelowego elektrowibratora

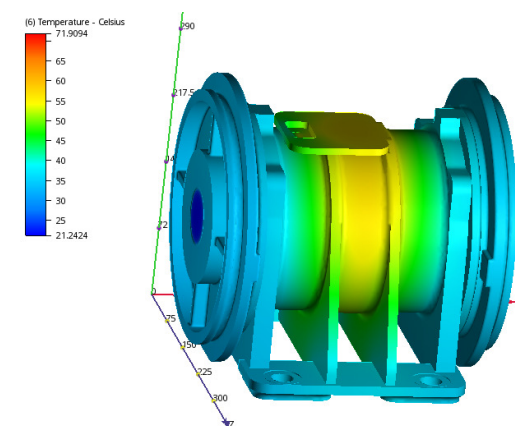
Wybrany rodzaj maszyny (magnesy trwałe) wymaga bardzo wnikliwej analizy cieplnej maszyny. Spowodowane jest to dużą wrażliwością jej komponentów na podwyższoną temperaturę. Przede wszystkim na magnesy trwałe, trwałość izolacji uzwojenia, czy możliwość zbyt dużego obciążenia cieplnego elementu sterującego pracą maszyny (enkoder).

Podczas analizy cieplnej wykorzystano uproszczone modele geometryczne przygotowane w programie *Autodesk Inventor*. Do zamodelowania uzwojenia została użyta metoda homogenizacji uzwojenia. Zostało ono zastąpione jedną bryłą o zastępczej przewodności cieplnej wyznaczonej metodą Richtera. Zamiast modelu izolacji żłobkowej wprowadzono parametr zastępczej rezystancji cieplnej (określony na podstawie doświadczeń Instytutu KOMEL) [3]. Model geometryczny zaimportowano do środowiska obliczeniowego *Autodesk Multiphysics* (rys. 21). Następnie w modelu wprowadzono własności materiałowe (przewodności cieplne) poszczególnych elementów [2] maszyny i wartości przewidywanych strat wyznaczonych z obliczeń obwodu elektro-magnetycznego. Przy uwzględnieniu warunków pracy ustawiono odpowiednie wartości brzegowe modelu (temperatura w przestrzeni pracy maszyny równa 20°C). Dla przygotowanego modelu przeprowadzono symulację typu steady-state, na jej podstawie określono temperaturę poszczególnych regionów maszyny (rys.22-24). Ten typ analizy jest odpowiedni dla urządzeń do pracy ciągłej. Zakłada się, aby temperatura wnętrza nie przekraczała 80°C ze względu na magnesy

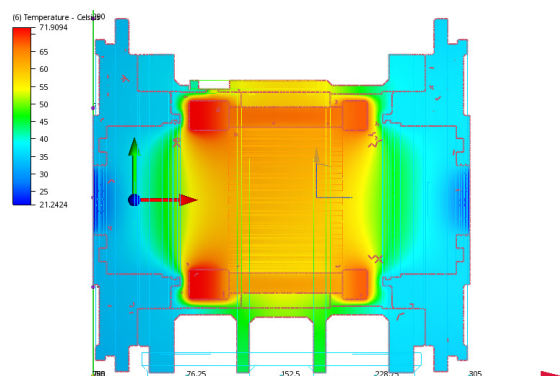
trwałe i możliwość zastosowania enkodera wewnątrz maszyny, a temperatura uzwojenia nie przekraczała 180°C ze względu na klasę izolacji uzwojenia (H).



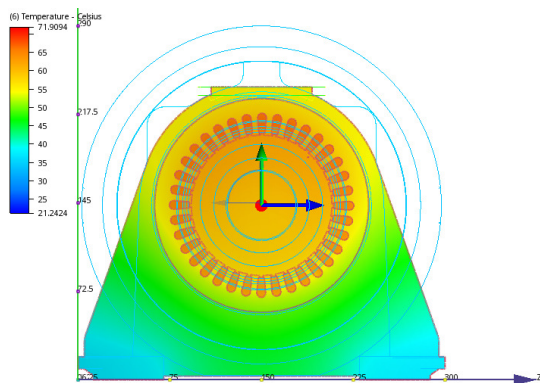
Rys. 21. Model geometryczny zaimportowany do środowiska obliczeniowego Autodesk Multiphysics



Rys. 22. Obliczona temperatura kadłuba modelowego elektrowibratora dla pracy ciągłej



Rys. 23. Obliczona temperatura wnętrza modelowego elektrowibratora dla pracy ciągłej - przekrój osiowy



Rys. 24. Obliczona temperatura wnętrza modelowego elektrowibratora dla pracy ciągłej - przekrój poprzeczny

Analizując wyniki obliczeń cieplnych można zauważyć, że temperatura uzwojenia sięga maksymalnie 72°C , natomiast temperatura wnętrza sięga 60°C . Temperatury te nie przekraczają założonych dopuszczalnych temperatur, zatem kadłub nie wymaga zmian poprawiających wymianę ciepła z otoczeniem np. przez zastosowanie dodatkowego uźebrowania powierzchni zewnętrznej.

6. Podsumowanie

Nowoczesne narzędzia wspomagające projektowanie pozwalają na szerokie spektrum analiz nowo opracowywanych konstrukcji maszyn elektrycznych, jak również mogą służyć do analizy już istniejących rozwiązań. Stosując specjalistyczne pakiety obliczeniowe, takie jak np. *Autodesk Multiphysics* możemy szczegółowo przeanalizować konstrukcję pod względem wytrzymałości, drgań własnych, czy wydajności układu chłodzenia. Dzięki tego typu analizom możemy uniknąć wielu błędów konstrukcyjnych już na etapie projektowania i przyspieszyć proces powstania finalnego urządzenia.

7. Literatura

- [1]. Rossa R. „Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych”, *Napędy i Sterowanie* 12/2018, s. 32-33.
- [2]. Będkowski B., Madej J. „Własności cieplne pakietu blach elektrotechnicznych - badania i symulacje” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, nr 2, 2015, s. 117-122.
- [3]. Będkowski B., Madej J. „Wyznaczenie zastępczej rezystancji cieplnej izolacji żłobkowej - badania i symulacje” *Zeszyty problemowe - Maszyny Elektryczne KOMEL*, 2015, s. 123-127.
- [4]. Madej J., Sitek M., „Modal and frequency analysis of electrovibrator kit for different configuration

of activators” *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 5, No. 3, 2011, s. 87-90.

[5]. Glinka T., „Electric motors with permanent magnets” *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7, 2008, s. 1-7.

[6]. Bernatt J., „Silniki trakcyjne z magnesami trwałymi i -nowa jakość w napędach trakcyjnych” *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe KOMEL*, nr 74, 2006, s. 11-17.

Autorzy

dr inż. Bartłomiej Będkowski
 b.bedkowski@komel.katowice.pl
 Instytut Napędów i Maszyn
 Elektrycznych KOMEL
 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188,

Informacje dodatkowe

Projekt „Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych”, współfinansowany ze środków NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych, zgodnie z umową: PBS3/B4/15/2015.