

Zastosowanie techniki radia programowalnego w badaniach odporności aparatury medycznej na zaburzenia pochodzące od urządzeń sieci bezprzewodowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono budowę stanowiska pomiarowego, opartego na modułach radia programowalnego, umożliwiającego badanie odporności urządzeń na zaburzenia promieniowane. Opisano budowę takiego stanowiska, właściwości poszczególnych jego elementów, w tym głównie zastosowanie modułu radia programowanego a także przedstawiono sposób kalibracji całego stanowiska pomiarowego.

Abstract. In this paper the radiated immunity test set-up based on software defined radio (SDR) module is presented. The most important properties of all test set-up components are described and discussed, and appropriate calibration procedure for test set-up is proposed. (**Application of software defined radio in immunity tests of medical equipment to interferences produced by wireless network devices**).

Słowa kluczowe: odporność na promieniowanie, radio zdefiniowane programowo, kompatybilność elektromagnetyczna.

Keywords: radiated immunity, software defined radio, electromagnetic compatibility.

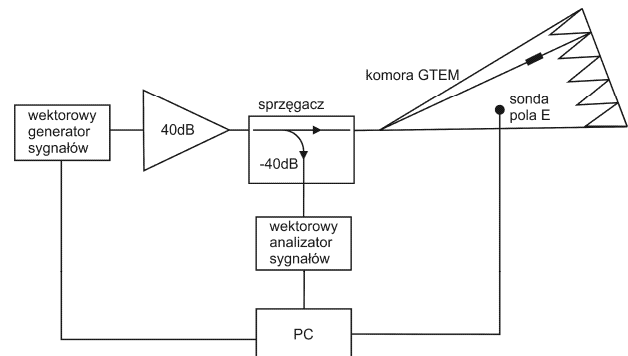
Wstęp

We współczesnej diagnostyce medycznej stosuje się różnorodną aparaturę wykorzystującą elektryczną aktywność ciała ludzkiego, taką jak elektrokardiografy, miografy, elektroencefalografy, od których – z racji pełnionych funkcji – wymaga się bardzo wysokiego poziomu niezawodności. Znakomita większość wymienionych tutaj urządzeń medycznych przetwarza z dużą rozdzielczością bardzo słabe sygnały elektryczne w szerokim zakresie dynamiki. Oczywistą konsekwencją takiego stanu rzeczy jest potencjalnie duża wrażliwość takiej aparatury na zaburzenia elektromagnetyczne występujące w środowisku [1].

Z obecnością zaburzeń elektromagnetycznych i ich wpływem na rejestrowane sygnały bioelektryczne konstruktorzy aparatury mierzą się od lat. Do niedawna jedynym źródłem zaburzeń, z którymi trzeba było liczyć się w powszechnej praktyce, były urządzenia sieciowe, z dominującym wpływem sygnałów pochodzących z sieci energetycznej (o częstotliwości 50 Hz i harmonicznym). Skuteczną metodą poprawy odporności jest tutaj np. stosowanie pasmowo-zaporowych filtrów analogowych lub cyfrowych. Należy zwrócić jednak uwagę na istotną zmianę, która nastąpiła w przeciągu ostatnich lat w środowisku elektromagnetycznym, w którym pracują urządzenia medyczne. Chodzi o gwałtowny rozwój telefonii komórkowej, bezprzewodowego dostępu do Internetu i powszechny obecnie trend stosowania łączności bezprzewodowej do transmisji wszelkiego rodzaju danych. Systemy telefonii komórkowej reprezentują tutaj systemy GSM, UMTS/HSPA+ oraz LTE. Wśród systemów krótkiego zasięgu do najpopularniejszych zaliczyć należy Bluetooth czy wszelkie warianty standardu 802.11. W przyszłości należy spodziewać się jeszcze większej aktywności urządzeń bezprzewodowych z powodu rosnącego zainteresowania sieciami 5G, Internetu rzeczy (*ang.* Internet of Things) czy systemami opartymi na radiu kognitywnym. Tak więc, w pobliżu pacjenta może, a w niedalekiej przyszłości będzie, znajdować się wiele urządzeń emitujących energię elektromagnetyczną, które mogą być źródłem zaburzeń o istotnym poziomie. Na skutek potencjalnie niewielkiej odległości pomiędzy źródłem zakłóceń a urządzeniem medycznym należy liczyć się z sygnałami, których poziom może być bardzo duży, nawet do 50-80 V/m [2,3,4,5].

W ramach prowadzonych prac autorzy artykułu zmierzają do wypracowania metod wykrywania wpływu

sygnałów pochodzących od rzeczywistych urządzeń sieci bezprzewodowych na aparaturę elektromedyczną podczas jej pracy diagnostycznej. Rzeczywiste sygnały emitowane przez te urządzenia to sygnały zmodulowane cyfrowo, coraz częściej szerokopasmowe, o skomplikowanej sekwencji pakietów, których zawartość bitowa zmienia się w czasie. Sygnały te znacznie odbiegają od tych stosowanych podczas badań kompatybilności elektromagnetycznej urządzenia w ramach testu odporności na zaburzenia promieniowane. W praktyce laboratoryjnej istotnym problemem podczas prób badania wpływu wspomnianych sygnałów rzeczywistych na urządzenia elektromedyczne okazało się ich wytworzenie w warunkach kontrolowanych w komorze GTEM.



Rys. 1. Schemat blokowy profesjonalnego stanowiska do pomiaru odporności urządzeń na zaburzenia promieniowane

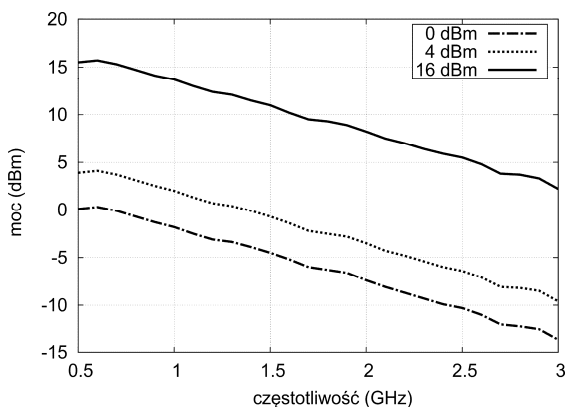
Na rysunku 1 przedstawiono profesjonalne stanowisko pomiarowe. Składa się ono z wektorowego generatora sygnałów z opcjami umożliwiającymi generowanie możliwie największej liczby standardów radiokomunikacyjnych, wektorowego analizatora sygnałów, komory GTEM, odpowiednich wzmacniaczy, sprzęgaczy i sond pomiarowych. Całą procedurą pomiarową steruje zazwyczaj komputer wyposażony w odpowiednie oprogramowanie. Poważną wadą takiego stanowiska jest jego wysoka cena, która niejednokrotnie decyduje o braku możliwości jego zakupu. Przed takim problemem stanęli autorzy, którzy ze względu na ograniczony budżet nie mogli pozwolić sobie na zakup bardzo drogiego wektorowego generatora arbitralnych wraz z opcjami generacji sygnałów wszystkich

interesujących systemów bezprzewodowych. W tej sytuacji, rozsądną alternatywą okazała się budowa stanowiska pomiarowego opartego na urządzeniach radia programowalnego wsparta środowiskiem LabView. Do zalet modułów radia programowalnego zaliczyć należy: relatywnie niski koszt, parametry porównywalne z parametrami powszechnie stosowanymi urządzeniami łączności bezprzewodowej oraz elastyczność w implementacji dowolnego typu modulacji i/lub standardów komunikacyjnych. Za wyborem środowiska LabView z kolei przemawia: łatwość tworzenia aplikacji, dostępność bibliotek umożliwiających w prosty sposób kontrolę nad różnego typu urządzeniami (w tym modułami SDR) a przez to duża efektywność w prototypowaniu rozwiązań.

Niniejszy artykuł opisuje konstrukcję takiego „ekonomicznego” stanowiska z wykorzystaniem modułu SDR sterowanego oprogramowaniem stworzonym w środowisku LabView. Pokazano w nim możliwości i ograniczenia wynikające z wykorzystania zaproponowanej platformy sprzętowo-programowej. W szczególności skupiono się na zagadnieniach kalibracji całego stanowiska pomiarowego. Całość artykułu uzupełniają przykładowe wyniki pomiarów zarejestrowanych na zbudowanym stanowisku pomiarowym.

Moduł radia programowalnego

Wybrany moduł radia programowanego NI-USRP-2942R [6] składa się z jednostki centralnej opartej na układzie logiki programowalnej podłączonej do dwóch układów nadawczo/odbiorczych pozwalających na transmisję/odbiór sygnałów o szerokości pasma do 120 MHz na częstotliwościach od 400 MHz do 4,4 GHz. Jak wspomniano we Wstępie urządzenia SDR odbiegają parametrami od profesjonalnych analizatorów widma czy generatorów sygnałowych. Już przy pierwszych testach można zauważyć zmiany poziomu mocy wyjściowej modułu w miarę zmieniającej się częstotliwości. Skoro ma więc on spełniać rolę urządzenia o charakterze metrologicznym to oczywiste staje się przeprowadzenie dokładnych badań parametrów nadajnika. W tym celu wyjście nadajnika modułu SDR podłączono do wektorowego analizatora widma FSV30. Eksperyment przeprowadzono dla dwóch sygnałów testujących, tj. ciągłego sygnału sinusoidalnego oraz ciągłego sygnału binarnego o szybkości 100 kb/s i poddanego modulacji 16-QAM. W obu przypadkach ustawiano programowo wartość mocy wyjściowej nadajnika SDR, a następnie za pośrednictwem analizatora widma mierzono jej średnią wartość w kanale. Częstotliwość nośną zmieniano w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 3 GHz, kontrolując cały czas, aby sygnał wyjściowy był niezniekształcony.

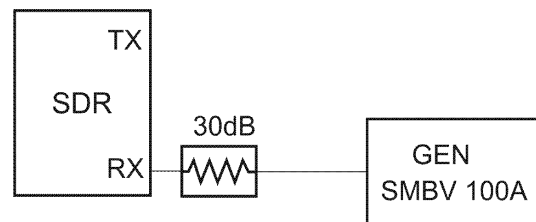


Rys. 2. Częstotliwościowa zależność zmierzonej mocy wyjściowej w kanale dla kilku ustawionych w nadajniku mocy wyjściowych

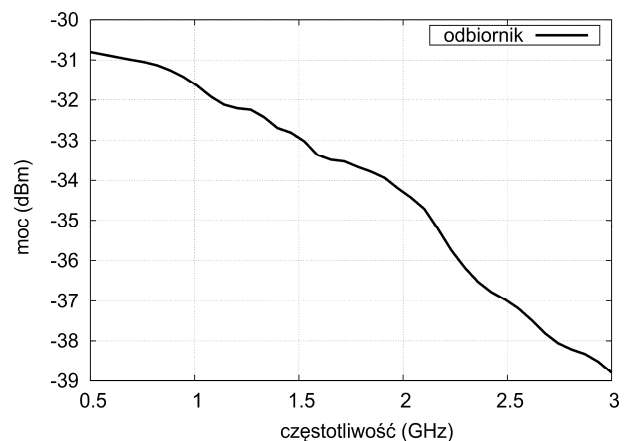
Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów dla ciągłego sygnału sinusoidalnego. Jak widać, dla programowo ustawionej mocy wyjściowej równej 16 dBm różnica poziomów mocy zmierzonej dla częstotliwości 500 MHz i 3 GHz wynosi około 13 dB i utrzymuje się dla pozostałych wartości mocy wyjściowych. W przypadku sygnału 16-QAM otrzymane wyniki są niemal identyczne.

Analogiczne pomiary wykonano dla części odbiorczej modułu. Jego wejście poprzez tłumik 30 dB podłączono do wyjścia wektorowego generatora sygnałowego SMBV100A, co poglądowo przedstawiono na rysunku 3. Badania przeprowadzono dla identycznych sygnałów jak w przypadku nadajnika. Moc wyjściową generatora ustawiono na poziomie 0 dBm, a następnie za pomocą modułu SDR i odpowiedniego oprogramowania mierzono wartość średnią mocy w kanale. Przebieg poziomu mocy w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 3 GHz dla sygnału 16QAM przedstawiono na rysunku 4. Jak widać, tym razem pomimo stałej wartości mocy doprowadzonej do odbiornika SDR, różnica zmierzonych przez niego wartości mocy dla częstotliwości 500 MHz i 2,7 GHz wynosiła około 8 dB (poziomą mocą mniejszą od -30 dBm wynika z zastosowanego tłumika).

Na podstawie otrzymanych wyników, a także biorąc pod uwagę częstotliwościowe właściwości zastosowanych kabli pomiarowych i tłumika stworzono tablice kalibracyjne umożliwiające pełną kontrolę nad parametrami części nadawczej i odbiorczej modułu SDR.



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru parametrów odbiornika modułu SDR

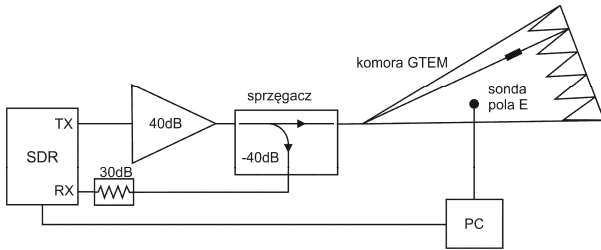


Rys. 4. Częstotliwościowa zależność zmierzonej przez moduł SDR mocy wejściowej w kanale

Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy proponowanego stanowiska pomiarowego. Składa się ono z modułu radia programowalnego NI-USRP-2942R, komputera PC, na którym zainstalowano środowisko LabView umożliwiające jego sterowanie, wzmacniacza mocy, sprzęgacza i komory GTEM wraz z sondą pola. W środowisku LabView stworzono aplikację, która wraz z

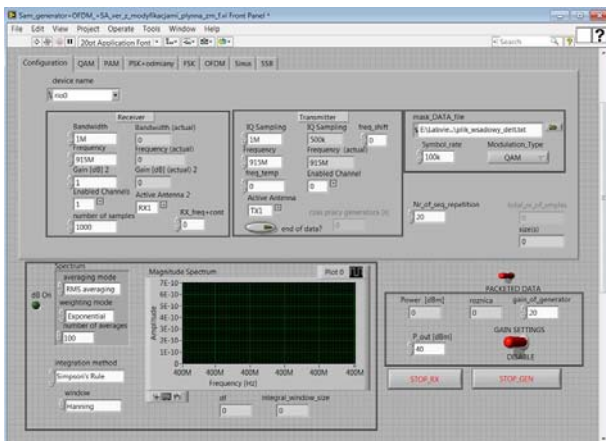
modułem SDR może pełnić jedną z dwóch funkcji, tj. wektorowego analizatora sygnałów lub wektorowego generatora sygnałów.



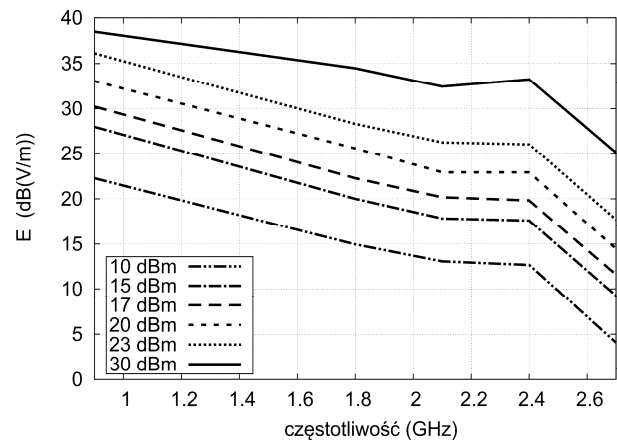
Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Wektorowy analizator sygnałów pozwala na: odbiór sygnałów rzeczywistych generowanych przez urządzenia działające w danym systemie, przeniesienie tych sygnałów do pasma podstawowego oraz ich demodulację a następnie zapisanie do pliku w postaci próbek sygnałów I (synfazowego) i Q (kwadraturowego). Ponadto, umożliwia pomiar wybranych parametrów sygnału np. moc w kanale, parametr CCDF czy odległość między kolejnymi pakietami.

Generator wektorowy wykorzystywany jest do transmisji, na dowolnej częstotliwości, zapisanych wcześniej sygnałów pochodzących od rzeczywistych urządzeń lub sygnałów generycznych składających się z sekwencji pakietów zawierających dane pseudolosowe wysyłanych z ustalonymi zależnościami czasowymi, modulacjami i odpowiednimi poziomami mocy. To drugie podejście daje możliwość pełnej kontroli nad sekwencjami pakietów i zbadania wpływu takich parametrów jak moc nadajnika, częstotliwość pracy, zależności czasowe czy warianty procedur, które trudno wymusić w działającej komercyjnie sieci (np. przyznanie dowolnej liczby szczelin czasowych przy transmisji danych w ramach systemu GSM/EDGE). Dla wytworzonych sekwencji pakietów porównywano parametry sygnałów z parametrami sekwencji rzeczywistych uzyskując potwierdzenie dobrej zgodności wyników. Weryfikację przeprowadzono zarówno z wykorzystaniem kanału odbiorczego zastosowanego modułu radia programowalnego, jak również pracującego całkowicie autonomicznie odbiornika pomiarowego ESR3 firmy Rohde&Schwarz. Na rysunku 6 przedstawiono widok aplikacji sterującej pracą generatora sygnałowego i analizatora sygnałów.



Rys. 6. Widok aplikacji sterującej pracą generatora sygnałowego i analizatora sygnałów



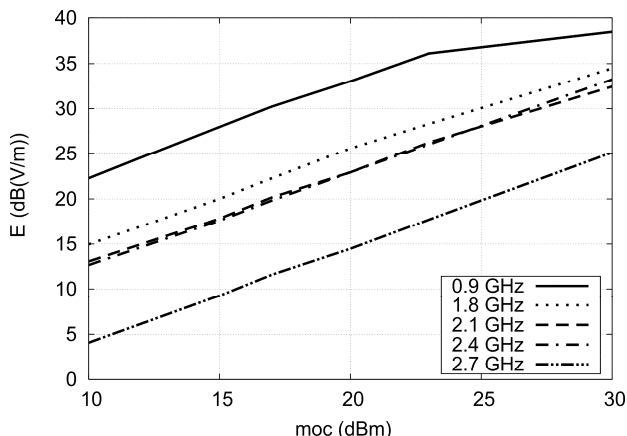
Rys. 7. Natężenie pole elektrycznego mierzonego przez sondę pola w funkcji częstotliwości dla kilku ustawionych wartości mocy wyjściowej nadajnika SDR

W tak zbudowanym stanowisku pomiarowym, sygnały wytworzone w module SDR, po wzmocnieniu podawane są na wejście komory GTEM, w której poziom natężenia pola elektrycznego kontrolowany jest za pomocą sondy pola. Wytworzenie pola o wymaganej intensywności wymaga kolejnej kalibracji, tym razem całego stanowiska pomiarowego. W praktyce bowiem parametry wszystkich jego elementów, tj. modułu SDR, wzmacniacza i komory GTEM są zależne od częstotliwości. Procedura kalibracji i weryfikacji przeprowadzona była w sposób następujący:

1. Wyjście nadajnika modułu SDR podłączono, za pośrednictwem wzmacniacza o wzmocnieniu 40 dB, do komory GTEM. Poziom mocy dostarczanej do komory mierzono za pomocą odbiornika modułu SDR pełniącego funkcję analizatora sygnałów, przy czym sygnał mierzony pochodził ze sprzęgacza kierunkowego o sprężeniu -40 dB. W ten sposób realizowana jest kontrola poziomu mocy doprowadzanej do komory.

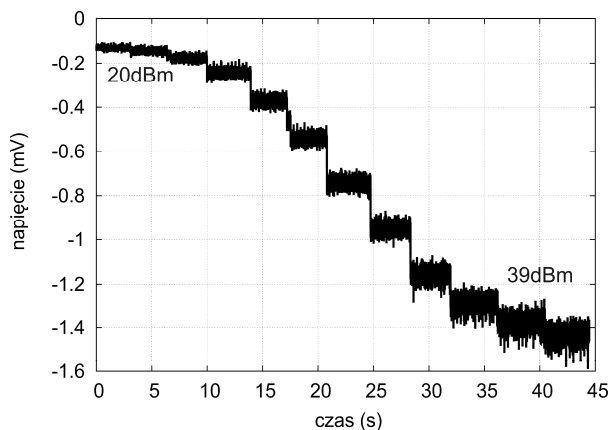
2. W komorze, w połowie odległości między septum a podłogą, umieszczono sondę mierzącą wartość natężenia pola elektrycznego. Do komory GTEM doprowadzono sygnał sinusoidalny o zadanej częstotliwości i kontrolowanym poziomie mocy, a następnie za pomocą sondy odczytywano natężenie wytworzonego pola elektrycznego. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy zmian wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonego w komorze w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 2,7 GHz dla kilku wartości mocy wyjściowej nadajnika SDR (ograniczenie pomiarów do częstotliwości 2,7 GHz wynikało z pasma pracy zastosowanego wzmacniacza mocy). Jak widać, dla częstotliwości do około 2,3 GHz spadek wartości jest dość łagodny. Dopiero dla częstotliwości powyżej 2,4 GHz mamy do czynienia z nieco większym spadkiem. Dodatkowo, okazuje się, że dla całego stanowiska pomiarowego różnica poziomów wytworzonego pola dla częstotliwości 500 MHz i 2,7 GHz, w przybliżeniu równa się różnicy poziomów sygnałów wyjściowych otrzymywanych dla samego modułu SDR. Na rysunku 8 przedstawiono zależności zmian wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonego w komorze w funkcji mocy wyjściowej nadajnika SDR dla kilku wybranych częstotliwości pracy. Widać tutaj, że dla częstotliwości powyżej 1,8 GHz zależność ta ma charakter liniowy, tzn. wzrost mocy wyjściowej o n dB skutkuje wzrostem natężenia pola elektrycznego również o n dB. Dla częstotliwości do około 1,8 GHz liniowość zachowana jest dla wartości mocy wyjściowej nadajnika do około 23 dBm. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stworzono tabele kalibracyjne opisujące częstotliwościową zależność wymaganej mocy

sygnału doprowadzonego do komory GTEM, gwarantującej uzyskanie w niej pożądanego natężenia pola elektrycznego. Okazało się, że stały poziom pola generowanego w paśmie częstotliwości od 500 MHz do 2,7 GHz, wymaga zmiany mocy wyjściowej nadajnika SDR o około 20 dB.



Rys. 8. Natężenie pole elektrycznego mierzonego przez sondę pola w funkcji częstotliwości dla kilku wartości ustawionej mocy wyjściowej nadajnika SDR

Na koniec, za pomocą metody dwutonowej, zbadano liniowość układu moduł SDR – wzmacniacz mocy. Na jej podstawie wyznaczono poziom maksymalnej mocy wyjściowej nadajnika SDR, dla której sygnał na wejściu komory zawierał produkty intermodulacyjne 3 rzędu o poziomie co najmniej 40 dBc. Pomiary przeprowadzone dla częstotliwości 500, 900, 1800, 2100 i 2400 MHz pokazały, że wartość mocy nie powinna przekraczać 14 dBm, co przekłada się na poziom mocy dostarczonej do komory równej około 54 dBm. Dla takiego poziomu mocy nie zaobserwowano istotnych zniekształceń widma i przebiegów czasowych generowanych sygnałów.



Rys. 9. Rejestrowany przez encefalogram sygnał zakłócający

Przykładowe wyniki

Zbudowane stanowisko zastosowano do badania podatności encefalografu na zakłócenia promieniowane. Urządzenie badane umieszczono w komorze GTEM do której doprowadzono sygnał zakłócający w postaci ciągłego przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 433 MHz i mocy

zmieniającej się w czasie 45 sekund od wartości 20 do 39 dBm. Jednocześnie rejestrowano odbierany przez encefalogram sygnał. Wyniki przedstawiono na rysunku 9. Sygnały zakłócające o takiej wartości z pewnością zakłóciłyby pracę urządzenia. Jak widać, dla mniejszych mocy poziom zakłócenia nie jest zbyt duży i wynosi około -0,1 mV. W miarę wzrostu intensywności pola rośnie również poziom odbieranego sygnału i dla mocy 39 dBm przyjmuje wartość około -1,5 mV. Mając na uwadze, że poziomy sygnałów rejestrowanych przez encefalografy osiągają ułamki mV, można stwierdzić, że taka amplituda zaburzeń jest na tyle duża, aby zakłócić pracę urządzenia.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono budowę stanowiska pomiarowego opartego na modułach radia programowalnego do badania odporności urządzeń na zaburzenia promieniowane. Przeprowadzono pomiary właściwości poszczególnych elementów stanowiska, czego rezultatem było stworzenie tabeli kalibracyjnych, na podstawie których możliwe jest generowanie sygnałów zakłócających o w pełni kontrolowalnych parametrach. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że zastosowanie modułów radia programowalnego w badaniu podatności urządzeń medycznych na zaburzenia promieniowane może być rozsądną alternatywą dla profesjonalnego stanowiska pomiarowego wyposażonego w kosztowne generatory sygnałowe i analizatory sygnałów.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (umowa nr PBS3/B3/34/2015).

Autorzy: dr inż. Dariusz Wójcik, dr inż. Maciej Surma, dr inż. Artur Noga, dr hab. inż. Andrzej Karwowski, dr inż. Tomasz Topa, Politechnika Śląska, Instytut Elektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: dwojcik@polsl.pl, msurma@polsl.pl, anoga@polsl.pl, akarwowski@polsl.pl, ttopa@polsl.pl; mgr inż. Jan Mocha, Instytut Techniki i Aparatury Medycznej ITAM, ul. F. Roosevelta 118, 41-800 Zabrze E-mail: jmocha@itam.zabrze.pl.

LITERATURA

- [1] Bandopadhyay S., Varkey J.K., EMI susceptibility characteristics of electromedical equipment in a typical hospital electromagnetic environment with particular reference to electrocardiography, *International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, 1995, 266-272
- [2] Nanou, E.D.; Tsiafakis, V.G.; Kaparelitis, E.S.; Sotiriou, A.I.; Capsalis, C.N., Electromagnetic compatibility between GSM base station and EEG signal, *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2005, vol 1, 535-538
- [3] Mocha J., Woźnica T., Wójcik D., Noga A., Surma M., Badanie odporności aparatury medycznej na zaburzenia elektromagnetyczne pochodzące od współczesnych systemów radiokomunikacyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.2, 42-44
- [4] Woźnica T., Mocha J., Badura G., Wójcik D., Surma M., Ocena wpływu zaburzeń emitowanych przez urządzenia telefonii komórkowej GSM na aparaturę elektrokardiograficzną, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n.12b, 151-154
- [5] Lloyd M., Tianlin D., Cellular Phone Base Stations Installation Violate the Electromagnetic Compatibility Regulations, *4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT 2008*, 18-21 Aug. 2004, Beijing, China, 920-922
- [6] www.ni.com