

Stanowisko do badania wybranych materiałów konstrukcyjnych tłumiących pola magnetyczne niskich częstotliwości

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję i realizację praktyczną stanowiska do badania skuteczności tłumienia pola magnetycznego niskich częstotliwości przez wybrane materiały i struktury. Opisano najistotniejsze elementy składowe proponowanego rozwiązania tj. zadajnik pola i separującą osłonę pomiarową oraz zaproponowano metodę prowadzenia badań weryfikacyjnych. W procesie projektowania stanowiska wykorzystano autorski model numeryczny konstrukcji. Porównano wyniki badań weryfikacyjnych z wynikami eksperymentu numerycznego.

Abstract. The article presents the concept and practical implementation of a test stand for testing the effectiveness of low-frequency magnetic field attenuation by selected materials and structures. The most essential components of the proposed solution, i.e. the field source transmitter and the shielded measuring chamber, are described, and the method of verification tests is proposed. In the process of designing the stand, the author's numerical model of the structure was used. The results of the verification tests were compared with the results of the numerical experiment (**Test stand for selected structural materials suppressing low-frequency magnetic fields**).

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne niskich częstotliwości, ekranowanie pola magnetycznego, magnetyczna skuteczność ekranowania, osłony magnetyczne

Keywords: low frequency electromagnetic field, magnetic field shielding, magnetic shielding effectiveness, magic shields

Wstęp

Tematyka emisji pól elektromagnetycznych, powstających w wyniku technicznej działalności człowieka, do środowiska jest podejmowana od wielu dekad. Problemem jest zarówno ograniczenie emisji jak również opracowanie urządzeń odpornych na takie pola pochodzące od czynników zewnętrznych. Zagadnienia z tymi procesami zwykle się określać mianem kompatybilności elektromagnetycznej (ang. electromagnetic compatibility - EMC). Aktualnie przyjmuje się, że zjawiska te rozpoznane są w stopniu pozwalającym dość skutecznie ograniczać ich negatywne oddziaływania. Służą temu dokumenty i normy o zasięgu międzynarodowym. Ustawodawstwo to podlega permanentnym zmianom i uściśleniom. Sam fakt zidentyfikowania obecności zmiennego w czasie pola elektromagnetycznego niestety nie skutkuje automatycznie wskazaniem metody jego ograniczenia lub eliminacji. Autorzy niniejszej pracy zwrócili szczególną uwagę na składową magnetyczną o niskich częstotliwościach wspomnianego pola.

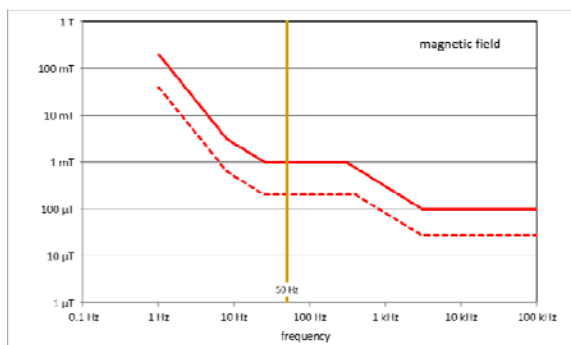
Jednym z częściej przywoływanych standardów jest norma PN-EN 55015:2019 w zakresie sprzętu oświetleniowego [1], która w punkcie 4.5.4 określa zasady pomiaru pól magnetycznych emitowanych przez urządzenia oświetleniowe w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz za pomocą systemu dużych anten magnetycznych (ang. LLAS – large loop-antenna system). Kolejnym dokumentem określającym metodę pomiarów emisji zaburzeń jest norma kolejowa PN-EN 50121-3-1:2010 [2]. Przywołany standard skupia się na pomiarze emisji zaburzeń promieniowanych pola magnetycznego z całego zespołu trakcyjnego podczas jazdy i dotyczy zakresu częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz, precyzując w punkcie 6.3.3 dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń. Proponowaną metodą pomiaru, opisaną szczegółowo w punkcie 5.6 części PN-EN 50121-2 [3], jest użycie pętlowej anteny magnetycznej ustawionej w określonej przez normę odległości pomiarowej 10 m. Norma dopuszcza również pomiary z odległości 1 m, 3 m, 10 m i 30 m w zależności od gabarytu mierzonego obiektu i środowiska pomiarowego. Najnowsza wersja normy PN-EN 50121-3-1:2017 [4] zawęża zakres częstotliwości

miarowych emisji pól magnetycznych do zakresu od 150 kHz do 30 MHz zupełnie pomijając zakres od 9 kHz do 150 kHz. Ten ostatni przedział częstotliwości, jest szczególnie istotny przy budowie i eksploatacji napędów stosowanych w taborze kolejowym. Zjawiska emisji pól magnetycznych przez urządzenia gospodarstwa domowego zostały zauważone i opisane przez normę PN-EN 55014-1:2017 [5], jednak wymaganiem pomiaru zostały objęte w zasadzie tylko kuchenki indukcyjne.

Powszechnie obowiązujące regulacje prawne w dokumentach międzynarodowych, odnoszące się do wspomnianego problemu, dzielą środowisko na dwie kategorie: środowisko naturalne (ang. residential lub general public) i środowisko zawodowe inaczej środowisko pracy (ang. occupational). Granica pomiędzy tymi środowiskami jest relatywnie trudna do określenia. Konsekwencją takiego podziału jest wyznaczenie odmiennych, co do wartości dopuszczalnych, natężeń pola magnetycznego dla każdej z kategorii obszarów [6, 7].

Wspomniane normy EMC niestety odnoszą się do zjawisk o częstotliwościach powyżej 9 kHz. Doświadczenia zawodowe autorów (regularne zapytania ze strony rynku odbiorców) wskazują na zapotrzebowanie ograniczania pól elektromagnetycznych niskich częstotliwości tj. poniżej wspomnianych 9 kHz. Zapytania dotyczą z jednej strony ograniczenia emisji pól elektromagnetycznych do środowiska przez pracujące urządzenia i instalacje, z drugiej istotne jest zabezpieczenie ludzi i urządzeń przed niepożądanym ich oddziaływaniem.

Pewnym rozwiązaniem jest posiłkowanie się dopuszczalnymi poziomami oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego podawanymi przez ICNIRP - Międzynarodową Komisję ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP (ang. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [6,7]. Standard w najnowszej wersji z 2020 roku ogranicza zakres dopuszczalnych poziomów narażeń powyżej 100 kHz, ale jego poprzednie wersje podawały poziomy także, dla interesujących autorów, niższych przedziałów częstotliwości (rys. 1.).



Rys. 1. Dopuszczalne poziomy oddziaływania zmiennego pola elektromagnetycznego podawane przez ICNIRP 2010 [6]; linia ciągła to poziom dla środowiska pracy, a linia przerywana to środowisko ogólnodostępne [8]

Oferowane rozwiązania

Aktualnie dostępne na rynku rozwiązania komercyjnie można podzielić na trzy grupy. Pierwsza grupa to osłony budowane z materiałów typu mu-metal i permalloy, które tłumią pole magnetyczne praktycznie już od pól stałych. Rozwiązania tego typu oferuje brytyjska firma MAGNETIC SHIELD CORP. Przykładowe osłony: MuMETAL® Zero Gauss Chambers zaprezentowano na rysunku 2, natomiast rysunek 3 prezentuje komorę MuMETAL® Stress Annealed Sheet. Pomimo dobrych parametrów magnetycznych i skutecznego tłumienia rozwiązanie to nie jest rozpowszechnione ze względu na wysoki koszt wykonania stosowanej osłony. Stosowany materiał wymaga specjalistycznej obróbki termicznej, a to, przy wykonywaniu konstrukcji o większych wymiarach liniowych powoduje dodatkowe problemy w tym logistyczne.



Rys. 2. Wykonana z mu-metalu osłona MuMETAL® Zero Gauss Chambers produkcji MAGNETIC SHIELD CORP. [9]



Rys. 3. Komora z mu-metalu firmy MuMETAL® Stress Annealed Sheet produkcji MAGNETIC SHIELD CORP. [9]

Drugą grupę stanowią materiały o niejednorodnej strukturze wielowarstwowej. Są to najczęściej kompozyty tłumiące efektywnie pola magnetyczne w zakresie częstotliwości powyżej 15 Hz. Z materiałów tego typu można prefabrykować relatywnie duże elementy, z których na miejscu realizacji inwestycji można montować większe konstrukcje. Dodatkową przewagą jest prosta obróbka

mechaniczna prefabrykowanych elementów. Współczynniki tłumienia, podawane przez producenta, to ok. 10 razy dla 16.7 Hz i znacznie większe dla częstotliwości wyższych. Z takiego materiału mogą być wykonywane całe pomieszczenia jak pokazano na rysunku 4 [10].



Rys. 4. Pomieszczenie badawcze ekranowane systemem Systron PowerShield® produkcji firmy SYSTRON Magnetic Shielding w technologii blach warstwowych [10]

Trzecim dostępnym rozwiązaniem są aktywne systemy kompensacji pól magnetycznych. Takie rozwiązania w sposób aktywny generują przeciwpoła o wartościach określanych na podstawie zmierzonych pól zewnętrznych. Są to m. inn. rozwiązania trójosiowe firmy Stefan Mayer Instruments GmbH & Co. KG w postaci urządzeń Magnetic Field Compensation System MR-3 [11]. Rozwiązania tego typu zapewniają zmniejszenie natężenia pola magnetycznego, w miejscu w, którym znajduje się czujnik pomiarowy, nawet ok. 100 razy dla 50 Hz.

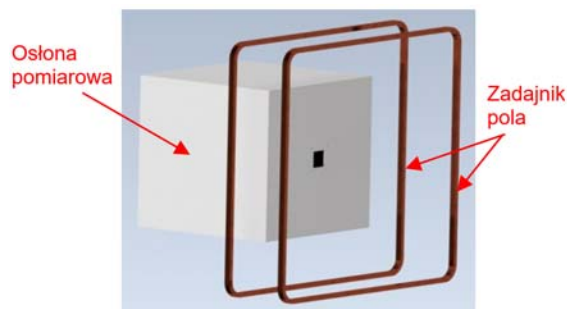
Koncepcja budowy stanowiska

Celem przygotowania własnego stanowiska do wyznaczenia skuteczności tłumienia pól magnetycznych o częstotliwości sieciowej 50 Hz i nieco wyższych przez konstrukcje wykonane z różnych materiałów jest pozyskanie wiedzy o możliwościach tłumienia składowej magnetycznej niskiej częstotliwości przez wybrane materiały i konstrukcje podlegające łatwej obróbce mechanicznej (montaż osłon) bez utraty zdolności tłumieniowych.

Podstawowym założeniem, przy opracowywaniu stanowiska, było:

- odizolowanie wybranej przestrzeni od zewnętrznych pól magnetycznych występujących w środowisku,
- generowanie pola magnetycznego, którego parametry będą kontrolowane przez operatora stanowiska,
- możliwość testowania próbek materiałów o wymiarach co najmniej 100x100mm.

Ogólny projekt stanowiska, który stał się podstawą do opracowania i wykonania kluczowych elementów prezentuje rysunek 5.



Rys.5. Wizualizacja 3D kluczowych elementów stanowiska: ekranująca klatka pomiarowa z otworem pomiarowym, zadajnik pola magnetycznego

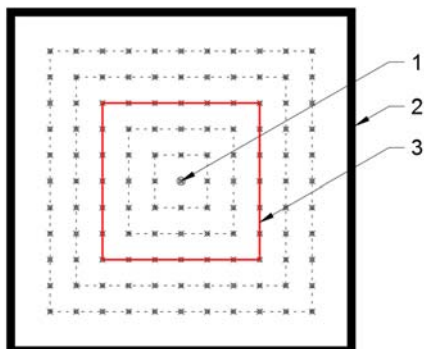
Zadajnik pola magnetycznego

Przyjęto, że źródłem regulowanego, możliwie jednorodnego pola magnetycznego będzie zespół minimum dwóch cewek. Przygotowane cewki pracują w układzie Helmholtza. Mają one wymiary w świetle 1270 x 1270 mm każda, ustawione względem siebie równolegle w sposób umożliwiający płynną zmianę odległości pomiędzy ich płaszczyznami. Pierwotnie zostały one ustawione w odległości 1m od siebie zgodnie z rysunkiem 6. Dla tej konfiguracji wyznaczono współczynnik CF (z ang. Coil Factor), który określa zależność pomiędzy prądem płynącym przez cewkę zadajnika, a natężeniem generowanego pola magnetycznego. Współczynnik CF jest uznawany za wskaźnik pozwalający określić jakość i przydatność zadajnika w aplikacji. Użytkownik oczekuje, że współczynnik CF będzie miał wartość możliwie dużą. Komercyjne firmy produkujące zadajniki pola o częstotliwości sieciowej (zgodnie z normą PN-EN 61000-4-8:2010 [7,12]) podają dla zadajnika o krawędzi długości 1 m i 37 zwojach współczynnik o wartości $CF = 34$. Współczynnik CF wyznaczony dla wykonanej cewki o 60 zwojach ma wartość 41.

Obszar jednorodności pola wyznaczono mierząc jego natężenie w kolejnych punktach przestrzeni między cewkowiej oddalonych od siebie o 100 mm (siatka xyz z węzłami co 100 mm). Na tej podstawie obliczono jednorodności pola dla obszarów sześciennych o różnych długościach boku i środkach położonych w punkcie centralnym obszaru roboczego zadajnika (rys.6). Finalnie jednorodność określono jako stosunek wyznaczonych największych i najmniejszych wartości natężenia pola, w danym sześcianie, wyrażony w skali decybelowej (rys. 7). Z przyjętych standardów w zakresie zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej [13] wynika, że w przypadku, gdy wspomniany stosunek jest większy od 6dB, obszar należy uznać za niejednorodny.



Rys. 6. Zadajnik pola magnetycznego własnego projektu i wykonania podczas pomiarów jednorodności pola i wyznaczania współczynnika CF



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia punktów, w których wykonano pomiary; rzut od strony cewki zadajnika pola; 1 – centralny punkt osłony pomiarowej, 2 – ściana osłony, 3 – granica obszaru jednorodności pola o boku 600 mm

Zestawienie wyników pomiarów jednorodności pola dla różnych wielkości obszarów zawarto w Tabeli 1. Badania wykazały, że sześcian o krawędzi 600 mm z nadatkiem spełnia wymaganie jednorodności pola. Taki obszar o jednorodnym polu umożliwia umieszczenie w nim separującej osłony pomiarowej dużej objętości.

Tabela 1. Zestawienie wielkości obszaru jednorodnego względem poziomu jednorodności pola wewnątrz obszaru

Wielkość obszaru względem punktu środkowego [mm]	Jednorodność [-]	Jednorodność [dB]
0	1	0
200	1,09	0,73
400	1,18	1,41
600	1,53	3,7
800	2,8	8,93
900	8,73	18,82

Cewki zostały wykonane w sposób umożliwiający niezależne zasilanie każdej z nich prądem przemiennym o wartości skutecznej do 15 A.

Separująca osłona pomiarowa

Koncepcja przeprowadzenia pomiarów sprowadza się do mierzenia pola magnetycznego przenikającego do przestrzeni odseparowanej od zewnętrznych pól magnetycznych. W przestrzeni tej umieszczony jest przyrząd pomiarowy. Konstrukcja osłony jest taka, aby jedyną drogą wnikania pola magnetycznego do jej wnętrza był otwór, opcjonalnie przesłaniany badanymi próbkami. Osłona znajduje się wewnątrz obszaru jednorodności pola magnetycznego zadajnika (rys. 8). Wymiary osłony zostały dobrane tak, aby w jej wnętrzu mogły być umieszczone wszystkie przewidywane przyrządy pomiarowe. Sygnały wielkości mierzonych są transmitowane światłowodowo do rejestratorów zewnętrznych (brak zakłóceń elektromagnetycznych). Istotnym elementem stanowiska jest postument zbudowany z materiału niewpływającego na rozkład pola magnetycznego wytwarzanego przez zadajnik. Konstrukcja postumentu zapewnia stabilne posadowienie zadajnika wraz z osłoną (całkowita masa stanowiska pomiarowego - ponad 300 kg). Rozwiązanie prezentuje rysunek 8.



Rys. 8. Osłona pomiarowa z zamocowaną ścianą pomiarową wewnątrz zadajników pola z widocznym postumentem

Miernik pola magnetycznego

Kluczowym elementem stanowiska jest miernik pola magnetycznego. Do wstępnych testów zostały wyselekcjonowane dwa mierniki pola: SMP2 z sondą pomiarową WP400-3 i WPH-DC firmy Wavecontrol oraz miernik ESM-100 firmy Maschek (rys. 9a, 8b). Dla potwierdzenia poprawności pomiarów został skonstruowany weryfikator wskazań. Jego konstrukcja pozwala umieścić głowice pomiarowe mierników w jednorodnym, stałym i powtarzalnym polu magnetycznym.

Metoda weryfikacji polega na porównaniu wskazań mierników, gdy ich głowice pomiarowe umieszczone są w komorze pomiarowej weryfikatora zasilanego prądem o niezmienną wartości. Weryfikacji należy dokonać przed rozpoczęciem cyklu pomiarowego i po jego zakończeniu. Zbieżne wskazania przed i po cyklu pomiarowym pozwalają wnioskować, że podczas pomiarów miernik pola działał właściwie. Weryfikator wskazań wraz z miernikiem został przedstawiony na rysunku 10.



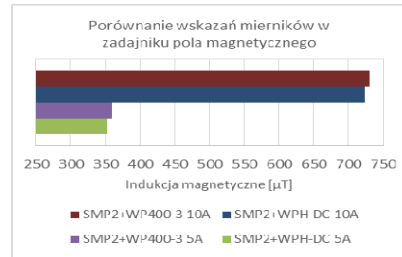
Rys. 9. Mierniki pola: a) ESM-100 Maschek, b) SMP-2 Wavecontrol

Ważnym aspektem doboru miernika jest rodzaj czujnika pola magnetycznego. W tym przypadku do dyspozycji pozostają czujniki typu indukcyjnego (cewki) i sensory Halla. Miernikiem SMP2 wykonano wstępne pomiary, które wykazały relatywnie duży poziom szumów własnych w przypadku wykorzystania sond z czujnikami Halla. Minimalne możliwe wskazania miernika wpływają w dużym stopniu na możliwości pomiarowe stanowiska. W przypadku wysokiego poziomu szumów własnych miernik znacząco ogranicza dynamikę pomiaru. Eksperymenty wykazały, że dla miernika SMP2 z sondą WP400-3 z czujnikami indukcyjnymi poziom szumów własnych to 58 nT, a z sondą WPH-DC z czujnikami Halla zarejestrowano 2 μ T. Tak duża różnica ogranicza stosowanie mierników z tego typu sondami. Sondy z czujnikami indukcyjnymi charakteryzują się znacznymi wymiarami liniowymi, co uniemożliwia rzeczywiście punktowy pomiar pola.



Rys. 10. Weryfikator wskazań podczas walidacji wraz z miernikiem SMP2 z sondą z czujnikami Halla WPH-DC

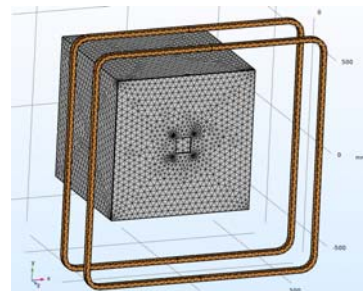
Przykładowe wyniki pomiarów weryfikatora wskazań przedstawiono na rysunku 11. Dotyczą one wskazań miernika pola SMP2 z sondą indukcyjną WP400-3 oraz z sondą z czujnikami Halla WPH-DC. Pomiary wykonano dla dwóch wartości prądów, 5 A i 10 A. Otrzymano zbieżne wyniki dla porównywanych przypadków (rys. 11). Wykazano liniowość wskazań miernika - dwukrotny wzrost wartości prądu weryfikatora skutkuje dwukrotną zmianą wartości indukcji magnetycznej. Tym samym potwierdzono przydatność weryfikatora i opracowanej metody pomiaru.



Rys. 11. Wartości indukcji magnetycznej pomierzonej miernikiem SMP2 dla dwóch sond pomiarowych i dwóch wartości prądów weryfikatora

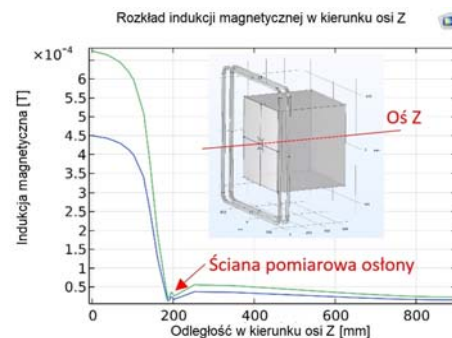
Model numeryczny

W procesie projektowania stanowiska opracowano autorski model numeryczny. Optymalizacja ustawienia elementów zadajnika pola względem siebie oraz względem separującej osłony pomiarowej pozwoliła na uzyskanie najkorzystniejszej dynamiki pomiarowej. W efekcie badań stwierdzono, że najkorzystniejsze jest umieszczenie cewek zadajnika bliżej siebie i w niewielkiej odległości od ściany z otworem pomiarowym. Na rysunku 12. zamieszczono model 3D z siatką do analizy rozkładu pola magnetycznego. Obliczenia przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie COMSOL MultiPhysics.



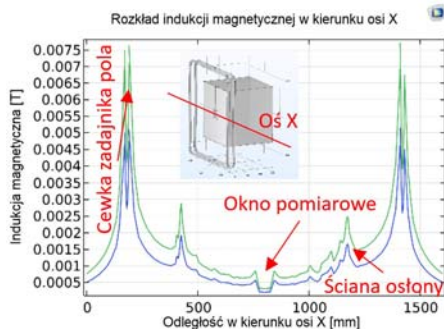
Rys. 12. Model numeryczny 3D z siatką dyskretyzacyjną

W wyniku obliczeń wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż głównych osi symetrii stanowiska. Szczególnie istotny z punktu widzenia prowadzonych badań jest rozkład wzdłuż osi tzn. osi przechodzącej przez środek płaszczyzny zadajnika pola, środek okna pomiarowego, środek separującej osłony pomiarowej aż do tylnej ściany (przeciwległej do ściany pomiarowej) osłony (rys. 13). Charakter zmian indukcji magnetycznej pokazany na rysunku 13 jest zbieżny z przebiegiem przewidywanym. Wyniki uzyskano dla dwóch wartości prądów płynących przez cewki zadajnika. Przebieg niebieski dla prądu 4 A, a przebieg zielony dla 6 A.



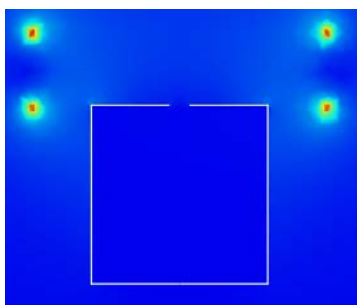
Rys. 13. Wartości indukcji magnetycznej w kierunku osi Z, z zaznaczoną ścianą pomiarową osłony, otrzymanych z symulacji numerycznych; niebieski przebieg dla prądu zadajnika 4 A, zielony dla 6 A

Na rysunku 14 widoczne są przebiegi otrzymane także dla wymuszenia 4 A – kolor niebieski i 6 A – kolor zielony. Widoczny jest wpływ elementów stanowiska, takich jak: cewki zadajnika, ściany boczne osłony separującej oraz okno pomiarowe, na wartość indukcji magnetycznej. Zaprezentowane wyniki są zgodne ze spodziewanymi.

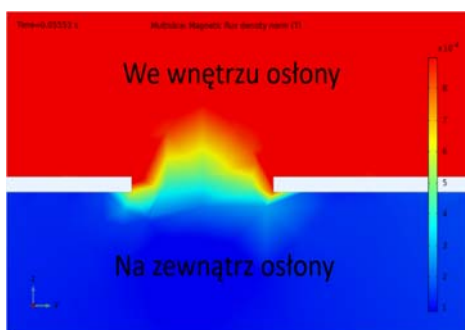


Rys. 14. Wartości indukcji magnetycznej w kierunku osi X, z zaznaczonymi elementami stanowiska wpływającymi na zmiany otrzymywanych wyników; niebieski przedstawia rozkład dla prądu zadajnika 4 A, zielony dla 6 A

Krytycznym elementem w zakresie funkcjonalności separującej osłony pomiarowej jest okno pomiarowe. Ponieważ osłona wykonana została z materiału ferromagnetycznego naturalnym jest, że pole magnetyczne, wnikające do takiej struktury przez okno pomiarowe, będzie wielokrotnie mniejsze niż pole na zewnątrz osłony. Na podstawie symulacji stwierdzono, że poziom natężenia pola magnetycznego, które wnika do wnętrza osłony przez otwór pomiarowy, jest na tyle wysoki, że zapewni wystarczająco dużą dynamikę pomiarową. Rysunek 15 pokazuje rozkład pola w płaszczyźnie przekroju poziomego zadajnika pola i separującej osłony z otworem pomiarowym. Natomiast na rysunku 16 zamieszczono powiększony fragment konstrukcji z obszarem okna pomiarowego. Rezultaty pomiarów i wyniki symulacji wskazują, że dynamika pomiaru wynosi 20 dB (10 razy). Potwierdza to przydatność stanowiska do przeprowadzenia planowanych pomiarów.



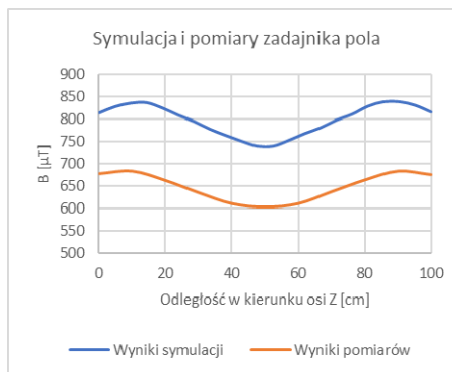
Rys. 15. Rozkład pola w płaszczyźnie przekroju poziomego zadajnika pola i separującej osłony z otworem pomiarowym



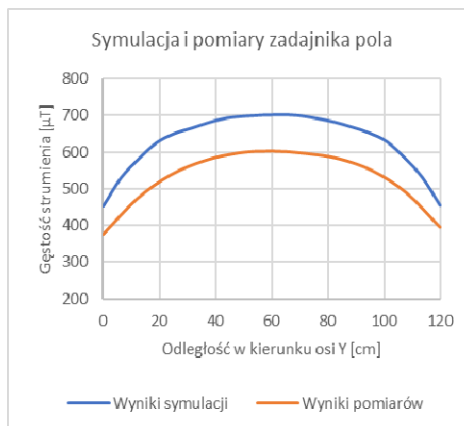
Rys. 16. Rozkład pola w przekroju poziomym w obszarze okna pomiarowego

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych i pomiarów pozwoliły na zoptymalizowanie stanowiska. Na rysunku 17 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów indukcji magnetycznej wzdłuż osi cewek zadajnika pola (kierunek określany jako kierunek osi Z). Cewki ustawiono w odległości 1 m od siebie; przez każdą z nich płynął prąd o wartości 10 A. Dla takich samych warunków zasilania i odległości między cewkami przeprowadzono pomiar i wykonano symulację numeryczną rozkładu indukcji. Wyniki modelowania i pomiarów prezentuje rysunek 18. Charakter otrzymanych wartości jest zgodny ze spodziewanym. Przyczyną rozbieżności między przebiegami jest fizyczne przesunięcie położenia cewek sondy pola miernika względem obudowy sondy (producent nie podaje dokładnego ich ułożenia).



Rys. 17. Wyniki symulacji i rzeczywistych pomiarów indukcji magnetycznej pola pomiędzy cewkami zadajnika



Rys. 18. Wyniki symulacji i rzeczywistych pomiarów indukcji magnetycznej między cewkami zadajnika pola.

Opisane elementy stanowiska do badania własności tłumiących materiałów magnetycznych zostały wykonane i pozytywnie zweryfikowane. Stanowisko zostało zestawione i przygotowane do jego walidacji.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Urbaniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: grzegorz.urbaniak@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Paweł Idziak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: pawel.idziak@put.poznan.pl; dr inż. Krzysztof Kowalski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.kowalski@put.poznan.pl; dr inż. Milena Kurzawa, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: milena.kurzawa@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] PN-EN IEC 55015:2019, „Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez elektryczne urządzenia oświetleniowe i urządzenia podobne”, Polski Komitet Normalizacyjny
- [2] PN-EN 50121-3-1:2010 „Zastosowania kolejowe Kompatybilność elektromagnetyczna -- Część 3-1: Tabor Pociąg i kompletny pojazd, Polski Komitet Normalizacyjny
- [3] PN-EN 50121-2:2010, „Zastosowania kolejowe Kompatybilność elektromagnetyczna -- Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie”, Polski Komitet Normalizacyjny
- [4] PN-EN 50121-3-1:2017, „Zastosowania kolejowe Kompatybilność elektromagnetyczna - Część 3-1: Tabor Pociąg i kompletny pojazd”, Polski Komitet Normalizacyjny
- [5] PN-EN 55014-1:2017, „Kompatybilność elektromagnetyczna - Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń -- Część 1: Emisja”, Polski Komitet Normalizacyjny
- [6] ICNIRP 2010, Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym ICNIRP (ang. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
- [7] The Orange Book of Knowledge 9th Edition, rf/microwave Instrumentation, 2021
- [8] Wykres przygotowany przy pomocy strony internetowej <https://www.emfs.info/limits/limits-organisations/comparison/>
- [9] Materiały dostępne na stronie MAGNETIC SHIELD CORP., <https://www.magnetic-shield.com/>
- [10] Materiały dostępne na stronie SYSTRON Magnetic Shielding, <https://www.systronemv.com/en/>
- [11] Materiały dostępne na stronie Stefan Mayer Instruments GmbH & Co. KG, <https://stefan-mayer.com/en/>
- [12] PN-EN 61000-4-8:2010, „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-8: Metody badań i pomiarów -- Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej”, Polski Komitet Normalizacyjny
- [13] PN-EN IEC 61000-4-3:2021, „Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-3: Metody badań i pomiarów -- Badanie odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej”, Polski Komitet Normalizacyjny