

Półmostkowy dwuczęstotliwościowy falownik rezonansowy do hartowania indukcyjnego kół zębatach

Streszczenie. W artykule przedstawiono półmostkowy, rezonansowy falownik dwuczęstotliwościowy wykorzystywany powszechnie do hartowania indukcyjnego kół zębatach. Na wstępie pokrótce omówiono problematykę związaną z hartowaniem obwodniowym kół zębatach, następnie zaprezentowano laboratoryjny układ rezonansowy, jednoczesnego falownika dwuczęstotliwościowego (2F) oraz omówiono jego najistotniejsze elementy składowe. W dalszej części artykułu przedstawiono przebiegi czasowe prądu odbiornika i napięcia na tranzystorze T_1 oraz zaprezentowano charakterystykę modułu impedancji $|Z|$ i fazy Θ szeregowo-równoległego obwodu rezonansowego. W końcowej części artykułu zaprezentowano model MES układu wzбудnik-wsad wykonany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D oraz sprzęgnięty z nim model obwodowy przekształtnika rezonansowego wykonany w ANSYS Simplorer. Opracowane modele komputerowe posłużyły do weryfikacji otrzymanych wyników badań oraz do zilustrowania rozkładu pola magnetycznego i prądów wirowych w układzie wzбудnik-wsad.

Abstract. This paper presents a simultaneous dual-frequency inverter used for induction hardening of gears. A prototype inverter was built in a half-bridge structure using two SCH2080KE SiC MOSFETs with a series-parallel resonant circuit. The control system was based on a MAX10 FPGA. The operating frequencies were 8 kHz and 267 kHz. The output power of the prototype was 3 kW and the drain efficiency was equal to 95%. Additionally, this paper presents two co-simulation models made in ANSYS software: a circuit model of the inverter made in Simplorer and a FEM model of coil and gear made in Maxwell 3D. Simulated distributions of eddy currents and magnetic induction in the gear, as well as energy density in a single tooth are presented. (*Simultaneous dual-frequency inverter for induction hardening of gears*)

Słowa kluczowe: rezonans, jednoczesny dwuczęstotliwościowy falownik, hartowanie indukcyjne, koła zębata, analiza MES.

Keywords: resonance, simultaneous dual-frequency inverter, induction hardening, gears, MES analysis, co-simulations.

Wprowadzenie

Wysokie wymagania stawiane elementom stalowym, związane z uzyskaniem określonych właściwości mechanicznych takich jak np. odpowiednia twardość powierzchni, przy niezmiennych kształtach i wymiarach elementu, powodują konieczność stosowania precyzyjnej obróbki cieplnej. Warunkami koniecznymi do uzyskania wymienionych rezultatów są właściwie dobrane parametry obróbki oraz pełna kontrola nad przebiegiem procesu [1]. Przykładami elementów stalowych mogą być np. koła zębata, pręty, rury, blachy, itd., których parametry w procesie obróbki ulegają znaczącym zmianom. Istnieje również potrzeba precyzyjnego hartowania konturowego elementów owalnych np. kół zębatach przy zachowaniu niezmiennych właściwości pozostałej części elementu stalowego.



Rys.1. Typowe koła zębata hartowane indukcyjnie

Od kilkudziesięciu lat stosowana jest w tym celu indukcyjna metoda grzejna, która charakteryzuje się następującymi zaletami - przede wszystkim dużą szybkością nagrzewania i selektywnością obszaru poddawanego obróbce, powtarzalnością procesu zapewniającą stabilność i jakość otrzymanego produktu oraz wysoką sprawnością

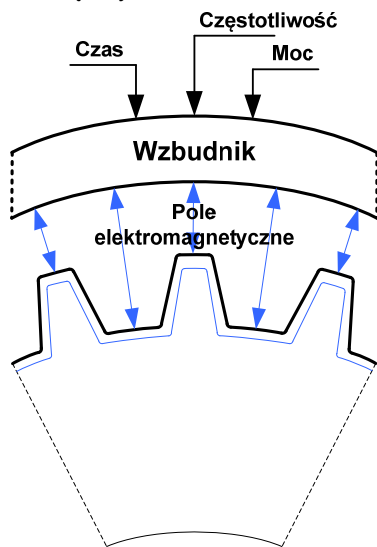
energetyczną mającą niewielki wpływ na środowisko naturalne [1, 2, 3]. Powierzchniowe hartowanie indukcyjne jest zagadnieniem interdyscyplinarnym, gdyż stanowi ono kombinację zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych i metalurgicznych. Wszystkie wymienione zjawiska zachodzą, gdy powierzchnia materiału poddawane obróbce w pierwszym etapie procesu jest nagrzewana powyżej temperatury austenitowania, a następnie w kolejnym etapie gwałtownie schładzana [1, 2, 3]. Potrzeba niezawodnego i precyzyjnego hartowania konturowego elementów owalnych np. kół zębatach o nieregularnym kształcie (rys.1) w bardzo krótkim czasie, spowodowała rozwój przekształtników dwuczęstotliwościowych (ang. *Dual-frequency inverter*) oznaczanych w literaturze jako 2F [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Dwuczęstotliwościowe przekształtniki realizowane są w wielu możliwych konfiguracjach szerzej opisanych m. in. w pracach [2, 3, 7, 8, 9]. W niniejszym artykule przedstawiony zostanie generator do jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego hartowania w strukturze półmostka oznaczany w literaturze skrótem SDF – ang. *Simultaneous Dual Frequency Inverter*. Przekształtniki tego typu charakteryzują się dwiema składowymi prądami wyjściowymi – wysokiej częstotliwości (High-Frequency - HF) i średniej częstotliwości (Medium-Frequency - MF). Częstotliwość HF powinna być odpowiednio od 10 do 30 razy większa od częstotliwości MF.

W dalszej części artykułu przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z dwuczęstotliwościowym hartowaniem kół zębatach, omówiono układ laboratoryjny falownika rezonansowego oraz przedstawiono wyniki symulacji komputerowej wraz z ich weryfikacją laboratoryjną.

Hartowanie dwuczęstotliwościowe kół zębatach - teoria

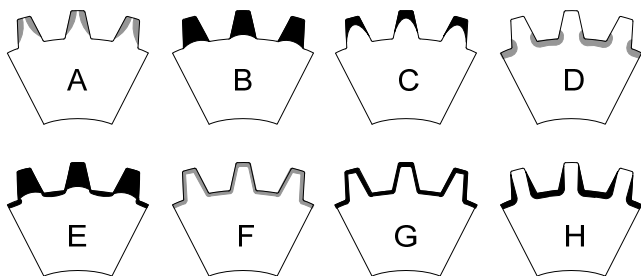
Jak wspomniano na wstępie artykułu, hartowanie indukcyjne jest zagadnieniem interdyscyplinarnym i nie sposób opisać wszystkie zjawiska zachodzące podczas tego procesu. Zasilanie prądem przemiennym układu grzejnego, jakim jest układ wzбудnik-wsad, skutkuje powstaniem w jego otoczeniu zmiennego w czasie pola magnetycznego o tej samej częstotliwości. Powstałe pole

powoduje indukowanie się prądów wirowych we wsadzie, a także w innych przewodzących obiektach, znajdujących się w pobliżu wzbudnika. Częstotliwość prądów wirowych jest równa częstotliwości prądu wzbudnika, ale ich zwroty są przeciwne. Przepływ prądów wirowych wytwarza ciepło Joule'a, a rozkład gęstości prądów w układzie wzbudnik-wsad jest nierównomierny. Nierównomierność ta, pojawia się na skutek występowania charakterystycznych dla nagrzewania indukcyjnego zjawisk elektromagnetycznych, do których zaliczyć należy zjawiska: naskórkowości, zbliżenia, wypierania i zakrzywienia [1, 5, 6]. W przypadku falownika jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego zjawiska te nasilają się, gdyż występują dwie składowe częstotliwości prądu wzbudnika. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony przebieg procesu hartowania indukcyjnego kół zębatych.



Rys.2. Przebieg procesu hartowania indukcyjnego kół zębatych

Ponieważ, dla różnych wartości częstotliwości prądu wzbudnika, głębokość wnikania pola magnetycznego w materiał wsadu może być różna, co zostało przedstawione m. in. w pracach [1, 3, 5], stosuje się dwuczęstotliwościowe celem kontroli tego procesu. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład indukowanych prądów wirowych we wsadzie względem składowych częstotliwości prądu wzbudnika.



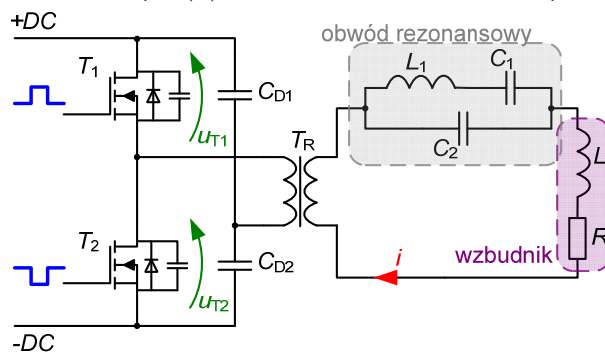
Rys.3. Rozkład indukowanych prądów wirowych we wsadzie względem poszczególnych składowych częstotliwości prądu wzbudnika

Wysoka częstotliwość HF prądu wzbudnika nagrzewa powierzchnie leżące w pobliżu wzbudnika (rys.3a, b, c), czyli powierzchnie boczne i zęby. Średnia częstotliwość MF prądu wzbudnika nagrzewa głębsze obszary (rys.3d, h), głównie wręby i wnętrza kół zębatych. Stosując dwuczęstotliwościowe hartowanie HF+MF można nagrzewać zarówno zęby i wręby (rys.3e), jak również sam kontur kół zębatych (nierównomierny - rys.3f i równomierny - rys.3g).

Proces dwuczęstotliwościowego hartowania może być prowadzony w różny sposób, gdyż czasy włączenia i wyłączenia obydwu częstotliwości, a także ich moce mogą być regulowane. Regulacja tymi parametrami może prowadzić do uzyskania całkowicie różnych profili twardości koła. Dla zahartowania tylko wierzchołków zębów potrzeba wielkiej częstotliwości i dużych gęstości mocy, do hartowania dna wrębów używane są najniższe częstotliwości, przy mniejszych wartościach mocy [1, 3]. Dzięki tej własności zastosowanie powyższej metody hartowania daje zadowalające efekty, zwłaszcza oczekiwany profil twardości przy stosunkowo małych deformacjach koła (rys.3g).

Półmostkowy, dwuczęstotliwościowy falownik rezonansowy

Na rysunku 4 przedstawiono schemat dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego o strukturze półmostka, w którym zastosowano tranzystory MOSFET na bazie węgla-krzemu SiC o oznaczeniach SCH2080KE ($R_{DS(on)}=80\text{ m}\Omega$, $U_{DSS}=1200\text{ V}$, $I_D=40\text{ A}$).

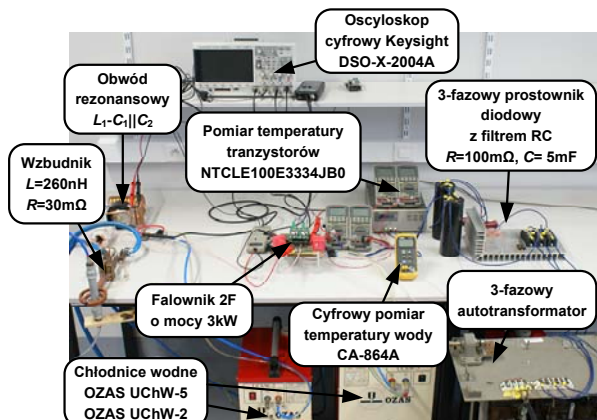


Rys.4. Schemat dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego stosowanego do obwiedniowego hartowania kół zębatych

Energoelektroniczny przekształtnik z rysunku 4 charakteryzuje się mocą znamionową na poziomie 3 kW, a jego obciążenie stanowi dwuczęstotliwościowy, szeregowo-równoległy obwód rezonansowy ($L_1-C_1||C_2$) z transformatorem dopasowującym T_R o przekładni zwojowej 15:1. Transformator ten został nawinięty przewodem wielożyłowym typu lica 630×0,1 mm na czterech toroidalnych rdzeniach proszkowych 3F3. Ponadto, układ falownika zawiera w swej strukturze kondensatorowy dzielnik napięcia (C_{D1} i C_{D2}) o łącznej pojemności 6,8 μF .

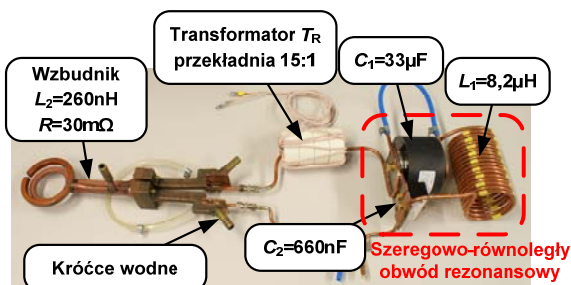
Podczas badań laboratoryjnych falownik został zasilony z 3-fazowego autotransformatora, poprzez prostownik z filtrem pojemnościowym ($R=100\text{ m}\Omega$, $C=5\text{ mF}$). Do prawidłowegoysterowania pary tranzystorów MOSFET SiC użyto cyfrowego, dwuczęstotliwościowego modulatora MSI, który został wykonany na bazie układu FPGA MAX10 o oznaczeniu 10M08DAF256C8GES. Szczegółowy opis realizacji układu sterowania można znaleźć m. in. w literaturze [8]. W trakcie badań laboratoryjnych głębokość modulacji została ustawiona w układzie sterowania i wynosiła $A\approx 0,8$, częstotliwość średnia (modulująca) MF wynosiła $f_{R1}=8\text{ kHz}$, a częstotliwość wysoka (nośna) HF wynosiła $f_{R2}=267\text{ kHz}$. W trakcie wykonywania pomiarów tranzystory MOSFET SiC o oznaczeniu SCH2080KE były umieszczone na radiatorze chłodzonym wodą w obiegu zamkniętym, dodatkowo multimetrem cyfrowym CA-864A wykonywany był bezpośredni pomiar temperatury wody chłodzącej. Temperatura tranzystorów była pośrednio kontrolowana za pomocą termistorów NTCLE100E3334JB0 przyklejonych na obudowach obu tranzystorów klejem strukturalnym typu Loctite. Na rysunku 5 przedstawiono

wygląd stanowiska laboratoryjnego służącego do weryfikacji pomiarowej zasady działania opracowanego falownika.



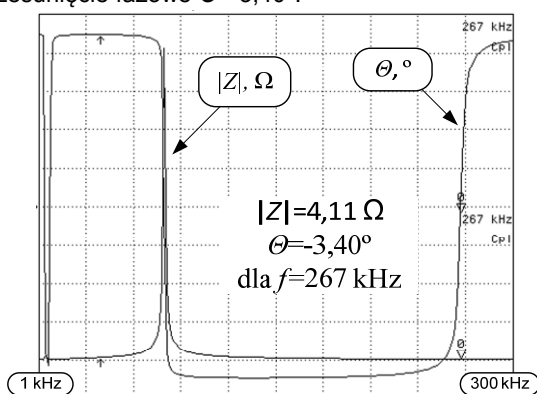
Rys.5. Wygląd stanowiska laboratoryjnego jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego przekształtnika rezonansowego

Rysunek 6 przedstawia wygląd szeregowo-równoległego, dwuczęstotliwościowego obwodu rezonansowego, wraz z opisem poszczególnych elementów.



Rys.6. Wygląd szeregowo-równoległego, dwuczęstotliwościowego obwodu rezonansowego falownika

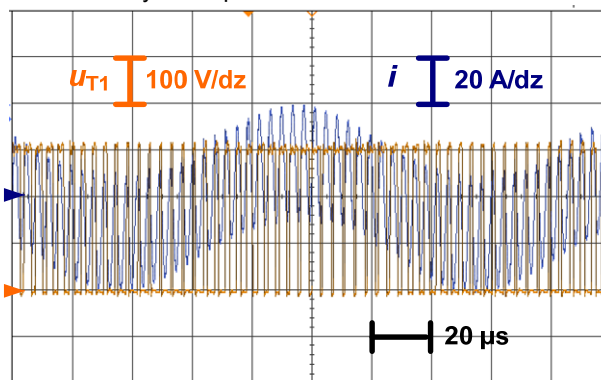
Za pomocą precyzyjnego analizatora impedancji Agilent 4294A wyznaczono na zaciskach strony pierwotnej transformatora T_R moduł impedancji i fazy obwodu rezonansowego z rysunku 6 w funkcji częstotliwości. Dla częstotliwości 267 kHz moduł impedancji $|Z|$ wyniósł 4,11 Ω , a przesunięcie fazowe $\Theta = -3,40^\circ$.



Rys.7. Moduł impedancji i fazy obwodu rezonansowego z rysunku 6 w funkcji częstotliwości

Ponieważ szczegółowe badania prezentowanego falownika zostały szeroko opisane m. in. w literaturze [8, 9], gdzie prezentowane są np. sprawność drenowa, straty mocy w tranzystorach MOSFET SiC lub możliwe typy komutacji, postanowiono na potrzeby niniejszego artykułu przedstawić jedynie przebiegi czasowe dwuczęstotliwościowego prądu odbiornika i zmodulowanego napięcia tranzystora T_1 –

rysunek 8. Należy też wspomnieć, że sprawność drenowa falownika złożonego w oparciu o tranzystory MOSFET SiC SCH2080KE wyniosła ponad 95%.

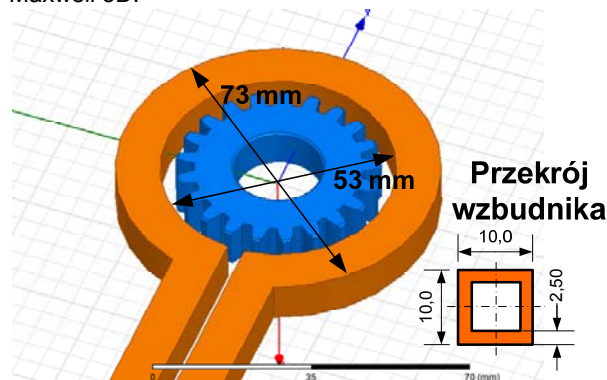


Rys.8. Oscylogram prądu odbiornika i napięcia u_{T1} tranzystora T_1

W dalszej części artykułu przedstawiono model komputerowy MES, który posłużył do zobrazowania wpływu dwuczęstotliwościowego prądu wzбудnika na wsad, którym może być np. koło zębate.

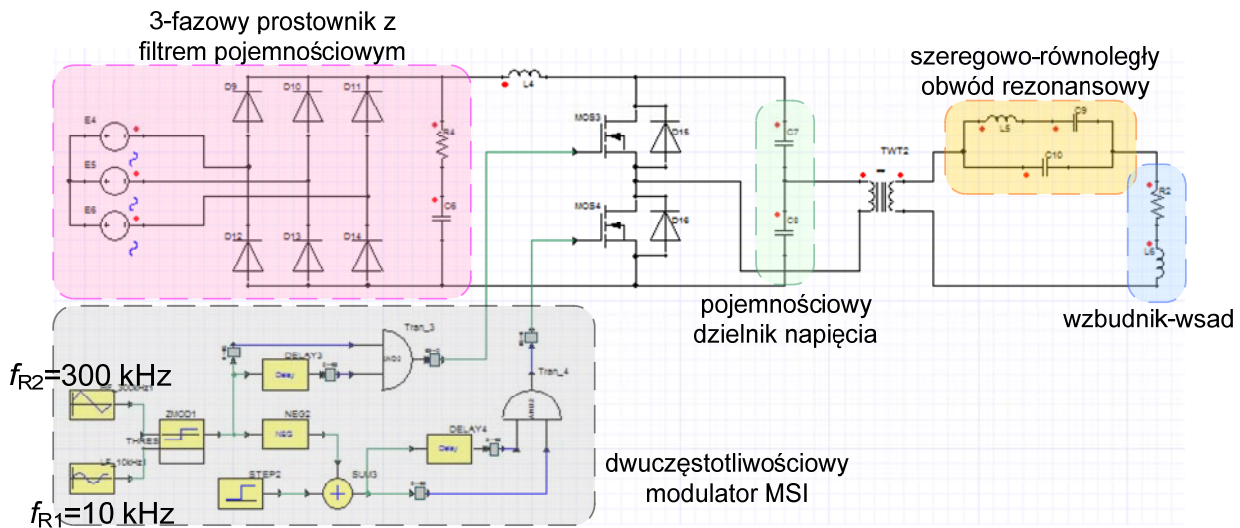
Model MES jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego

W celu zilustrowania wpływu dwuczęstotliwościowego prądu wzбудnika na wsad w postaci np. koła zębatego przeprowadzono symulację MES w oprogramowaniu ANSYS. Rysunek 9 przedstawia model MES układu wzбудnik-wsad wykonany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D.



Rys.9. Model MES układu wzбудnik-wsad dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego

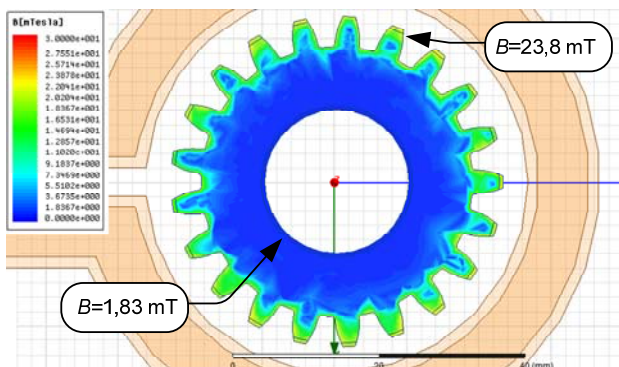
Jak wynika z rysunku 9 średnica zewnętrzna wzбудnika wynosiła 73 mm, średnica wewnętrzna 53 mm, wysokość 10 mm, grubość ścianki 2,5 mm. Wymiary koła zębatego były następujące: średnica zewnętrzna 46 mm, średnica wewnętrzna 21 mm, wysokość 10 mm, liczba zębów 21. Wszystkie parametry materiałowe (miedzi i stali stopowej C45) umożliwiające przeprowadzenie symulacji MES układu wzбудnik-wsad zostały zaczerpnięte z bibliotek programu ANSYS oraz z literatury [1, 2, 5, 10]. Siatka obliczeń została zróżnicowana w zależności od wymiarów i znaczenia elementów składowych modelu. Ponieważ symulacja miała na celu zilustrowanie rozkładu pola magnetycznego i prądów wirowych wsadu, liczba elementów siatki obliczeń była następująca: dla wzбудnika wynosiła ona 30000 elementów, a dla koła zębatego 100000 elementów. Dwuczęstotliwościowy prąd wzбудnika został wymuszony poprzez sprzężenie modelu MES układu wzbudnik-wsad z modelem obwodowym przekształtnika rezonansowego wykonanym w oprogramowaniu ANSYS Simplorer (rys.10).



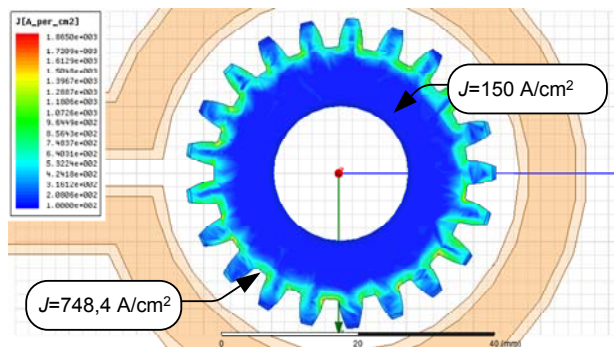
Rys.10. Model obwodowy dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego wykonany w oprogramowaniu ANSYS Simplorer

Jak wynika z rysunku 10, model obwodowy rezonansowego przekształtnika dwuczęstotliwościowego zawierał wszystkie elementy składowe rzeczywistego układu falownika, takie jak: trójfazową sieć zasilającą z prostownikiem diodowym obciążonym filtrem pojemnościowym, pojemnościowy dzielnik napięcia, szeregowo-równoległy obwód rezonansowy, modulator MSI oraz parametry pasożytnicze układu wzbudnik-wsad.

W wyniku symulacji komputerowej sprzężonych modeli MES i obwodowego uzyskano: rozkład indukcji magnetycznej B (rys.11) oraz rozkład gęstości prądu J (rys.12) w płaszczyźnie poziomej koła zębatego.



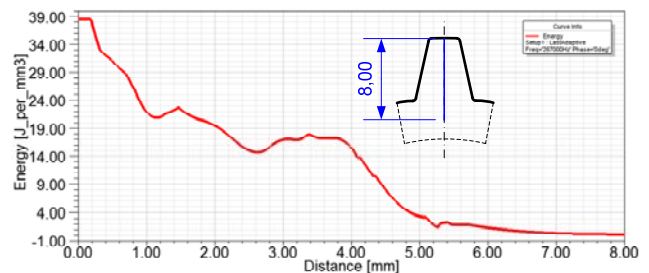
Rys.11. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego dla dwuczęstotliwościowego prądu wzbudnika



Rys.12. Rozkład gęstości prądu J w płaszczyźnie poziomej koła zębatego dla dwuczęstotliwościowego prądu wzbudnika

Dodatkowo, w celu lepszego zobrazowania dwuczęstotliwościowego procesu hartowania pojedynczego

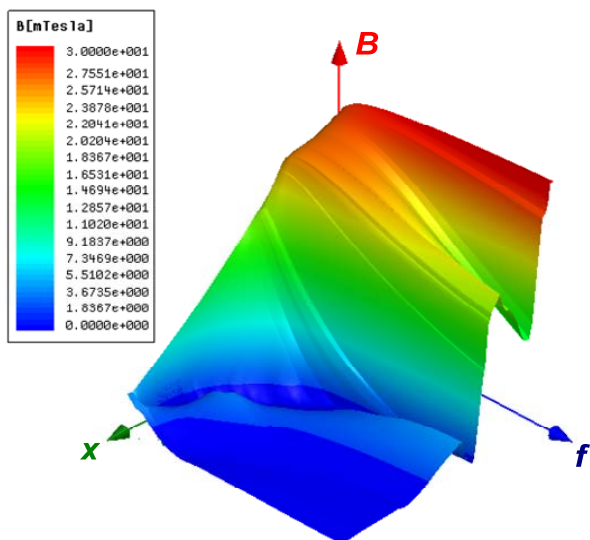
zęba, na rysunku 13 przedstawiono rozkład gęstości energii E w pojedynczym zębie koła w zależności od odległości względem czoła (wierzchołka) zęba.



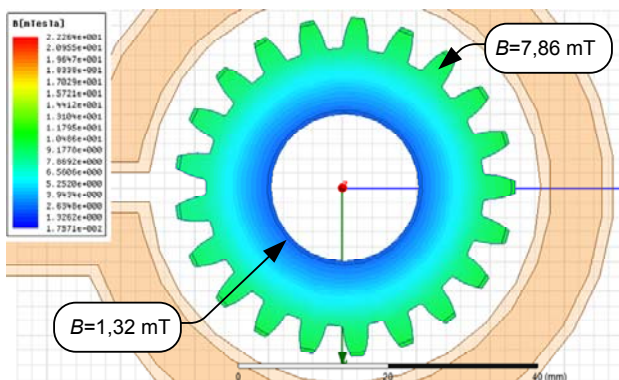
Rys.13. Rozkład gęstości energii E w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba

Analizując rysunek 13 można zauważyć, że największa gęstość energii E występuje na głębokości o ok. 1 mm mniejszej niż promień koła zębatego – średnia gęstość energii wynosi ok. 30 J/mm^3 . Dodatkowo, na tej samej głębokości zauważyć można największe natężenia indukcji magnetycznej B , która wynosi ok. $23,8\text{ mT}$ (rys.11) – dla wartości skutecznej obu składowych prądu odbiornika wynoszącej ok. 300 A . Otrzymana na drodze symulacyjnej wartość indukcji magnetycznej B oraz gęstość energii E może wynikać ze słabego sprzężenia (dużej odległości ok. 5 mm) między wzbudnikiem a wsadem. Analizując rysunek 12 przedstawiający rozkład natężenia prądu J można zauważyć, że największe natężenie prądu występuje w okolicach boków zębów oraz wrębów. Maksymalne natężenie prądu wynosi w tym wypadku ok. 748 A/cm^2 .

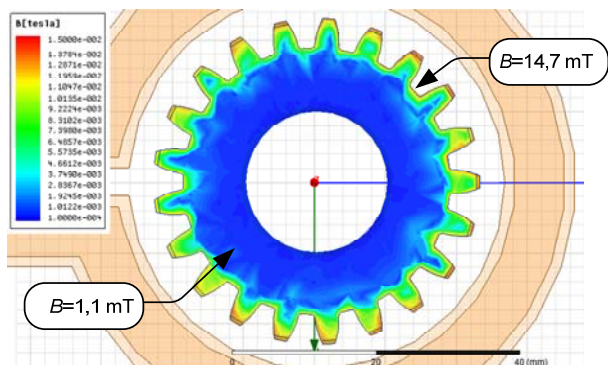
Dodatkowo, na rysunku 14 przedstawiono płaszczyznę rozkładu indukcji magnetycznej B w zależności od częstotliwości f składowej HF prądu wzbudnika i odległości X od średnicy zewnętrznej koła zębatego. Parametry modelu obwodowego, podobnie jak wartość składowej MF częstotliwości prądu wzbudnika były stałe. W celu lepszego zobrazowania wpływu częstotliwości prądu wzbudnika na proces hartowania obwodowego kół zębatego postanowiono przeprowadzić symulację przedstawionego układu wzbudnik-wsad osobno dla każdej z częstotliwości składowych prądu. Na rysunku 15 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej dla składowej MF częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 8 kHz , natomiast na rysunku 16 – dla składowej HF wynoszącej 267 kHz .



Rys.14. Rozkład indukcji magnetycznej B w zależności od częstotliwości HF składowej prądu wzбудnika i odległości od średnicy zewnętrznej koła zębatego



Rys.15. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego dla częstotliwości prądu wzбудnika wynoszącej 8 kHz



Rys.16. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego dla częstotliwości prądu wzбудnika wynoszącej 267 kHz

Z analizy rysunków 15 i 16 wynika fakt, iż wraz ze wzrostem częstotliwości prądu wzбудnika zmienia się rozkład pola magnetycznego w kole zębatym. Dla niskiej częstotliwości pole magnetyczne obejmuje cały wsad i przenika aż do wnętrza koła zębatego (rys.15), co w konsekwencji powoduje równomierne nagrzewanie się całego elementu. W przypadku pracy falownika z wysoką częstotliwością prądu wzбудnika, pole magnetyczne wnika jedynie w niewielki kontur koła zębatego (rys.16). Powoduje to, znaczny wzrost temperatury tylko na obwodni koła, wewnątrz koła pozostaje znacznie chłodniejsze.

Stosując dwuczęstotliwościowe falowniki rezonansowe można dowolnie sterować procesem wnikania pola magnetycznego. Dobierając odpowiednio częstotliwości składowe MF i HF prądu wzбудnika, możliwe jest sterowanie procesem nagrzewania dowolnego elementu o dość złożonym i nieregularnym kształcie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono układ laboratoryjny półmostkowego, dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego zbudowanego w oparciu o tranzystory MOSFET z węgla-krzemu SiC. Prezentowany falownik charakteryzował się mocą znamionową na poziomie 3kW i sprawnością drenową wynoszącą 95%. Ponadto, w artykule przedstawiono sprzężnięte ze sobą dwa modele komputerowe, które posłużyły do weryfikacji zagadnień związanych z procesem dwuczęstotliwościowego hartowania obwiedniowego kół zębatych.

Dalszy etap prac w ramach prezentowanej tematyki będzie polegał na: zwiększeniu mocy skonstruowanego falownika do ok. 10 kW, weryfikacji symulacyjnej i pomiarowej rozkładu temperatury na powierzchni wsadu w postaci koła zębatego, rozszerzeniu modelu komputerowego MES wykonanego w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D o przepływ cieczy chłodzącej wzбудnik.

Autorzy: dr inż. Piotr Legutko, mgr inż. Kamil Kierepka, mgr inż. Piotr Zimoch, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: piotr.legutko@polsl.pl, kamil.kierepka@polsl.pl, piotr.zimoch@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Smalcerz A., Modelowanie zjawisk zachodzących podczas procesu hartowania indukcyjnego kół zębatych, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-341-6, Gliwice 2015
- [2] Candeo A., Ducassy C., Bocher P., Dughiero F., Multiphysics Modeling of Induction Hardening of Ring Gears for the Aerospace Industry, IEEE Transactions on Magnetics 47 (5), 2011, p.918-921
- [3] Davies E.J., Induction Heating handbook, Mc-Graw-Hill, New York 1979
- [4] Kasprzak M., Falowniki rezonansowe klasy D i DE o częstotliwościach pracy do 13,56 MHz, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-037-8, Gliwice 2013
- [5] Bokota A., Parkitny R., Modelowanie zjawisk cieplnych, strukturalnych i mechanicznych procesów hartowania elementów stalowych. Informatyka w technologii metali. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
- [6] Fraczyk A., Jaworski T., Urbanek P., Kucharski J., The design for a smart high frequency generator for induction heating of Leeds, Przegląd Elektrotechniczny nr 90 (2), 2014, p.20-23
- [7] Esteve V., Jordan J., Dede E.J., Sanchis-Kilders E., Maset E., Induction Heating Inverter with Simultaneous Dual-Frequency Output, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2006. APEC '06
- [8] Kierepka K., Szeregowy, dwuczęstotliwościowy falownik do nagrzewania indukcyjnego o strukturze półmostka tranzystorowego SiC MOSFET wraz z kondensatorowym dzielnikiem napięcia, Przegląd Elektrotechniczny
- [9] Kierepka K., Legutko P., Pojedynczy szeregowy dwuczęstotliwościowy falownik jednoczesny do nagrzewania indukcyjnego – problem komutacji nieoptymalnych, Przegląd Elektrotechniczny
- [10] Dobrzański L. A., Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002 r.