

Wpływ koncentratora pola magnetycznego na proces hartowania indukcyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono i omówiono wyniki sprzężonej symulacji modelu obwodowego przekształtnika rezonansowego z modelem MES układu grzejnego wzbudnik-wsad dla kilku wariantów nagrzewania indukcyjnego. Ponadto, przedstawiono wpływ zastosowania w układzie grzejnym wzbudnik-wsad dodatkowego koncentratora pola magnetycznego wykonanego z materiału magnetycznie miękkiego (Fluxtrol LFM). Wsad w postaci koła zębatego został zamodelowany ze stopu stali konstrukcyjnej (C45) używanej powszechnie do produkcji tego typu elementów mechanicznych. Przekształtnik energoelektroniczny o mocy 3 kW został zamodelowany w postaci mostkowego falownika rezonansowego zasilanego z sieci 3×400 V poprzez prostownik z filtrem RC i obciążonego szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym. W wyniku badań symulacyjnych sprzężonych modeli uzyskano rozkłady pola magnetycznego i gęstości energii na powierzchni wsadu, charakterystyki gęstości energii w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba oraz wartości temperatury zarejestrowanej na wierzchołku zęba (w połowie jego wysokości) dla kilku wariantów pracy układu grzejnego i przyjętych w analizie częstotliwości prądu wzbudnika.

Abstract. This paper presents a co-simulation FEM of induction heating of gears. The co-simulation was made in ANSYS software used a circuit model (resonant inverter with MOSFET SiC transistors) and FEM model (coil, magnetic field concentrator and gear). The circuit model was built in a bridge structure of inverter with a series-parallel resonant circuit. The output power of inverter was 3 kW and the drain efficiency was equal to 96%. The co-simulation of models was made for C45 alloy steel of gear, and two type of induction heating of gear (with magnetic field concentrator and without him) at three operating frequency (MF, HF and 2F). Additionally, in this paper presents a distribution of magnetic induction in the gear, energy density in the gear, the characteristics of energy density in a single tooth on the length 8 mm and the temperature of tooth tip for two type of induction heating. (*The influence of a magnetic field concentrator on the induction hardening process*)

Słowa kluczowe: nagrzewanie indukcyjne, analiza MES, koncentrator pola magnetycznego, koła zębate, falownik rezonansowy.

Keywords: induction hardening, FEM analysis, magnetic field concentrator, gears, resonance inverter.

Wprowadzenie

W wielu gałęziach przemysłu wykorzystuje się różnego rodzaju komponenty stalowe rozwiązujące niezliczoną ilość problemów inżynierskich. Jednymi z najczęściej spotykanych elementów mechanicznych są koła i przekładnie zębate. Na rynku istnieje bardzo duża różnorodność kształtów i wielkości tego typu podzespołów wchodzących w skład złożonych konstrukcji pojazdów mechanicznych. Aby spełnić wysokie wymagania jakościowe stawiane tego typu elementom stalowym oraz zapewnić odpowiednią przez twardość powierzchni w procesie hartowania poszukuje się wciąż nowych materiałów konstrukcyjnych i eksperymentuje się z odpowiednim doбором parametrów procesu nagrzewania. Parametry materiałowe stali stopowych z których wykonane są np. koła zębate odpowiadają w głównej mierze za: charakter pracy elementu mechanicznego, jego szybkość obrotową, moc przenoszoną przez element, środowisko pracy np. korozję, wytrzymałość elementu, temperaturę pracy i sposób smarowania [3, 4, 5, 6, 8, 12, 15].

Dobrze przeprowadzony proces nagrzewania bądź hartowania indukcyjnego z pełną kontrolą nad jego przebiegiem tj. z właściwie dobranymi parametrami obróbki, takimi jak np. czas ekspozycji, częstotliwość i wartość skuteczna prądu wzbudnika, pozwala uzyskać pożądane właściwości mechaniczne elementów stalowych [1, 2, 6, 7, 10, 13, 16]. Jak wynika z powyższych informacji, powierzchniowe hartowanie indukcyjne, które odbywa się po zgrubnej i kształtującej obróbce wsadu, jest zagadnieniem złożonym, gdyż stanowi ono kombinację zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych i metalurgicznych.

Ciągły rozwój wielu gałęzi przemysłu wykorzystującego elementy stalowe, potrzeba zapewnienia odpowiedniego przebiegu procesu hartowania oraz rozwój rynku nowych półprzewodników spowodowały w ostatnich latach znaczny wzrost zainteresowania falownikami rezonansowymi zarówno jedno- (MF, HF), jak i dwu-częstotliwościowymi (2F). Dwuczęstotliwościowe przekształtniki realizowane są

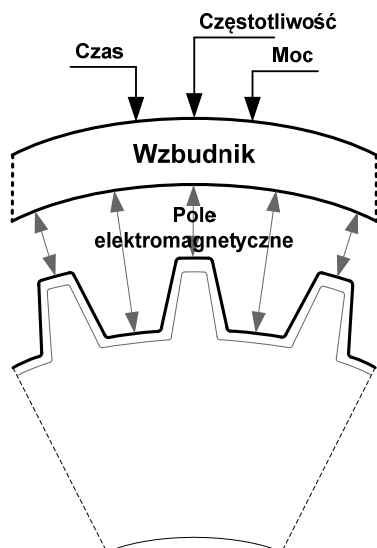
w wielu możliwych konfiguracjach szerzej opisanych m. in. w pracach [11, 12, 13, 16, 17] i wykorzystują w swej strukturze nowe rodzaje półprzewodników. W niniejszym artykule przedstawiony zostanie generator do jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego hartowania w strukturze półmostka oznaczany w literaturze skrótem SDF – ang. *Simultaneous Dual Frequency Inverter*. Przekształtnik tego typu charakteryzuje się dwiema składowymi prądu wyjściowego – 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. Szczegółowy opis modelu tego przekształtnika znaleźć można w dalszej części artykułu lub w literaturze [11, 12, 16, 17].

W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie sprzężony model komputerowy przekształtnika rezonansowego z układem grzejnym wzbudnik-wsad. Model ten posłużył do przedstawienia wpływu koncentratora pola magnetycznego na proces nagrzewania wsadu w postaci np. koła zębatego. W ramach badań symulacyjnych wyznaczone zostaną charakterystyki natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej, gęstości energii i temperatury we wsadzie (wykonanym ze stali stopowej C45) dla kilku wariantów częstotliwości prądu wzbudnika oraz dla układu grzejnego z i bez koncentratora magnetycznego.

Teoria indukcyjnego nagrzewania kół zębatach

Nagrzewanie indukcyjne to proces, który stosuje się do łączenia, utwardzania lub zmiękczenia metali bądź innych materiałów przewodzących. Proces ten, zaliczany jest do złożonych zagadnień interdyscyplinarnych, łączących ze sobą takie dziedziny nauki jak np. fizyka, mechanika i elektrotechnika. Opis uwzględniający wszystkie zjawiska zachodzące podczas procesu nagrzewania indukcyjnego jest dość złożony i trudny do całościowego oszacowania. Proces ten polega na umieszczeniu w układzie grzejnym

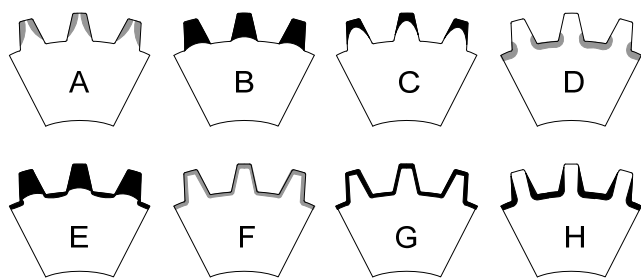
(wzbudniku), zasilanym prądem przemiennym, elementu poddawanego obróbce termicznej (wsadu), w którym pod wpływem zmiennego w czasie pola magnetycznego o tej samej częstotliwości indukują się prądy wirowe. Częstotliwość prądów wirowych wsadu jest równa częstotliwości prądu wzbudnika, ale ich zwroty są przeciwne.



Rys.1. Przebieg procesu nagrzewania indukcyjnego

Przepływ prądów wirowych powoduje wydzielanie się ciepła Joule'a, a rozkład ich gęstości w układzie grzejnym wzbudnik-wsad jest nierównomierny. Nierównomierność ta, związana jest z występowaniem charakterystycznych dla nagrzewania indukcyjnego zjawisk elektromagnetycznych, do których zaliczyć należy zjawiska: naskórkowości, zbliżenia, wypierania i zakrzywienia [1-7, 10, 12, 13, 16].

W celu zapewnienia pełnej kontroli nad przebiegiem procesu nagrzewania indukcyjnego wsadu np. w postaci koła zębatego należy zapewnić odpowiednią wartość mocy układu grzejnego wzbudnik-wsad w jednostce czasu. Dodatkowo, dzięki odpowiednio dobranej częstotliwości prądu wzbudnika można sterować głębokością wnikania pola magnetycznego, która bezpośrednio przekłada się na rozkład prądów wirowych we wsadzie [1-7, 13, 16]. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład indukowanych prądów wirowych w kole zębatym w zależności od częstotliwości prądu wzbudnika.



Rys.2. Rozkład indukowanych prądów wirowych we wsadzie względem poszczególnych składowych częstotliwości prądu wzbudnika

Analizując rysunek 2 można wyróżnić trzy podstawowe metody nagrzewania indukcyjnego ze względu na częstotliwość prądu wzbudnika:

- nagrzewanie wysoką (HF) częstotliwością – powoduje nagrzewanie powierzchni wsadu leżących w bliskiej

odległości od wzbudnika (rys.2a, b, c), czyli powierzchni bocznych i zębów;

- nagrzewanie niską (MF) częstotliwością – powoduje nagrzewanie powierzchni wsadu leżących głębiej (rys.2d, h), nagrzewane są głównie wręby i wnętrza kół zębatych;
- nagrzewanie dwuczęstotliwościowe (MF+HF, 2F) – powoduje nagrzewanie zarówno zębów i wrębów (rys.2e), jak również samego konturu (obwiedni) kół zębatych o profilu nierównomiernym (rys.2f) i równomiernym (rys.2g).

Należy zaznaczyć, że proces dwuczęstotliwościowego nagrzewania może być prowadzony w różny sposób, gdyż czasy włączenia i wyłączenia obydwu częstotliwości, a także ich moce mogą być niezależnie regulowane. Regulacja tymi parametrami może prowadzić do uzyskania całkowicie różnych profili twardości koła. Dla zahartowania tylko wierzchołków zębów potrzeba wielkiej częstotliwości i dużej gęstości mocy, do hartowania dna wrębów używane są najniższe częstotliwości, przy mniejszych wartościach mocy [6, 15]. Dzięki tej własności zastosowanie powyższej metody hartowania daje zadowalające efekty, zwłaszcza oczekiwany profil twardości przy stosunkowo małych deformacjach koła (rys.2g).

Innym sposobem zwiększenia efektywności procesu nagrzewania indukcyjnego, zmniejszenia czasu procesu obróbki cieplnej i zapewnienia kontroli nad wyindukowanym polem magnetycznym jest zastosowanie w układzie grzejnym wzbudnik-wsad dodatkowego elementu w postaci koncentratora pola magnetycznego [1-7, 14, 17, 20]. Koncentratory pola magnetycznego (rys.3) wykonuje się z materiałów magnetycznie miękkich wśród których wyróżnić można np. stopy (żelazowo-niklowe, termokompensacyjne, żelazo-kobaltowe, żelazowo-krzemowe) [1-7, 8, 14, 17, 20].



Rys.3. Przykładowe koncentratory pola magnetycznego [20]

Ponadto, w skład miękkich magnetyków wchodzi sproszkowane materiały magnetyczne i dielektryczne spoiwa, sprasowane pod wysokim ciśnieniem i poddane obróbce termicznej. Zasadniczo koncentratory służą do kształtowania strumienia magnetycznego (koncentracji, ekranowania, modyfikacji) w taki sposób, aby zmienne pole magnetyczne zostało skierowane do żądanej powierzchni elementu poddawanego obróbce (lub jego części) przy niewielkim strumieniu rozproszenia. Materiały magnetycznie miękkie charakteryzują się niskim przewodnictwem elektrycznym, wysoką przenikalnością i niskimi stratami magnetycznymi. Skupienie procesu grzewczego, w zawężonym obszarze dzięki zastosowaniu koncentratorów pola powoduje poprawę pod względem jakości produkcji i wydajności procesu dla obrabianego elementu. Ze względu na właściwości magnetyczne koncentratorów uzyskuje się

zmniejszenie zużycia energii, czego wynikiem jest mniejsza uciążliwość dla środowiska naturalnego.

Podsumowując, proces nagrzewania bądź hartowania indukcyjnego jest bardzo złożony, gdyż występuje w nim szereg zjawisk i zagadnień inżynierjno-technicznych które, jeżeli zostaną poprawnie rozwiązane, przynoszą wymierne korzyści zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne.

Komputerowy model układu grzejnego

W celu zobrazowania najważniejszych właściwości i różnic wynikających z przyjętej metody nagrzewania indukcyjnego wsadu o nieregularnym kształcie stworzono komputerowy model układu grzejnego wzbudnik-wsad, który został sprzęgnięty z modelem obwodowym przekształtnika. Symulacja sprzężona (Co-Symulacja) pełnego modelu została przeprowadzona w oprogramowaniu ANSYS (Twin Builder + Maxwell 3D). Sprzężony model komputerowy składał się z następujących podobwodów:

- modelu obwodowego przekształtnika energoelektronicznego (rys.4)
- modelu układu sterowania (rys.5)
- modelu układu grzejnego wzbudnik-wsad (rys.6).

Rysunek 4 przedstawia model obwodowy przekształtnika energoelektronicznego, który posłużył do zadawania częstotliwości pracy układu i wymuszenia przepływu prądu wzbudnika. Jak wynika z tego rysunku model obwodowy składał się z: trójfazowej sieci zasilającej (3×400 V), 6-pulsowego prostownika diodowego z filtrem RC ($R=100\text{ m}\Omega$, $C=5\text{ mF}$), mostkowego falownika, szeregowo-równoległego obwodu rezonansowego z transformatorem separującym (15:1) i modelem układu wzbudnik-wsad. Energoelektroniczny przekształtnik zamodelowany w oprogramowaniu ANSYS charakteryzował się mocą znamionową na poziomie 3 kW, i został obciążony szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym o parametrach przedstawionych w tabeli 1. Szczegółowy opis zamodelowanego przekształtnika przedstawiany i omawiany był już wcześniej w innych pracach autora niniejszego artykułu takich jak np. [11, 18]. Tranzystory MOSFET falownika z rysunku 4 zostały zamodelowane na podstawie karty katalogowej tranzystorów wykonanych na bazie węgliku-krzemu SiC o oznaczeniu SCH2080KE. Jak podaje producent [19], tranzystory te charakteryzują się rezystancją przewodzenia $R_{DS(on)}$ na poziomie $80\text{ m}\Omega$,

maksymalnym napięciem dren-źródło U_{DSS} na poziomie 1200 V i maksymalną wartością prądu drenu I_D wynoszącą 40 A .

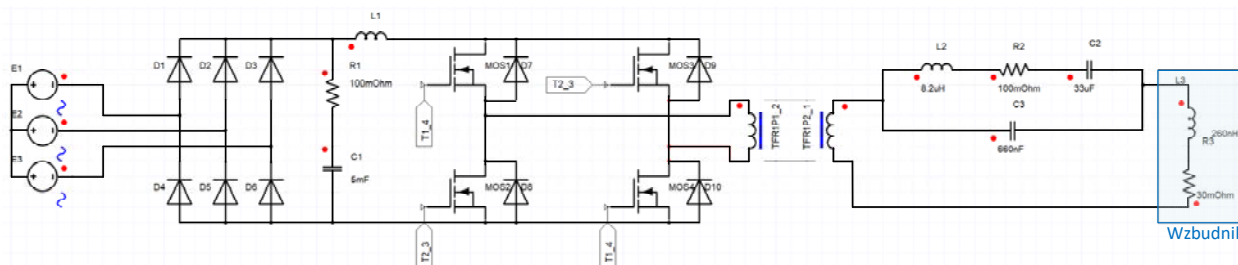
Tabela 1. Zestawienie parametrów wyjściowego obwodu rezonansowego falownika

Parametr	Wartość
L_2	$8,2\text{ }\mu\text{H}$
L_3	260 nH
R_2	$100\text{ m}\Omega$
R_3	$30\text{ m}\Omega$
C_2	$33\text{ }\mu\text{F}$
C_3	660 nF

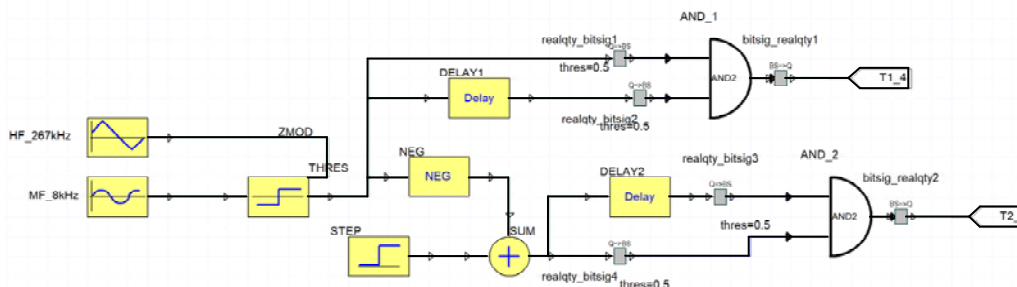
Dodatkowo, na schemacie przekształtnika z rysunku 4 wyróżnić można szybkie diody Schottky'ego, które stanowią wewnętrzną część budowy tranzystora SiC. Za wyborem tego typu tranzystorów MOSFET przemawiały głównie następujące argumenty: niskie straty mocy, szybkie wewnętrzne diody, krótkie czasy przełączeń. Prototyp laboratoryjny oraz wyniki badań tego przekształtnika zostały szczegółowo omówione m. in. w pracach [11, 13].

Ponadto, na rysunku 5 przedstawiono prosty modulator MSI realizujący naturalną lub regularną metodę sterowania tranzystorów MOSFET falownika. Za pomocą tej metody możliwe jest większościowe sterowanie mocą poszczególnych składowych częstotliwościowych prądu wzbudnika. Zmiana głębokości modulacji wpływa na amplitudę składowej niskiej częstotliwości (MF), a zmiana częstotliwości nośnej wpływa na zmianę amplitudy składowej wysokoczęstotliwościowej (HF). Więcej informacji na temat realizacji układu i metody sterowania, jak i możliwych wariantów komutacji w prezentowanym falowniku można znaleźć m. in. w literaturze [7, 9, 11, 12, 13].

Jak wspomniano wcześniej, model obwodowy przekształtnika z rysunków 4 i 5 został sprzęgnięty z modelem MES układu grzejnego wzbudnik-wsad, który został przedstawiony na rysunkach od 6 do 8. Połączenie tych dwóch modeli miało na celu wymuszenie przepływu prądu z obwodu rezonansowego falownika poprzez wzbudnik o określonej częstotliwości. Zabieg ten jest niezbędny do przeprowadzenia złożonej analizy MES układu wzbudnik-wsad w oprogramowaniu Maxwell 3D.

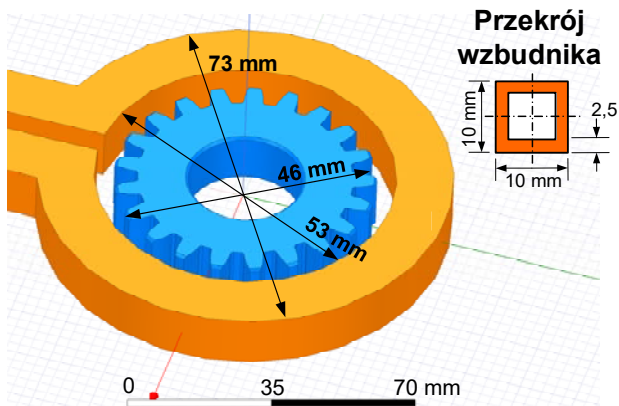


Rys.4. Model obwodowy przekształtnika wykonany w oprogramowaniu ANSYS Twin Builder

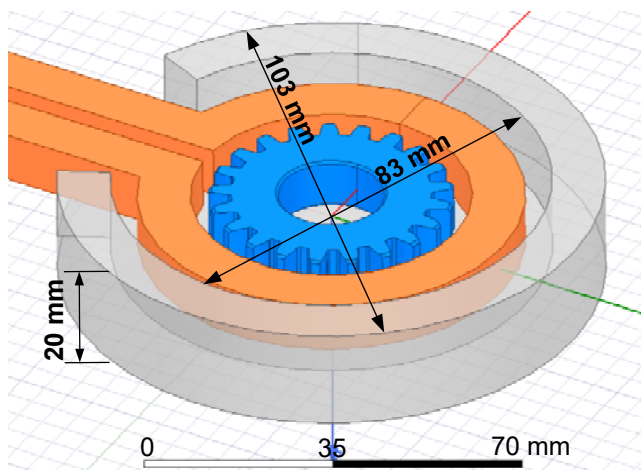


Rys.5. Model prostego modulatora MSI

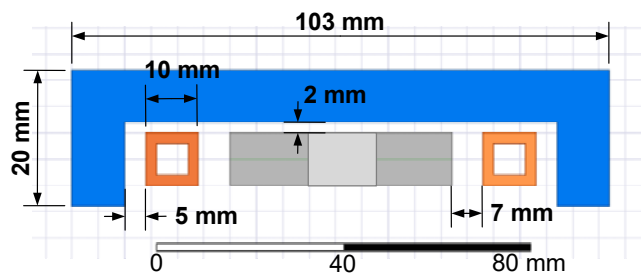
Parametry materiałowe modelu MES z rysunków 6 - 8 zostały zaczerpnięte z bibliotek programu ANSYS oraz z literatury [1-8, 12, 13, 16, 17].



Rys.6. Model MES układu wzbudnik-wsad wykonany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 3D



Rys.7. Model MES układu grzejnego wraz z koncentratorem (widok od spodu)



Rys.8. Model MES układu grzejnego wraz z koncentratorem (przekrój 2D)

Tabela 2. Zestawienie parametrów materiałowych stali C45

Parametr	Stop stali
	C45
ρ , Ωm	$16 \cdot 10^{-6}$
λ , W/mK	49
μ , H/m	600
α_K	15
ε	0,7

gdzie:

ρ – rezystywność, λ – przewodność cieplna, μ - przenikalność magnetyczna, α_K – współczynnik konwekcji, ε - emisyjność

Aby uzyskać zadowalającą dokładność obliczeń postanowiono wygenerować i zagęścić siatkę obliczeń w

postaci czworościanów foremnych. Liczba elementów siatki była zróżnicowana i wynosiła: dla koła zębatego 1 500 000 elementów, dla wzbudnika 500 000 elementów, a dla koncentratora 1 000 000 elementów. Badania symulacyjne zostały wykonane na sprzęcie komputerowym o parametrach: procesor Intel(R) Xeon(R) E-2276M, pamięć RAM 128GB, karty graficzne: zintegrowana Intel(R) Graphics 630 i NVIDIA Quadro RTX 5000, dwa dyski SSD Samsung 1TB 970EVO Plus. Czas symulacji dla podanych parametrów siatki wyniósł ok. 30 minut.

Tabela 3. Parametry materiałowe koncentratora pola Fluxtrol LFM

Parametr	Jednostka	Wartość
Użyteczny zakres częstotliwości	kHz	10 - 500
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \perp}$	-	63
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \perp}$	-	120
Przenikalność początkowa $\mu_{ri \parallel}$	-	63
Przenikalność maksymalna $\mu_{r \max \parallel}$	-	120
Indukcja nasycenia B_S	T	1,6
Rezystywność ρ	Ωm	5
Przewodność cieplna $K \perp$	W/mK	27
Przewodność cieplna $K \parallel$	W/mK	27
Gęstość	g/cm^3	6,6

Sprzężona symulacja komputerowa została przeprowadzona dla następujących warunków:

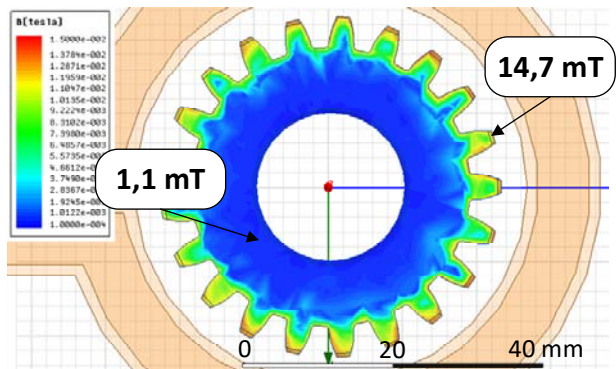
- Wsad w postaci koła zębatego: średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm (rys. 6).
- Wsad w całości wykonany ze stali stopowej C45, której parametry zestawiono w tabeli 2.
- Analizowane były dwa rodzaje nagrzewania indukcyjnego dla trzech częstotliwości prądu wzbudnika:
 - z zastosowaniem dodatkowego koncentratora pola magnetycznego na wzbudniku,
 - bez dodatkowego koncentratora pola magnetycznego (sam wzbudnik).
- Częstotliwości prądu wzbudnika:
 - niska (MF) wynosząca 30 kHz,
 - wysoka (HF) wynosząca 300 kHz,
 - jednoczesna, dwuczęstotliwościowa (2F=MF+HF).
- Falownik zasilony był z trójfazowej sieci o napięciu znamionowym 3×400 V.
- Moc wyjściowa falownika na poziomie 3 kW.
- Tranzystory MOSFET użyte w modelu zostały zamodelowane zgodnie z danymi katalogowymi [19] tranzystorów o oznaczeniu SCH2080KE.
- Wartości indukcyjności L_3 i rezystancji R_3 zostały wyznaczone laboratoryjnie i odpowiadają parametrom pasożytniczym miedzianego wzbudnika o wymiarach przedstawionych na rysunkach 6-8.
- Koncentrator pola magnetycznego w całości wykonany z materiału Fluxtrol LFM o parametrach zestawionych w tabeli 3 i wymiarach przedstawionych na rysunkach 7 i 8.

Wyniki sprzężonej symulacji MES

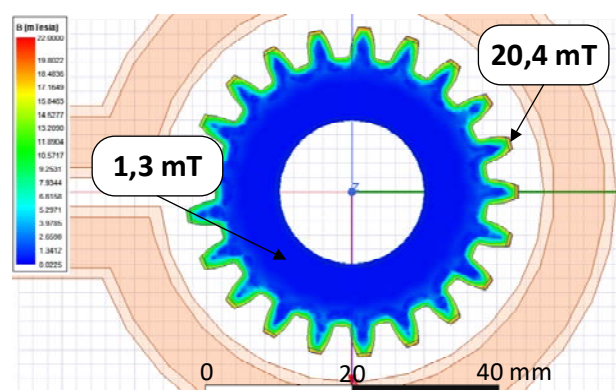
Zaprezentowany model komputerowy został przesyłowany, jak wspomniano wcześniej, dla wsadu w postaci koła zębatego (średnica 46 mm, liczba zębów 21, wysokość zęba 4,2 mm) wykonanego ze stopu C45 stali konstrukcyjnej (tabela 2) dla dwóch trybów pracy: z dodatkowym koncentratorem pola magnetycznego i bez niego. Dla każdego z trybów pracy układu grzejnego przeprowadzono analizę MES uwzględniającą: rozkład indukcji magnetycznej B , rozkład gęstości prądu J w płaszczyźnie poziomej, rozkład gęstości energii E w płaszczyźnie poziomej i poprzecznej pojedynczego zęba

oraz rozkład temperatury T w płaszczyźnie poziomej i poprzecznej pojedynczego zęba. Każdy przypadek podlegał analizie dla trzech częstotliwości prądu wzбудnika (MF, HF, 2F).

Na rysunkach od 9 do 14 przedstawiono wybrane wyniki symulacji sprężonej MES uwzględniającej model obwodowy przekształtnika i model 3D układu grzejnego wzбудnik-wsad.



Rys.9. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego wykonanego ze stali C45 dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny bez koncentratora pola)



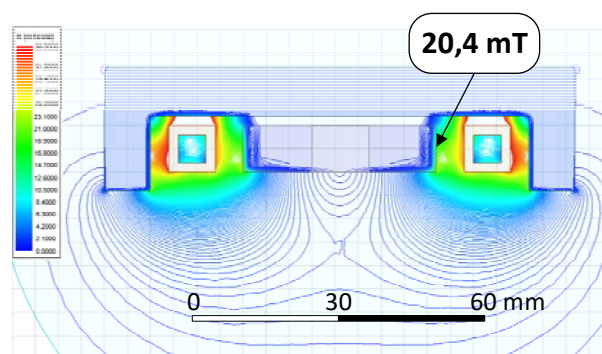
Rys.10. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej koła zębatego wykonanego ze stali C45 dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny z koncentratorom pola)

Analizując rozkłady indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poziomej nagrzewanego wsadu w postaci koła zębatego (rys.9 i 10) można zauważyć, że dla układu grzejnego bez koncentratora pola magnetycznego pracującego z częstotliwością 300 kHz największe wartości indukcji występują w obrębie całych zębów i nie przekraczają one wartości 14,7 mT. Taki stan pracy układu grzejnego wzbudnik-wsad może skutkować nadmiernym wzrostem temperatury w obrębie zębów koła (tzw. wygrzaniem), co w konsekwencji może doprowadzić do znacznego osłabienia struktury materiałowej elementu poddawanego długotrwałym działaniom sił i naprężeń mechanicznych. Oczywiście należy zaznaczyć, że w przypadku nagrzewania indukcyjnego niezwykle ważny jest również czas ekspozycji nagrzewanego elementu na działanie określonej częstotliwości prądu wzbudnika, który w analizowanych przypadkach nie był rozpatrywany.

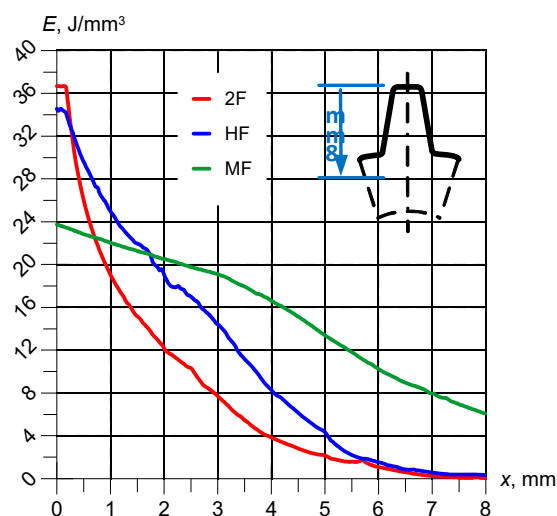
W przypadku zastosowania dodatkowego koncentratora pola magnetycznego w układzie grzejnym wzbudnik-wsad (rys.10) zmienia się rozkład indukcji magnetycznej w płaszczyźnie poziomej koła zębatego. W tym przypadku ma on charakter obwiedniowy – największe wartości indukcji B

występują na wierzchołkach zębów i we wrębach. Wartość indukcji magnetycznej w przypadku zastosowania dodatkowego koncentratora wzrasta do wartości 20,4 mT.

Aby lepiej zobrazować działanie i wpływ koncentratora pola na układ grzejny na rysunku 11 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej w płaszczyźnie poprzecznej modelu. Analizując powyższy rysunek można zauważyć, że największa wartość indukcji magnetycznej w układzie grzejnym wzbudnik-wsad w przypadku zastosowania koncentratora pola magnetycznego występuje pomiędzy wzbudnikiem a koncentratorem. Efekt ten związany jest ze skupieniem, nagromadzeniem i wypieraniem przez materiał koncentratora pola magnetycznego wyindukowanego przez wzbudnik na skutek przepływającego prądu. Dolna część układu grzejnego nie objęta koncentratorem charakteryzuje się naturalnym i zgodnym z teorią układem linii pola magnetycznego rozpraszanego w powietrzu.



Rys.11. Rozkład indukcji magnetycznej B w płaszczyźnie poprzecznej modelu grzejnego dla częstotliwości prądu wzbudnika wynoszącej 300 kHz (układ grzejny z koncentratorom pola)

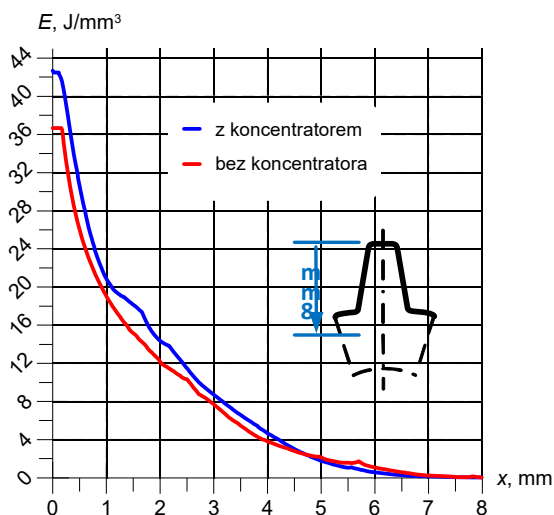


Rys.12. Charakterystyki rozkładu gęstości energii E w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba wykonanego ze stali C45 dla trzech częstotliwości prądu wzbudnika (układ grzejny bez koncentratora)

W kolejnym kroku symulacji MES wyznaczono charakterystyki gęstości energii E (rys.12) dla trzech podstawowych metod nagrzewania indukcyjnego. Charakterystyki te zostały wyznaczone w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba w funkcji odległości od jego wierzchołka. Analizując rysunek 12 można zauważyć, że dla układu grzejnego złożonego tylko z miedzianego wzbudnika i wsadu np. w postaci koła zębatego rozkład gęstości energii zmienia się w zależności od częstotliwości

prądu wzбудnika – co jest zgodne z teorią przedstawioną na wstępie niniejszego artykułu.

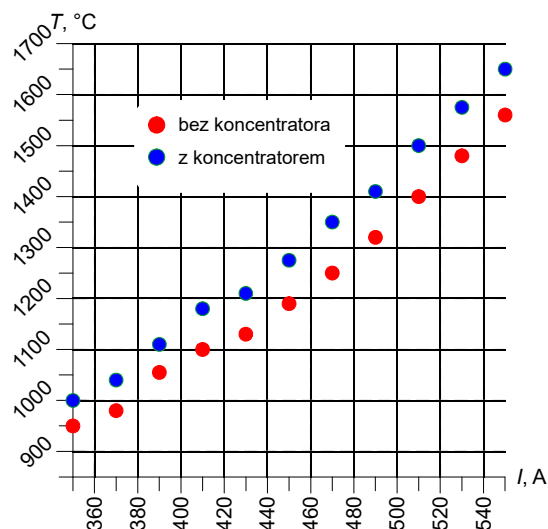
W przypadku nagrzewania wsadu niską (MF) częstotliwością maksymalna wartość gęstości energii występuje na wierzchołku zęba i wynosi ok. 24 J/mm^3 . Wraz ze wzrostem odległości w kierunku środka koła zębatego gęstość energii maleje do wartości ok. $6,5 \text{ J/mm}^3$, co daje średnią gęstość energii w tym obszarze (8 mm) na poziomie ok. 15 J/mm^3 . Dla przypadku nagrzewania wsadu wysoką (HF) częstotliwością uzyskujemy obwiedniowy rozkład gęstości energii o maksymalnej wartości (na wierzchołku zęba) wynoszącej ok. 33 J/mm^3 . Wraz ze wzrostem odległości w kierunku środka koła zębatego gęstość energii maleje do wartości ok. $1,5 \text{ J/mm}^3$, co daje średnią gęstość energii w całym rozpatrywanym obszarze na poziomie ok. 17 J/mm^3 . W przypadku dwuczęstotliwościowej metody nagrzewania indukcyjnego (2F) obwiedniowy kontur gęstości energii jest jeszcze bardziej widoczny, gdyż zwiększa się zjawisko wypierania prądów wirowych generowanych we wsadzie. Maksymalna wartość energii wynosi w tym przypadku ok. 37 J/mm^3 . Charakterystyka rozkładu gęstości energii z rysunku 12 dla tej metody nagrzewania ma charakter funkcji wykładniczej.



Rys. 13. Charakterystyki rozkładu gęstości energii E w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba wykonanego ze stali C45 dla dwóch trybów pracy i częstotliwości nagrzewania 2F

Wpływ koncentratora pola magnetycznego na charakterystyki gęstości energii przedstawiono na rysunku 13. W celu poprawy czytelności charakterystyki na rysunku 13 przedstawiono porównanie jedynie dla nagrzewania dwuczęstotliwościowego (2F). Analizując rysunek 13 można zauważyć, że wpływ zastosowania w układzie grzejnym koncentratora pola magnetycznego zauważalny jest na długości o ok. 5 mm mniejszej, niż promień koła zębatego (liczonej od czoła zęba). Średni wzrost energii w rozpatrywanym obszarze wynosi ok. $4,5 \text{ J/mm}^3$. Dalszy wzrost długości liczonej od czoła zęba ($x > 5 \text{ mm}$) skutkuje zanikiem różnic w zastosowaniu w układzie grzejnym koncentratora – jego wpływ jest niezauważalny, a różnica w gęstości energii jest bliska zero. Należy zaznaczyć, że duży wpływ na taki stan rzeczy ma stosunek częstotliwości pracy układu (HF i MF), współczynnik głębokości modulacji (w tym przypadku 0,8) oraz odległości między wzбудnikiem a wsadem i koncentratorom (rys.8). Dla pozostałych dwóch przypadków nagrzewania wsadu z niską (MF) i wysoką (HF) częstotliwością wpływ koncentratora pola będzie widoczny w całym rozpatrywanym obszarze [1-7, 12, 13, 16].

W ostatnim kroku badań symulacyjnych prezentowanych w niniejszym artykule wykreślono charakterystyki temperatury rejestrowanej na wierzchołku zęba w funkcji natężenia prądu wzbudnika (rys.14) przy zachowaniu stałej częstotliwości (HF).



Rys.14. Wykres zmian temperatury na wierzchołku zęba wykonanego ze stali C45 w funkcji natężenia prądu wzbudnika dla dwóch trybów pracy i częstotliwości nagrzewania 300 kHz

Analizując zbiorcze dane indukcji magnetycznej B , gęstości energii E i temperatury T zarejestrowane na wierzchołku pojedynczego zęba można zauważyć, że stosując dwuczęstotliwościową (2F) lub jednoczęstotliwościową (HF) metodę nagrzewania wsadu z zastosowaniem koncentratora pola magnetycznego można osiągnąć znacznie wyższe wartości tych wielkości. Dodatkowo dobierając odpowiednio stop stali konstrukcyjnej nagrzewanego elementu charakteryzujący się np. większą zawartością węgla, chromu lub molibdenu można też wpływać na wartości tych wielkości co zostało wykazane m. in. w pracy [4, 5, 6, 12, 16]. Dodatkowo, stosując koncentratory pola magnetycznego można sterować procesem wnikanía pola magnetycznego w nagrzewany element np. o dość złożonym i nieregularnym kształcie, jak również o dowolnym składzie chemicznym.

Ponadto, zastosowanie koncentratora pola pozwala przyspieszyć proces nagrzewania, zwiększyć jego efektywność energetyczną oraz zmniejszyć koszty zużycia energii elektrycznej.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań (indukcji magnetycznej B , rozkład gęstości energii E i wartości temperatury T), które w głównej mierze zostały otrzymane na drodze sprzężonej symulacji modelu obwodowego i modelu MES mogą być obarczone pewnymi niedokładnościami wynikającymi z:

- słabego sprzężenia między wzбудnikiem a wsadem (odległość ok. 4 mm);
- błędów modelowania, gdyż model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości;
- błędów wartości współczynników równań różniczkowych – przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych jak i warunków brzegowych np. dane materiałowe obarczone są błędem;
- błędów zaokrągleń, czyli błędów wynikającego z wielokrotności przybliżeń powtarzanych wartości modelu.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono komputerowy model mostkowego falownika rezonansowego zbudowanego w

oparciu o tranzystory SiC MOSFET. Prezentowany model obwodowy falownika charakteryzował się mocą znamionową na poziomie 3 kW i został sprzęgnięty z modelem 3D układu grzejnego w postaci wzbudnika i wsadu. W wyniku sprzężonej symulacji MES wykonanej w oprogramowaniu ANSYS uzyskano rozkłady indukcji magnetycznej B oraz gęstości energii E dla wsadu w postaci koła zębatego o średnicy 46 mm wykonanego z typowej stali stopowej C45 dla dwóch rodzajów nagrzewania indukcyjnego – z zastosowaniem koncentratora pola magnetycznego i bez jego zastosowania. Dodatkowo, w wyniku co-symulacji uzyskano charakterystyki zmian rozkładu gęstości energii (rys.12 i 13) w płaszczyźnie poprzecznej pojedynczego zęba oraz zmian temperatury na wierzchołku zęba w funkcji natężenia przepływającego prądu (rys.14).

Przedstawione w niniejszym artykule badania symulacyjne stanowią kontynuację podjętej tematyki badawczej i uzupełnienie wcześniejszych badań laboratoryjnych, które potwierdziły przydatność i możliwość szerokiego zastosowania falowników rezonansowych w nagrzewaniu indukcyjnym.

Autor: dr inż. Piotr Legutko, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: piotr.legutko@polsl.pl,

LITERATURA

- [1] Balabozov I., Brauer H., Yatchev I., "Modelling of magnetic concentrators in induction heating systems," 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017, pp. 453-456,
- [2] Baldan M., Cetin M., Nikanorov A., Nacke B., "Optimal Design of Magnetic Flux Concentrators in Induction Heating," 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), 2019, pp. 203-207,
- [3] Barglik J., Nagrzewanie indukcyjne wsadów płaskich w polu poprzecznym. Symulacja komputerowa i weryfikacja doświadczalna. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo z.65, Gliwice 2002
- [4] Barglik J., Induction hardening of steel elements with complex shapes, Przegląd Elektrotechniczny nr 4/2018, ISSN: 0033-2097, str.51-54
- [5] Barglik, J., Smalcerz, A.: Influence of the magnetic permeability on modeling of induction surface hardening, COMPEL, 2017, 36, (2), pp. 555–564
- [6] Bokota A., Parkitny R., Modelowanie zjawisk cieplnych, strukturalnych i mechanicznych procesów hartowania elementów stalowych. Informatyka w technologii metali. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
- [7] Davies E.J., Induction Heating handbook, Mc-Graw-Hill, New York 1979
- [8] Dobrzański L. A., Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002 r.
- [9] Frączyk 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, ISSN: 0033-2097, p.20-23
- [10] 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
- [11] Kierepka K., Legutko P., Szeregowy, dwuczęstotliwościowy falownik do nagrzewania indukcyjnego z pojedynczym mostkiem tranzystorowym typu H - problemy komutacji nieoptymalnych, Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2018, ISSN: 0033-2097, str.169-172
- [12] Legutko P., Wpływ parametrów materiałowych stali stosowanych w produkcji kół zębatach na proces hartowania indukcyjnego, Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2021, ISSN: 0033-2097, str.20-27
- [13] Legutko P., Symulacje MES procesu nagrzewania koła zębatego dla jednoczesnego, dwuczęstotliwościowego falownika rezonansowego, Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2020, ISSN: 0033-2097, str.1-8
- [14] Maikut S., Bashkatov Y., Tsybulsky L., Kuzmichev A., Simulation of induction evaporator with magnetic field concentrator, 2014 International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO), 2014, pp. 1-4,
- [15] Skoć A., Świtoński E., Przekładnie zębata. Zasada działania. Obliczenia geometryczne i wytrzymałościowe., Wydawnictwo Naukowe PWN 2016r., ISBN: 9788301189006
- [16] Smalcerz A., Modelowanie zjawisk zachodzących podczas procesu hartowania indukcyjnego kół zębatach, Monografia Habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN 978-83-7880-341-6, Gliwice 2015
- [17] Zhu T., Feng P., Li X., Li F., Rong Y., The Study of the Effect of Magnetic Flux Concentrator to the Induction Heating System Using Coupled Electromagnetic-Thermal Simulation Model, 2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering, 2013, pp. 123-127,
- [18] Zimoch P., Legutko P., Kierepka K., Kasprzak M., Dual-frequency Induction Heating for Gear Hardening: Converter, Resonant Circuit and FEM Modelling, IET Power Electronics, 11/2018, ISBN 1755-4535, str. 2396-2402,
- [19] Dokumentacja techniczna tranzystora SCH2080KE dostępna pod adresem: www.rohm.com
- [20] Dokumentacja techniczna koncentratorów pola magnetycznego dostępna pod adresem: www.fluxtrol.com