

Paweł SZCZUPAK¹

KALIBRACJA MAŁEJ ANTENY PĘTLOWEJ

W artykule przedstawiono przykłady kalibracji małej anteny pętlowej, która może być wykorzystana do pomiarów składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego. Źródłem takiego pola może być na przykład wyładowanie atmosferyczne. Istnieje wiele metod kalibracji anteny pętlowej. Poniżej przedstawiono dwie - przy użyciu skalibrowanej anteny probierczej o znanych parametrach, oraz używając jednorodnego pola magnetycznego wytworzonego przy pomocy cewki Helmholtza. Pomiarzy przy użyciu pierwszej metody zostały przeprowadzone w komorze bezodbiwojowej laboratorium kompatybilności elektromagnetycznej.

Słowa kluczowe: antena pętlowa, kalibracja anteny, cewka Helmholtza

1. Wprowadzenie

Anteny pętlowe są powszechnie wykorzystywane do pomiaru pola magnetycznego zarówno przez wojsko, jak i instytucje cywilne takie jak prywatne laboratoria. Są one istotnym narzędziem podczas pomiarów pola magnetycznego w badaniach i pomiarach kompatybilności elektromagnetycznej. Sensory bazujące na antenie pętlowej stosuje się najczęściej w zakresach częstotliwości do 30MHz.

W badaniach EMC (ang. Electromagnetic compatibility) niezwykle ważny jest dokładny pomiar natężenia pola magnetycznego wytwarzanego przez badane urządzenia elektryczne i elektroniczne, przewody wysokiego napięcia czy też zaburzenia pochodzące na przykład z wyładowań atmosferycznych. Aby pomiar był dokładny, antena musi zostać skalibrowana, a co za tym idzie musi zostać określony współczynnik antenowy (ang. antenna factor).

Istnieje wiele metod wzorcowania anten pętlowych. W poniższym artykule skupiono się na wybranych dwóch. Pierwsza polega na wykorzystaniu anteny

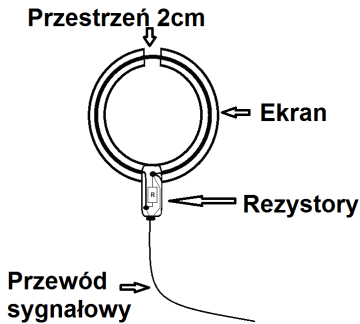
¹ Paweł Szczupak, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.; (17) 8651294, e-mail: pszczup@prz.edu.pl.

wzorcowej, o znanych parametrach. Pomiaru zostały wykonane w komorze bezodbiciowej, dla częstotliwości od 10kHz do 5MHz.

Druga metoda opierała się o wykorzystanie cewki Helmholtza. W tym przypadku pomiaru wykonano dla częstotliwości od 100Hz do 250kHz.

2. Mała antena pętlowa – budowa, zastosowanie

Celem przeprowadzonych pomiarów było określenie współczynnika antenowego małej anteny pętlowej własnej konstrukcji. Antena wykonana została z drutu miedzianego o przekroju 8 mm^2 wygiętego w okrąg o średnicy 250mm i została osłonięta ekranem (rys. 1).



Rys.1. Struktura ekranowanej anteny pętlowej

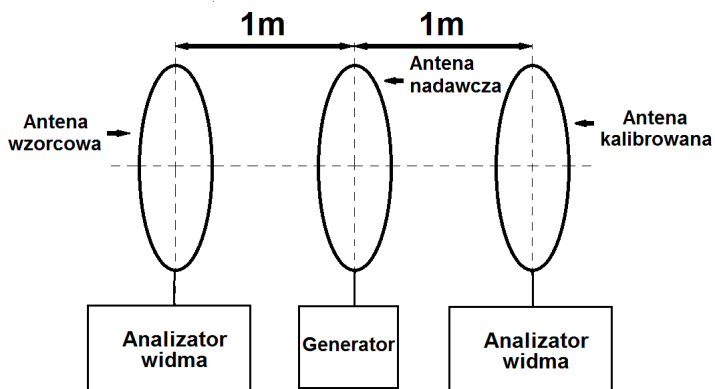
Fig.1. The structure of the shielded loop antenna

Do wyjścia anteny dołączono dwa równoległe połączone oporniki bezindukcyjne o rezystancji 100 Ohmów każdy, w celu dopasowania impedancyjnego. Antena została zaprojektowana tak, aby miała stosunkowo duży zakres częstotliwości, z tego względu zdecydowano się na jedno uzwojenie. Budowa taka powoduje, że antena ma małą czułość, zwiększając jednak ilość zwojów, zwiększa się pojemność międzyzwojową, przez co pasmo częstotliwości anteny zostaje ograniczone.

2.1. Kalibracja przy użyciu anteny wzorcowej

Do kalibracji skonstruowanej anteny posłużyła sonda pola magnetycznego HZ10 firmy ROHDE & SHWARZ o współczynniku antenowym $31\text{dB}(1/\Omega\text{m})$ i zakresie częstotliwości od 5Hz do 10M Hz. Jako źródło sygnału wykorzystano generator sygnału SML01 z zakresem od 9 kHz do 1.1 GHz, zasilający aktywną, ramową antenę pętlową HFH2Z2, generującą pole elektromagnetyczne. Każda z anten została ustawiona w odległości 1 metra w linii prostej od źródła sygnału (rys. 2). Do obserwacji sygnału na wyjściu zarówno anteny probierczej, jak

i badanej, użyto odbiornika ESU26 z możliwością obserwacji sygnałów o częstotliwościach od 20 Hz do 26GHz.



Rys. 2. Ustawienie anten podczas pomiarów

Fig. 2. Antenna alignment during measurements

Wyniki pomiarów przedstawione zostały w tabeli 1. Posługując się danymi z pomiarów, oraz znając współczynnik antenowy anteny probierczej, możliwe było wyznaczenie natężenia pola magnetycznego, w którym się ona znajdowała [1,2,3]. Współczynnik antenowy anteny wzorcowej K_H wynosi $-31,5\text{dB}(1/\Omega\text{m})$. Można więc zastosować wzór[1,2,3]:

$$H^{dB} = V^{dB} + K_H \quad (1)$$

gdzie: H^{dB} – natężenie pola magnetycznego w $\text{dB}(\text{mA}/\text{m})$,

V^{dB} – odczytane napięcie w dBmV ,

K_H – współczynnik antenowy w $\text{dB}(1/\Omega\text{m})$ lub $\text{dB}(\text{S}/\text{m})$.

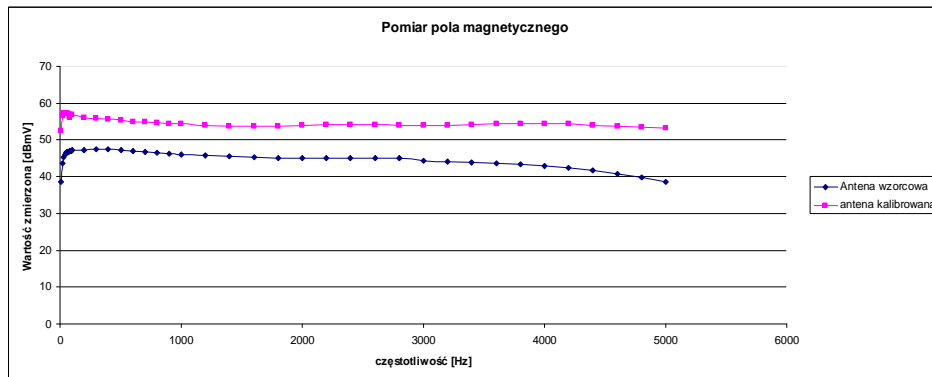
Wiedząc jaka jest wartość natężenia pola magnetycznego w odległości 1m od anteny nadawczej, oraz mierząc napięcie na wyjściu anteny wzorcowanej, po przekształceniu wzoru (1) otrzymujemy szukaną wartość współczynnika antenowego wzorcowanej anteny.

$$K_{HM} = H^{dB} - V^{dB} \quad (2)$$

Z pomiarów wynika, że współczynnik antenowy anteny wzorcowanej wynosi $-41.9\text{dB}(1/\Omega\text{m})$.

Tabela 1. Wyniki pomiarów z użyciem anteny wzorcowej przy mocy -10dBm z generatora
 Table 1. Measurement results using reference antenna at -10dBm power from the generator

| Częstotliwość [kHz] | Antena wzorcową [dBmV] | Antena kalibrowana [dBmV] |
|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 10 | 38,5 | 52,4 |
| 20 | 43,7 | 56,6 |
| 30 | 45,4 | 57,3 |
| 40 | 46,1 | 57,4 |
| 50 | 46,4 | 57,3 |
| 60 | 46,7 | 57,2 |
| 70 | 46,8 | 57,1 |
| 80 | 47 | 56 |
| 90 | 47,1 | 56,9 |
| 100 | 47,3 | 56,8 |
| 200 | 47,3 | 56,2 |
| 300 | 47,5 | 55,8 |
| 400 | 47,4 | 55,6 |
| 500 | 47,2 | 55,3 |
| 600 | 47,05 | 55 |
| 700 | 46,8 | 54,8 |
| 800 | 46,5 | 54,6 |
| 900 | 46,3 | 54,5 |
| 1000 | 46,1 | 54,3 |
| 1200 | 45,9 | 53,9 |
| 1400 | 45,5 | 53,8 |
| 1600 | 45,2 | 53,8 |
| 1800 | 45,02 | 53,8 |
| 2000 | 45 | 54 |
| 2200 | 45 | 54,1 |
| 2400 | 45 | 54,2 |
| 2600 | 45 | 54,2 |
| 2800 | 45 | 53,9 |
| 3000 | 44,3 | 53,9 |
| 3200 | 44 | 54 |
| 3400 | 43,9 | 54,2 |
| 3600 | 43,7 | 54,3 |
| 3800 | 43,4 | 54,4 |
| 4000 | 42,9 | 54,4 |
| 4200 | 42,4 | 54,3 |
| 4400 | 41,6 | 54 |
| 4600 | 40,7 | 53,7 |
| 4800 | 39,7 | 53,4 |
| 5000 | 38,6 | 53,1 |

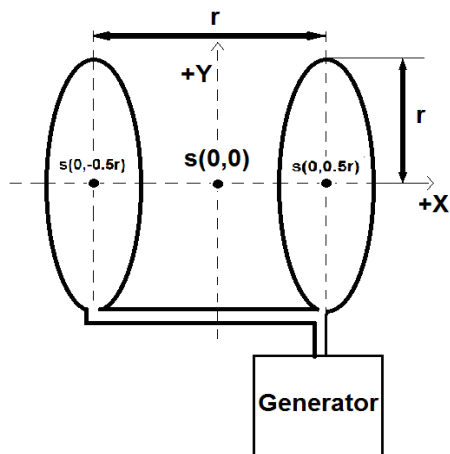


Rys. 3. Przebieg napięcia wyindukowanego w antenach: wzorcowej oraz kalibrowanej

Fig. 3. Voltage induced in standard and calibrated antennas

2.2. Wzorcowanie anteny przy użyciu cewki Helmholtza

Wykorzystana do wzorcowania cewka Helmholtza [3] składa się z dwóch cewek o promieniu 1 metra, połączonych ze sobą szeregowo, oddalonych od siebie na odległość równą ich promieniowi (rys. 4).



Rys.4. Schemat poglądowy cewki Helmholtza

Fig.4. Schematic diagram of the Helmholtz coil

Oba uzwojenia są ze sobą połączone tak, aby płynął przez nie ten sam prąd, dzięki czemu wewnątrz cewki otrzymuje się niemal jednorodne pole magnetyczne. Równanie opisujące natężenie pola magnetycznego wewnątrz cewki, w dowolnym punkcie na osi X opisuje równanie [4]:

$$H_x = \frac{NI}{2r} \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{r} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + \left[1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{r} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (3)$$

gdzie: N – liczba uzwojeń każdej z cewek,
 r – promień cewek [m],
 I – prąd płynący przez cewki [A],
 x - odległość punktu na osi X od punktu $s(0,0)$ [m].

Dla punktu $s(0,0)$ równanie to przyjmuje postać [4]:

$$H_x = \frac{NI}{r(1.25)^{\frac{3}{2}}} \approx \frac{0.7155NI}{r} \quad (4)$$

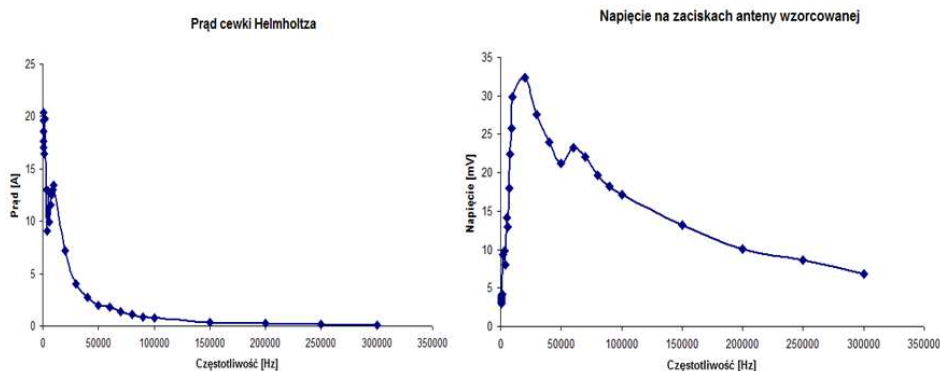
Wyniki pomiarów z wykorzystaniem cewki Helmholtza przedstawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów z wykorzystaniem cewki Helmholtza

Table 2. Measurement results using Helmholtz coil

| Częstotliwość [Hz] | Prąd płynący przez cewkę Helmholtza [A] | Napięcie z anteny wzorcowanej [mV] |
|--------------------|---|------------------------------------|
| 500 | 20,4 | 3,04 |
| 600 | 19,6 | 3,2 |
| 700 | 18,6 | 3,52 |
| 800 | 17,6 | 3,76 |
| 900 | 17 | 4 |
| 1000 | 16,4 | 4,16 |
| 2000 | 19,8 | 9,36 |
| 3000 | 13 | 9,8 |
| 4000 | 9,04 | 8 |
| 5000 | 12,8 | 14,2 |
| 6000 | 9,92 | 13 |
| 7000 | 11,6 | 18 |
| 8000 | 12,5 | 22,4 |
| 9000 | 13 | 25,8 |
| 10000 | 13,4 | 29,9 |
| 20000 | 7,2 | 32,4 |
| 30000 | 4,04 | 27,6 |
| 40000 | 2,76 | 24 |
| 50000 | 1,96 | 21,2 |
| 60000 | 1,76 | 23,2 |

| | | |
|--------|-------|------|
| 70000 | 1,36 | 22 |
| 80000 | 1,14 | 19,6 |
| 90000 | 0,896 | 18,2 |
| 100000 | 0,776 | 17,2 |
| 150000 | 0,384 | 13,2 |
| 200000 | 0,24 | 10,1 |
| 250000 | 0,144 | 8,64 |
| 300000 | 0,098 | 6,8 |



Rys. 5. Przebiegi prądu płynącego w cewce Helmholtza oraz napięcia wyindukowanego w kalibrowanej antenie pętlowej

Fig. 5. Waveforms of the current flowing through the Helmholtz coil and voltage induced in calibrated antenna

Z pomiarów wynika, że współczynnik antenowy, wzorcowanej anteny pętlowej wynosi $-41,8\text{dB(S/m)}$. Wynik ten zbliżony jest do wyniku kalibracji przy użyciu anteny wzorcowej.

3. Podsumowanie

Mała antena pętlowa jest prostym i zarazem efektywnym elementem układu do pomiaru szybkozmiennego pola magnetycznego. Odpowiednie jej zaprojektowanie i staranne wykonanie gwarantuje dokładny pomiar pola magnetycznego w szerokim paśmie częstotliwości. Dobór sposobu kalibracji anteny zależy od wielu czynników między innymi od szerokości pasma pomiarowego, przeznaczenia anteny, jak również możliwości sprzętowych.

Podczas kalibracji anteny należy spełnić kilka warunków. Pierwszym z nich jest pomiar w komorze bezodbiwojowej. Jest to szczególnie istotne podczas pomiarów wysokoczęstotliwościowych, w celu wyeliminowania szumu tła. Kolejną rzeczą jest odpowiedni dobór urządzeń ze względu na ich dokładność oraz po-

wtarzalność. W zależności od zastosowania, konieczne może się okazać policzenie niepewności pomiarowej układu pomiarowego bazującego na małej antenie pętlowej.

Niewątpliwą zaletą – obok niezawodności i łatwości wykonania małej anteny pętlowej, do pomiarów zmiennego w czasie pola magnetycznego, jest jej cena. Wszystko to sprawia, że jest chętnie i powszechnie wykorzystywana.

Literatura

- [1] Fugjii K., Sakai K., Sugijama K., Nisijama I., Calibration of Loop antennas for EMI Measurements in Frequency Range Below 30 MHz, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 63(1):71-81, January 2016.
- [2] Aykan A., Calibration of circular loop antenna., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 47(2):446-452 · May.
- [3] Overturf D., Lumsden N., Dea J., Rodriguez D., Rockway J.D., Air Core Loop Antenna Calibration Methods, SPAWAR Systems Center Pacific San Diego, CA 92101, USA.
- [4] EL. Bronaugh, HELMHOLTZ COILS FOR EMI IMMUNITY TESTING: STRETCHING THE UNIFORM FIELD AREA.
- [5] IEEE Std 291-1991, IEEE Standard Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30 Hz to 30 GHz.

THE CALIBRATION OF SMALL LOOP ANTENNA

Summary

The article presents examples of calibration of a small loop antenna, which can be used to measure the magnetic component of the electromagnetic field. The source of such a field may be, for example, lightning. There are many methods of calibration a loop antenna. Two of them are presented below – using test antenna which is calibrated and with known parameters, and using a homogenous magnetic field generated inside Helmholtz coil. Measurements using the first method were carried out in the anechoic chamber of the EMC laboratory.

Keywords: loop antenna, antenna calibration, Helmholtz coil

DOI: 10.7862/re.2020.8

Przesłano do redakcji: grudzień 2019 r.

Przyjęto do druku: luty 2021 r.