

Cyfrowe izolatory magnetyczne a kompatybilność elektromagnetyczna – studium przypadku

Streszczenie. Artykuł poświęcony jest zagadnieniu ograniczenia emisji zaburzeń promieniowanych w dwuwarstwowych obwodach drukowanych układów zawierających cyfrowe izolatory magnetyczne firmy Analog Devices. Zbadano skuteczność wybranych metod ograniczania emisji. Pokazano wyniki pomiarów pola elektrycznego wykonanych w komorze GTEM.

Abstract. The issues of reducing radiated emissions in the double-layer printed circuit board with digital magnetic isolators from Analog Devices are discussed in this article. The effectiveness of the chosen radiation mitigation techniques are examined. Results from measurement of the electric field carried in the GTEM chamber are presented. (*Digital magnetic isolator and electromagnetic compatibility – a case study*).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, emisja promieniowana, separacja galwaniczna.

Keywords: electromagnetic compatibility (EMC), radiated emission, galvanic separation.

Wstęp

W wielu konstrukcjach elektronicznych zachodzi konieczność separacji galwanicznej dwóch lub więcej bloków urządzenia. Separacja galwaniczna może dotyczyć sygnałów analogowych, sygnałów cyfrowych, jak i obwodów zasilania. Zwykle ma to na celu minimalizację przenikania zakłóceń pomiędzy różnymi częściami urządzenia [1] lub zapewnienie spełnienia ostrych wymagań dotyczących bezpieczeństwa elektrycznego. W szczególności potrzeba taka występuje w aparaturze elektromedycznej gdzie konieczne jest separowanie galwaniczne części aplikacyjnej typu F (tzw. pływająca część aplikacyjna) od reszty urządzenia. Separacja ta powinna spełniać surowe wymagania normy PN-EN 60601-1:2011 [2] i zapewniać napięcie przebicia co najmniej 4 kV_{RMS} przy próbie napięciowej trwającej jedną minutę.

Realizacji separacji galwanicznej nastręczała od lat wielu problemów konstruktorom urządzeń elektronicznych. Powszechnie do realizacji separacji sygnałów cyfrowych wykorzystuje się transoptory o odpowiednim dla danego zastosowania napięciu przebicia. Specjalne wykonania transoptorów (tzw. transoptory analogowe) były również wykorzystywane do separacji sygnałów analogowych. Wiele problemów nastręczała jednak budowa separowanych galwanicznie układów zasilania, gdyż wymagało to wykonania transformatora o odpowiednio dużej wartości napięcia przebicia.

Bardzo dużym ułatwieniem dla konstruktorów było wprowadzenie do oferty handlowej przez firmę Analog Devices separatorów galwanicznych rodziny *iCoupler*® umożliwiających separację galwaniczną sygnałów cyfrowych. Do produkcji wprowadzono również układy w technologii *isoPower*® umożliwiającą separację zasilania urządzenia. Sprawność przetwarzania w przypadku technologii *isoPower*® jest niewielka, przez co układy te polecane są wszędzie tam gdzie zapotrzebowanie energetyczne separowanego bloku urządzenia nie jest duże. Nie mniej jednak połączenie technologii *iCoupler*® oraz *isoPower*® daje konstruktorom bardzo wygodne rozwiązanie do budowy bariery galwanicznej, często z zastosowaniem tylko pojedynczego układu scalonego. Zalety te sprawiają, że elementy te są bardzo chętnie wykorzystywane, w szczególności w konstrukcji aparatury elektromedycznej.

Izolatory *iCoupler*® i *isoPower*® działają na zasadzie sprzężenia magnetycznego i pracują przy bardzo dużych częstotliwościach kluczowania sięgających do 300 MHz. Ze względu na zasadę działania, wysoką częstotliwość kluczowania oraz konieczność transformacji dużej mocy ze

strony niez izolowanej na stronę izolowaną oczywistym jest, że elementy takie mogą być źródłem zaburzeń elektromagnetycznych o bardzo dużych wartościach. Przekłada się to bardzo często na przekroczenie dopuszczalnych wartości emisji elektromagnetycznej przez urządzenie, w których zastosowano takie izolatory galwaniczne. Okazuje się bowiem, że obwód drukowany z izolatorem zachowuje się często jak efektywne źródło promieniowania elektromagnetycznego utworzone z dwóch odizolowanych części, pracujących jak ramiona dipola, i izolatora umieszczonego pomiędzy nimi, odpowiedzialnego za wzbudzenie w takim układzie prądów w.cz.

O wadze problemu niechaj świadczy fakt, że firma Analog Devices opublikowała dwie noty aplikacyjne AN-0971 [3] oraz AN-1109 [4] opisujące problematykę emisji promieniowanej izolatorów galwanicznych wykonanych w technologii *iCoupler*® oraz *isoPower*®. W notach tych można znaleźć głównie zalecenia co do konstrukcji obwodu drukowanego, którego topologia oraz układ warstw powinien przyczynić się do zmniejszenia emisji promieniowanej. Zalecenia te mają na celu stworzenie drogi powrotnej dla prądu wielkich częstotliwości, czyli „zwarcie” obu ramion „dipola” dla składowych w.cz. Przede wszystkim jednak zalecenia te odnoszą się do obwodów wielowarstwowych (cztero- i więcej), których zastosowanie jest niejednokrotnie nieakceptowane ze względów ekonomicznych. Inną istotną kwestią jest fakt, że niektóre z zaleceń mogą nie być akceptowalne konstrukcyjnie ze względu na konieczne do uzyskania parametry bariery galwanicznej (np. w urządzeniach elektromedycznych).

W niniejszym artykule przeanalizowano mechanizmy promieniowania zaburzeń przez układy separacji galwanicznej wykorzystujące technologie *iCoupler*® oraz *isoPower*®. Pokazano wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla prototypowego obwodu drukowanego zawierających izolator ADuM6201. Przebadano skuteczność wybranych metod ograniczania poziomów emisji promieniowanej. Przedstawione wyniki analiz oraz pomiarów mają na celu umożliwienie konstruktorom świadomego wykorzystywania cyfrowych izolatorów magnetycznych bez obaw o problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną projektowanego urządzenia elektronicznego.

Zalecenia projektowe

Cytowane noty aplikacyjne [3, 4] wskazują na dwa podstawowe mechanizmy, będące źródłem nadmiernej

emisji promieniowanej przez obwody drukowane urządzeń wykorzystujących izolatory rodziny *iCoupler®* i *isoPower®*:

- emisja poprzez krawędzie obwodu drukowanego,
- emisja przez dipol utworzony po rozcięciu obwodu poprzez układ izolatora.

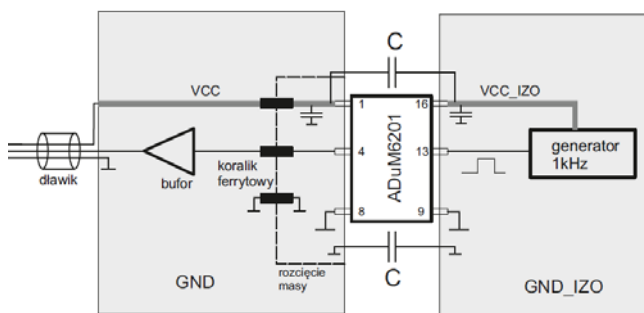
Szczegółowa analiza wyników pomiarów zamieszczonych w [3, 4] pokazuje, że decydującym mechanizmem jest tutaj emisja promieniowana przez układ dipola utworzonego z izolatora i rozciętego „na pół” obwodu elektrycznego. Na skutek impulsowego przepływu prądów o dużych amplitudach przez obwód bariery, generowany jest sygnał wspólny skutecznie wypromieniowywany przez utworzony dipol elektryczny. W praktyce ramiona dipola utworzone są zwykle przez obwody zasilania po obu izolowanych stronach. Dzieje się tak dlatego, że w znakomitej większości przypadków to płaszczyzny masy/zasilania stanowią część obwodu o największych wymiarach elektrycznych, a więc potencjalnie najbardziej efektywny radiator. Ramię dipola może również stanowić przewód zewnętrzny dołączony do obwodu.

Zalecane przez producenta metody ograniczania emisji zaburzeń promieniowanych polegają na dodaniu ścieżek ochronnych połączonych z masą lub metalizacji krawędzi obwodu (ograniczenie emisji za pośrednictwem krawędzi) oraz pojemności łączących obie izolowane strony, tak jak to pokazano na rysunku 1. Dodatkowa pojemność ma na celu „zwarcie” ramion dipola dla składowej zmiennej w.c.z. Jak wynika z analizy wyników pomiarów zamieszczonych w notach aplikacyjnych [3, 4], istotne ograniczenie emisji zaburzeń promieniowanych osiąga się dla pojemności rzędu 150 pF. Zaleca się wykonanie tej pojemności w formie kondensatora płaskiego utworzonego z części płaszczyzn masy obu izolowanych stron. Rozwiązanie takie może wymagać zastosowania jako izolatora tak zbudowanego kondensatora, cienkiego dielektryka o dużej wartości stałej dielektrycznej. Konieczne jest ponadto zagwarantowanie przez producenta obwodu odpowiedniej wytrzymałości dielektryka na przebicie.

Wyniki pomiarów

Przytoczone metody ograniczania emisji zaburzeń promieniowanych mogą być stosowane tylko w obwodach wielowarstwowych. Autorzy opracowań [3, 4] twierdzą nawet, że w obwodach dwuwarstwowych nie jest możliwe osiągnięcie skutecznego ograniczenia emisji. Przyjęcie takich wniosków prowadzi więc do konieczności stosowania obwodów wielowarstwowych nawet wtedy, gdy względy ekonomiczne i stopień skomplikowania układu elektronicznego nie usprawiedliwiają takiego wyboru.

Tak jak wspomniano we wprowadzeniu, autorzy postawili sobie za cel udowodnienie, że również w obwodach dwuwarstwowych istotne ograniczenie poziomu zaburzeń promieniowanych jest jednak możliwe przy zastosowaniu odpowiednio dobranych środków ochronnych.



Rys.1. Badane urządzenie – rysunek uproszczony

Badania eksperymentalne wykonano z wykorzystaniem urządzenia, które pokazano poglądowo na rysunku 1. Urządzenie składa się generatora sygnału prostokątnego o częstotliwości 1 kHz umieszczonego po stronie izolowanej, izolatora ADuM6201 oraz bufora sterującego przewód zewnętrzny. Przewodem tym podawane jest również napięcie zasilające. Izolator służy również do zasilania generatora prostokątnego. Zastosowana bariera spełnia wymagania stawiane urządzeniom medycznym zgodnie z normą elektrycznego PN-EN 60601-1:2011 [2]. Wymiary obwodu drukowanego wynosiły 80 mm x 37,5 mm, a wymiary płaszczyzny masy 37mm x 36mm dla części izolowanej i 32,5 mm x 36 mm dla części nieizolowanej.

W celu ograniczenia poziomu emisji zastosowano następujące środki ochronne [5, 6], które zaznaczono schematycznie na rysunku 1:

- połączenie części izolowanych dwoma kondensatorami o pojemności C, łączącymi, odpowiednio, masy i zasilania,
- zastosowanie dławika sygnału wspólnego na przewodzie zasilającym/sygnałowym,
- wydzielenie lokalnej masy izolatora po stronie nieizolowanej i połączenie jej z masą główną za pomocą koralika ferrytowego. Koraliki ferrytowe zastosowano też w linii zasilającej i sygnałowej.

Skuteczność poszczególnych środków ochronnych zbadano eksperymentalnie wykonując pomiary w komorze GTEM w paśmie 30÷1000 MHz, a następnie przeliczono na wyniki pomiaru na otwartym poligonie pomiarowym dla odległości 10 m. Zbadano następujące konfiguracje środków ochronnych:

1. Brak dodatkowych środków ochronnych (rys.2).
2. Kondensatory o wartościach C=2,2 nF (rys.3)
3. Dławik sygnałów wspólnych (rys.4).
4. Koraliki ferrytowe (rys.5).
5. Kondensatory o wartościach C=2,2 nF i koraliki ferrytowe (rys.6).
6. Kondensatory o wartościach C=2,2 nF, koraliki ferrytowe i dławik sygnałów wspólnych (rys.7).
7. Kondensatory o wartościach C=150 pF, koraliki ferrytowe i dławik sygnałów wspólnych (rys.8).
8. Kondensatory o wartościach C=33 pF, koraliki ferrytowe i dławik sygnałów wspólnych (rys.9).

Zastosowano dławik sygnałów wspólnych o oznaczeniu 74271111 firmy Wurth Electronics i koralik ferrytowy BLM18EG121SN1D firmy Murata. Elementy te zostały wybrane ze względu na dużą wartość impedancji dla częstotliwości 100 MHz÷1 GHz. W celu ułatwienia analizy otrzymanych wyników, wartości emisji promieniowanej dla kluczowych częstotliwości zestawiono w tabeli 1.

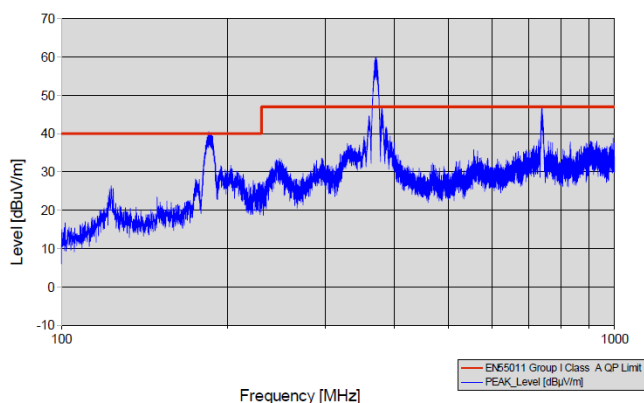
Na rysunku 2 pokazano poziom emisji promieniowanej dla układu pozbawionego środków ochronnych. Jak widać urządzenie nie spełnia wymagań nawet dla klasy A. Ekstrema emisji występują dla częstotliwości 185 MHz i jej wielokrotności: 370 MHz i 740 MHz. Dla częstotliwości 370 MHz graniczny poziom promieniowania, przy pomiarze detektorem szczytowym, jest przekroczony o około 13 dB. Po dołączeniu kondensatorów o wartości 2,2 nF zaobserwowano spadek poziomu pola elektrycznego o 1÷3 dB dla 1 i 4 harmonicznej i o blisko 14 dB dla 2 harmonicznej. Analiza otrzymanych wyników pokazuje, że badany układ wykazuje silne własności rezonansowe: dołączenie kondensatorów pomiędzy części izolowane powoduje wyraźny wzrost poziomu emisji dla częstotliwości 555 MHz (3. harmoniczna). Eksperymenty ujawniły, że poziom promieniowania jest jeszcze większy gdy kondensator wpięty jest tylko pomiędzy masy lub zasilania obu części. Wystąpienie efektu rezonansowego nie powinno dziwić biorąc pod uwagę, że obie strony izolatora

sprężone są ze sobą magnetycznie, a pojemności dopinane są do niego równolegle. Nie do pominięcia są również rozproszone indukcyjności i pojemności obwodu drukowanego i dołączonych przewodów. Istotnie, po zastosowaniu dławika sygnałów wspólnych na przewodzie, promieniowanie na tej częstotliwości spadło do poziomu tła elektromagnetycznego, co pokazuje rysunek 4. Podobny efekt daje wydzielenie lokalnej masy dla układu izolatora po stronie niez izolowanej i wpięciu szeregowo we wszystkie linie koralików ferrytowych. Dławik sygnałów wspólnych obniża promieniowanie w całym zakresie częstotliwości o 2 dB dla 1 harmonicznej do nawet 9 dB dla 4 harmonicznej, co wynika z rosnącej w funkcji częstotliwości impedancji dławika. Wyniki te potwierdzają przypuszczenie, że za duży poziom promieniowania odpowiada sygnał wspólny wzbudzony po obu stronach płytki przez układ izolatora. Wydzielenie lokalnej masy i zastosowanie koralików ferrytowych tylko nieznacznie obniżyło poziom promieniowania (około 2 dB dla 740 MHz).

Tabela 1. Zestawienie wartości natężenia pola elektrycznego (dB μ V/m) dla wybranych częstotliwości

konfiguracja	185MHz	370MHz	555MHz	740MHz
1	40	60	34	47
2	39	46	39	44
3	38	51	34	36
4	41	58	34	44
5	31	36	34	39
6	30	31	34	33
7	31	32	34	33
8	26	43	34	39

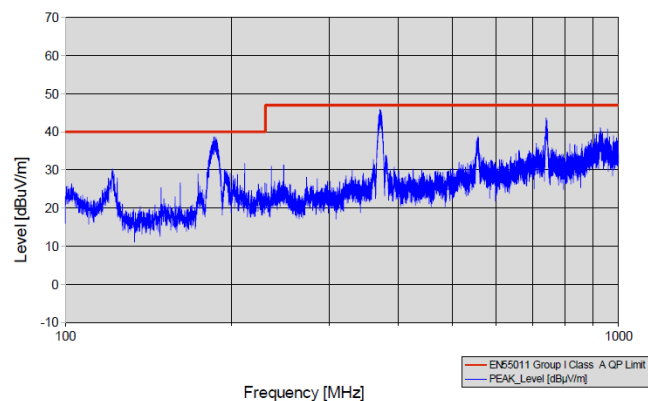
Każda z analizowanych technik ograniczania emisji, zastosowana samodzielnie nie przynosi zadowalających wyników. Okazuje się jednak, że zdecydowanie lepsze efekty daje zastosowanie co najmniej dwóch z opisanych metod. Łączne użycie kondensatorów łączących izolowane strony oraz koralików ferrytowych pozwala na uzyskanie wyników pokazanych na rysunku 6. Jak widać, w całym paśmie uzyskano tłumienie zaburzeń o co najmniej 8 dB, a dla częstotliwości drugiej harmonicznej nawet o 24 dB. Jeszcze lepsze wyniki uzyskano po dołożeniu dławika sygnałów wspólnych, co pozwoliło zwiększyć tłumienie o co najmniej 10 dB.



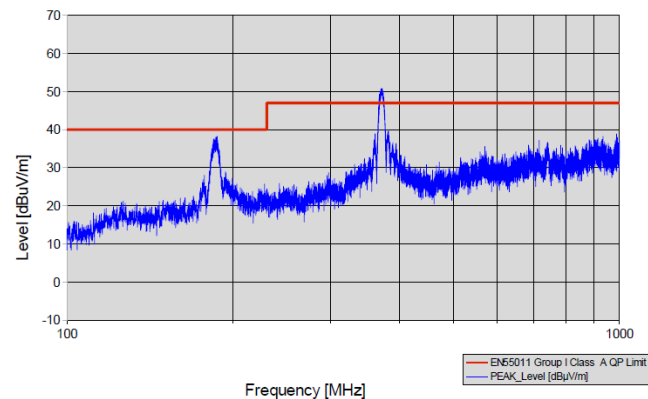
Rys.2. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 1

Uzyskane wyniki pozwalają na spełnienie wymagań EMC dla klasy A z dużym zapasem. Należy jednak pamiętać, że łączenie części izolowanych kondensatorem prowadzi do wzrostu prądu upływu, co może przełożyć się na nie spełnienie wymagań bezpieczeństwa elektrycznego dla sprzętu medycznego. Cytowana norma [1] ogranicza dla częstotliwości 50 Hz prąd upływu pacjenta do poziomu nie

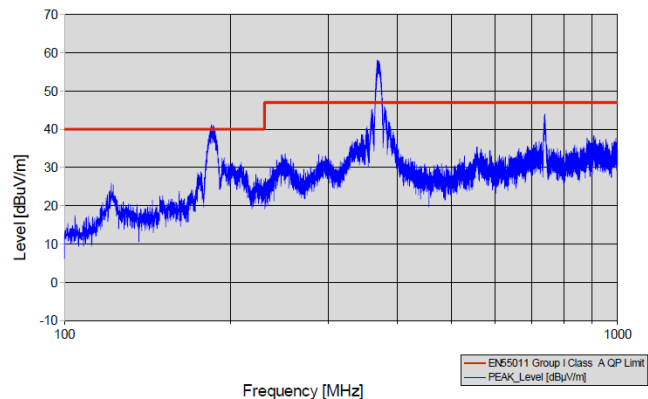
większego niż 10 μ A, co jest możliwe do spełnienia przy całkowitej pojemności łączącej części izolowane nie większej niż około 140 pF. Większe wartości pojemności nie są więc możliwe do stosowania w sprzęcie medycznym. Z drugiej strony, mała wartość pojemności prowadzi do mniej skutecznego „zwarcia” ramion dipola dla składowych zaburzeń przy zmniejszeniu wartości każdej z pojemności do, odpowiednio, 150 pF i 33 pF. Jak należało się spodziewać, zmniejszenie pojemności prowadzi do wzrostu poziomu promieniowania, szczególnie dla częstotliwości 370MHz, wciąż jednak otrzymane wyniki pozwalają na spełnienie wymagań dla klasy A. Zastosowanie kondensatorów o wartości 33pF umożliwia równocześnie na spełnienie wymagań bezpieczeństwa elektrycznego z dużym zapasem.



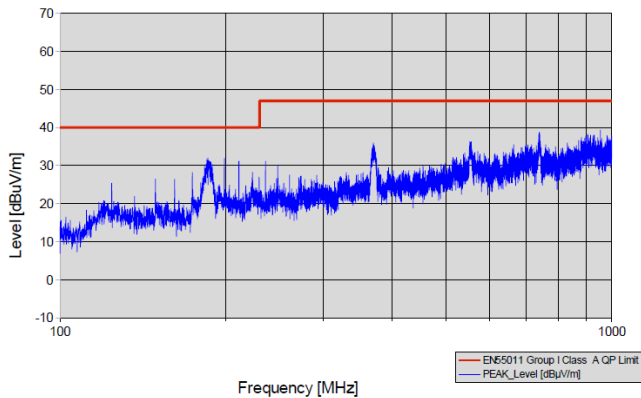
Rys.3. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 2



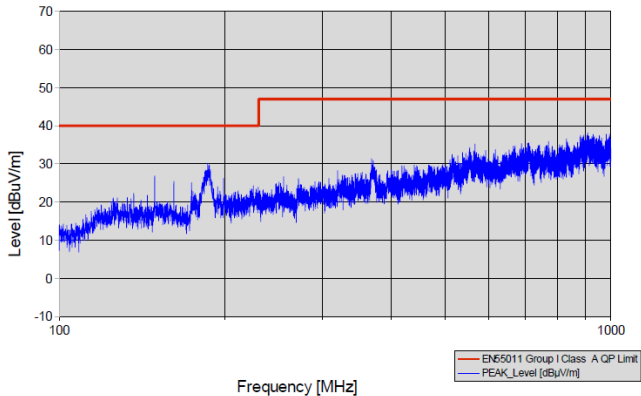
Rys.4. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 3



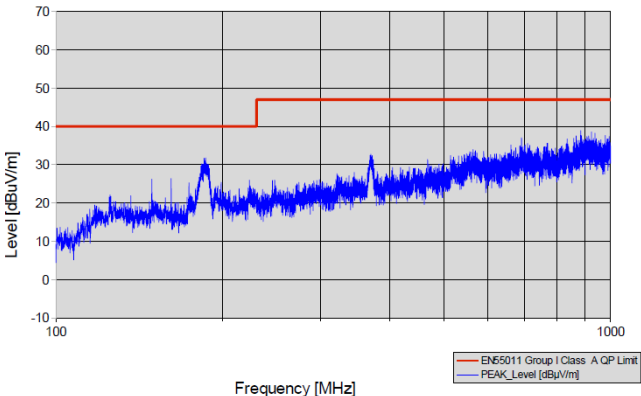
Rys.5. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 4



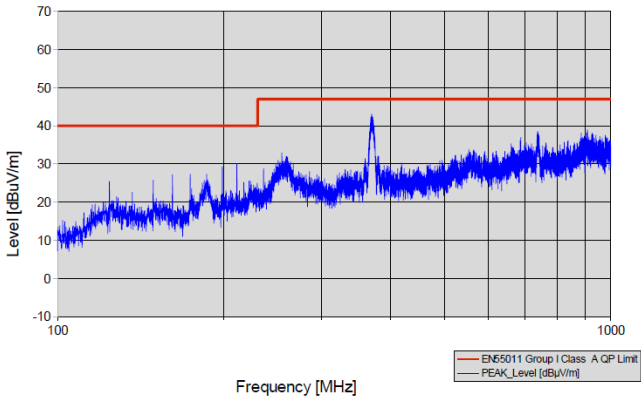
Rys.6. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 5



Rys.7. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 6



Rys.8. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 7



Rys.9. Wyniki pomiarów emisji promieniowanej dla konfiguracji 8

Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki pomiarów pokazują, że zastosowanie w projekcie elektronicznym magnetycznych izolatorów cyfrowych faktycznie może prowadzić do problemów ze spełnieniem wymagań EMC dotyczących emisji zaburzeń promieniowanych. Użycie zalecanych w notach producenta kondensatorów łączących części izolowane, nie prowadzi w przypadku obwodów dwuwarstwowych do znaczącej poprawy sytuacji. Dodatkową trudnością jest to, że w takim przypadku nie jest możliwe „wbudowanie” takiej pojemności w obwód drukowany i konieczne jest zastosowanie elementów dyskretnych. Konieczność zapewnienia wymaganego odstępu izolacyjnego po powierzchni druku prowadzi do stosowania elementów w dużych obudowach, co przekłada się na duże wartości indukcyjności doprowadzeń i ogranicza skuteczność ich działania dla w.cz. Dodatkowo, spełnienie wymagań bezpieczeństwa elektrycznego skutkuje koniecznością stosowania pojemności o małych wartościach, co nie pozwala na efektywne ograniczenie emisji dla najniższych częstotliwości. Prowadzi to wprost do konieczności stosowania dodatkowych środków ograniczających emisję zaburzeń.

Dobre wyniki daje zastosowanie koralików ferrytowych w obwodach masy, zasilania i liniach sygnałowych. Zastosowanie obu tych środków nie eliminuje w pełni zaburzeń o charakterze wspólnym w obwodach masy i zasilania – dodanie dławików sygnałów wspólnych pozwala na dalsze ograniczenie emisji. Sytuacja ta pokazuje, że w obwodach z izolatorami magnetycznymi w przypadku podłączania przewodów zewnętrznych konieczne może być stosowanie filtrów sygnałów wspólnych. Przeprowadzone badania pokazują ponadto, że nawet w przypadku małych obwodów drukowanych w układzie z izolatorem mogą występować efekty rezonansowe mające wpływ na poziom emisji w zakresie częstotliwości do 1 GHz. W opinii autorów fakt ten powoduje, że dobór właściwych środków ochronnych, w szczególności dobór wartości elementów, musi być dokonywany na drodze eksperymentalnej.

LITERATURA

- [1] Worek C., Szczurkowski M., Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń elektronicznych przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 3, 176-178
- [2] PN-EN 60601-1:2011 Medyczne urządzenia elektryczne. Część 1: Wymagania ogólne dotyczące bezpieczeństwa podstawowego oraz funkcjonowania zasadniczego
- [3] Recommendations for Control of Radiated Emissions with isoPower Devices, AN-0971APPLICATION NOTE, Analog Devices, 2014
- [4] Recommendations for Control of Radiated Emissions with iCoupler Devices, AN-1109 APPLICATION NOTE, Analog Devices, 2011
- [5] Archambeault B., Drewniak J., PCB Design for Real-World EMI Control. Boston: Kluwer Academic Publishers 2002
- [6] Montrose M., Printed Circuit Board Design Techniques For EMC Compliance: A Handbook For Designers, Wiley 2000

Autorzy:

dr inż. Dariusz Wójcik, Instytut Elektroniki, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice,
E-mail: dwojcik@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
 mgr inż. Tomasz Woźnica, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice
E-mail: tomasz.woznica@ibemaq.pl