

Ekspozycja na pole elektromagnetyczne w badaniach biomedycznych i kompatybilności elektromagnetycznej

Streszczenie. W artykule dyskutuje się źródła niepewności w badaniach bioelektromagnetycznych. Przedstawia się półprzewodzące własności materii biologicznej i ich rolę *in vivo*. Przypomina się efekt naskórkowy i jego rolę w tłumieniu pól i prądów w ciele. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły występowanie w ciele efektów nieliniowych. Oba zjawiska wskazują na potrzebę kompleksowej ekspozycji w badaniach biomedycznych. Proponuje się zestaw do tego celu, przy badaniu radiotelefonów osobistych.

Abstract. In the paper are discussed selected sources of uncertainty in bioelectromagnetics research. Semiconducting properties of biologic matter and their role *in vivo* are presented. The skin depth and its role in fields and currents attenuation in a body is reminded. Performed experiments confirmed presence of nonlinear phenomena in a body. Both the phenomena suggest a necessity for complex exposure in biomedical studies. A set for this purpose, in the case of exposure to personal radios, is presented. (*Exposure to EMF in biomedicine and in electromagnetic compatibility*).

Słowa kluczowe: bioelektromagnetyzm, układ ekspozycyjny, telefonia komórkowa, głębokość wnikania, pole elektromagnetyczne.

Keywords: bioelectromagnetics, exposure system, cellular telephony, penetration depth, electromagnetic field.

doi:10.12915/pe.2014.12.47

Wstęp

Ocenia oddziaływania pola elektromagnetycznego (PEM) na materię nie- i żywą oraz wytwory techniki jest procesem złożonym i wymaga szczegółowych analiz stosowanych procedur, zwłaszcza w aspekcie dokładności. Podstawowym zadaniem jest tu określenie i pomiar efektów oddziaływania PEM. W zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) możemy określić oczekiwany stopień odporności urządzeń bądź akceptowalne dysfunkcje w działaniu pod wpływem ekspozycji na PEM, a robią to inżynierowie. Badanie obiektów biologicznych to domena biologów i lekarzy, a technicy mogą tu jedynie służyć pomocą. Drugi, ale nie mniej istotny (o ile nawet nie istotniejszy) problem to opracowanie scenariuszy ekspozycji na PEM oraz układów ekspozycyjnych zapewniających osiągnięcie oczekiwanej dokładności. To jest już zawsze domena inżynierów i o ile w dziedzinie EMC, gdzie i tak wiele badań jest określonych normami krajowymi i międzynarodowymi, wszelkie uzgodnienia prowadzą inżynierowie reprezentujący określony poziom wiedzy dziedziny elektromagnetyzmu, o tyle dla badań biomedycznych niezbędny jest dialog i wzajemne rozumienie problemów przez przedstawicieli świata medycyny i techniki. Nie ma wątpliwości, że wszelkie eksperymenty w dziedzinie bioelektromagnetyzmu muszą być projektowane, inicjowane i nadzorowane, a ich rezultaty interpretowane przez biologów i lekarzy i nie może tu być mowy o ingerencji techników. Jednak strona techniczna, jak na przykład przygotowanie układów ekspozycyjnych, kontrola ich pracy w trakcie eksperymentu oraz ocena ekspozycji, musi być pod nadzorem fizyków lub inżynierów reprezentujących wiedzę w dziedzinie elektromagnetyzmu. Jeżeli postulat ten nie jest zachowany może dochodzić do naruszenia technicznej poprawności prowadzonych eksperymentów. Poza wątpliwością dotyczącą poprawności, a więc i dokładności, wielu eksperymentów w dziedzinie bioelektromagnetyzmu, najbardziej charakterystycznym jest znana z wielu publikacji rozbieżność wyników „identycznych” badań prowadzonych w różnych ośrodkach.

Niniejszą pracę poświęcamy zwróceniu uwagi na niektóre źródła błędów, popełnianych w badaniach biomedycznych i staramy się pokazać możliwości ich ograniczenia, przedstawiając również efekty eksperymentów potwierdzających nieliniowe własności tkanek i proponując układ ekspozycyjny pozwalający na kompleksową ekspozycję na PEM od radiotelefonów.

Kilka uwag o dokładności

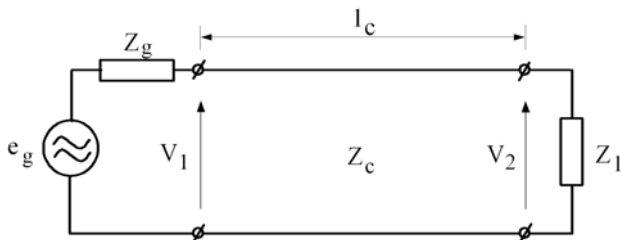
Każda procedura pomiarowa jest obciążona błędem, właściwym dla tej procedury. Teoria błędów, lub chętniej ostatnio stosowanego określenia „niepewność”, daje eksperymentatorom narzędzia do analizy, oceny i możliwości optymalizacji systemu pomiarowego pod kątem minimalizacji niepewności. Narzędzia te czasami są tak złożone, że nierzadko mamy problemy z ich prawidłową interpretacją i wykorzystaniem. Niezależnie od okoliczności wynik pomiaru, badania czy analizy zawsze obciążony jest błędem i aby był poprawnie przedstawiony, musi zawierać informację o szacunkowej wartości tego błędu. Dla przypomnienia – jeżeli np. chcemy podać średni czas dojścia do pracy wynoszący 30 minut, to nie zapominajmy o oszacowaniu błędów bądź niepewności wyznaczenia tego czasu. Prawidłowo zapisany wynik powinien być przedstawiony w postaci: 30 ± 6 minut lub $30 \text{ min} \pm 20\%$. W elektronice chętnie wykorzystuje się również miarę logarytmiczną, której „reprezentantem” są decybele [dB].

W przypadku badań związanych z ekspozycją na PEM niezwykle istotne są dodatkowe pojęcia związane z niepewnością pomiarów – powtarzalność i odtwarzalność warunków i wyników eksperymentu. Na podstawie naszych spostrzeżeń, to właśnie jest wciąż piętą achillesową badań biomedycznych. W rezultacie wyniki „identycznych” eksperymentów, prowadzonych w różnych ośrodkach, jak i wysnuwane na ich podstawie wnioski, mogą być skrajnie rozbieżne. W zakresie EMC, gdzie bada się między innymi susceptybilność urządzeń, procedury i stanowiska pomiarowe są szczegółowo opisane w wielotomowych normach, ale jednocześnie dokładne przyjrzenie się tym normom prowokuje do wyciągnięcia ryzykownego wniosku, że bezwzględne wartości rozpatrywanych wielkości fizycznych mają mniejsze znaczenie, a liczy się głównie właśnie odtwarzalność i powtarzalność – zapewnia to spełnienie podstawowych oczekiwań – zapewnienia kompatybilności, czyli niezakłócanego współistnienia różnych elementów, urządzeń czy systemów, i często jest to analiza jakościowa: „spełnia – nie spełnia” wymagania normy. Co więcej przy tak sformułowanych kryteriach oceny istnieje możliwość wyznaczenia dopuszczalnego marginesu błędów uwzględniającego niedoskonałość metod pomiarowych, stanowisk a nawet czynnika ludzkiego. Jednak w badaniach podstawowych czy biomedycznych istotne zaczynają być wartości bezwzględne – rzadko kiedy oczekiwanym wynikiem badań jest stwierdzenie „żyje – nie

żyje”. Również przy wzorcowaniu narzędzi pomiarowych istotne są „prawdziwe” wartości bezwzględne, a niepewność jest jednym z podstawnych kryteriów oceny możliwości laboratorium i klasy wzorcowań.

Linia TEM jako układ ekspozycyjny

Linia TEM (nazywana też komorą Crawforda) to bardzo popularny, wręcz „definitywny” układ ekspozycyjny PEM. Najprostszy schemat zastępczy linii TEM pokazano na rysunku 1. Linia TEM o impedancji falowej Z_c , o długości całkowitej l_c i odległości między przewodami d jest zasilana ze źródła e_g o impedancji wyjściowej Z_g i jest obciążona obciążeniem bezodbiciowym o impedancji Z_l . Napięcia na wejściu i wyjściu linii wynoszą odpowiednio V_1 i V_2 .



Rys. 1 Schemat zastępczy linii TEM

W warunkach pełnego dopasowania, to znaczy jeżeli $Z_g = Z_c = Z_l$, napięcie między przewodami linii, w dowolnym jej przekroju, jest jednakowe: $V_1 = V_2$ i (teoretycznie rzecz biorąc) nie zależy od długości linii. Jednocześnie natężenie pola elektrycznego (E) wewnątrz linii też powinno być stałe i wyrażać się zależnością $E=V/d$.

Tymczasem w trakcie eksperymentu linię obciąża się badanym obiektem (BO), co powoduje zmianę impedancji linii, powstawanie fal stojących i w rezultacie różną ekspozycję obiektu (-ów) w zależności od jego (ich) położenia w linii. Nawet niewielkie niedopasowanie linii może prowadzić do znacznych różnic napięć V_1 i V_2 , oraz napięć w dowolnym przekroju poprzecznym linii, zwłaszcza przy długościach linii przekraczających około $0.05 \lambda_{min}$ (gdzie λ_{min} oznacza najkrótszą długość fali, na jakiej prowadzone są badania).

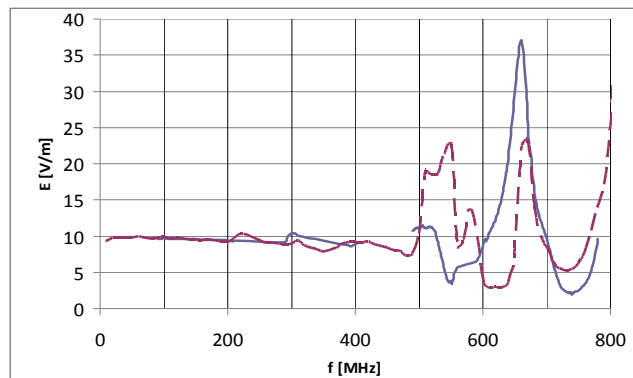
Najprostsze oszacowania stosunku V_1/V_2^+ , (gdzie V_2^+ reprezentuje napięcie fali padającej na wyjście linii), których rezultaty przedstawiono w tabeli 1, pokazują, że nawet przy niewielkim współczynniku odbicia ($\Gamma_2 = 0.2$) wartość tego stosunku może różnić się nawet o $\pm 20\%$. Dodajmy, że absorpcja mocy przez obiekt badany zależy od E^2 , zatem granica niepewności będzie dwukrotnie wyższa: do $\pm 40\%$!

Tabela 1. Wyniki oszacowania stosunku V_1/V_2^+

Γ_2	V_2/V_1^+
1	0 - 2
0.8	0.2 - 1.8
0.6	0.4 - 1.6
0.4	0.6 - 1.4
0.2	0.8 - 1.2
0	1

Na rysunku 2 przedstawiono zmierzone w funkcji częstotliwości natężenie PEM wewnątrz komory TEM obciążonej obiektem badanym dla dwóch różnych położań obiektu w linii. Obiekt przesunięto. Mimo, że jest to tylko przykład, wyraźnie widać, efekty fal stojących w postaci znacznego wzrostu natężenia PEM dla wyższych częstotliwości, mimo utrzymywania stałych napięć V_1 i V_2 na zaciskach komory (z niepewnością nieprzekraczającą $\pm 20\%$). Linia wykazuje dużą wrażliwość na obciążenie obiektem – porównanie dwóch pomiarów na rys 2, gdzie

wewnątrz komory przesunięto obiekt badany ok. 2cm przy wymiarze linii $d=15\text{cm}$. W tym kontekście oczywistym jest również wniosek, że nawet eksperymentalne wyznaczenie parametrów PEM w obszarze ekspozycji pustego układu nie jest miarodajne



Rys. 2 Wynik pomiaru rozkładu E w funkcji częstotliwości

Kolejnym istotnym efektem ograniczającym dokładność wyznaczenia absorpcji energii PEM przez badany obiekt jest sprzężenie obiektu z linią oraz sprzężenia wzajemne między obiektami. W ich rezultacie zmienia się „impedancja wewnętrzna” obiektów (nie wnikając w pytanie co to oznacza), a tym samym zmiany energii pochłanianej przez obiekt względem wartości wyznaczonej na podstawie zależności wyznaczonych dla linii próżnej. Co istotniejsze zmiany powodują wzrost energii absorbowanej względem wartości referencyjnej i zależą od położenia badanego obiektu w linii a także od ilości obiektów. Można wykazać, że dla minimalizacji tych sprzężeń BO nie powinien zajmować obszaru większego, niż 1/5 przestrzeni między okładkami linii TEM. Wstępowanie tego zjawiska może być łatwo sprawdzone w każdym laboratorium drogą umieszczenia pomiędzy okładkami linii (kondensatora) sondy do pomiaru pola E. Przy utrzymaniu stałej wartości natężenia pola (wyznaczonej jako $E=V/d$), wskazania sondy będą wzrastały przy zmniejszaniu odległości pomiędzy płytami, a zmiany wskazań mogą wzrosnąć nawet ponad 30%..

Zarówno występowanie niedopasowań (fal odbitych), jak i inne oddziaływania pozwalają na sformułowanie kilku wniosków:

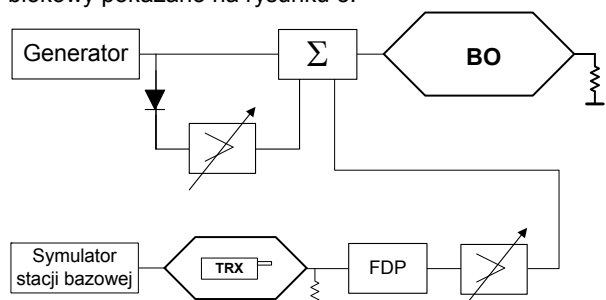
- istnieje wprawdzie możliwość idealnego dopasowania linii, jednak żadną miarą nie zmienia to rozkładu napięć wzdłuż linii w rezultacie występowania w niej fal stojących,
- stosowanie linii o długości sięgającej lub przekraczającej $0.25 \lambda_{min}$ może prowadzić do różnic V_1 i V_2 przekraczających 100%,
- stwierdzenie powyższe dotyczy nie tylko użytkowej długości linii (l_c), ale i całkowitej długości toru zasilania od generatora po obciążenie bezodbiciowe, co wynika z istotnej roli nawet niewielkich odbić przy znacznej długości tego toru,
- absorpcja energii PEM w BO jest funkcją kwadratu natężenia pola elektrycznego (E) działającego na ten obiekt, zatem błąd wyznaczenia tej energii jest dwukrotnie większy od błędu wyznaczenia E , czy napięcia w linii w przekroju umieszczenia obiektu,
- obiekt umieszczony w linii może absorbować moc w różnym stopniu w różnych jego częściach lub, w przypadku licznej grupy równocześnie badanych obiektów ich ekspozycja może znacznie się różnić i nie uwzględnienie tego zjawiska przy analizach statystycznych może całkowicie zafałszować wyniki prowadzonych badań.

Próba minimalizacji wpływu ostatniego z wymienionych efektów na wyniki badań jest ograniczenie gabarytów obiektów badanych. Prowadzone oszacowania pokazują, że zmiana parametrów BO może być pomijalna jeżeli gabaryty obiektu nie przekraczają około 1/5 odległości między przewodami linii (w badaniach EMC stosuje się łagodniejsze kryterium – 1/3 do 1/2 d). Zatem: uzyskanie akceptowalnej dokładności pomiaru wymaga nie tylko stosowania elektrycznie krótkich linii, ale i ich znacznych wymiarów w stosunku do badanego obiektu. Prowadzi to do konieczności znacznego ograniczenia rozmiarów lub/i ilości badanych w linii obiektów. Niestety, jest to niezbędny koszt poprawy dokładności badań.

Innym aspektem w badaniach oddziaływania PEM jest przybliżenie warunków badań do warunków ekspozycji rzeczywistej. W badaniach EMC taką namiastką warunków rzeczywistych jest wykorzystanie pola modulowanego w amplitudzie sygnałem sinusoidalnym. Podobne zabiegi stosuje się np. w badaniach biomedycznych związanych z oddziaływaniem terminali telefonii komórkowej, które prowadzi się (choć nie zawsze) przy ekspozycji BO na falę nośną zmodulowaną sygnałami wybranego systemu komunikacyjnego. Jednakże nawet najprostsze badanie widma promieniowanego przez dowolnie wybrany terminal radiokomunikacji osobistej wykaże obecność trzech charakterystycznych widm, a to:

- zmodulowanej fali nośnej,
- pola magnetycznego (H) o widmie identycznym do modulacji fali nośnej,
- PEM z zakresu częstotliwości od herców po kilkadziesiąt kHz, wytwarzanego przez system kontroli i sterowania terminala.

Znana z doniesień literaturowych, rozbieżność wyników badań epidemiologicznych i laboratoryjnych w dziedzinie oddziaływań telefonii komórkowej może być np. rezultatem niekompletnej ekspozycji obiektu na PEM, obecne w otoczeniu takich terminali w trakcie ich rzeczywistej pracy, a stosowanej w badaniach laboratoryjnych. Autorzy proponują tu kilka wersji rozwiązań, które zapewniają ekspozycję obiektu do zbliżoną do rzeczywistej, np. zintegrowany system ekspozycyjny [1], którego schemat blokowy pokazano na rysunku 3.



Rys. 3 Schemat blokowy zintegrowanego systemu ekspozycyjnego

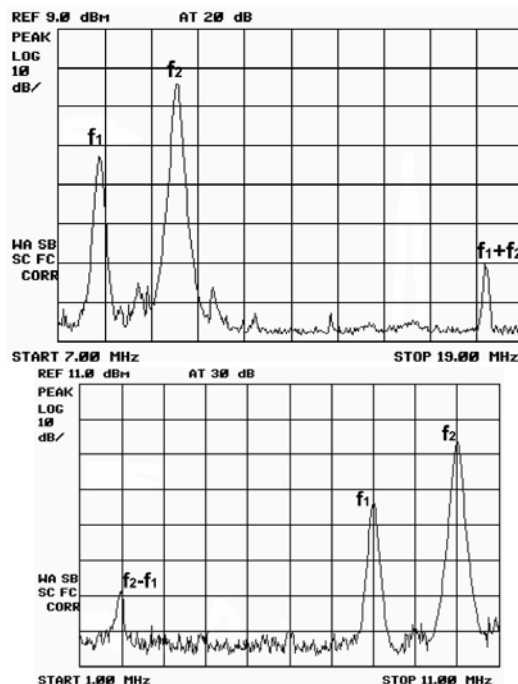
Badany obiekt (BO) jest umieszczony w odcinku linii TEM, co zapewnia zarówno możliwość całościowej ekspozycji, jak i odizolowanie BO. Od wpływów zewnętrznych. Poprzez układ sumujący (Σ) linia jest zasilana wprost z generatora fali nośnej (CW), który zastępuje rzeczywiste urządzenie (TRX) i jest modulowany w sposób właściwy dla systemu w jakim pracuje TRX. Zastąpienie TRX'a przez generator CW ma na celu jego zabezpieczenie przed możliwością uszkodzenia w warunkach długotrwałej pracy z maksymalną mocą wyjściową. Równocześnie sygnał wyjściowy generatora CW poddaje się detekcji obwiedni, a uzyskany sygnał (odzwierciedlający pole magnetyczne generowane przez przewody zasilające wzmacniacz wyjściowy), po

wzmocnieniu, doprowadza się przez sumator do linii. Uzyskanie sygnałów odpowiadających pracy układu kontroli i sterowania TRX'a jest nieco bardziej złożony. Wybrany TRX umieszcza się w komorze TEM, sterowanej ze stymulatora stacji bazowej. Zapewnia to uzyskanie promieniowań TRX'a w różnych warunkach pracy oraz ich odbiór i przekazanie do linii z BO. Otrzymane sygnały doprowadza się do sumatora poprzez filtr dolnoprzepustowy (FDP), którego celem jest ograniczenie przenoszonego pasma do pożądanego zakresu częstotliwości, z wyeliminowaniem sygnałów o częstotliwości zbliżonej do generatora CW, a pochodzących od stymulatora. Przedstawiona propozycja, lub jej dowolne modyfikacje, są siłą rzeczy bardziej złożone od stosowanych rozwiązań w których BO jest poddawany ekspozycji jedynie na sygnały generatora CW (często bez modulacji). Niestety, jest to nieunikniony koszt podniesienia dokładności (odpowiedniości do rzeczywistości) badań.

Zwrócimy jeszcze uwagę na polaryzację PEM w układzie ekspozycyjnym. W omawianym przypadku jest ona liniowa, co może prowadzić do dodatkowych błędów oceny wartości ekspozycji.

Efekty nieliniowe

W licznych pracach prezentowane są wyniki badań dotyczących własności półprzewodzących błon komórkowych. Autorzy podjęli próbę zbadania istnienia i ewentualnej roli tych własności w skali makroskopowej. Pierwsze eksperymenty dotyczyły możliwości wystąpienia detekcji obwiedni sygnału w.cz. doprowadzanego do ośrodka biologicznego. W trakcie badań, w których autorzy pełnili rolę BO, pobudzano organizm bądź PEM, bądź za pomocą pary elektrod dołączonych do organizmu. Za pomocą drugiej pary elektrod badano obecność w BO widma odpowiadającego obwiedni sygnału pobudzającego. Uzyskano szereg interesujących rezultatów, które okazały się fałszywe, bowiem detekcja następowała na wejściu analizatora widma i po doprowadzenia obserwowanych sygnałów przez FDP, wszelkie efekty zanikły.



Rys. 4 Sygnały sumy (u góry) i różnicy (u dołu)

Podjęto kolejną próbę potwierdzenia roli nieliniowości tym razem badając efekt modulacji w BO. W tym celu do BO doprowadzano sygnały z dwu generatorów sygnałów

sinusoidalnych i za pomocą analizatora widma badano rezultaty eksperymentu. Przykład uzyskanych wyników pokazuje rysunek 4.

Do BO doprowadzono sygnały o częstotliwościach 8 i 10 MHz. Na rysunku 6 widać rezultaty modulacji w postaci sygnału o częstotliwości 18 MHz (u góry) i 2 MHz (u dołu). Wydaje się, że przedstawione rezultaty pomiarów pozwalają na potwierdzenie istnienia efektów nieliniowych w materiale biologicznym. Może to rzutować na występowanie także i detekcji obwiedni sygnału w.cz.. Jest to o tyle istotne, że sygnał w.cz. jest stosunkowo szybko wytłumiany w efekcie występowania efektu naskórkowego, natomiast sygnały o mniejszych częstotliwościach rozchodzą się swobodnie po całym BO.

Przedstawione rozważania rodzą kilka pytań:

- jaka jest rola oddziaływania fali nośnej, obecności modulacji i możliwości rozdzielenia tych ról,
- jakie efekty mogą powodować kolejne składowe widma obecnego w promieniowaniu terminala,
- czy występują efekty synergetyczne przy łącznym i rozłącznym eksponowaniu BO.

Są to pytania natury biomedycznej na które, jako inżynierowie, nie jesteśmy w stanie odpowiedzieć. Za naszą rolę uważamy zwrócenie uwagi na występujące efekty i możliwą ich rolę, zwłaszcza *in vivo*, oraz przedstawieni możliwości prowadzenia badań kompleksowych.

Zakończenie

Przedstawiono wybrane czynniki ograniczające dokładność oszacowania ekspozycji na działanie PEM, ze szczególnym uwzględnieniem badań w dziedzinie bioelektromagnetyzmu. Pokazano przykłady źródeł błędów, które niekiedy redukują rezultaty badań z ilościowych do jakościowych i ilustrują źródła rozbieżności rezultatów prac, prezentowanych przez różnych autorów.

Przedstawiono własne propozycje dotyczące możliwości poprawy dokładności prowadzonych badań. Ich stosowanie prowadzi do oczywistego wymogu ograniczenia ilości i rozmiarów badanych obiektów. Jest to trudny do spełnienia, zwłaszcza przy dążeniu do dysponowania znacznej próby badanej, kosztem minimalnych nakładów.

Przedstawiono możliwości przybliżenia warunków ekspozycji w badaniach laboratoryjnych do warunków naturalnych. Wymaga to jednak pewnej rozbudowy tradycyjne stosowanych systemów ekspozycyjnych.

Przedstawiono, wynikającą z obserwowanej praktyki, konieczność włączenia w skład zespołów badawczych fizyków i techników, oraz docenienia ich kompetencji przy planowaniu strony technicznej przewidywanych badań.

Przedstawiono potrzebę uwidoczniania dokładności prowadzonych badań przy prezentacji ich wyników w odróżnieniu od panującego obecnie zwyczaju prezentacji w ujęciu statystycznym, jedynie z zaznaczeniem dyspersji, co przy niewielkiej dokładności prowadzonych badań jest niewystarczające.

Przedstawiono niedokładności badań w dziedzinie biomedycyny, zwłaszcza badań oddziaływań słabych, kontrastują z precyzją formułowanych na ich podstawie unormowań ochronnych.

LITERATURA

- [1] Patent RP 215534 „Sposób ekspozycji na pole elektromagnetyczne i urządzenie do ekspozycji na pole elektromagnetyczne”, P. Bieńkowski, H. Trzaska, zgłoszenie z 2011.01.10
- [2] Patent RP 211359 „Sposób i urządzenie do wytwarzania wzorcowego pola elektromagnetycznego”. P. Bieńkowski, E. Grudziński, K. Rozwalka, H. Trzaska, zgłoszenie z 2008.04.01
- [3] Zgłoszenie patentowe 394300 „Urządzenie do sprawdzania mierników natężenia pola elektromagnetycznego”, P. Bieńkowski, H. Trzaska, zgłoszenie z 2011.03.22
- [4] Patent RP 214069 „Urządzenie do wytwarzania pola elektromagnetycznego o polaryzacji quasi sferycznej” P. Bieńkowski, H. Trzaska, zgłoszenie z 2009.04.20,

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Bieńkowski, prof. PWR, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Politechnika Wroclawska, 50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27.
Pawel.Bienkowski@pwr.wroc.pl
Prof. Hubert Trzaska, prof. emerytowany,
Hubert.Trzaska@pwr.wroc.pl