

Wpływ kadłuba na poziom hałasu silników trakcyjnych

Streszczenie. W artykule opisano podstawowe metody analizy i oceny przyczyn hałasu występującego w silnikach trakcyjnych z magnesami trwałymi z wirnikiem, w którym magnesy zostały umieszczone wewnątrz wirnika (PMSM IPM). Przedstawiono w nim analizę hałasu akustycznego silnika o mocy 240 kW z 60 żłobkami stojana i liczbą par biegunów $2p=10$ przeznaczonego do napędów autobusów i samochodów ciężarowych. W dalszej części pokazano wyniki analizy wpływu kadłuba na ogólny poziom hałasu silnika. Obliczono częstotliwości drgań własnych stojana silnika oraz sił działających w szczeliny powietrznej. Na podstawie tych danych obliczono poziom mocy akustycznej (A-SWL) w całym zakresie prędkości obrotowych silnika zarówno z kadłubem, jak również bez kadłuba. Pokazano, jak wpływa kadłub na poziom hałasu silnika, określono co jest podstawowym źródłem hałasu silników trakcyjnych pracujących w szerokich zakresach prędkości obrotowych.

Abstract. The article describes basic methods for analyzing and evaluating the causes of noise occurring in permanent magnet permanent magnet motors with a rotor in which the magnets have been placed inside the rotor (PMSM IPM). An analysis of the acoustic noise of a 240 kW motor with 60 stator slots and a number of pole pairs of $2p=10$ designed for bus and truck drives is presented. The computational effect of the housing on the overall noise of the motor is presented. The natural frequencies of the motor stator and the forces acting in the air gap were calculated. Based on these data, the sound power level (A-SWL) was calculated over the entire range of motor speeds both with and without the housing, and it was shown how the housing affects motor noise. It was determined what is the primary cause of noise of traction motors operating in wide speed ranges. (Impact of housing on traction motor noise).

Słowa kluczowe: kadłub silnika, hałas silnika, napęd trakcyjny, napęd elektryczny, PMSM IPM

Keywords: motor housing, motor noise, traction drive, electric drive, PMSM IPM.

Wstęp

Napędy trakcyjne mają zastosowanie w różnego typu pojazdach, zaczynając od rowerów czy hulajnog elektrycznych a kończąc na napędach stosowanych w ciężarówkach, autobusach, trolejbusach, lokomotywach czy różnego typu jachtach. Coraz szersze zastosowanie elektrycznych napędów trakcyjnych wynika z ich wielu zalet [1] oraz szybkiego rozwoju elektromobilności. Szczególnie szybko rozwija się ta związana z napędami do pojazdów osobowych, dostawczych oraz autobusów miejskich. Jest to efektem zarówno wymogów prawnych [2], jak również środowiskowych [3]. Pojazdy z napędami elektrycznymi na etapie produkcji są bardziej energochłonne i czasochłonne niż pojazdy spalinowe. Wynika to z wysokich kosztów produkcji akumulatorów trakcyjnych. Pojazdy elektryczne są pozbawione wielu wad przypisywanych pojazdom z napędem spalinowym, które oprócz emisji szeregu zanieczyszczeń są również źródłem hałasu. Emisja hałasu ma szczególne znaczenie w centrach miast i dużych aglomeracjach miejskich, w których następuje kumulacja hałasu powodując negatywne oddziaływanie na środowisko, jak również ludzi. Napędy elektryczne mogą być bardzo ciche jednak tylko te, które zostały prawidłowo zaprojektowane i wykonane. Poziom hałasu nieprawidłowo zaprojektowanego na następnie wykonanego trakcyjnego silnika elektrycznego może być zaskakująco duży, a dodatkowo częstotliwość tego hałasu pokrywa się z częstotliwością zwiększonej wrażliwości ucha ludzkiego [3] co powoduje że jest on wyjątkowo nieprzyjemny dla ludzi. Elektryczne napędy trakcyjne mogą być bardzo ciche szczególnie pracując przy małych prędkościach obrotowych z tego powodu producenci pojazdów elektrycznych wprowadzili w pojazdach system AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) [4]. Jest to system, który ma zapewnić minimalny poziom hałasu zewnętrznego pojazdów tak aby były on słyszalne szczególnie w ruchu miejskim. Od 1 lipca 2021 r. każdy nowy samochód elektryczny i hybrydowy działający w trybie bezemisyjnym musi generować dźwięk. Zgodnie z przyjętymi regulacjami emitowany dźwięk musi być ciągły, a jego głośność minimalna to 56 dB przy prędkości 20 km/h, a maksymalna 75 dB przy wyższych prędkościach. Silniki elektryczne wykorzystywane w

napędach pojazdów zwykle generują zwiększony hałas przy wyższych prędkościach obrotowych oraz przy zwiększonym obciążeniu. Przy wyższych prędkościach obrotowych silnika napędowego, źródłem hałasu staje się już nie tylko sam silnik z kadłubem, ale również inne elementy napędu takie jak skrzynia biegów, mechanizm różnicowy, rama mocowania silnika czy koła. Praca silników przy wysokich prędkościach obrotowych wynika z wymogów stawianym nowoczesnym napędom. Podstawowym wymogiem jest praca z przekładnią mechaniczną najczęściej o jednym lub czasami o dwóch przełożeniach [5]. Drgania i wibracje generowane przez napęd pojazdu często przenoszą się poprzez konstrukcję mechaniczną mocowania silnika do wnętrza pojazdu i mogą wpływać negatywnie na komfort podróżowania użytkowników pojazdów. W artykule będą rozważane głównie silniki synchroniczne z magnesami trwałymi gdyż one ze względu na swoją wysoką sprawność są bardzo często używane jako napędy trakcyjne [6–9] w pojazdach z napędem elektrycznym. W nowoczesnych konstrukcjach silników trakcyjnych jednym z celów jest maksymalne obniżenie masy silnika przy zachowaniu wymaganej mocy. W związku z tym zredukowana jest masa kadłuba oraz masy elementów czynnych stojana i wirnika co zmniejsza sztywność konstrukcji. Występujące w szczeliny silnika duże siły magnetyczne mogą prowadzić do odkształceń stojana i przeniesienie ich na kadłub [10], w wyniku tych odkształceń generowane są wibracje i hałas. Dlatego analiza wibroakustyczna a następnie minimalizacja generowanego hałasu już na etapie projektowania silników trakcyjnych do różnego typu napędów pojazdów elektrycznych jest koniecznością. Źródłami hałasu najczęściej występującymi w silnikach elektrycznych z magnesami trwałymi są:

- elementy mechaniczne tj. łożyska, przekładnie, asymetrie wirnika (niewyważa lub owalność),
- zjawiska aerodynamiczne tj. okresowa zmiana ciśnienia,
- siły wytworzone przez pole magnetyczne, które dla silników PMSM pochodzą o magnesów trwałych, i mają charakter sił promieniowych lub osiowych.

Dla nowoczesnych napędów trakcyjnych obliczenia wibroakustyczne są również ważne, jak obliczenia elektromagnetyczne czy termiczne. Najczęstszymi

przyczynami hałasu silników trakcyjnych są źródła magnetyczne, dlatego analiza harmonicznymi gęstości sił promieniowych, z jakimi oddziałuje wirnik silnika na stojan, jest jednym z najważniejszych kroków w zagadnieniu dotyczącym analizy źródeł hałasu akustycznego. Pozwala bowiem wyjaśnić korelację pomiędzy hałasem akustycznym a wyższymi harmonicznymi gęstości siły promieniowej. W silnikach IPMSM zawartość harmonicznymi gęstości sił promieniowych w szczelinie powietrznej silnie zależy od konstrukcji obwodu magnetycznego wirnika, ułożenia magnesów trwałych oraz ułożenia i długości mostków magnetycznych wirnika [11,12]. Do redukcji drgań i hałasu silników trakcyjnych stosowanych jest wiele metod. Możemy do nich zaliczyć:

- zwiększenie sztywności stojana i kadłuba. Jednak takie podejście wiąże się w większości przypadków ze zwiększeniem masy silnika. W związku z tym jest to sprzeczne z aktualnymi trendami minimalizacji masy napędów stosowanych w pojazdach.

- redukcję wartości elektromagnetycznej siły wzbudzonej [13]. W tej metodzie, szczególnie w silnikach z magnesami obniża się również wartość siły, która jest odpowiedzialna za moment silnika. Wpływa to na pogorszenie parametrów silnika.

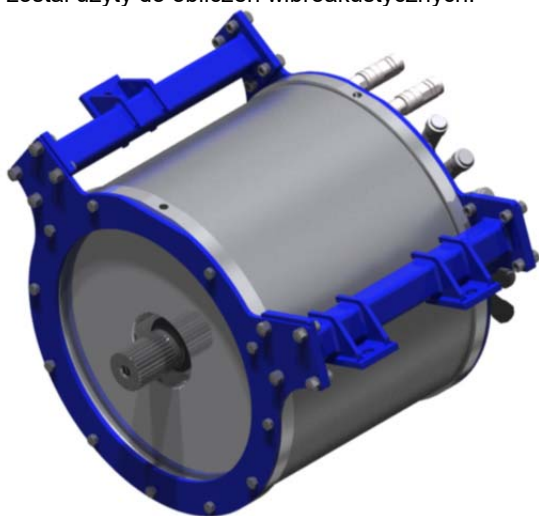
- odpowiedni dobór liczby żłobków i liczby biegunów silnika [14], tak aby zminimalizować wpływ naprężeń Maxwella na strukturę stojana w całym zakresie z prędkości obrotowych silnika. Metoda pozwala nam na ograniczenie hałasu już podczas projektowania maszyny.

- redukcję pulsacji siły promieniowej za pomocą harmonicznymi prądu zasilającego [15,16], lub poprzez złagodzenie pulsacji momentu obrotowego [17,18].

Jednak z praktycznego punktu widzenia najważniejszym elementem jest określenie częstotliwości modalnych kadłuba, stojana oraz sprawdzenie czy nie występują rezonanse z częstotliwościami przestrzennymi fal naprężeniowych powstałych na skutek występowania sił Maxwella w szczelinie powietrznej silnika.

Analiza wibroakustyczna

Poniżej przedstawiono wyniki analizy wibroakustycznej prototypu silnika, który został zaprojektowany do napędu autobusów oraz ciężarówek. Podstawowe dane mechaniczne oraz parametry elektromechaniczne silnika zamieszczono w tabeli 1, na rysunku 1 przedstawiono model trójwymiarowy silnika umieszczony w ramie montażowej. Na rysunku 2 przedstawiono model kadłuba który został użyty do obliczeń wibroakustycznych.

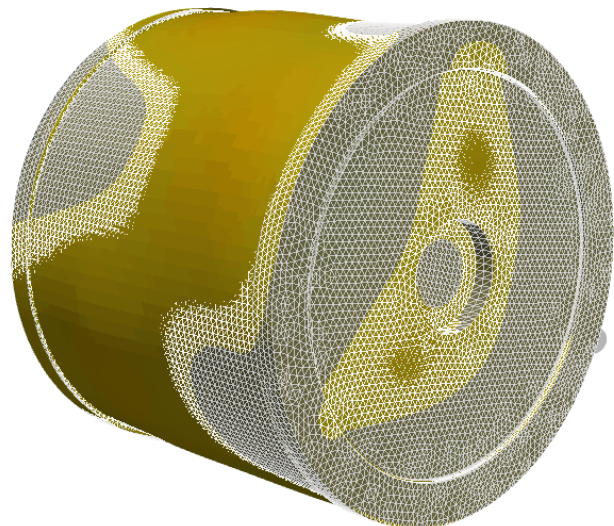


Rys 1. Silnika SMwsK280M20 umieszczony w ramie montażowej.

Tabela 1. Podstawowe dane mechaniczne oraz parametry elektromechaniczne silnika SMwsK280M20

Parametr	Jednostka	Wartość
Średnica zewnętrzna stojana	mm	470
Średnica wewnętrzna stojana	mm	382
Długość pakietu stojana i wirnika	mm	170
Wznios mechaniczny	mm	280
2p	-	20
Skos	stojan	1 podziałka żłobkowa
Moc znamionowa, P_N (S2-60 min)	kW	240
Moc maksymalna	kW	400
Moment maksymalny	Nm	2400
Prędkość maksymalna	obr/min	3000
Sprawność przy P_N (S2-60 min)	%	96
Masa	kg	275

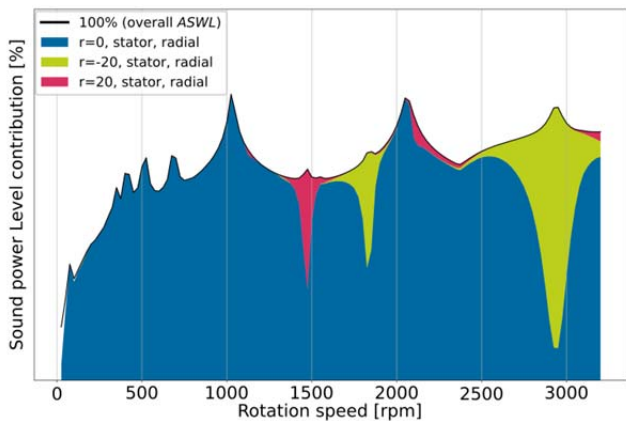
Widoczna na rysunku 2 siatka oraz odkształcenia kadłuba obrazują deformacje zewnętrznej powierzchni kadłuba pod wpływem sił oddechowych. Obliczenia wibroakustyczne silnika rozpoczęto od analitycznego wyliczenia częstotliwości modalnej uproszczonego pakietu stojana oraz uproszczonej wersji kadłuba. Uproszczenia polegały za zastąpieniu stojana oraz kadłub jednolitym pierścieniem o wypadkowej gęstości i sprężystości, rzeczywistego kadłuba oraz stojana. W wyniku obliczeń otrzymano częstotliwość drgań własnych pakietu stojana dla trybu przestrzennego $r=0$ oraz dla kolejnych trybów przestrzennych sił.



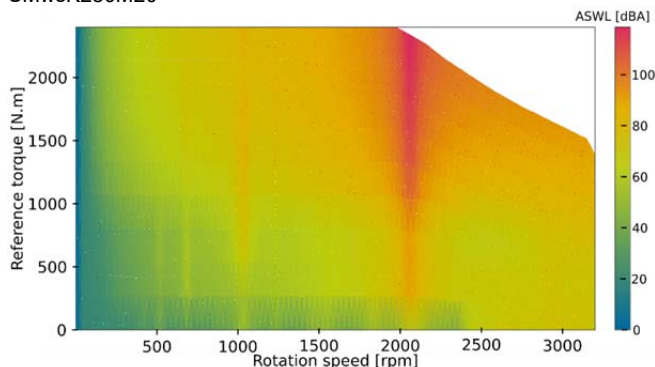
Rys.2. Model kadłuba silnika z siatką 3D użyty do obliczeń wibroakustycznych silnika SMwsK280M20

Jednak najważniejszą jest częstotliwość drgań własnych trybu 0 (oddechowego) która dla analizowanego silnika wynosiła 2500 Hz [19]. Częstotliwość ta znajduje się w paśmie, w którym ucho ludzkie wykazuje się dużą wrażliwością. Dlatego generowanie hałasu w tych częstotliwościach przez silnik będzie potęgowało odczucie nieprzyjemnego dźwięku. Analiza modalna daje nam również odpowiedź jakiej siły należy użyć aby moc odkształcić pakiet stojana. Najniższe rzędy trybów przestrzennych r mają wyższą skuteczność promieniowania [7]. Dlatego siły naprężeniowe trybu przestrzennego $r=0$ (oddechowe) muszą być uwzględniane szczególnie w napędach trakcyjnych pracujących w szerokim zakresie prędkości obrotowych ponieważ wymagają relatywnie niewielkiej siły do dużych deformacji stojana. Deformacje ze stojana przenoszą się na kadłub powodując odkształcenia zewnętrznej powierzchni kadłuba która jest bezpośrednio

odpowiedzialna za propagację hałasu w powietrzu. W publikacji [5] wykazano doświadczalnie, że w trakcyjnych maszynach wielobiegunowych głównym źródłem hałasu są siły trybu oddychania $r=0$. Analizowany silnik jest maszyną wielobiegunową $2p=20$, częstotliwość drgań własnych stojana i kadłuba znajduje się w bardzo niekorzystnym pasmie ze względu na charakterystykę czułości ucha ludzkiego, w związku z czym należy się spodziewać podwyższonego poziomu hałasu z bardzo dużym udziałem sił trybu 0 w generowanym hałasie silnika. Dalsze obliczenie wykonano z wykorzystaniem programu EOMYS MANATEE v2.2.4.2. Model kadłuba przedstawiony na rysunku 2 został przygotowany specjalnie to tego programu. Wyniki obliczeń wykonane z wykorzystaniem modelu kadłuba przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7. Aby pokazać jak duży wpływ na ogólny hałas silnika ma kadłub, wykonano obliczenia dla silnika z uwzględnieniem kadłuba oraz bez jego uwzględniania. Na rysunku 3 pokazano udział mocy akustycznej generowanej przez silnik bez kadłuba dla poszczególnych trybów przestrzennych występujących w silniku. Obliczenia te wykonano dla silnika pracującego na biegu jałowym w pełnym zakresie prędkości obrotowych pracy silnika. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki kolejnych obliczeń wibroakustycznych wykonanych dla silnika pracującego w pełnym zakresie obciążenia momentem oraz w pełnym zakresie prędkości obrotowych, jest to tzw. mapa hałasu silnika.



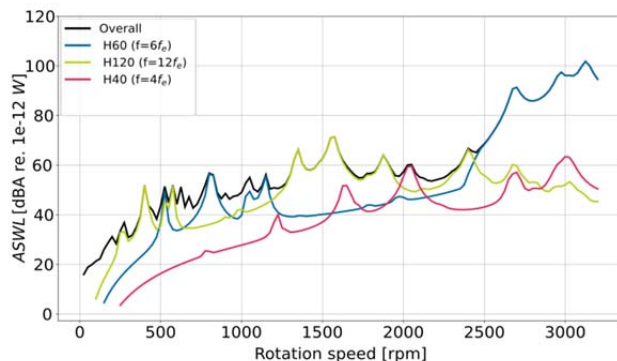
Rys.3. Praca na biegu jałowym bez kadłuba - udział mocy akustycznej dla poszczególnych trybów przestrzennych silnika SMwsK280M20



Rys.4. Mapa hałasu silnika SMwsK280M20 – bez kadłuba

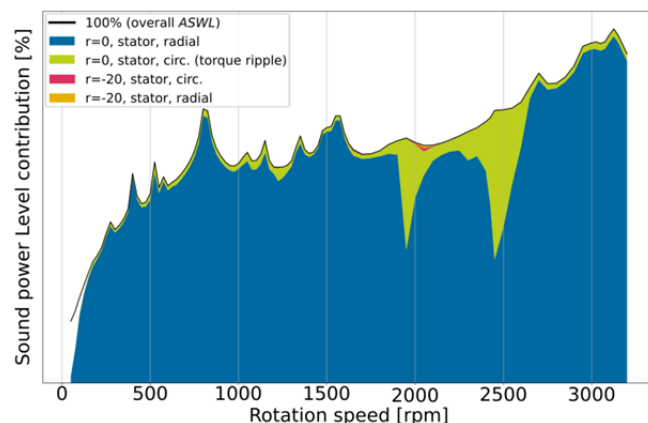
Można zauważyć, że mapy hałasu wykonane (rysunek 7) dla silnika z kadłubem oraz wykonane dla silnika bez kadłuba (rysunek 4) różnią się istotnie. Porównując te dwa obliczenia wibroakustyczne możemy zauważyć, jak znacząco kadłub silnika wpływa na ogólny hałas silnika. Na rysunku 3 tryb 0 jest trybem dominującym, jednak przy maksymalnej prędkości silnika (3000 obr./min) jego udział jest około 15%, a dominującym trybem jest tryb $r=-20$.

Częstotliwość trybu $r=0$ dla tego silnika wynosi H60 (jest równa 60-krotności prędkości obrotowej silnika liczonej w obrotach na sekundę). Przy 3000 obr./min częstotliwość H60 jest równa 3000 Hz. Częstotliwość trybu H120 jest dwukrotnie wyższa. Po uwzględnieniu kadłuba oraz tarcz silnika na biegu jałowym w obliczeniach wibroakustycznych przedstawionych na rysunku 5 głównym źródłem hałasu jest już tryb oddechowy $r=0$ o częstotliwości H60.

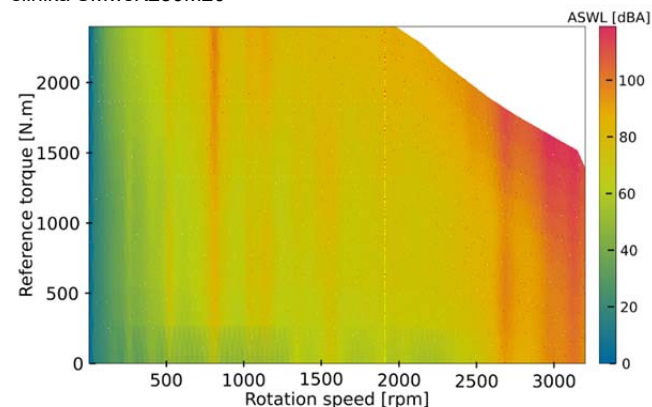


Rys.5. Analiza wymuszeń w funkcji prędkości obrotowej wirnika silnika SMwsK280M20 – bieg jałowy z kadłubem [20]

Częstotliwość H60 jest częstotliwością wyraźnie dominującą szczególnie przy wyższych prędkościach obrotowych. Następną częstotliwością potencjalnego hałasu jest H120. Obie te częstotliwości są trybami oddechowymi, które zostały wzmocnione przez rezonans z częstotliwościami drgań własnych kadłuba, inne częstotliwości wyższych trybów zostały stłumione przez kadłub, a ich ogólny wkład w całkowity hałas generowany przez silnik jest niewielki (rysunek 6).



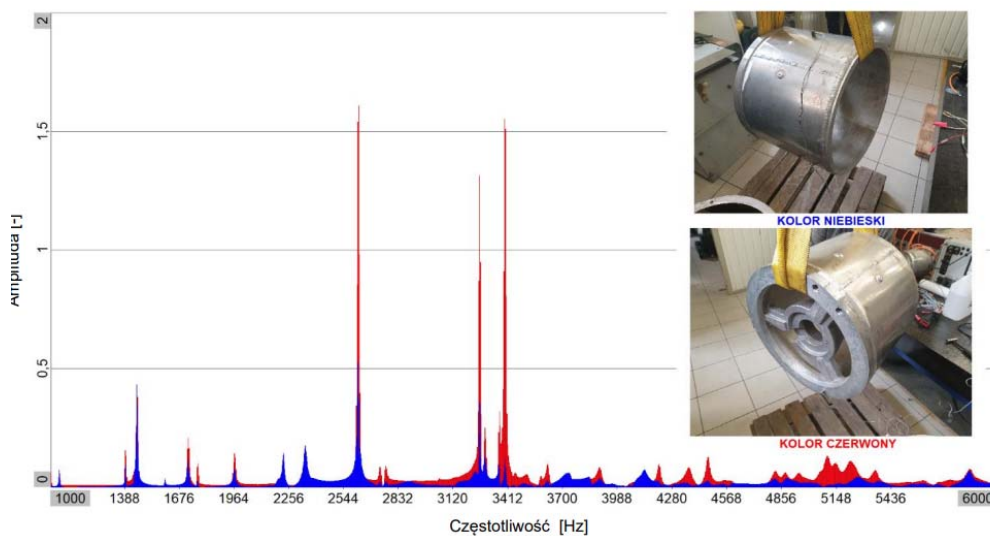
Rys.6. Praca przy obciążeniu znamionowym z kadłubem - udział mocy akustycznej dla poszczególnych trybów przestrzennych silnika SMwsK280M20



Rys.7. Mapa hałasu silnika SMwsK280M20 – obliczenia z kadłubem

Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń wibroakustycznych można zauważyć bardzo duży wpływ kadłuba na ogólny hałas silnika oraz bardzo niewielki wpływ obciążenia na poszczególne źródła wymuszeń w przypadku obliczeń z kadłubem. W obliczeniach, w których został uwzględniony kadłub widzimy znaczący wzrost hałasu silnika przy obciążeniu znamionowym, jednak samo źródło pozostaje niezmiennie (H60) -tryb oddechowy. Obliczenia przedstawione na rysunkach 5, 6 oraz 7 mają bardzo dużą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych, które zostały wykonane dla analizowanego silnika. Hałas trybu oddechowego o częstotliwości H60 dla analizowanego silnika zaczyna gwałtownie narastać już od prędkości 2600 obr./min aby osiągnąć maksimum dla maksymalnej prędkości obrotowej silnika. Taka częstotliwość dźwięku jest bardzo negatywnie odbierana przez ludzkie ucho, co sprawia, że hałas silnika jest nieprzyjemny i przy poziomach mocy akustycznej powyżej 105 dBA trudny do zniesienia.

Pomiary rzeczywistych kadłubów



Rys.8. Analiza FFT różnych typów kadłubów do silnika SMwsK280M20.

Podsumowanie i wnioski

Szybko rozwijająca się elektromobilność zarówno w krajach rozwiniętych, jak i rozwijających się wymaga coraz bardziej zoptymalizowanych i tańszych napędów trakcyjnych. Duży nacisk na wprowadzanie napędów elektrycznych wynika m.in. z wprowadzenia regulacji mających na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla. Jednak sama emisja dwutlenku węgla nie jest jedynym problemem dużych aglomeracji miejskich. Tym problemem jest nadmierny hałas. Jedną z metod redukcji hałasu w aglomeracjach miejskich jest redukcja poziomu hałasu generowanego przez napędy różnego rodzaju pojazdów poruszających się po drogach aglomeracji miejskich. Dlatego analiza wibroakustyczna silników trakcyjnych napędzających różnego rodzaju pojazdy jest koniecznością. Przeprowadzenie prawidłowej analizy wibroakustycznej silnika trakcyjnego jest skomplikowane obliczeniowo, ponieważ istnieje wiele źródeł, które mogą być potencjalnymi przyczynami nadmiernego hałasu silnika. Sam proces analizy wibroakustycznej jest dodatkowo skomplikowany ze względu na szeroki zakres prędkości, w których muszą pracować silniki trakcyjne różnych typów pojazdów. Zastosowanie w tym celu specjalistycznego oprogramowania pozwala znacznie przyspieszyć proces analizy wibroakustycznej, a także ułatwia interpretację wyników oraz modyfikację silnika, które minimalizują ten

hałas. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań modalnych przeprowadzonych w Laboratorium Centrum Maszyn i Napędów Elektrycznych Łukasiewicz - GIT. Oba kadłuby były wykonane do tego samego typu silnika. Kadłub oznaczony na rysunku 8 kolorem niebieskim był kadłubem wykonanym ze zwijanej na następnie spawanej aluminiowej blachy. Kadłub oznaczony kolorem czerwonym był wykonany jako odlew aluminiowy.

W obu kadłubach wykonano układy chłodzenia płynem. Jak łatwo zauważyć kadłuby mają zbliżone częstotliwości drgań własnych jednak kadłub odlewany dużo mocniej wzmacniał wymuszenie (kolor czerwony). Zastosowanie odlewane kadłuba w silniku będzie powodowało znaczący wzrost hałasu silnika w stosunku do kadłuba zwijanego z grubościennej blachy. Hałas będzie się nasilał przy wystąpieniu rezonansu z częstotliwościami sił oddechowych. Częstotliwości modalne obu kadłubów znajdują się w pasmie częstotliwości dużej wrażliwości ucha ludzkiego, w związku z tym nawet niewielki hałas będzie negatywnie odbierany przez ludzi.

hałas. Analiza źródeł hałasu w silnikach trakcyjnych wymaga zbadania wpływu szeregu czynników, które wpływają na poziom hałasu generowanego przez silnik. Jednym z najważniejszych czynników wpływających na hałas i wibracje silnika jest rezonans częstotliwości sił magnetycznych, częstotliwości drgań własnych stojana i kadłuba. Rezonans tych częstotliwości prowadzi do nadmiernego odkształcenia stojana, które są przenoszone na kadłub i emitowane jako hałas akustyczny. Dlatego materiał korpusu powinien być odpowiednio dobrany, ponieważ jako część silnika może za-równo wzmacniać, jak i tłumić hałas pochodzący ze stojana. Jak zostało pokazane w powyższym artykule obliczenia wibroakustyczne silników trakcyjnych, które standardowo pracują w kadłubie bez jego uwzględnienia nie przynosi rezultatów zgodnych z rzeczywistymi. Tylko uwzględnienie rzeczywistego kadłuba w obliczeniach pozwoli poznać hałas silnika zbliżony do rzeczywistego. W przedstawionych badaniach wykazano, że częstotliwości modalne kadłubów wykonanych w różnych technologiach, mogą mieć bardzo różne częstotliwości modalne co może przełożyć się na końcowy poziom hałasu całego napędu trakcyjnego. Bardzo ważne jest, aby mieć świadomość, że w większości wykonywanych obliczeń wibroakustycznych ostateczna weryfikacja każdego rodzaju obliczeń (analitycznych, MES 2D, MES 3D) powinna być przeprowadzona na podstawie testów

laboratoryjnych prototypu silnika i porównania uzyskanych wyników testów z obliczeniami. Takie podejście do analizy wibroakustycznej pozwala na weryfikację oraz modyfikację parametrów obliczeniowych i materiałów tak, aby były one jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych.

Autorzy: mgr. inż. Emil Król, Sieć Badawcza Łukasiewicz Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, E-mail: emil.krol@git.lukasiewicz.gov.pl; dr hab. inż. Marcin Maciążek, prof. PŚ, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Ergoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: marcin.maciazek@polsl.pl.

LITERATURA

- Rossa, R.; Król, E. Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „e-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* 75–80.
- DIRECTIVE (EU) 2019/ 1161 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 20 June 2019 - Amending Directive 2009/ 33/ EC on the Promotion of Clean and Energy-Efficient Road Transport Vehicles. 15.
- Night noise guidelines for Europe; Hurlley, C., World Health Organization, Eds.; World Health Organization Europe: Copenhagen, Denmark, 2009; ISBN 978-92-890-4173-7.
- COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/ 839 - of 7 March 2019 - Amending Regulation (EU) No 540 / 2014 of the European Parliament and of the Council on the Sound Level of Motor Vehicles and of Replacement Silencing Systems. 4.
- Hofmann, A.; Qi, F.; Lange, T.; De Doncker, R.W. The Breathing Mode-Shape 0: Is It the Main Acoustic Issue in the PMSMs of Today's Electric Vehicles? In Proceedings of the 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); IEEE: Hangzhou, China, October 2014; pp. 3067–3073.
- Chen, B.; Wu, J.; Sun, Q.; Wu, H.; Zhang, L. FEA-Based Mathematical Modeling and Simulation for IPMSM Drive with Consideration of Saturation and Cross-Coupling Influence. In Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS); IEEE: Harbin, China, August 2019; pp. 1–5.
- Hwang, Y.-H.; Lee, J. HEV Motor Comparison of IPMSM With Nd Sintered Magnet and Heavy Rare-Earth Free Injection Magnet in the Same Size. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2018**, *28*, 1–5, doi:10.1109/TASC.2018.2807377.
- Król, E.; Wolnik, T. Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych – właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe* **2021**, *Nr 2 (126)*, 146–151.
- Rossa, R. Napęd elektryczny eKit – kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych wybranymi zabiegami konstrukcyjnymi. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe* 153–161.
- Le Besnerais, J. Fast Prediction of Variable-Speed Acoustic Noise Due to Magnetic Forces in Electrical Machines. In Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM); IEEE: Lausanne, Switzerland, September 2016; pp. 2259–2265.
- Devillers, E.; Hecquet, M.; Devillers, E.; Le Besnerais, J. A New Hybrid Method for the Fast Computation of Airgap Flux and Magnetic Forces in IPMSM. In Proceedings of the 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER); IEEE: Monte-Carlo, Monaco, April 2017; pp. 1–8.
- Andersson, A.; Thiringer, T. Electrical Machine Acoustic Noise Reduction Based on Rotor Surface Modifications. In Proceedings of the 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE); IEEE: Milwaukee, WI, USA, September 2016; pp. 1–7.
- Jung, J.-W.; Lee, S.-H.; Lee, G.-H.; Hong, J.-P.; Lee, D.-H.; Kim, K.-N. Reduction Design of Vibration and Noise in IPMSM Type Integrated Starter and Generator for HEV. *IEEE Trans. Magn.* **2010**, *46*, 2454–2457, doi:10.1109/TMAG.2010.2041434.
- Zuo, S.; Lin, F.; Wu, X. Noise Analysis, Calculation, and Reduction of External Rotor Permanent-Magnet Synchronous Motor. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2015**, *62*, 6204–6212, doi:10.1109/TIE.2015.2426135.
- Harries, M.; Woerndle, A.; De Doncker, R.W. Low Vibrations and Improved NVH in Permanent Magnet Synchronous Machines Due to Injection of Flux-Linkage Harmonics. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* **2021**, 1–1, doi:10.1109/JESTPE.2021.3092711.
- Kanematsu, M.; Miyajima, T.; Fujimoto, H.; Hori, Y.; Enomoto, T.; Kondou, M.; Komiya, H.; Yoshimoto, K.; Miyakawa, T. Proposal of 6th Radial Force Control Based on Flux Linkage. In Proceedings of the 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA); IEEE: Hiroshima, Japan, May 2014; pp. 2421–2426.
- Liang, J.; Li, Y.; Mak, C.; Bilgin, B.; Al-Ani, D.; Emadi, A. A Comprehensive Analysis of the Acoustic Noise in an Interior Permanent Magnet Traction Motor. In Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE); IEEE: Baltimore, MD, USA, September 2019; pp. 3845–3851.
- Pellerey, P.; Favennec, G.; Lanfranchi, V.; Friedrich, G. Active Reduction of Electrical Machines Magnetic Noise by the Control of Low Frequency Current Harmonics. In Proceedings of the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society; IEEE: Montreal, QC, Canada, October 2012; pp. 1654–1659.
- Król, E. Metody analizy wibroakustycznej silników z magnesami trwałymi. *ELECTROTECHNICAL REVIEW* **2022**, *1*, 220–225, doi:10.15199/48.2022.11.45.
- Król, E.; Maciążek, M. Identification and Analysis of Noise Sources of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor with Interior Permanent Magnet. *Energies* **2023**, *16*, 6018, doi:10.3390/en16166018.