

Wybrane właściwości i ocena dokładności metody pomiaru tłumienia składowej magnetycznej fali emitowanej przez dipol magnetyczny przy pomiarach ekranów w zakresie małych częstotliwości

dr inż. Piotr Ruszel
Instytut Metrologii Elektrycznej
Politechniki Wrocławskiej

Omówiono podstawowe właściwości metody pomiaru współczynnika tłumienia składowej magnetycznej fali, emitowanej przez dipol magnetyczny, z punktu widzenia uzyskiwanych zakresów pomiaru, ich dokładności oraz występujących ograniczeń.

Pomiar skuteczności tłumienia składowych fali elektromagnetycznej przez ekrany, jak również pomiar właściwości materiałów, z których są one budowane, jest jednym z wielu elementów doświadczalnej weryfikacji, która umożliwia ostateczną ocenę właściwości KEM urządzeń technicznych. Pomiary te mają duże znaczenie, zwłaszcza jeżeli ekran znajduje się w tak zwanym obszarze indukcyjnym źródła zakłóceń w zakresie małych częstotliwości i kiedy źródłem emisji jest dipol magnetyczny. Osiągane wartości tłumienia składowej magnetycznej pola w tym przypadku zawierają się w przedziale od kilku do kilkunastu decybeli. Ponieważ nie są to duże wartości tłumień, dlatego pomiary są istotnym elementem weryfikacji jakości ekranu. Zwiększenie poziomu tłumienia do wartości kilkudziesięciu decybeli wymaga stosowania złożonych wielowarstwowych ekranów o odpowiednio dużych grubościach, wykonanych z materiałów diamagnetycznych jak i paramagnetycznych [1, 2, 3]. Jednak i w tym przypadku ostateczna ocena skuteczności ekranowania i jakości materiału stosowanego na ekran jest otrzymywana na drodze pomiarowej [4, 5].

Pomiar współczynnika tłumienia składowej magnetycznej fali elektromagnetycznej w zakresie małych częstotliwości

Współczynnik tłumienia A wyznaczany jest przez podstawienie do zależności (1), wyników otrzymanych na drodze pomiarów w układzie jak na rys. 1.

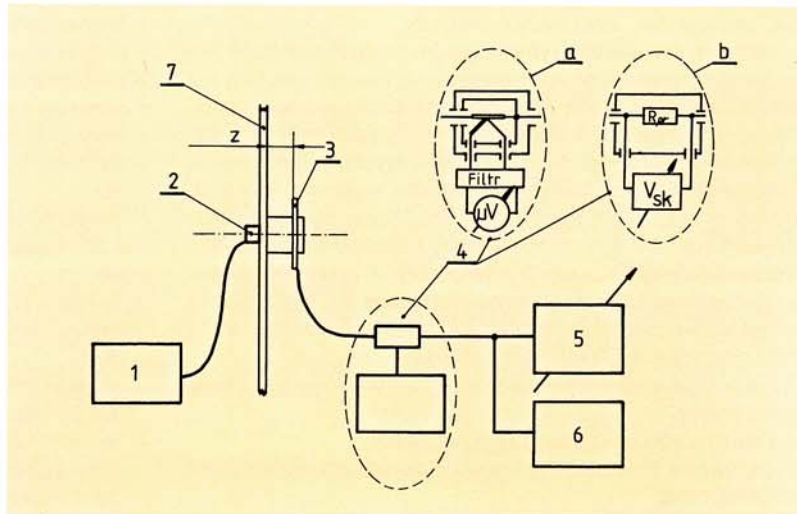
$$A = 20 \log (U_0 / U_1) \text{ dB dla } f = \text{parametr} \quad (1)$$

gdzie:

U_0 – wartość sygnału zmierzona dla częstotliwości f_x przy braku przegrody tłumiącej falę,

U_1 – wartość sygnału zmierzona dla częstotliwości f_x przy założonej przegrodzie tłumiącej falę.

Zakres wyznaczanych w tej metodzie wartości współczynnika tłumienia A zależy od zakresów i parametrów aparatury wchodzącej w skład zestawu pomiarowego (rys. 1). Podstawowe ograniczenia wynikają z wartości



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska do pomiarów tłumienia składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego w zakresie m. cz. emitowanego przez dipol magnetyczny (Z – odległość między dipolem a czujnikiem, przy kalibracji $Z=50$ mm): 1. mikrooltomierz selektywny; 2. Sonda mikrooltomierza selektywnego; 3. Dipol nadawczy; 4. Układ kontroli prądu zasilającego dipol nadawczy; 5. Generator zasilający dipol; 6. Częstościomierz; 7. Ekran lub przegroda, której tłumienie jest mierzone.

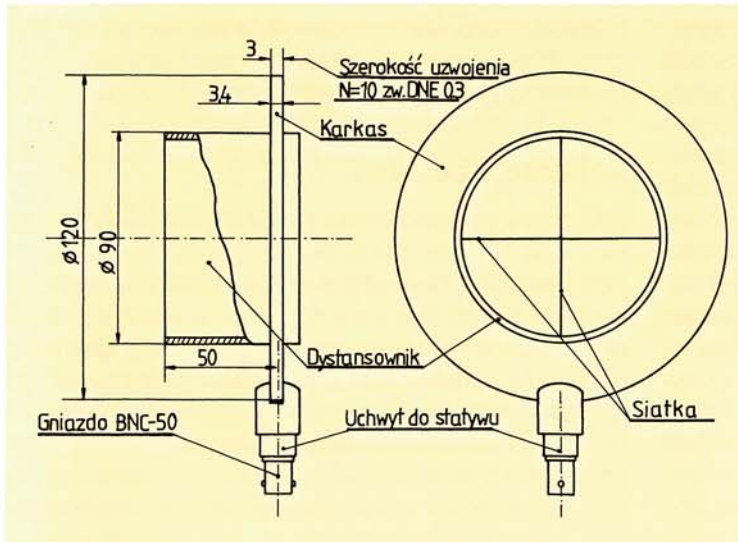
najniższego zakresu pomiarowego mikrooltomierza selektywnego oraz maksymalnej mocy wyjściowej generatora zasilającego dipol magnetyczny. Nie bez znaczenia są także w tym przypadku: wartość impedancji wyjściowej generatora, jak również wartość i zakres zmian impedancji wejściowej dipola w funkcji częstotliwości.

Przedział częstotliwości, w którym wyznaczany jest wyżej wymieniony współczynnik tłumienia A , jest określony w pierwszym rzędzie przez zakresy częstotliwościowe selektywnego miernika napięcia (mikrooltomierza selektywnego) i źródła sygnału zasilającego cewkę nadawczą (dipol magnetyczny). Nie są to jedyne ograniczenia wpływające na częstotliwościowy zakres pomiarów. Dalsze wynikają z właściwości częstotliwościowych układu kontroli wartości prądu zasilającego cewkę nadawczą oraz od wartości częstotliwości pierwszego rezonansu własnego cewki nadawczej i cewki czujnika detektora pola.

Elementy zestawu pomiarowego

Cewka nadawcza – dipol magnetyczny

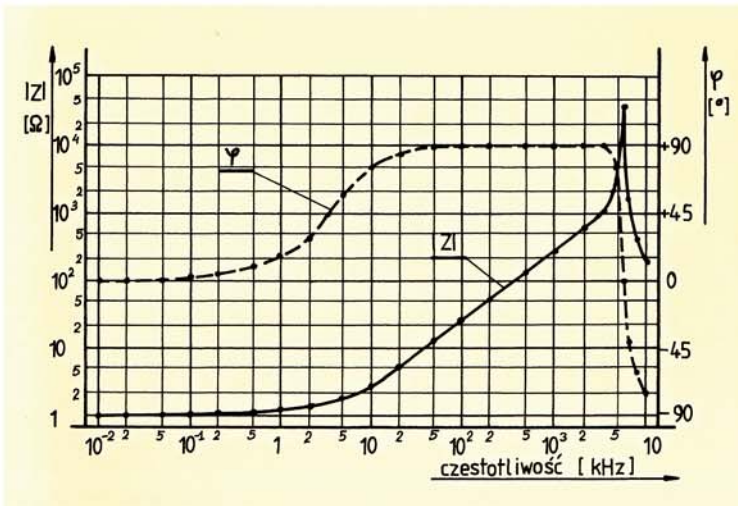
Zadaniem tego elementu zestawu pomiarowego jest wytworzenie pola elektromagnetycznego o dominującej składowej magnetycznej. Konstrukcyjnie cewkę wyko-



Rys. 2. Szczyt konstrukcyjny cewki nadawczej (dipol magnetyczny) stosowanej do pomiaru współczynnika tłumienia składowej magnetycznej fali w zakresie małych częstotliwości.

nano jako jednowarstwową o wymiarach jak na rys. 2, [6, 7]. Stałą odległość ($Z = 50$ mm) cewki od powierzchni obiektu badanego zapewnia mechaniczny dystansownik, a prosta siatka pozycjonująca ułatwia prawidłowe ustawienie dipola na określony punkt płaszczyzny. Indukcyjność własna cewki wyliczona w przybliżeniu z wymiarów geometrycznych wynosi $L_D = (35,6 \pm 2,7) \mu\text{H}$, a zmierzona ma odpowiednio wartości $L_D = (34,5 \pm 0,1) \mu\text{H}$ przy $f_p = (1 \pm 1 \cdot 10^{-5})$ kHz i $L_D = (34,3 \pm 0,2) \mu\text{H}$ dla częstotliwości $f_p = (1,4 \pm 0,01)$ MHz. Częstotliwość pierwszego rezonansu własnego dipola wynosi $f_{r \text{ dipola}} = (5,96 \pm 0,05)$ MHz (rys. 3).

Wartość natężenia składowej magnetycznej pola wytworzonego przez cewkę nadawczą jest wprost proporcjonalna do wartości natężenia prądu płynącego przez tę cewkę. Przy określonej wartości minimalnej napięcia mierzonego przez μV -selektywny i stałej geometrii układu dipol nadawczy – badany obiekt – cewka czujnika, wartość natężenia prądu płynącego przez dipol nadawczy musi być tym większa, im większe wartości tłumienia badanego ekranu chcemy mierzyć.



Rys. 3. Wykres zmian wartości modułu i fazy impedancji cewki nadawczej w funkcji częstotliwości.

Podana optymalizacja pozwala wyznaczyć liczbę zwojów cewki (przy zadanej geometrii), przy której w przestrzeni pomiarowej powstanie pole o maksymalnej wartości. Niestety warunek ten jest spełniany dla jednej konkretnej wartości częstotliwości i określonych parametrów generatora. Zatem praktyczna realizacja ww. optymalizacji wymaga stosowania cewki lub cewek o zmiennej liczbie zwojów. W rzeczywistym układzie pomiarowym dipol magnetyczny łączony jest z generatorem za pośrednictwem kabla koncentrycznego poprzez układ umożliwiający pomiar wartości prądu płynącego przez dipol (detal 4 z rys. 1). Każdy z tych elementów: generator, układ pomiaru prądu, przewody łączące wnoszą własne parametry takie jak: pojemność, rezystancja czy indukcyjność resztkowa. Powoduje to znaczną komplikację schematu zastępczego układu pracy dipola. Wyliczanie w tych warunkach optymalnej liczby zwojów cewki nadawczej nie jest uzasadnione.

Maksymalna częstotliwość pomiarowa zestawu powinna leżeć znacznie poniżej częstotliwości rezonansu ww. obwodu (2), a maksymalna długość przewodu nawojowego powinna być znacznie mniejsza niż długość fali przy maksymalnej częstotliwości pomiarów (3).

$$f_{\max} \leq 0,1 f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{\sum L \cdot \sum C}) \quad (2)$$

gdzie:

- f_{\max} – maksymalna częstotliwość pomiarów,
- f_0 – częstotliwość rezonansu obwodu utworzonego przez dipol, generator i połączenia,
- $\sum L$ – wypadkowa indukcyjność obwodu (praktycznie równa jest indukcyjności dipola),
- $\sum C$ – wypadkowa pojemność obwodu (w wykonanym zestawie $\sum C \approx (80 \div 150)$ pF, w zależności od długości kabli łączących).

$$2\pi r N = l_{\text{przewodu}} \leq 0,1 (c / f_{p,\max}) \quad (3)$$

gdzie:

- r – średnica uzwojenia dipola.
- N – liczba zwojów uzwojenia dipola.
- l_{przewodu} – długość przewodu z którego wykonano uzwojenie.
- c – prędkość światła w próżni.
- $f_{p,\max}$ – maksymalna częstotliwość pomiarowa.

Układ kontroli wartości prądu zasilającego cewkę nadawczą

Umożliwia on wyznaczenie aktualnej wartości skutecznej prądu zasilającego dipol nadawczy. Układ ten wykonano na bazie termopary o nominalnej wartości prądu $I_{\text{nom.}} = 250$ mA, włączanej w tor jego przepływu, w układzie dokładnego pomiaru prądu [8]. Taki układ połączeń ekranów i termopary pozwala zminimalizować wpływ pojemności rozproszonych ekranu i własnych termopary, na wynik pomiaru prądu.

Pomiar wartości ww. prądu można także zrealizować, kontrolując szerokopasmowym woltomierzem, wartość spadku napięcia wytworzonego przez przepływający prąd, na oporniku próbkującym włączonym w szereg z zasilanym dipolem (rys. 1). Wartość opornika próbkującego należy dobrać w taki sposób, aby uzyskany na nim spadek napięcia powstający przy przepływie prądu miał wartość zbliżoną do końcowej wartości napięcia mierzonego na jednym z zakresów stosowanego woltomierza. Czynniki ograniczającymi w tym przypadku dokładność lub wręcz zastosowanie tej metody wyznaczania wartości prądu dipola będą: właściwości częstotliwościowe impedancji zastosowanego rezystora próbkującego oraz konieczność stosowania woltomierza szerokopasmowego o symetrycznym wejściu, reagującego na wartość skuteczną mierzonego napięcia. Zastosowanie woltomierza o wejściu niesymetrycznym powoduje powstanie dodatkowego błędu o trudnej do kreślenia wartości. Wywołany on jest podziałem napięcia na dzielniku utworzonym przez impedancję wewnętrzną źródła zasilającego i impedancję rezystora próbkującego z dołączonymi pojemnościami i indukcyjnościami resztkowymi połączeń i elementami impedancji wejściowej woltomierza. Należy pamiętać, że wszystkie te parametry są wielkościami zespolonymi, a w związku z tym zależnymi od częstotliwości.

Sonda pomiarowa μV -selektywnego

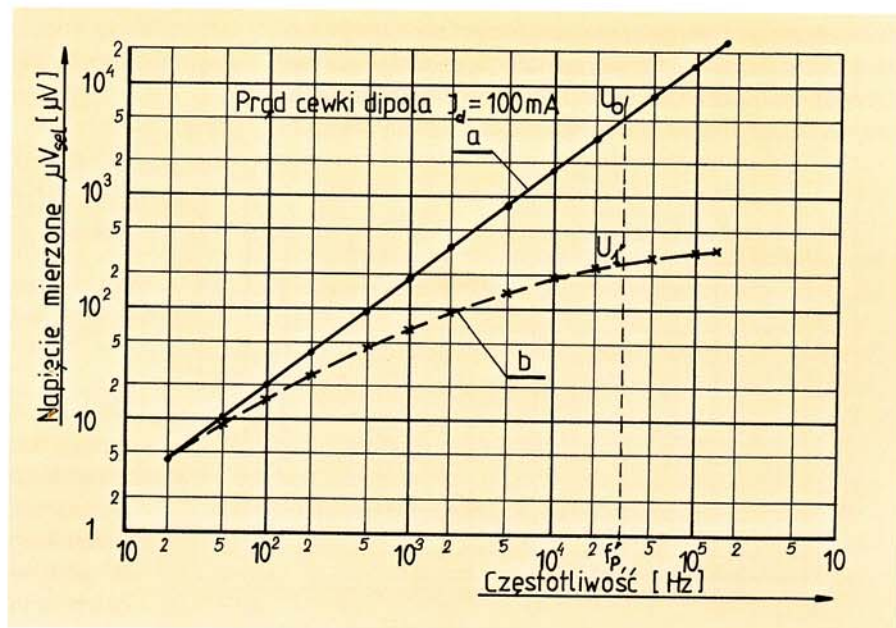
Jest ona ostatnim z elementów, które trzeba wykonać przy budowie stanowiska pomiarowego. Sonda wykonana jest w postaci cewki indukcyjnej o małych wymiarach geometrycznych. W wykonanym stanowisku sonda pracuje jako aperiodyczna. Jest to wersja korzystniejsza do pomiarów w omawianym przypadku, ponieważ, w przeciwieństwie do sondy rezonansowej, nie jest konieczne jej dostrajanie po każdej zmianie częstotliwości. Wadą tego rozwiązania jest mniejsza selektywność i czułość całego układu selektywnego pomiaru napięcia. Wartość indukcyjności sondy nie jest krytyczna. Ze względu na wartość indukowanego w cewce sondy sygnału napięciowego indukcyjność jej powinna mieć dużą wartość. Spełnienie tego warunku jest ograniczone częstotliwością pierwszego rezonansu własnego indukcyjności sondy, którego wartość powinna być co najmniej trzy razy wyższa niż maksymalna częstotliwość wykonywanych pomiarów. Zastosowana w stanowisku pomiarowym cewka sondy ma indukcyjność $L_s = (1 \pm 0,03) \mu H$ (częstotliwość pomiaru $f = 1 \text{ kHz}$), przy wymiarach: $D = 10 \text{ mm}$, $l = 8,5 \text{ mm}$ i liczbie zwojów $N = 450$ nawiniętych koszykowo. Cewka sondy jest cewką bezrdzeniową. Przy założonej górnej wartości częstotliwości pomiarowej $f_{p,max} = 150 \text{ kHz}$ maksymalna war-

tość pojemności własnych obwodu pomiarowego (kablów łączących, pojemności wejściowej mikrowoltomierza selektywnego itp.) powinna spełniać zależność $C_{s,max} \leq 100 \text{ pF}$.

Kalibracja zestawu

Idea pomiaru współczynnika tłumienia ekranu, polegająca na określeniu wartości stosunku poziomów dwu sygnałów (1), ma szereg zalet. Nie wymaga ona określenia bezwzględnej wartości natężenia składowej magnetycznej pola H czy indukcji B . Wystarczy, jeżeli zmierzone sygnały napięciowe będą związane z wartością pola przez pewien współczynnik „k”, którego wartość jest taka sama dla obu pomiarów (pomiar U_0 i U_1), przy tej samej częstotliwości pomiarowej. Spełnienie tego warunku pozwala wykonać cykl pomiarów określających napięcie indukowane w cewce sondy w funkcji częstotliwości, przy stałej wartości prądu zasilającego dipol nadawczy i przy stałej konfiguracji przestrzennej układu dipol nadawczy – sonda, w przypadku kiedy między nimi nie ma przegrody tłumiącej składową magnetyczną fali (rys. 4a). Pomiar ten stanowi swoistą formę kalibracji zestawu. W następnym etapie realizuje się ponownie cykl pomiarów w warunkach takich jak w procesie kalibracji, ale z wprowadzoną między dipol nadawczy a sondę przegrodą (materiał ekranu), której tłumienie chcemy zmierzyć (rys. 4 krzywa b). Dysponując dwiema krzywymi (rys. 4 krzywe „a” i „b”), z których wyznacza się odpowiednie pary wartości napięć U_0 i U_1 dla konkretnej częstotliwości pomiarowej (f_p – rys. 4), można wyznaczyć tłumienie wnoszone przez tą przegrodę dla tej częstotliwości. Postępując analogicznie dla innych punktów częstotliwościowych, wyznacza się szukaną charakterystykę tłumienia przegrody w funkcji częstotliwości.

Dokładność pomiarów zależy od precyzji współosiowego skonfigurowania dipola nadawczego i cewki czujnika. Niewspółosiowe ustawienie tych obu elementów



Rys. 4. Wykres zmian wartości sygnału napięciowego indukowanego w cewce czujnika przez składową magnetyczną pola
 a) przy braku przegrody tłumiącej (proces „kalibracji”),
 b) przy obecności przegrody tłumiącej (proces pomiaru).

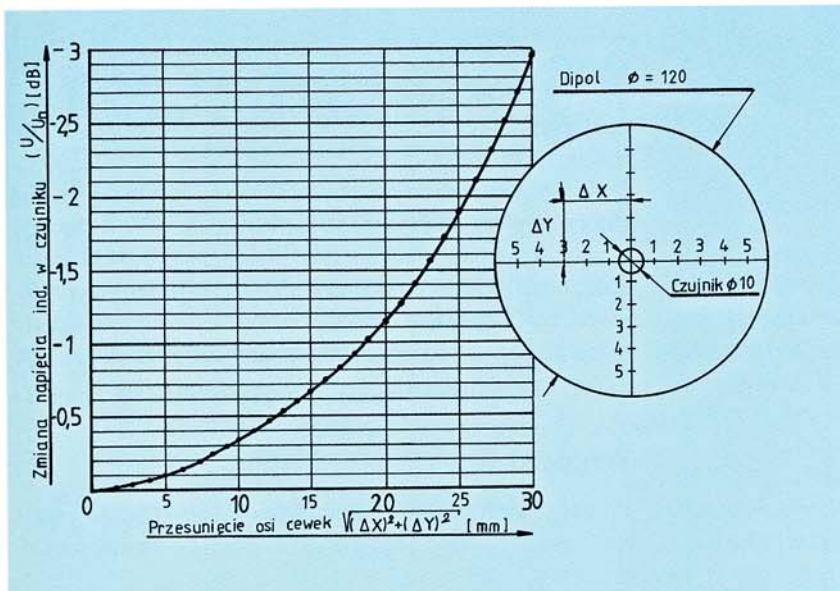
stanowiska jest źródłem błędów (rys. 5). Również dodatkowy błąd pomiaru występuje w przypadku zmiany odległości między dipolem nadawczym a cewką czujnika (rys. 6), jeżeli odległości między nimi są różne w procesie kalibracji i podczas pomiaru.

Uwagi końcowe

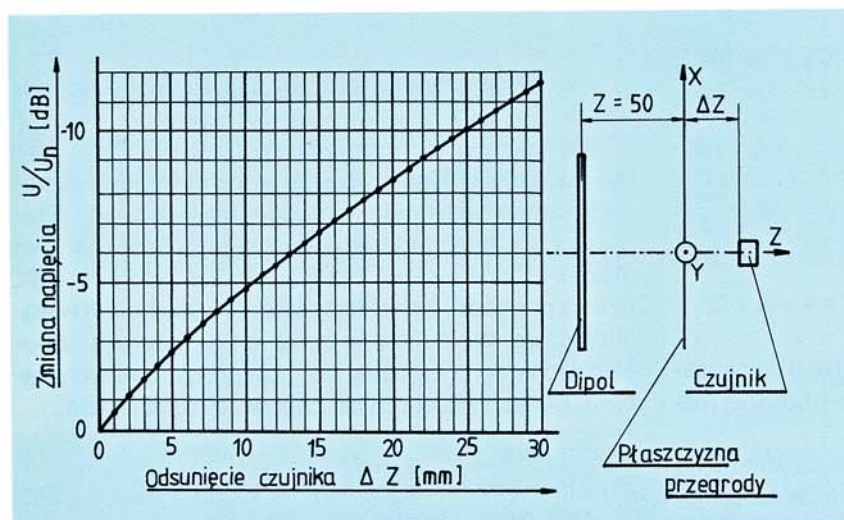
Przedstawiona metoda pomiaru tłumienia składowej magnetycznej w zakresie m.cz. jest względnie prosta do zrealizowania i nie wymaga stosowania unikalnej aparatury. Zakresy pomiarowe od 20 Hz do około (100÷150) kHz przy mierzonych wartościach współczynnika tłumienia $A_{\max} \leq 80$ dB są osiągalne przy standardowych generatorach mocy ($I_{\max} \approx 100$ mA) i mikrowoltomierzu selektywnym o minimalnym zakresie pomiarowym 1 μ V. Rozszerzenie zakresu mierzonych tłumień wymaga sto-

sowania generatorów większej mocy lub czulszych mikrowoltomierzy selektywnych. Zwiększenie górnej częstotliwości pomiarowej może być ograniczone rezonansem własnym dipola lub cewki czujnika. Dokładności uzyskiwanych pomiarów napięć wynikają z różnic dokładności mikrowoltomierza selektywnego na poszczególnych podzakresach. Są one rzędu $\pm 0,5$ dB. Dodatkowe błędy mogą wynikać z niewspółosiowości ustawienia dipola i czujnika oraz różnych odległości między nimi w procesie kalibracji i pomiaru. Ich wartość można oszacować na podstawie przytoczonych wcześniej wykresów. W standardowych warunkach należy liczyć się z całkowitą niepewnością pomiarów na poziomie $\pm(1\div 1,5)$ dB. Ten poziom dokładności jest całkowicie zadowalający w przypadku pomiarów wartości współczynnika tłumienia ekranów lub materiałów, z których są one budowane. W publikacji, ze względu na objętość materiału, nie omówiono

wplywu postronnych sygnałów na wyniki pomiarów. Jako podstawowe zalecenie należy przyjąć zasadę realizacji pomiarów w kabine ekranowanej. Ponieważ kabina taka jest bardzo kosztowna to pomiary można realizować z powodzeniem w pomieszczeniu, w którym sygnały zakłócające nie mają nadmiernych poziomów.



Rys. 5. wykres zmiany wartości napięcia indukowanego w cewce czujnika przy niecentrycznym ustawieniu jej względem osi dipola (odniesieniem jest sygnał indukowany w czujniku przy centrycznym ustawieniu cewek).



Rys. 6. Wykres zmiany wartości napięcia indukowanego w cewce czujnika przy współosiowym ustawieniu jej względem cewki dipola, w funkcji odległości czujnika od płaszczyzny przegrody (płaszczyzna x-y). Odniesieniem jest sygnał U_n indukowany w cewce czujnika przy odległości $\Delta Z = 0$.

Bibliografia:

- [1] Ott H. W.: Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. John Wiley & Sons Inc., New York 1976.
- [2] Morrison R.: Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation. John Wiley & Sons Inc., New York 1967.
- [3] Biter W. J., Jamnicki P. J., Coburn W.: Shielding Improvements by Use Thin Multilayer Films. 7th International SAMPE Electronic Materials and Processes Conference, Parsippany, New York June 1994, s. 234-239
- [4] MIL-STD-461: Electromagnetic Interference Characteristics, Requirements for Equipment, 1966.
- [5] Hołownia J., Małek J.: Metody pomiaru skuteczności ekranowania obudów urządzeń elektronicznych w zakresie niskich częstotliwości. Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Raport nr I-28/SPR-007/1981, s. 1-31.
- [6] Nota informacyjna: Antennas for MIL-STD-61. ITEM, 1979, s. 90-92.
- [7] Lewiński K., Lewińska A.: Nomogramy i tablice radiotechniczne. WNT, Warszawa 1970.
- [8] Jellonek A., Karkowski Z.: Miernictwo radiotechniczne. WNT, Warszawa 1972.

Abstracts

Measurements of Attention Magnetic Wave Emission by Magnetic Dipole in Low-Frequency Range

Piotr Ruszel – p. 38

The author present the destination of laboratory testing system for magnetic wave emission by magnetic dipole in low-frequency range. The configuration of the system and functional properties of this system are described. The specialised functional blocks of the system such as the precision magnetic wave emission for simulation of dipole in low-frequency range.