

**Damian GONSCZ**

INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI, POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## Analiza i pomiary pól magnetycznych w otoczeniu elektrycznych urządzeń przemysłowych dużej mocy

Dr inż. Damian GONSCZ

Autor urodził się w 1973r. Dyplom mgra inż. elektryka uzyskał w 1998r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej, gdzie również w 2003r. otrzymał stopień doktora w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Działalność naukową realizuje w obszarze badań pól magnetycznych i budowy aparatury pomiarowej do analizy oddziaływań elektromagnetycznych.



e-mail: damian.gonszcz@polsl.pl

### Streszczenie

Publikacja jest zwartym opracowaniem na temat zagadnień związanych z analizą i metodyką badań przemiennych pól magnetycznych, wykonywanych na potrzeby oceny narażeń pracowników na ekspozycję w polu magnetycznym w środowisku przemysłowym. Praca obejmuje aspekty techniczne poprawnego wykonywania pomiarów oddziaływań magnetycznych, charakterystykę narzędzi pomiarowych oraz uwagi dotyczące interpretacji wyników w odniesieniu do aktualnych norm i przepisów. Szczególną uwagę zwrócono na sposób wyboru miejsc i pionów pomiarowych w bliskim otoczeniu źródeł pól magnetycznych. Praca zawiera również zestawienia dopuszczalnych poziomów oddziaływań magnetycznych z uwzględnieniem stref ochronnych.

**Słowa kluczowe:** pomiary przemiennych pól magnetycznych, ekspozycja w polu magnetycznym.

### Analysis and measurements of magnetic fields nearby electric power devices

#### Abstract

The analysis and methods of research of alternate magnetic fields in industrial environment are described in the paper. Described problems concern the workers' exhibition in the magnetic field on the work positions. A selected type of instruments for magnetic measurements are presented. The limit values of magnetic induction and the limit values of intensity of magnetic field are shown in tab. 1. The established standard protective zones are marked in this table too. A technical aspects of measurement processes and a methods of result interpretations are explained. The most measurement problems and essentials error sources are pointed.

**Keywords:** measurements of alternate magnetic fields, exhibition in the magnetic field.

### 1. Wstęp

Pole elektromagnetyczne (PEM) występujące w środowisku przemysłowym może być oddziaływaniem zamierzonym lub skutkiem ubocznym pewnych procesów technologicznych. Należy zaznaczyć, że PEM może być rozpatrywane w tzw. strefie dalekiej lub bliskiej. Strefa daleka występuje w odległości  $x$  od źródła pola przy spełnieniu warunku  $x > \lambda/2\pi$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali, obliczaną z zależności  $\lambda = c/f$ . Parametr  $c$  jest prędkością światła i wynosi  $3 \cdot 10^8$  m/s, a  $f$  jest daną częstotliwością oddziaływania polowego, wyrażoną w Hz. W obszarze tym składowe: elektryczna (PE) i magnetyczna (PM) są wzajemnie sprzężone impedancją falową  $Z = E/H$  i nie można ich rozpatrywać oddzielnie. Osobna analiza składowych jest możliwa wyłącznie w strefie bliskiej dla warunku  $x \leq \lambda/2\pi$ , co ma miejsce dla większości pomiarów pól w bliskim otoczeniu wielkopiędowych obiektów przemysłowych. Pomiary te wykonuje się głównie w celu oceny zagrożeń pracowników ekspozowanych w PEM na stanowiskach pracy.

Metrologia pól elektromagnetycznych jest dosyć skomplikowana, przede wszystkim z uwagi na fakt niemożności pomiaru bezpośredniego, jak również z racji braku możliwości wykrycia organoleptycznie występowania pola. Ponadto PEM jest wielkością wektorową, co utrudnia pomiary pewnych jego parametrów, gdyż w analizie należy uwzględnić współrzędne przestrzenne ( $x, y, z$ ) i zmienność wektora w czasie  $t$  [1]. Dalsza treść artykułu dotyczy wyłącznie problematyki pomiarowej dla pola magnetycznego w strefie bliskiej oddziaływań.

### 2. Identyfikacja pola i dobór narzędzi pomiarowych

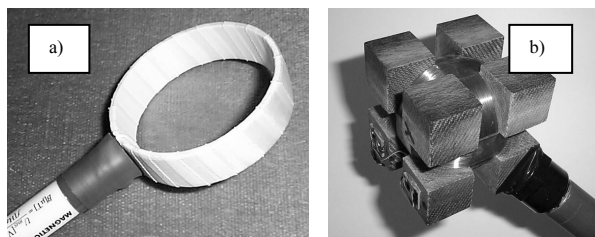
Przed przystąpieniem do jakichkolwiek pomiarów (niekiedy magnetycznych) należy zawsze w miarę możliwości wstępnie zidentyfikować analizowany obiekt. W przypadku przemiennego pola magnetycznego nie jest to sprawa prosta. W badaniach środowiskowych i w ocenie ekspozycji zawodowej pracowników, zakłada się zwykle, że pole magnetyczne jest wirujące harmoniczne, stacjonarne i jednorodne. W rzeczywistości jednak rozpatrywane pole nie spełnia w dokładny sposób powyższych założeń. Problem poznawczy tkwi w ocenie stopnia niespełnienia tych założeń, co w konsekwencji ma związek z doбором optymalnie najlepszych przyrządów pomiarowych, tzn. takich, które mogą wyznaczać wybrane parametry pola najdokładniej. Najistotniejszą kwestią jest stwierdzenie, czy pole jest faktycznie harmoniczne. W wyniku superpozycji bliskich oddziaływań magnetycznych, większość pomiarów w bliskim otoczeniu wielkopiędowych obiektów przemysłowych dotyczy pól odkształconych. Ma to związek z powszechnością stosowania energoelektronicznych układów przekształtnikowych, gdzie prąd roboczy jest zwykle odkształcony i ponadto duże znaczenie mają obwody sterujące, generujące również odkształcone pole magnetyczne. W konsekwencji wektor indukcji nie zakreśla elipsy lecz pewną trójwymiarową figurę w bliskim otoczeniu linii elipsy, odwzorowującej podstawową harmoniczną pola.

Identyfikacja takiej sytuacji może polegać np. na analizie dokumentacji i poznaniu zasady działania obiektu, będącego głównym źródłem badań. Inny sposób wymaga wizualizacji przebiegu czasowego modułu wektora pola lub jednej z jego składowych. Do tego celu można wykorzystać oscyloskop z sondą indukcyjną. Jest to prosty detektor kierunkowy, który pozwala odwzorować kształt przebiegu czasowego składowej wektora pola, pod warunkiem niezbyt dużych częstotliwości oddziaływań. Zaobserwowany przebieg sinusoidalny pozwala sądzić, że oddziaływanie magnetyczne jest harmoniczne. W przeciwnym razie mamy do czynienia z polem odkształconym. Opisany problem nie występuje w przypadku stosowania mierników szerokopasmowych, przewidzianych do analizy pól odkształconych. Przyrządy te zwykle umożliwiają wizualizację zmian czasowych modułu wektora pola i dokonują analizy FFT wraz z oceną zawartości wyższych harmonicznych (współczynnik THD).

Aktualne zalecenia zawarte w normach [2], nakazują dokonywanie pomiarów w bardzo szerokim paśmie częstotliwości. Jest to istotny problem konstruktorski, gdyż produkowane sondy muszą mieć płaską charakterystykę częstotliwościową w całym zakresie pomiarowym. Zapewnienie takiej charakterystyki daje możliwość poprawnego wyznaczenia rzeczywistej wartości skutecznej natężenia PM. Zagadnienie jest o tyle istotne, że dopuszczalne poziomy dla PE i PM [3] wyrażane są w wartościach skutecznych.

Do detekcji słabych oddziaływań, obecne techniki pomiaru PM, wykorzystują przede wszystkim sondy indukcyjne w wersji kierunkowej i bezkierunkowej. Detektory indukcyjne mają szereg zalet [4], jednak ich główną wadą jest różniczkowanie sygnału -

efekt szczególnie istotny w pomiarach pól odkształconych. Antena indukcyjna przeznaczona do pomiarów pól odkształconych, musi więc współpracować z aktywnym lub pasywnym integratorem. Obowiązujące normy [2] zalecają stosowanie w pomiarach przyrządów bezkierunkowych, jednak dopuszczają również stosowanie przyrządów kierunkowych. Bez kierunkowy pomiar pozwala dla dowolnego ustawienia głowicy pomiarowej (przy zachowaniu niezmienności współrzędnych jej środka) zawsze poprawnie wyznaczyć moduł wektora pola (indukcji lub natężenia) w danej chwili czasu w wybranym punkcie przestrzeni pomiarowej. Pomiar z wykorzystaniem sond kierunkowych są kłopotliwe, ponieważ dla każdego punktu pomiarowego operator musi znaleźć maksimum wskazań. W polu harmonijnym wirującym, maksimum odpowiada kierunkowi półosi dłuższej elipsy, czyli kierunek tej półosi musi być prostopadły do płaszczyzny sondy, zaś dla pola pulsującego, o niezmiennym położeniu kierunkowej, maksymalne wskazanie wystąpi, jeżeli prosta kierunkowa będzie prostopadła do płaszczyzny sondy (np. anteny ramowej). Powoduje to powstanie znacznej dodatkowej składowej błędów, która nie wynika z toru przetwarzania przyrządu. Ponadto, szukając maksymalnej wartości pola w pionie pomiarowym, przy użyciu detektora kierunkowego, pomiary należy wykonywać skokowo (w punktach oddalonych o jednakową odległość). W przypadku pomiaru bezkierunkowego, problem nie występuje, gdyż operator może w sposób płynny przemieścić głowicę wzdłuż pionu. Widok przykładowej głowicy kierunkowej i bezkierunkowej pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Głowice pomiarowe: kierunkowa (a) i bezkierunkowa (b) [5]  
Fig. 1. The measuring heads: direction head (a) and directionless head (b) [5]

Należy pamiętać, że inne narzędzia pomiarowe stosuje się do wyznaczania parametrów pól bliskich, a inne dla dalekich. Z zasady, narzędzia przeznaczone do badań pól bliskich można w pewnych sytuacjach przenieść do strefy dalekiej, ale nigdy nie odwrotnie.

W celu uniezależnienia reakcji detektora indukcyjnego od składowej elektrycznej pola, stosuje się ekranowanie sondy np. obudową aluminiową. Ekran ten jest jednak filtrem dolnoprzepustowym. Wielu producentów podejmowało szereg prób dopasowania charakterystyk częstotliwościowych sond do przedziałów częstotliwości związanych z konkretnymi dopuszczalnymi poziomami ekspozycji. Tego typu podejście nie jest zalecane z uwagi na okresowo zmieniające się przepisy dotyczące wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) i przedziałów częstotliwości w jakiej są rozpatrywane. Innym rozwiązaniem są detektory selektywne, dla których nie występuje problem z przetwarzaniem sygnałów odkształconych. Przykładowo, dla pomiaru pola harmonicznego, równanie przetwarzania detektora indukcyjnego ma postać:

$$e(t) = -2 \cdot z \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot f \cdot B_m \cdot \cos \omega t \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

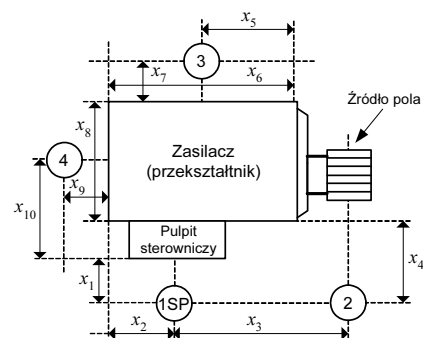
gdzie:  $f$  – częstotliwość przebiegu indukcji magnetycznej o amplitudzie  $B_m$ ,  $z$  – liczba zwojów,  $r$  – promień cewki i  $\cos \alpha$  – współczynnik kierunkowy, wynoszący 1 dla maksymalnego sygnału napięciowego na wyjściu sondy, uzyskanego w wyniku odpowiedniego ustawienia sondy.

W pomiarach przemysłowych częstotliwości pól magnetycznych zawierają się najczęściej w przedziale od 50 Hz do ok. 200 kHz (np. grzejnictwo indukcyjne). Badania na stanowiskach pracy

dotyczą więc strefy bliskiej. Należy pamiętać, że dla bardzo dużych częstotliwości (np. grzejnictwo mikrofalowe), bliskie otoczenie urządzenia może stanowić strefę daleką. W takiej sytuacji średnica cewki pomiarowej musi być mniejsza od długości fali PEM. Ze względu na uśrednianie mierzonego pola w obszarze objętej cewką, wymagane jest aby wymiary cewki były minimalne. Jest to wymóg stawiany wszystkim rodzajom detektorów, szczególnie przeznaczonym do pomiarów pól o małych natężeniach, ponieważ ich gabaryty mogą zaburzać mierzone medium. W metrologii pól o bardzo dużych częstotliwościach (rzędu MHz i więcej), stosuje się złożone rozwiązania konstrukcyjne głowic pomiarowych. Wynika to z różnego rodzaju sprzężeń występujących między elementami składowymi głowic, które głównie odnoszą się do parametrów pasywnych detektorów (np. pojemności międzyzwojowe, wyprowadzenia przewodów itp.). Są to sprzężenia zarówno pojemnościowe, jak i indukcyjne.

### 3. Wybór miejsca wykonywania pomiarów

Pomiary związane z oceną narażeń pracowników na oddziaływanie magnetyczne, wykonuje się z reguły w miejscu zainstalowania urządzenia (hala produkcyjna) w pewnych charakterystycznych punktach, zgodnie z zaleceniami normy [2]. Liczba punktów jest zależna od usytuowania stanowiska pracy względem obiektu wytwarzającego pole oraz od obszaru, w którym może się poruszać pracownik. Niekiedy wymagane jest wykonanie mapy rozkładu PM na danym obszarze. Ma to miejsce, kiedy pracownicy podczas pracy mogą zajmować dowolny punkt rozpatrywanego obszaru. Przykładem są pomieszczenia biurowe znajdujące się nad lub obok silnych źródeł PM. Zwykle na wstępie wykonuje się szkic sytuacyjny, obejmujący zwymiarowany obiekt wytwarzający pole, stanowisko pracy oraz tzw. pion pomiarowy. Przykładowy szkic sytuacyjny (rzut z góry) pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowy szkic sytuacyjny mierzonego obszaru  
Fig. 2. The example of draft of the industry measuring area

Pion pomiarowy jest rozumiany jako oś człowieka znajdującego się w danym miejscu. W pomiarach pion stanowi prostą, zwykle prostopadłą do podłoża. Najważniejsze są piony oznaczane jako (SP), znajdujące się na stanowisku (stanowiskach) pracy. Pozostałe piony są pomocnicze i określają miejsca dostępne, gdzie ewentualnie może pojawić się człowiek w trakcie pracy. Pomiary należy wykonywać wzdłuż kolejnych pionów, na dwóch charakterystycznych wysokościach. Wysokości związane są z oddziaływaniem na kończyny dolne i klatkę piersiową dorosłej osoby. Przyjmuje się wysokości 0,7 m i 1,4 m od podłoża. W pionach (SP) należy dokonać dodatkowego pomiaru, polegającego na wyszukaniu maksymalnej wartości natężenia pola w osi człowieka i odpowiadającej mu wysokości  $h$  (niezbędne do wyznaczenia dozy rzeczywistej). Z uwagi na fakt, iż rzeczywisty poziom oddziaływań magnetycznych na stanowiskach pracy jest superpozycją oddziaływań, pochodzących od wszystkich źródeł pola, znajdujących się w otoczeniu badanego obszaru, można dokonać pomiarów tła. Celem tych pomiarów jest poznanie różnicy wartości natężenia pola w wybranych punktach przy pracującym i wyłą-

czonym urządzeniu, będącym przedmiotem badań. Badania narażeń związanych z ekspozycją pracowników w PM, nie wymagają jednak pomiarów tła, ponieważ istotne są wartości natężenia pola w danym obszarze bez wskazywania konkretnego źródła. Inna interpretacja zagadnienia jest w przypadku potrzeby poznania oddziaływań, wytwarzanych przez konkretne urządzenie. Często jest to przedmiotem zainteresowań producenta urządzenia, który zleca takie badania.

#### 4. Poziomy dopuszczalne i ocena wyników

Dokument [3] ściśle określa dopuszczalne poziomy natężenia PM dla środowiska pracy. W tabelicy 1 zestawiono wartości graniczne poszczególnych stref ochronnych z uwzględnieniem częstotliwości oddziaływań polowych. Jeżeli w trakcie pomiarów choć przez chwilę zostanie przekroczona wartość graniczna danej strefy, to strefę należy zaznaczyć graficznie na rysunku zamieszczonym w protokole końcowym z uwzględnieniem wymiarów.

Tab. 1. Wartości graniczne pola magnetycznego dla stref ochronnych  
Tab. 1. The limit values of the magnetic field for protective zones

Zakres częstotliwości	$H_0(f)$ , A/m	$B_0(f)$ , $\mu$ T	Graf.	$H_1(f)$ , A/m	$B_1(f)$ , $\mu$ T	Graf.	$H_2(f)$ , A/m	$B_2(f)$ , $\mu$ T	Graf.
(0 ÷ 0,5) Hz <i>pole magnetostatyczne</i>	2666	3333		8000	10000		80000	100000	
(0,5 ÷ 50) Hz	66,6	83,3		200	250		2000	2500	
(0,05 ÷ 1) kHz	10/(3f)	12,5/(3f)		100/f	125/f		100/f	125/f	
(1 ÷ 800) kHz	3,3	4,2		10	12,5		100	125	
(0,8 ÷ 150) MHz	8/(3f)	10/(3f)		8/f	10/f		80/f	100/f	
(0,15 ÷ 3) GHz	0,018	0,022		0,053	0,066		0,530	0,660	
* Ekspozycja do 8 godzin na zmianę roboczą. ** Zakaz ekspozycji.	Wartości rozgraniczające strefę pośrednią od bezpiecznej. Granica ekspozycji zawodowej.		Strefa pośrednia *	Wartości rozgraniczające strefy.		Strefa zagrożenia	Wartości rozgraniczające strefy.		Strefa niebezpieczna

Większość przyrządów pomiarowych przeznaczonych do powyższych badań, umożliwia zaprogramowanie progów stref ochronnych. Przekroczenie zadanego poziomu jest zwykle sygnalizowane optycznie lub akustycznie. Ponieważ strefa pośrednia jest definiowana jako obszar, w którym pracownik może przebywać przez 8 godzin w ciągu dnia, dopuszczalnymi poziomami granicznymi są  $H_1$  i  $B_1$ . Wynika to z założenia czasu pracy, który z reguły jest  $\leq 8$  h. Wielkością charakterystyczną w ocenie narażeń jest tzw. doza rzeczywista  $D_X(f)$ , określająca ekspozycję pracownika w PM, podczas wykonywania czynności w czasie całej zmiany roboczej. Wyznaczenie wartości dozy jest szczególnie istotne kiedy na SP mogą występować różne poziomy natężenia pola w różnych przedziałach czasu, a zwłaszcza jeżeli łączny czas pracy jest większy niż 8 h. W tabelicy 2 zestawiono wartości doz dopuszczalnych  $Dd_X(f)$  z uwzględnieniem częstotliwości PM.

Tab. 2. Zestawienie doz dopuszczalnych  
Tab. 2. The values of the real doses

Zakres częstotliwości	$Dd_H(f)$	$Dd_B(f)$
(0 ÷ 0,5) Hz <i>pole magnetostatyczne</i>	512 (kA/m) <sup>2</sup> h	800 (mT) <sup>2</sup> h
(0,5 ÷ 50) Hz	0,32 (kA/m) <sup>2</sup> h	0,5 (mT) <sup>2</sup> h
(0,05 ÷ 1) kHz	800/f <sup>2</sup> (A/m) <sup>2</sup> h	1250/f <sup>2</sup> ( $\mu$ T) <sup>2</sup> h
(1 ÷ 800) kHz	800 (A/m) <sup>2</sup> h	1250 ( $\mu$ T) <sup>2</sup> h
(0,8 ÷ 150) MHz	512/f <sup>2</sup> (A/m) <sup>2</sup> h	800/f <sup>2</sup> ( $\mu$ T) <sup>2</sup> h
(0,15 ÷ 3) GHz	0,022 (A/m) <sup>2</sup> h	0,035 ( $\mu$ T) <sup>2</sup> h
	Wartości stosowane do wyznaczania wskaźnika ekspozycji $W$ , pracownika ekspozowanego w strefach ochronnych.	

Doza rzeczywista jest sumą doz chwilowych  $dx_{k,m}(f)$ , rozpatrywanych dla  $k$  przedziałów czasowych ekspozycji i w  $m$  pionach SP, w których w czasie zmiany przebywa pracownik:

$$D_X(f) = \sum_k \sum_m dx_{k,m}(f) \quad (2)$$

Doza chwilowa:

$$dx_{k,m}(f) = [X_{k,m}(f)]^2 \cdot \Delta t_{k,m}, \quad (3)$$

gdzie:  $X_{k,m}(f)$  – wartość indukcji magnetycznej lub natężenia pola magnetycznego, w  $k$ -tym przedziale czasu ekspozycji dla  $m$ -tego pionu pomiarowego ( $m$ -tego stanowiska SP),  $\Delta t_{k,m}$  –  $k$ -ty przedział czasu oddziaływania pola na pracownika dla  $m$ -tego pionu pomiarowego.

Często definiuje się również wynikający z powyższego, wskaźnik ekspozycji dla dozy rzeczywistej pola:

$$W_X = \sum_f \frac{D_X(f)}{Dd_X(f)}, \quad (4)$$

uwzględniający kolejne częstotliwości, występujące w widmie pola. Pełna analiza składowej elektrycznej i magnetycznej, umożliwia wyznaczenie wskaźnika ekspozycji  $W$ , będącego sumą wskaźnika ekspozycji dla dozy rzeczywistej pola elektrycznego  $W_E$  i magnetycznego  $W_H$ . Przyjmuje się ekspozycję dopuszczalną jeżeli  $W \leq 1$  oraz ekspozycję nadmierną dla  $W > 1$ .

Niekiedy pomocnym parametrem jest dopuszczalny czas ekspozycji, który oblicza się dla SP ze znajomości wartości pola:

$$td_X(f) = \frac{Dd_X(f)}{X^2(f)} \quad [\text{h}] \quad (5)$$

#### 5. Wnioski

Pomiary oddziaływań magnetycznych w otoczeniu elektrycznych obiektów przemysłowych, wykonywane na potrzeby oceny narażeń pracowników, nie należą do najłatwiejszych. W niniejszym artykule z uwagi na ograniczoną objętość, zasygnalizowano tylko niektóre zagadnienia z tego obszaru. W celu poprawnej organizacji takich pomiarów, należy oprócz aspektów natury prawnej, rozważyć szereg problemów technicznych.

Mimo dużej oferty rynku w zakresie przyrządów pomiarowych, dedykowanych metrologii PEM, ciągle w wielu pracach naukowych poruszany jest temat projektowania i konstrukcji nowej aparatury pomiarowej. Ma to związek z potrzebą analiz oddziaływań polowych o bardzo małych wartościach, przeprowadzanych z dużymi dokładnościami.

Powyzsza tematyka jest aktualna i z punktu widzenia badań środowiskowych budzi obecnie szereg kontrowersji, co wynika z trudności w ustaleniu poziomów pola aktywnych biologicznie i z nieznanych do końca skutków oddziaływań pól na organizmy żywe. W technice zaś, pomiary PEM dotyczą przede wszystkim procedur nadania maszynom i urządzeniom certyfikatu zgodności.

#### 6. Literatura

- [1] B. Baron, D. Gonscz, J. Kolańska-Pluska, T. Bartuchowski: Two-dimensional magnetic field nearby the low voltage power line. Rozdział monografii, Alwers, Poznań, 2006.
- [2] Norma PN-T-06580 „Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz (część 1: Terminologia, część 3: Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy), zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej (Dz. U. Nr 79, poz. 513, z dnia 17.06.1998 r. oraz DU Nr 4, poz. 36 z dnia 02.01.2001 r.).
- [3] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29.11.2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 217 z dnia 18.12.2002 r., poz. 1833).
- [4] S. Tumański: Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju. Przegląd Elektrotechniczny, Sigma NOT, Warszawa, 2/2004.
- [5] T. Skubis, D. Gonscz: The directionalless instrument for the periodical magnetic field analysis. Mat. konf. IMTC, Como, Italy, 2004.