

doi:10.15199/48.2021.12.33

Przykład ograniczania pola magnetycznego generowanego przez urządzenia elektryczne w obszarze pomieszczenia pracy

Streszczenie. Praca przedstawia wyniki pomiarów rozkładu natężenia pola magnetycznego w pomieszczeniu, w których przewiduje się usytuować laboratorium oraz warsztat, komputerową analizę rozkładu pola dla ekranów o różnej konstrukcji oraz propozycję konstrukcji ekranów, które ograniczają natężenia pola magnetycznego w strefie chronionej.

Abstract. The work presents the results of measurements of the field strength distribution in the room where the laboratory and workshop are to be located, a computer analysis of the field distribution for shields of various designs and a proposal for the design of shields that will reduce the magnetic field strength in the protected zone. (An example of reducing the magnetic field generated by electrical equipment in the work room area).

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, ekran magnetyczny, ekran elektromagnetyczny, ekran wielowarstwowy, skuteczność ekranowania.
Keywords: magnetic field, magnetic shield, electromagnetic shield, multilayer shield, shielding effectiveness.

Wstęp

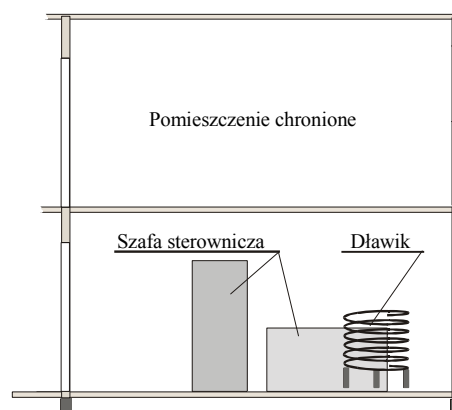
W środowisku, w którym żyjemy, ciągle poddawani jesteśmy wpływom różnego rodzaju pól elektrycznych i magnetycznych stałych i zmiennych i o różnej częstotliwości. W niektórych przypadkach pola te, przy ściśle kontrolowanym natężeniu, częstotliwości i czasowi oddziaływania, mają pozytywny dla ludzi wpływ leczniczy lub też dają efekty diagnostyczne. Słabe pola są obojętne dla ludzi, ale w większości przypadków silnych pól są one szkodliwe.

Pole magnetyczne generowane przez transformatory, tory prądowe rozdzielni, dławiki jest polem najczęściej słabym i rzadko przekracza poziom bezpieczny dla ludzi, natomiast może wywierać szkodliwy wpływ na urządzenia i przyrządy elektroniczne. Pole to ma stosunkowo małą wartość natężenia i niską częstotliwość, co sprawia, że różne sposoby prostego ekranowania nie są wystarczająco skuteczne lub też całkowicie nieskuteczne [1, 2, 3, 4].

W celu ekranowania niskoczęstotliwościowych źródeł pól magnetycznych są stosowane metody polegające na zmianie drogi strumienia magnetycznego poprzez zastosowanie materiałów o wysokiej przenikalności magnetycznej (np. mumetall, vacoperm, permenorm, vitrovac), wytworzeniu przeciwdziałającego strumienia magnetycznego wskutek prądów wirowych lub prądów źródeł sterowanych w układach ekranów aktywnych. Zmniejszenie wartości natężenia pola magnetycznego wytwarzanego przez źródła można uzyskać stosując ekrany magnetyczne, ekrany elektromagnetyczne, ekrany aktywne lub ich kombinacje tworząc ekrany mieszane oraz inne zabiegi na przykład oddalenie źródeł pola od obszaru chronionego, zmianę konfiguracji źródeł pola (wzajemne zbliżenie szyn poszczególnych faz) [5, 6, 7, 8, 9].

Przedmiotem artykułu jest analiza pola magnetycznego w pomieszczeniu chronionym, w którym przewiduje się funkcjonowanie projektowanego laboratorium i warsztatu oraz opracowanie sposobu ograniczenia pola w przestrzeni wykonywanej pracy. Pomieszczenie chronione znajduje się bezpośrednio nad dławikiem powietrznym i nad szafami z układami sterowania przekształtnikowego (rys.1). Jak wykazały badania, pole magnetyczne jest wzbudzone głównie prądami płynącymi w dławiku, w przewodach zasilających dławik oraz w szynach szaf sterowniczych. Praca przedstawia wyniki pomiarów rozkładu natężenia pola magnetycznego w pomieszczeniu chronionym, komputerową analizę rozkładu pola magnetycznego dla

ekranów o różnej konstrukcji oraz propozycję konstrukcji ekranów, które ograniczają natężenia pola magnetycznego w strefie chronionej.



Rys.1. Przekrój pionowy pomieszczeń kaskad i laboratorium

Szkodliwość pola magnetycznego w świetle przepisów

Analizując szkodliwy wpływ pola magnetycznego należy rozgraniczyć ich szkodliwość dla urządzeń technicznych oraz dla ludzi. Szkodliwość dla urządzeń technicznych stanowi złożony problem ze względu na ich różnorodność i wrażliwość na pola magnetyczne w zależności od ich natężenia i częstotliwości. Dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych w środowisku dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową i miejsc dostępnych dla ludności są określone rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r., w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, (Dz. U. z 2019 r. poz. 2448. Sposoby sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku przedstawia rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. (Dz. U. z 2020 r. poz. 258)

W kolejnym rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014r. (Dz. U. z 2014 r. poz. 817) podano wymagania w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. W świetle tego rozporządzenia, w otoczeniu źródeł pól magnetycznych stałych i o częstotliwości do 300GHz wyróżnia się 4 strefy oddziaływania pola zdefiniowane jako:

- strefę niebezpieczną, w której przebywanie pracowników jest zabronione,
- strefę zagrożenia, w której dopuszczone jest przebywanie pracowników przez czas ograniczony, zależy od wartości natężenia pola; przy czym dozy pola elektrycznego i magnetycznego oraz wskaźnik ekspozycji muszą jednocześnie spełniać określone warunki,
- strefę pośrednią, w której jest dopuszczone przebywanie pracowników w ciągu całej zmiany roboczej,
- strefę bezpieczną, w której przebywanie pracowników jest dozwolone bez ograniczeń czasowych.

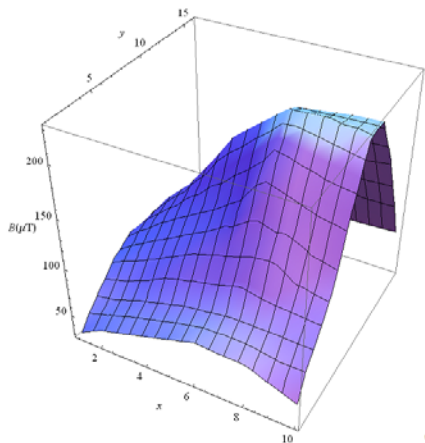
Za strefę bezpieczną, zwłaszcza nas interesującą, uważa się obszar, w którym natężenie pola magnetycznego stalego jest mniejsze od 8000/3 A/m. (ok. 3,35mT), a pola magnetycznego o częstotliwości przemysłowej 50 Hz – mniejsze od 200/3 A/m (ok. 83,8 μT).

Z powyższego wynika, że strefa bezpieczną w otoczeniu źródeł pola magnetycznego o częstotliwości przemysłowej 50Hz, jest obszar, w którym indukcja magnetyczna jest mniejsza od 83,8 μT.

Wymagania dotyczące między innymi źródeł pola elektromagnetycznego mających wpływ na bezpieczeństwo i higienę pracy, oceny narażenia na pole elektromagnetyczne, limitów oraz oceny bezpośredniego oddziaływania pola em na organizm i środków ochrony określa rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. (Dz. U. z 2016 poz. 950).

Pomiary natężenia pola magnetycznego

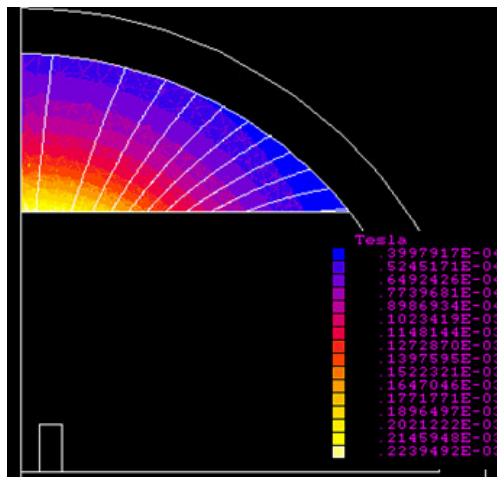
Badania pola magnetycznego przeprowadzono w pomieszczeniu projektowanego laboratorium i warsztatu (rys.1). Pomiary indukcji wykonane zostały na poziomie podłogi w węzłach siatki kwadratowej o boku 0,3 m. Podczas pomiarów natężenie prądu w torze prądowym dławika wynosiło 140 A w warunkach obciążenia normalnego, oraz 360 A przy obciążeniu maksymalnym. Rozkład indukcji magnetycznej na powierzchni podłogi w pomieszczeniu przedstawiono na rysunku 2.



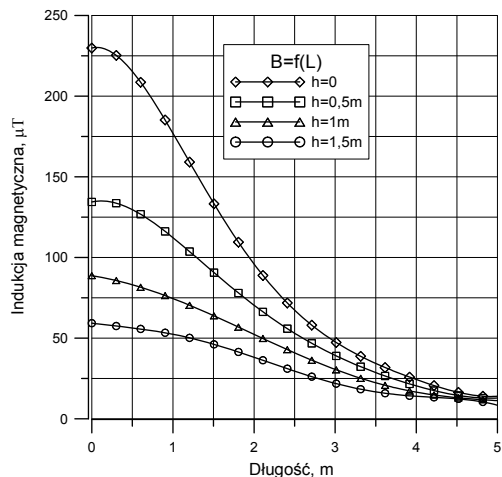
Rys.2. Rozkład indukcji magnetycznej na powierzchni podłogi w pomieszczeniu projektowanego laboratorium przy obciążeniu maksymalnym, (jednostkom długości na osiach "x" i "y" odpowiada wartość 0,3 m)

Maksymalne wartości indukcji na poziomie podłogi osiągnęły wartości do 230 μT przy obciążeniu maksymalnym oraz do 53 μT przy obciążeniu normalnym. Pole magnetyczne zawiera dominującą składową stałą, której wartość znacznie przewyższa wartości pól zmiennych generowanych przez układy sterowania napędu oraz wartość składowej pola o częstotliwości sieciowej.

Wartości indukcji magnetycznej w świetle obowiązujących przepisów są bezpieczne dla ludzi, ale znacznie przewyższają próg wrażliwości dla urządzeń i przyrządów stosowanych w laboratorium na zakłócenia polem magnetycznym. Wynika stąd konieczność ograniczenia wartości pola magnetycznego w pomieszczeniu projektowanego laboratorium nad kaskadami tyrystorowymi.



Rys.3 Obraz indukcji magnetycznej i linii strumienia magnetycznego w pomieszczeniu chronionym, przy obciążeniu maksymalnym



Rys.4 Rozkład indukcji magnetycznej na wysokości h od powierzchni podłogi w pomieszczeniu chronionym, przy obciążeniu maksymalnym

Analiza pola magnetycznego w układzie bez ekranu

Przeprowadzono obliczenia metodą elementów skończonych dla układu modelowego składającego się z dławika z prądem umieszczonego w powietrzu. Przyjęto, że natężenie prądu w torze prądowym dławika wynosiło 360 A przy obciążeniu maksymalnym, oraz 140 A w warunkach obciążenia normalnego. Model obliczeniowy realizowano w skali 1:4 w stosunku do układu rzeczywistego. Wynika stąd, że obliczone na podstawie tego modelu wartości indukcji odpowiadają wartościom rzeczywistym, a strumień magnetyczny w oryginale ma wartość czterokrotnie większą niż w modelu. Potencjał wektorowy w układzie bez ekranów można opisać następującymi równaniami: w uzwojeniu dławika

$$(1) \quad \text{rot} \left(\left(\frac{1}{\mu_0} \right) \text{rot} A \right) = J_u$$

w powietrzu

$$(2) \quad \operatorname{rot} \left(\left(\frac{1}{\mu_0} \right) \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = 0$$

gdzie: \mathbf{A} – potencjał wektorowy, \mathbf{J}_u – wektor gęstości prądu w uzwojeniu, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

Wyniki symulacji w postaci rozkładu pola magnetycznego oraz wykresów indukcji magnetycznej wzdłuż wybranych odcinków przedstawiono na rysunkach 3 i 4 dla warunków obciążenia maksymalnego. Maksymalna wartość indukcji w płaszczyźnie przechodzącej przez oś dławika osiąga wartość ponad 200 μT . Podczas obciążenia normalnego wartości indukcji zmniejszają się praktycznie proporcjonalnie do zmiany prądu.

Analiza pola magnetycznego w układzie ekranowanym

Aby zmniejszyć wartości indukcji magnetycznej w pomieszczeniu projektowanego laboratorium rozważono wiele układów ekranów. Ekran musi zapewnić ograniczenie składowej stałej pola magnetycznego i pól zmiennych wytwarzanych również przez dławik oraz układy sterowania i zasilania. Wybrane rozwiązanie polega na zastosowaniu dwóch rodzajów ekranów (rys.5).

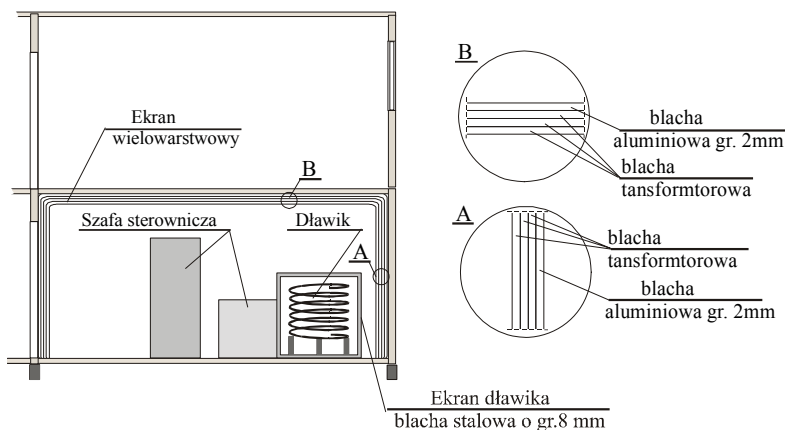
Składowa stała pola magnetycznego jest ograniczana przez zastosowanie ekranu indywidualnego dla dławika, w postaci walca z materiału ferromagnetycznego o grubości ścianek 8 mm, zamkniętego dwoma podstawami. Odległość ścianek ekranu od uzwojenia dławika wynosi 300 mm. Pole zmienne, wytworzone przez aparaty i urządzenia, jest tłumione w ekranie wielowarstwowym umieszczonym na suficie i ścianach pomieszczenia z szafami sterowniczymi. Ekran ten składa się z warstwy materiału przewodzącego (aluminium) o grubości 2 mm, jako warstwy zewnętrznej i materiału ferromagnetycznego w postaci trzech warstw blach transformatorowych o grubości 0,5 mm każda.

Potencjał wektorowy w układzie z ekranami opisują równania (1) i (2) oraz dodatkowo równania w następujących obszarach:

$$(3) \quad \operatorname{rot} \left(\left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \right) \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = 0$$

w ekranie aluminiowym

$$(4) \quad \operatorname{rot} \left(\left(\frac{1}{\mu_0} \right) \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_e$$



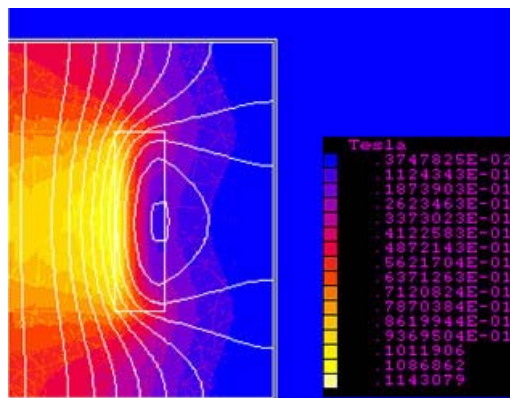
Rys.5. Szkic ilustrujący ekranowania pomieszczenia z zastosowaniem ekranu wielowarstwowego i ekranu ferromagnetycznego dla dławika

Gęstość prądu w środowisku przewodzącym wyraża zależność

$$(5) \quad \mathbf{J}_e = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \operatorname{grad} V$$

gdzie: \mathbf{A} – potencjał wektorowy, \mathbf{J}_e – wektor gęstości prądu w ekranie, μ_0, μ_r – przenikalność magnetyczna próżni i względna przenikalność ekranu, γ – konduktywność, V – potencjał elektryczny.

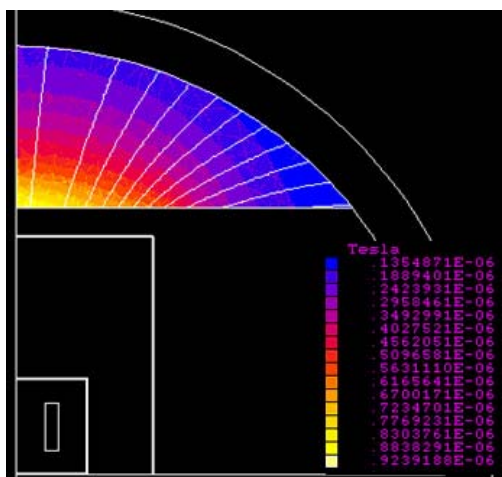
Wyniki symulacji w postaci obrazów rozkładu indukcji magnetycznej, linii strumienia magnetycznego oraz wykresów indukcji magnetycznej wzdłuż wybranych odcinków przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 9 dla warunków obciążenia maksymalnego.



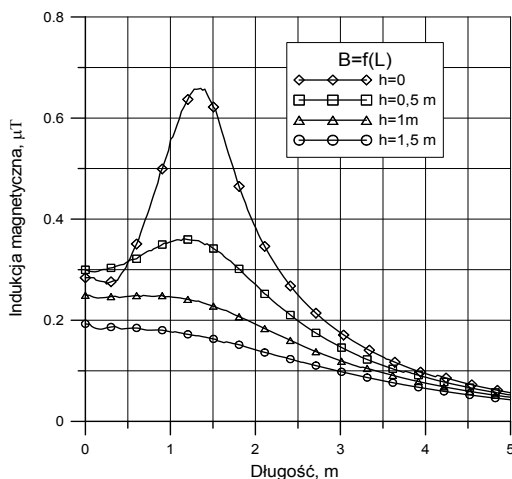
Rys.6. Obraz indukcji magnetycznej i linii strumienia w otoczeniu dławika ekranowanego indywidualnie, przy obciążeniu maksymalnym (połowa przekroju układu)

Na podstawie analizy numerycznej określono wartości współczynnika ekranowania na powierzchni podłogi oraz na różnych wysokościach nad nią (0,5 m, 1 m, 1,5 m) w pomieszczeniu chronionym (rys.9). Współczynnik ekranowania jest zdefiniowany, jako stosunek wartości indukcji B_e w danym punkcie w układzie z ekranem, do wartości indukcji B_0 w tym punkcie bez ekranu

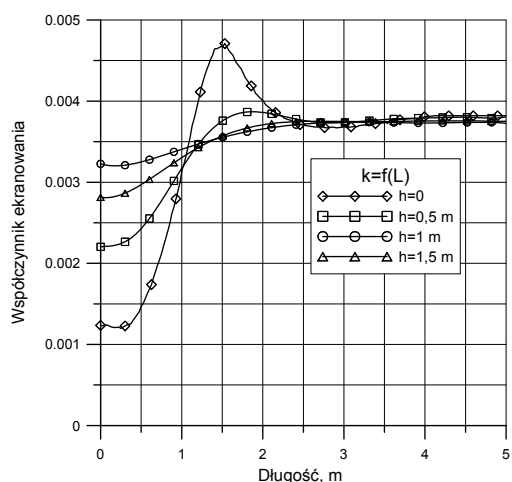
$$(6) \quad k = \frac{B_e}{B_0}$$



Rys.7. Obraz indukcji magnetycznej i linii strumienia magnetycznego w pomieszczeniu chronionym, przy obciążeniu maksymalnym



Rys.8. Rozkład indukcji magnetycznej w układzie ekranowanym na wysokości h od powierzchni podłogi w pomieszczeniu chronionym, przy obciążeniu maksymalnym



Rys.9. Rozkład współczynnika ekranowania na wysokości h od powierzchni podłogi w pomieszczeniu projektowanej dyspozytorni, przy obciążeniu maksymalnym

Współczynnik ekranowania przyjmuje na osi dławika najmniejszą wartość przy powierzchni podłogi 0,00125 i rośnie do wartości 0,00325 na wysokości 1,5 m. Praktycznie ustala się wartość w przedziale 0,0037 – 0,0038 w odległości powyżej 2,5 m od osi dławika, niezależnie od wysokości nad podłogą. Przedziałowi temu odpowiada współczynnik skuteczności ekranowania (będący odwrotnością współczynnika k) o wartościach 260-270, który zapewnia zmniejszenie indukcji magnetycznej w pomieszczeniu projektowanego laboratorium do poziomu poniżej $1 \mu\text{T}$

Podsumowanie

Pole magnetyczne w pomieszczeniu chronionym ma złożoną strukturę a wartości indukcji przekraczają ok. 90-120 razy wartość $2,5 \mu\text{T}$ przyjętą w założeniach, jako graniczną.

Zmniejszenie wartości słabych pól magnetycznych można uzyskać stosując ekrany wielowarstwowe, przemienne z blachy o dużym współczynniku przenikalności magnetycznej i blachy dobrze przewodzącej (miedzianej albo aluminiowej). Jak wynika z rozkładów indukcji uzyskanych w analizie numerycznej i danych pomiarowych na modelu fizycznym, dobre efekty tłumiące uzyskuje się w środkowej części ekranu, natomiast na brzegach występuje wzrost indukcji.

Stosując ekranowanie indywidualne dławika i ekran wielowarstwowy w pomieszczeniu chronionym można zmniejszyć wartości indukcji w strefie ochronnej poniżej wyznaczonego progu.

Autor: dr hab. inż. Ryszard Goleman, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: r.goleman@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Beiu C.; Toader C.; Golovanov N.; Buica G., Low frequency electromagnetic shielding solutions, *International Conference on Electromechanical and Power Systems, IEEE Xplore*: 01 December 2017, DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123301
- [2] Goleman R., Wac-Włodarczyk A., Giżewski T., Czerwiński D., Modelling of open magnetic shields' operation to limit magnetic field of high-current lines, *Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics, Studies in Applied Electromagnetic and Mechanics*, 30, IOS Press 2008, 403-409
- [3] Goleman R., Szponder J., Laminar screens applied to restrict magnetic fields of mains frequency, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF '01*, vol. 22, 2002, 411-414
- [4] Keshtkar A., Maghoul A., Kalantarnia A., Magnetic Shield Effectiveness in Low Frequency, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3 (2011), No. 4, 507-511
- [5] Pawłowski S., Jolanta Plewako J., O pewnych właściwościach mieszanych ekranów warstwowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 12, 129-132
- [6] Bambynek D., Jakubas A., Jabłoński P., Wpływ składu kompozytu żelazo-polimer na właściwości ekranujące fale elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 12, 55-58
- [7] Jaroszewski M., Thomas S., Rane A., V.: *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties and Applications*, Wiley, November 2018, ISBN: 978-1-119-12861-8
- [8] Arellano Y., Hunt A., Olivier O., Evaluation of near-field electromagnetic shielding effectiveness at low frequencies, *IEEE Sensors Journal*, vol. 19 (2018), no. 1, 18320962, 121 - 128
- [9] Goleman K., Sasada I., Proposal and theoretical evaluation of the active shield with self-tunable loop current array, *IEEE Trans. Magn.* 41 (2005), No.10, 4084-4086