

Problemy konstrukcji współczesnych urządzeń elektronicznych

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest analiza możliwości jednoczesnego spełnienia różnych wymagań eksploatacyjnych, jakie stawia się przed współczesnymi, wojskowymi urządzeniami elektronicznymi. Omówiono najważniejsze z tych wymagań i przedstawiono problemy, jakie sprawia ich spełnienie. Opisano autorskie metody zapewnienia optymalnych warunków pracy urządzeń w skrajnych warunkach klimatycznych. Metody te zostały praktycznie zweryfikowane w urządzeniach opracowanych i seryjnie produkowanych w WIL.

Abstract. The subject of the work is the analysis of the possibility of simultaneous fulfillment of various operational requirements that are set for modern military electronic devices. The most important of these requirements are discussed and the problems that their fulfillment causes. Proprietary methods of ensuring optimal working conditions for devices in extreme climatic conditions are described. These methods have been practically verified in devices developed and mass-produced at MCI. (**Construction problems of modern electronic devices.**)

Słowa kluczowe: urządzenie elektroniczne, narażenia klimatyczno-mechaniczne, chłodzenie, kompatybilność elektromagnetyczna
Keywords: electronic device, climatic and mechanical exposures, cooling, electromagnetic compatibility

Wstęp

Przedmiotem pracy jest analiza możliwości jednoczesnego spełnienia różnych wymagań eksploatacyjnych, jakie stawia się przed współczesnymi, wojskowymi urządzeniami elektronicznymi, pracującymi w warunkach polowych. Wymagania te mają charakter interdyscyplinarny i krytyczny, ponieważ ich spełnienie warunkuje dopuszczenie urządzenia do eksploatacji, pod warunkiem spełnienia wszystkich wymagań, potwierdzonych badaniami kwalifikacyjnymi oraz funkcjonowanie w rzeczywistych, zwykle trudnych warunkach pracy i przechowywania w sensie obecności wszystkich możliwych narażeń. W pracy zostaną przeanalizowane wymagania w zakresie:

- a) odporności i wytrzymałości na narażenia klimatyczne i mechaniczne,
- b) kompatybilności i elektromagnetycznego przenikania informacji.

Można powiedzieć, że generalnie nie ma sprzeczności między nawet tak pozornie różnymi wymaganiami, jak odporność urządzenia na wilgoć, opary, pyły, czy kurze, a jego szczelność, zapobiegająca elektromagnetycznemu przenikaniu informacji. Brak takich sprzeczności uwidacznia się jednak wtedy, kiedy urządzenie jest projektowane od podstaw i wzmiankowane szczelności są od razu uwzględniane w konstrukcji. Często zdarza się nawet, że mechanizm zapobiegający przed narażeniami jednego rodzaju może jednocześnie służyć do ochrony przed nawet kilkoma innymi narażeniami. Jednak taka funkcjonalna korelacja jest możliwa tylko pod warunkiem intencjonalnego zaprojektowania jej już na etapie modelowania i sprawdzenia w prototypowaniu. Natomiast uzupełnianie dodatkowych funkcjonalności w późniejszych etapach procesu konstrukcyjnego jest bardzo kłopotliwe, czasochłonne, kosztowne i zwykle nie prowadzi do rozwiązań optymalnych.

Wymagania podstawowe

Pod pojęciem odporności na narażenia klimatyczne i mechaniczne rozumie się zdolność urządzenia do pracy w założonym przedziale temperatur i wilgotności oraz obecności mechanicznych narażeń ciągłych i chwilowych. W wojskowych urządzeniach polowych są to zwykle temperatury pracy od -30°C do $+50^{\circ}\text{C}$ przy wilgotności względnej sięgającej 98% oraz ciągłe, wielowymiarowe drgania z przyspieszeniem do 10g i silne, pojedyncze udary chwilowe, ale powtarzane nawet do 100.000 razy [1], [2]. Badania takich odporności prowadzi się zwykle w kolejności

od mechanicznych do następnym, aby sprawdzić, czy narażenia mechaniczne nie spowodowały degradacji konstrukcji urządzenia, np. jego szczelności – jednak nie tylko w odniesieniu do wilgoci, ale również do elektromagnetycznego przenikania informacji.

Pod pojęciem wytrzymałości na narażenia klimatyczne i mechaniczne rozumie się zdolność niepracującego urządzenia do przetrwania w założonym przedziale temperatur i wilgotności oraz w obecności mechanicznych narażeń ciągłych i chwilowych. Narażenia te są zawsze bardziej intensywne w porównaniu z odpornościowymi (np. temperatury od -40°C do $+60^{\circ}\text{C}$, wytrzymałość na krótkotrwałe zanurzenie w wodzie, czy krytyczne narażenia rezonansowe), a kryterium ich spełnienia jest brak uszkodzeń i zdolność od pracy po ustąpieniu narażeń.

Takie narażenia jest w stanie wytrzymać tylko solidna obudowa metalowa, ze względu na masę wykonana ze stopów aluminium o pożądanych właściwościach mechanicznych i elektromagnetycznych, zwykle frezowana lub odlewana. W zasadzie nie stosuje się już dzisiaj obudów wykonanych z blach i montowanych metodami spawania, czy lutowania, ponieważ ich wykonanie jest nie tyle pracochłonne, ile nie zapewnia pożądanej precyzji. Odlewanie stosuje się tylko w przypadku niewielkich obudów, niezbyt skomplikowanych geometrycznie i produkowanych w bardzo długich seriach. Jednak ze względu na duże możliwości w sensie wykonania nawet wyrafinowanych kształtów, precyzję i szybkość wykonania, możliwość łatwego i szybkiego wprowadzania poprawek oraz znaczący spadek kosztów w przypadku użycia automatycznych frezarek numerycznych, dominują właśnie obudowy frezowane lub wykonywane w technologii łączącej odlewanie z późniejszą obróbką ubytkową (skrawanie, szlifowanie, wiercenie itp.) powierzchni współpracujących z innymi elementami konstrukcji. Podejmowane kiedyś próby użycia do takich celów tworzyw sztucznych nie były udane – nie tyle ze względu na problemy wytrzymałościowe, ile elektromagnetyczne. O ile obudowa metalowa o typowej grubości ścianek 3 mm bez żadnych problemów i od razu spełnia wszystkie opisane poniżej wymagania elektromagnetyczne, o tyle zastosowanie tworzywa, które następnie trzeba wewnętrznie uszczelniać metodą wtórnej metalizacji, jest kłopotliwe produkcyjnie, kosztowne, nietrwałe i daje wyniki o co najmniej 20 dB gorsze. Jeszcze większe problemy nastęrczało odprowadzanie ciepła – obudowy z tworzyw w praktyce nie mają takiej właściwości.

Szczegółowe wymagania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej zawarte są w licznych normach wojskowych [3], [4], [5], [6], [7] i cywilnych [8], [9] natomiast dotyczące elektromagnetycznego przenikania informacji są zwykle niejawne. Pod pojęciem kompatybilności rozumie się poprawną pracę urządzenia w silnie zakłóconym środowisku elektromagnetycznym, ale równoległe praktyczny brak wpływu tego urządzenia na zakłócanie tego środowiska. Wymagania wojskowe są w tej dziedzinie bardzo wysokie, w przypadku zakłóceń promieniowanych, czy przewodzonych zwykle wyższe od 10 dB do nawet 20 dB w porównaniu z cywilnymi. Można je obrazowo opisać jako wymaganie, by urządzenie nie emitowało promieniowania elektromagnetycznego w paśmie do 40 GHz o poziomie powyżej czułości typowego odbiornika, mierzone z odległości zaledwie 1 m, co sprowadza się do nie przekroczenia poziomu emisji własnej o natężeniu pola elektrycznego rzędu 10 $\mu\text{V/m}$. Jednocześnie urządzenie musi wykazywać odporność w sensie poprawnej pracy w obecności pola zakłóceń w paśmie do 40 GHz i natężeniu sięgającym 50 V/m. Specjalnym wymaganiem jest odporność na wyładowania ESD o wartości do 16 kV, oddziałujące na obudowę, przy których nie powinno obserwować się nie tylko uszkodzeń, ale nawet błędów transmisyjnych w przypadku urządzeń łączności.

Obecny poziom wymagań funkcjonalnych nakładanych na współczesne, profesjonalne urządzenia elektroniczne jest tak wysoki, że w praktyce nie jest możliwe ich spełnienie bez użycia zaawansowanych układów mikrokomputerowych, zwykle 32-bitowych procesorów klasy RISC pracujących z zegarami o częstotliwości rzędu 1 GHz i wspomaganymi pamięciami dynamicznymi DDR o dużych pojemnościach oraz układów programowalnych FPGA. Z natury rzeczy takie układy wymagają zastosowania wielowarstwowych płytek drukowanych, a liczba połączeń wewnętrznych na płytkach, w zależności od złożoności układu, waha się od 10.000 do nawet 100.000. Takie komponenty dają dużą swobodę projektantom elektroniki i możliwości programistom urządzenia, ale w każdym przypadku pobierają moc rzędu od kilku do nawet kilkudziesięciu watów i są bardzo wrażliwe na klimatyczne, choć w mniejszym stopniu mechaniczne warunki pracy.

W dalszym ciągu rozważono przykładową konstrukcję zaawansowanego urządzenia teleinformatycznego o następujących właściwościach i parametrach:

➤ szerokość 430 mm (słot stojaka 19'), głębokości 300 mm i wysokości 89 mm (2U),

zawierające wewnątrz:

- jeden moduł elektroniczny przetwarzający informacje,
- zbiór optycznych interfejsów wejścia-wyjścia,
- wyświetlacz fluorescencyjny i klawiaturę,
- główny zasilacz przetwarzający moc elektryczną 30 W.

Urządzenie będzie pracowało w warunkach klimatyczno-mechanicznych i musi spełniać wymagania kompatybilności oraz elektromagnetycznego przenikania informacji, opisane w poprzednim rozdziale.

Opis metod zabezpieczeń

Szczelność

Zakładana moc 30 W może wydawać się niewielka, ale należy pamiętać, że w obudowie urządzenia nie można zastosować otwartego, przelotowego systemu chłodzenia, polegającego na zasysaniu z otoczenia i włączaniu chłodnego, a następnie wyprowadzaniu podgrzanego powietrza, ponieważ najdrobniejsza szczelina w obudowie nie pozwoli na spełnienie wymagań szczelności przed wilgocią i szczelności elektromagnetycznej. Można tylko wspomnieć, że szczelność przed wilgocią stała się w przypadku płytek drukowanych z wielopinowymi układami w

obudowach BGA skrajnie krytyczna. Okazuje się, że przedostanie się nawet śladowych ilości wilgoci pod obudowę takiego układu powoduje swoiste zwarcia między pinami i wygrzewanie, a nawet ultradźwiękowe „mycie” tak zawilgoconej płytki nie pozwala na skuteczne usunięcie tego zjawiska. Wrażliwość zwłaszcza wielowarstwowych płytek drukowanych na narażenia mechaniczne jest również duża, ale może być łatwo zniwelowana przez odpowiedni montaż w obudowie urządzenia. Generalnie płytki drukowane zawierające od 8 do 12 klejonych warstw o typowej grubości 0,2 mm stanowią swoistą konstrukcję kompozytową, ale wykazują pewną elastyczność przy wyginaniu i skręcaniu. Takie narażenia mogą oddziaływać na wszystkie elementy płytki – od ścieżek, poprzez przelotki międzywarstwowe, aż po połączenia lutownicze pinów układów BGA z padami na płytce. Wymiary tych elementów są dzisiaj rzędu 0,1 mm, co czyni je dość wrażliwymi nawet przy dotykaniu sondą oscyloskopu. Wrażliwość tę można jednak łatwo zniwelować przez niewprowadzający naprężenia, ale sztywny montaż płytki w obudowie, a polegający na jej wielopunktowym przykrępowaniu (przykręceniu i zablokowaniu) do płaskiej ścianki tak, aby wyeliminować jakiegokolwiek drgania – wzdłużne, poprzeczne, skrętne, czy membranowe, tzn. polegające na drganiu środka płytki względem jej krawędzi.

Należy zatem założyć, że jeśli obudowa urządzenia ma być zamknięta, ale rozbieralna, to powinna się składać ze sztywnego, frezowanego lub odlewanego korpusu z punktami mocowania płytek i zamykającej go pokrywki (zwykle płytowego „sufitu”), która zawiera dwa zestawy uszczelki. *Primo* – mechanicznych, zapobiegających nie tylko dostawianiu się wilgoci, oparów, pyłów, czy kurzu, ale nawet szybkiej wymianie powietrza z wnętrza obudowy z otoczeniem. *Secundo* – elektromagnetycznych, zapobiegających wydostawianiu się promieniowania elektromagnetycznego z obudowy, ale na zasadzie wzajemności również wnikaniu zakłóceń do wnętrza urządzenia. Szczelność przed wilgocią nie jest absolutna – jakaś wymiana powietrza następuje choćby po „pływających” końcówkach złączy elektrycznych, czy poprzez adaptory złączy optycznych – nie ma tu jednak mowy o jakimś wnikaniu oparów, czy zasysaniu kurzu, zwłaszcza, kiedy w gniazdach urządzenia został już zainstalowany komplet wtyków elektrycznych i optycznych. Natomiast właściwość szczelności elektromagnetycznej wyraża się konkretnym parametrem tłumienności w założonym paśmie częstotliwości i w zależności od wymagań dla danego urządzenia ma wartości w przedziale od 80 dB do nawet ponad 100 dB.

Dwa zestawy uszczelki nie oznaczają już dzisiaj dwóch różnych uszczelki [5]. Można bowiem spotkać rozwiązania polegające na konstrukcji hybrydowej – w elastomerowej uszczelce wykonanej z twardego lub spienionego silikonu zatopione są poprzeczne druciki, które tworzą dość regularną, przestrzenną siatkę ekranującą o gęstości od 100 do 150 drucików na 1 cm^2 . Po odpowiednim ułożeniu i ściśnięciu uszczelki elastomer gwarantuje szczelność przed wilgocią, a druciki zagęszczają się i zwierają sobą krawędzie obu składanych części obudowy. Inną istotną zaletą takiej uszczelki jest możliwość nawiercania przez nią otworów pod śruby mocujące bez utraty szczelności. Skuteczne użycie uszczelki tego typu nie jest trudne, ale wymaga dokładnego wykonania elementów mechanicznych obudowy i starannego montażu – można wspomnieć, że samo dokręcanie śrub dociskających uszczelki musi być wykonywane kluczem dynamometrycznym, ponieważ skuteczność działania uszczelki występuje przy ściśle określonych siłach dociskowych, a sam montaż przypomina instalację głowicy silnika samochodowego. Widać zatem, że

taka uszczelka prosto i skutecznie rozwiązuje jednocześnie problemy wszystkich szczelności. Można też wspomnieć, że takie uszczelki mogą pracować w przedziale temperatur od -55°C do $+250^{\circ}\text{C}$, a ich montaż w sensie układania długich pasków na krawędziach obudów jest ułatwiony tym, że mogą być jednostronnie przyklejane fabrycznie naniesioną warstwą kleju przewodzącego – Rysunek 1.



Rys.1. Hybrydowa uszczelka silikonowo-metaliczna

Założono, że urządzenie ma zbiór interfejsów wejścia–wyjścia, w domyśle przesyłających dane do elektronicznego modułu przetwarzającego informacje i odbierających od niego wyniki tego przetwarzania. Typy stosowanych interfejsów zależą oczywiście od charakteru informacji. We współczesnych urządzeniach są to najczęściej standardowe interfejsy telekomunikacyjne ze wskazaniem na interfejsy dostępne sieci SDH lub sieci IP. W pierwszym przypadku są to interfejsy o synchronicznych przepływnościach od 2,048 Mbit/s do 155,52 Mbit/s, w drugim interfejsy Ethernet 100 Mbit/s lub coraz częściej 1 Gbit/s i w każdym przypadku mogą to być interfejsy elektryczne lub optyczne. Można powiedzieć, że o ile dla dowolnego z tych interfejsów w wersji elektrycznej można łatwo spełnić wymagania kompatybilności elektromagnetycznej, o tyle spełnienie wymagań elektromagnetycznego przenikania informacji możliwe jest tylko dla interfejsów optycznych. Wynika to stąd, że metody odzyskiwania informacji z tła elektromagnetycznego, nawet poniżej poziomu szumów, są tak zaawansowane, że odbiór choćby szczątkowej emisji z kabla interfejsu, dokonywany z odległości 1 m, pozwala na odtworzenie przesyłanych nim informacji. Natomiast w przypadku interfejsu optycznego takiej emisji praktycznie nie ma i jedynym sposobem jest metoda inwazyjna, tzn. przedostanie się do rdzenia światłowodu i zainstalowanie tam odpowiedniego odbiornika światła. W praktyce jest to jednak niemożliwe, ponieważ instalacje światłowodowe prowadzi się w tzw. strefach bezpieczeństwa fizycznego, a same światłowody są specjalnie zabezpieczone w niedemontowalnych przewodnicach i nie ma do nich dostępu – na pewno takiego, żeby niepostrzeżenie wspawać w odsłonięte włókno światłowodu pigtail z podsluchowym odbiornikiem optycznym. Inną, cenną zaletą interfejsów optycznych jest ich naturalna odporność (niewrażliwość), a więc i wytrzymałość na wyładowania ESD.

Chłodzenie

Chłodzenie modułów elektronicznych w przypadku zastosowania nowoczesnych układów elektronicznych stało się bardzo kłopotliwie z wielu powodów. *Primo* – zaawansowane moduły zawierają zwykle kilkadziesiąt, do nawet stu układów scalonych o bardzo różnych mocach strat, które ponadto mają najczęściej różne obudowy, zwykle konstrukcyjnie nieprzystosowane do chłodzenia. *Secundo* – układy w obudowach BGA mają zwykle niewielkie rozmiary i małą grubość, co już przy mocy strat rzędu 1 W powoduje kumulację ciepła i wzrost temperatury ich powierzchni do typowej wartości 60°C . *Tertio* – anonsowane metody odprowadzania ciepła z takiego układu przez płytkę drukowaną mogą być skuteczne, ale są

niekonsekwentne – przecież ciepło z płytki też trzeba gdzieś odprowadzić [10]. *Quarto* – stosowanie bardziej zaawansowanych mechanizmów chłodzenia wodnego, czy użycie ogniwo Peltiera [11] musi być uzasadnione i ma sens w przypadku bardzo gorących układów, które trzeba mocno schładzać, licząc się ponadto z dużym poborem mocy przez taki mechanizm i właśnie problemem odprowadzenia bardzo dużej ilości ciepła poza obudowę urządzenia. *Quinto* – zakładając opisaną szczelność obudowy można przyjąć, że moduł pobierający choćby 10 W mocy i „zanurzony” w stojącym powietrzu już po godzinie osiągnie średnią temperaturę 60°C , ale temperatury na obudowach najbardziej rozgrzanych układów przekroczyć nawet 85°C , co stanowi zwykle górną temperaturę pracy układów o specyfikacji przemysłowej (*industrial*). Układy mikrokomputerowe czy programowalne w takich temperaturach najczęściej automatycznie „bronią” się przed uszkodzeniami, zmniejszając częstotliwości zegarów, albo po prostu wyłączając przegrzewające się segmenty swoich struktur wewnętrznych. Należy też pamiętać, że intensywność uszkodzeń układów scalonych rośnie o 25% na każde 10°C wzrostu temperatury, więc wiele mocno rozgrzanych układów znacząco obniży niezawodność całego modułu. Znacznie bardziej wrażliwe na podwyższoną temperaturę są elementy zawierające komponenty chemiczne – kondensatory elektrolityczne i baterie, dzisiaj zwykle litowo-jonowe, które w podwyższonej temperaturze mogą skutecznie działać, ale ich żywotność może się wielokrotnie skrócić. Można zatem powiedzieć, że podwyższona temperatura jest wrogiem właściwie wszystkich elementów konstrukcji i zawsze powoduje niekorzystne degradacje ich właściwości i parametrów [13].



Rys.2. Przykładowe konstrukcje z obudowami-radiatorami

Jedynym sposobem wychładzania takich modułów pozostaje konwekcyjna reemisja ciepła przez obudowę urządzenia do otoczenia, co jest o tyle proste, kiedy wykonana jest ona z metalu, a zewnętrzna konstrukcja stanowi jakiś odpowiednik radiatora. Takie obudowy stają się coraz powszechniejsze, a ich konstrukcje nie mają już przypadkowych cech radiatorów, ale są intencjonalnie zaprojektowane jako właśnie efektywne radiatory o bardzo dużej powierzchni emisyjnej – Rysunek 2 – i jednym problemem pozostaje przeniesienie ciepła z wewnętrznego modułu na zewnętrzną obudowę.

Metoda 1

Można spotkać się z pomysłami bezpośredniego (stykowego), termicznego sprzęgnięcia modułu, a właściwie zamontowanych na nim układów scalonych z wewnętrzną powierzchnią obudowy. Pomysł ten jest jednak nie tyle chybiony, ile bardzo kłopotliwy w realizacji. *Primo* – wymagałby precyzyjnego wyfrezowania płyty odbierającej ciepło z układów na module (mających zwykle różne

pierwotne wysokości obudów, a w przypadku obudów BGA po przylutowaniu nie zawsze osiadających na tej samej wysokości nad płytką) z minimalną dokładnością do 0,1 mm i taka dokładność musiałaby być zachowana przy montażu obudowy. *Secundo* – w każdym przypadku taki styk poprzez nawet niewielką szczelinę rzędu choćby 0,1 mm niedopasowania byłby nieskuteczny w sensie bardzo dużej rezystancji termicznej. *Tertio* – na takich stykach musiałoby zatem być nałożone elementy termoprzewodzące w postaci lepkich past, czy klejów, albo też przyklejanych, stałych wypełniaczy termicznych (przekładek, mat itp.). Pomijając problem kontrolowanego, skutecznego złożenia takiej konstrukcji (po zamknięciu obudowy nie widać efektu złożenia), to miałyby ona charakter jednorazowy, bo w przypadku serwisowania modułu należałoby ją siłowo rozerwać i bardzo starannie wyczyścić resztki starych elementów termoprzewodzących, a w ich miejscu precyzyjnie zainstalować nowe. Można jednak wspomnieć, że w stosunku do urządzeń wojskowych wymaga się czasu naprawy nieprzekraczającego godziny, a w tym czasie taka operacja jest praktycznie niewykonalna, gdyby nawet naprawa miała polegać tylko na wymianie uszkodzonego modułu na nowy. *Quarto* – aby takie styki miały minimalną rezystancję termiczną, muszą na nich wystąpić odpowiednie, wcale niemałe naciski mechaniczne, zwrótnie wyginające płytkę drukowaną, co dla płytek wielowarstwowych z opisanych już powodów jest zabójcze, zwłaszcza przy dużej zmienności temperatur, jakie występują przy rozgrzewaniu modułu po włączeniu urządzenia i schłodzeniu po jego wyłączeniu. *Quinto* – jeśli płyta odbierająca ciepło będzie miała grubość nawet 3 mm, to przy rozmiarach np. 300 mm x 300 mm będzie w czasie badań mechanicznych przypominała membranę głośnika niskotonowego i drżała w środku z amplitudą sięgającą 1 mm, zwłaszcza w rezonansach, a drgania te przeniosą się na płytkę drukowaną, dokonując na zamontowanych na niej układach mechanicznego spustoszenia. *Sexto* – gdyby nawet skutecznie rozwiązać powyższe problemy, to wbrew pozorom takie schładzanie będzie nieefektywne z powodu dobrego, ale praktycznie punktowego przepływu ciepła z danego układu scalonego do obudowy, jednak jeśli grubość ścianki obudowy będzie wynosiła typowe 3 mm, to poprzeczne, równoległe rozchodzenie się ciepła przez tak wąską prowadnicę będzie bardzo słabe. Wynikowo na obudowie zewnętrznej będą zatem miejsca silnie rozgrzane, a między nimi mogą być obszary wręcz chłodne. Wynika stąd, że jakaś część obudowy nie będzie pracowała efektywnie jako radiator i nie będzie równomiernie, tzn. całą swoją powierzchnią oddawała ciepła do otoczenia. Praktyka potwierdza powyższe wątpliwości i takie chłodzenie jest kosztowne produkcyjnie, kłopotliwe serwisowo i wynikowo nieefektywne termicznie – po spełnieniu wszystkich opisanych powyżej warunków w najlepszym przypadku udaje się uzyskać 20°C różnicy temperatur między wnętrzem urządzenia, a jego otoczeniem.

Metoda 2

Ominięciem wszystkich problemów opisanych w poprzednim podpunkcie jest zastosowanie koncepcji wymiany ciepła między modulem, a otoczeniem poprzez wymuszony obieg powietrza wewnątrz obudowy i cało powierzchniową, konwekcyjną reemisję ciepła poprzez zewnętrzną część obudowy. Pomysł ten całkowicie eliminuje wymagania na precyzję wykonania konstrukcji wewnętrznej, ponieważ wymiana ciepła jest bezstykowa, moduł nie jest poddawany żadnym narażeniom w sensie nacisków mechanicznych, a swobodnie krążące powietrze równomiernie i skutecznie odbiera ciepło z wszystkich jego elementów, niezależnie od ich kształtów i rozmiarów. Jest

to duża zaleta, nieosiągalna w 1. metodzie. Okazuje się bowiem, że stosowane we współczesnych układach elektronicznych elementy w miniaturowych obudowach SMD typu SOT, czy QFN przetwarzają relatywnie niewielkie moce rzędu 100 mW, ale ich plastikowe obudowy o milimetrowych rozmiarach kumulują ciepło i ich temperatury pracy często sięgają nawet +70°C – wystarczy jednak lekki podmuch i temperatura szybko spada do +40°C. Poza powyższymi, oczywistymi zaletami takiego rozwiązania, jest bardzo prosta produkcja w sensie montażu i równie prosty demontaż przy serwisowaniu.

Szczegółowe założenia tej metody są następujące:

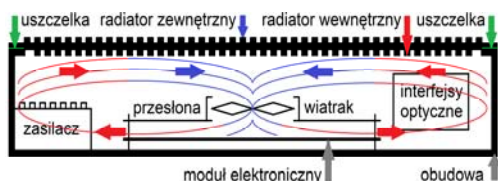
- wymuszony obieg powietrza wewnątrz obudowy realizuje niewielki wiatrak, nawiewający powietrze na moduł,
- obieg powietrza, wymuszony przez wiatrak nie musi być intensywny, wystarczy, żeby ciągle zwiewał kumulujące się ciepło z grzejących się elementów modułu,
- wiatrak pracuje we względnie komfortowych warunkach klimatycznych – temperatura wewnątrz obudowy jest zwykle tylko o kilka °C większa, niż temperatura otoczenia, a szczelna obudowa nie pozwala na przedostanie się do wnętrza wilgoci, pyłów, czy kurzu,
- wiatrak musi być przystosowany do ciągłej, wieloletniej pracy w przewidywanych warunkach eksploatacji – typowe rozwiązania wiatraków zapewniają ponad 50.000 godzin pracy w temperaturze +25°C, ale tylko 5.000 godzin w +60°C,
- pokrywka zamykająca obudowę jest obustronnym radiatorem i posiada głębokie ozebrowanie od środka i na zewnątrz; jeśli to jest możliwe w sensie konstrukcyjnym, to wszystkie ścianki obudowy powinny mieć taką budowę, podobnie, jak na Rysunku 2,
- powietrze krążące wewnątrz obudowy odbiera ciepło z modułu i przekazuje je do wewnętrznego radiatora,
- wewnętrzny radiator poprzez relatywnie cienkie ścianki obudowy cało powierzchniowo i prostopadle, a więc efektywnie przenosi ciepło do zewnętrznego radiatora, a ten oddaje go do otoczenia – jeśli to możliwe, to zewnętrzny radiator może korzystać z ewentualnej klimatyzacji pomieszczenia, w którym pracuje urządzenie – taki mechanizm stosuje się dzisiaj we wszystkich zamkniętych miejscach eksploatacji sprzętu wojskowego, tak stacjonarnych, jak i polowych.

Konstrukcja urządzenia i wyniki badań termicznych

Metodę zweryfikowano w konstrukcji opisanego wcześniej urządzenia. Okazuje się, że rzeczowe wyniki przynosi wyłącznie weryfikacja doświadczalna, a próby symulacji teoretycznych nie przynoszą ani wiarygodnych wyników, ani nawet odpowiedzi odnośnie optymalizacji metody, choć oczywiście ogólne zasady mechanicznych konstrukcji urządzeń elektronicznych pozostają niezmiennie od lat [12], [13], podobnie, jak zasady techniki chłodzenia i wymiany ciepła [13], [14]. Większość odpowiedzi na pytania o ustawienia elementów względem siebie, intensywności nawiewu wiatrakiem, temperatur w różnych konfiguracjach sprzętowych została uzyskana po niezbyt pracochłonnych, ale długotrwałych doświadczeniach w komorach termicznych i użyciu termometrów elektronicznych, wbudowanych w badane moduły. Termometry nie zostały zaimplementowane tam jednak z intencją tych badań, ale jako docelowe elementy kontrolno-pomiarowe w późniejszej pracy modułów. Można wspomnieć, że najnowsze i najbardziej zaawansowane elementy elektroniczne, np. układy programowalne, coraz częściej mają je wbudowane w strukturę i pełnią one ważną rolę w monitoringu ich pracy – nie tylko nie pozwalając na doprowadzenie do temperatur, stanowiących zagrożenie dla żywotności zwykle bardzo kosztownego układu, ale wcześniej ostrzegając o zbliżeniu

się do temperatur, stanowiących granice poprawnego działania danego układu.

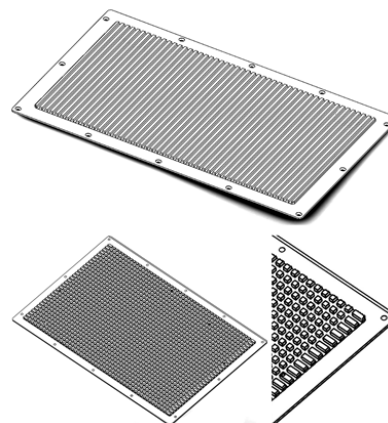
Jest to urządzenie zawierające jeden moduł elektroniczny o rozmiarach 200 mm x 200 mm, w którym zastosowano 4 zaawansowane układy programowalne FPGA i 3 mikrokomputery RISC z pamięciami DDR3. Cały moduł pobiera moc około 20 W i jest ona dość równomiernie rozłożona na całej powierzchni płytki drukowanej. Układy w postaci interfejsów elektrooptycznych i optoelektronicznych pobierają 5 W mocy, a lokalne zasilanie modułu realizują przetwornice DC/DC, które przy sprawności na poziomie 95% wytracają około 2 W mocy. Poza modulem znajduje się fluorescencyjny wyświetlacz i klawiatura, pobierające moc około 1,5 W i główny zasilacz w postaci przetwornicy DC/DC o sprawności 90% i mocy strat 3 W. Generalnie układy programowalne FPGA, mikrokomputery RISC i pamięci DDR3 bez żadnych zabiegów chłodzących w wolnej przestrzeni i przy temperaturze otoczenia $+25^{\circ}\text{C}$ osiągają na obudowach temperatury sięgające $+60^{\circ}\text{C}$. Obudowy te są jednak dość duże (średnio 25 mm x 25 mm) i wysokie (średnio 4 mm). Nałożenie na tak ustawione układy wspólnego radiatora jest oczywiście wykluczone, ponieważ przypominałoby koncepcję i powielaloby problemy odrzuconej 1. metody, a ponadto taki radiator miałby bardzo dużą masę. Nie miałoby sensu również indywidualne wyposażenie każdego grzejącego się układu w mniejszy radiator, ponieważ musiałby on być dodatkowo mocowany do płytki drukowanej, a zbiór takich radiatorów znacząco zmieniłby masę i moment bezwładności całego modułu. Należy też pamiętać, że poza modulem elektronicznym, urządzenie zawiera jeszcze inne moduły o zbiorczej mocy 10 W i ta moc również musi zostać jakoś rozproszona.



Rys.3. Konstrukcja urządzenia

W związku z powyższymi przyjęto inny sposób wymuszenia obiegu powietrza wewnątrz obudowy i odbioru ciepła z grzejących się elementów, jednak całkowicie zgodny z założeniami 2. metody, zwłaszcza z koncepcją cało powierzchniowej reemisji ciepła poprzez zewnętrzną część obudowy – Rysunek 3. Założono, że żaden z elementów na płytce drukowanej modułu nie będzie radiatorowany, a uwzględniając relatywnie duże powierzchnie najcieplejszych układów, wystarczy zbiorczy, odgórny nawiew na wszystkie układy przez jeden duży wiatrak o wymiarach 70 mm x 70 mm x 15 mm. Rozmiary wiatraka zostały dobrane doświadczalnie – wiatraki o rozmiarach 80 mm x 80 mm x 15 mm i większych nie dawały już zauważalnego spadku temperatury na układach, powodowały natomiast podwyższony hałas i drżenia, zaś wiatraki o rozmiarach 60 mm x 60 mm x 15 mm i mniejsze powodowały wyraźnie słabsze schładzanie. Okazało się, że taki nawiew sprowadza temperaturę na powierzchni nawet najbardziej grzejących się układów z $+70^{\circ}\text{C}$ do zaledwie $+35^{\circ}\text{C}$. Odwroćenie ciągu wiatraka, tzn. zasysanie ciepłego powietrza z powierzchni układów daje wynik nieporównanie gorszy, bo na poziomie $+50^{\circ}\text{C}$. Wiatrak został zamontowany na plastikowej płycie-przesłonie z otworem odpowiadającym średnicy łopatek, a płyta ta ma rozmiary płytki drukowanej modułu. Wiatrak zasysa chłodniejsze powietrze z okolic radiatora, stanowiącego wewnętrzną

część („sufit”) obudowy i włącza je na płytkę drukowaną, skąd jest promieniście rozproszane po całej jej powierzchni, schładzając wszystkie elementy na płycie, a następnie jest rozpraszane po wnętrzu całej obudowy, wracając do wewnętrznego radiatora pokrywki, gdzie oddaje ciepło, które po przejściu do radiatora zewnętrznego jest rozpraszane w otoczeniu urządzenia. Oczywiście powietrze krążąc w ten sposób wewnątrz obudowy schładza również inne moduły – główny zasilacz, interfejsy i wyświetlacz. Krytyczne jest położenie wiatraka. Okazuje się, że aby wiatrak skutecznie nawiewał, to z tyłu musi mieć dość dużo miejsca do zasysania powietrza. Z doświadczenia wynika, że odstęp łopatek od tylnej powierzchni ograniczającej zasysanie musi wynosić co najmniej głębokość łopatek – w tym przypadku co najmniej 15 mm – przy mniejszej odległości tylko miały one bezproduktywnie powietrze, bo nawiew jest znikomy, za to pobór mocy przez silnik wiatraka paradoksalnie rośnie. Odstęp ten najlepiej jest co najmniej dwukrotnie powiększyć, w tym przypadku do 30 mm, na co jest miejsce w obudowie, bo przy mniejszym wiatrak działa co prawda poprawnie, ale emituje dodatkowy hałas, który zanika przy większym odsunięciu. Z takiego ustawienia i oczywiście nawiewu korzystają również pozostałe elementy na płycie drukowanej modułu i największą korzyść odnoszą z tego miniaturowe przetwornice DC/DC – osiągające $+60^{\circ}\text{C}$ bez nawiewu i $+30^{\circ}\text{C}$ z nawiewem. Taką samą minimalizację temperatur można stwierdzić na innych, pierwotnie równie ciepłych, a następnie podobnie skutecznie schłodzonych elementach. Elementy o podwyższonych temperaturach występują zasadniczo na górnej stronie płytki – na stronie dolnej również występują i są ich może nawet setki, ale są to prawie wyłącznie kondensatory odsprężające zasilanie, które oczywiście się nie grzeją. Widać stąd, że znaczący wpływ na skuteczność metody ma również konfiguracja elementów na płycie.



Rys.4. Konstrukcja radiatorów na obu stronach pokrywki

Ostatnim i najważniejszym elementem konstrukcji jest pokrywka zamykająca obudowę z obustronnym radiatorem – Rysunek 4. Górna, zewnętrzna część pokrywki zawiera jednokierunkowo frezowany radiator o szerokości i głębokości żeber po 4 mm i odstępie między żebrami również 4 mm. Taka konstrukcja radiatora powiększa efektywną powierzchnię emisyjną dwa razy, pozwala na swobodną, konwekcyjną emisję ciepła z całej powierzchni radiatora i zapewnia pokrywce dostateczną sztywność. Można szacować, że przy rozmiarach pokrywki 400 mm x 300 mm rozwinięta powierzchnia emisyjna radiatora wynosi 24 dm^2 , a doliczając do tego płaskie ścianki boczne i ściankę tylną (ścianka przednia i podstawa urządzenia są słabszymi emiterami ciepła), otrzymuje się ponad 32 dm^2 . Dolna, wewnętrzna część pokrywki zawiera dwukierunkowo

frezowany radiator o takich samych rozmiarach i taka konstrukcja również powiększa efektywną powierzchnię absorpcyjną dwa razy, ale pozwala na równomierniejszy odbiór ciepła z całej powierzchni radiatora. Okazuje się, że próba zwiększenia czynnej powierzchni wewnętrznej radiatora przez wydłużenie elementów odbierających ciepło nie jest skuteczna, ponieważ zaczynają one tworzyć zbyt gęsty „las”, w którym powietrze przestaje swobodnie krążyć. Radiatory mają porowatą strukturę powierzchni, która jest ponadto poczerniona metodą utleniania elektrolitycznego. Takie zabiegi znacząco poprawiają absorpcyjne i emisyjne zdolności obu radiatorów – dość wspomnieć, że bez nich podane dalej wartości temperatur były o 10°C większe.

Niestety w tym przypadku nie było możliwe, aby wszystkie ścianki obudowy miały taką budowę, więc wynik jej działania był minimalny, tzn. przy większej powierzchni chłodzącej wszystkich ścianek byłby zapewne jeszcze lepszy. Wynik ten nie okazał się jednak zły – przy temperaturze otoczenia +25°C na najcieplejszych układach zmierzono nie więcej niż +40°C, temperatura na powierzchni płytki wynosiła +30°C, taka sama była temperatura głównego zasilacza, interfejsów i wyświetlacza, zaś temperatura zewnętrznego radiatora wynosiła +28°C, czyli była tylko o +3°C wyższa od temperatury otoczenia.

Najważniejszym testem była jednak praca w komorze termicznej, w której wymuszono temperaturę +50°C. Okazało się, że wszystkie powyższe wyniki, zarejestrowane dla temperatury otoczenia +25°C, zwiększyły się o te same +25°C, czyli wzrost temperatury dla każdej pośredniej wartości będzie liniowy. Temperatura $+(40+25)^{\circ}\text{C} = +65^{\circ}\text{C}$ na pierwotnie najcieplejszych układach jest całkowicie bezpieczna, ponieważ ich specyfikacje termiczne dopuszczają pracę w temperaturze otoczenia +85°C, więc margines bezpieczeństwa wynosi 20°C.

Zaobserwowano jeszcze jedno interesujące zjawisko, potwierdzające założenia metody. Otóż powietrze w komorze termicznej jest w wolnym, ale ciągłym ruchu, co wynika ze sposobu utrzymywania stałej temperatury wewnątrz komory. Ten ruch powietrza można jednak na krótko wstrzymać. Okazało się, że w takim stanie, cały czas w temperaturze otoczenia +50°C, wszystkie temperatury mierzone w module szybko wzrosły o około +5°C. Dowodzi to, że metoda jest w pełni skuteczna wtedy, kiedy zachodzi ciągła wymiana i nie ma kumulacji ciepła – nie tylko wewnątrz, ale również na zewnątrz obudowy. Potwierdza to sugestie, że urządzenia tego typu powinny pracować w pomieszczeniach klimatyzowanych, a w przypadku urządzeń pracujących na wolnym powietrzu pomoże im naturalny ruch powietrza. Oczywiście tym samym wykluczona jest praca takiego urządzenia – zwłaszcza o tak absorpcyjnej obudowie – poddanego bezpośredniemu oddziaływaniu promieniowania słonecznego, ale takie wykluczenie można znaleźć w każdej instrukcji obsługi – nie tylko wojskowych urządzeń elektronicznych.

Na koniec można jeszcze sprawdzić, jak ta metoda sprawdzi się w niskich temperaturach, sięgających -30°C i czy w takich warunkach nie można by np. wyłączać wiatraka. Okazuje się, że nie ma takiej potrzeby, a wręcz przeciwnie – działające i schładzane urządzenie działa nawet do temperatury -50°C, ponieważ moc 30 W jest wystarczająca do ciągłego podgrzewania powietrza i utrzymywania podwyższonej temperatury wewnątrz szczelnej obudowy urządzenia. Nie należy jednak twierdzić, że urządzenie będzie bezwarunkowo pracowało w temperaturze -50°C. Będzie pracowało włączone i schładzane, ale wyłączone i całe schłodzone do -50°C po włączeniu zasilania raczej od razu nie zadziała, choć po dłuższym, co najmniej kilkudziesięciminutowym czasie bezproduktywnego poboru mocy może się podgrzać i po

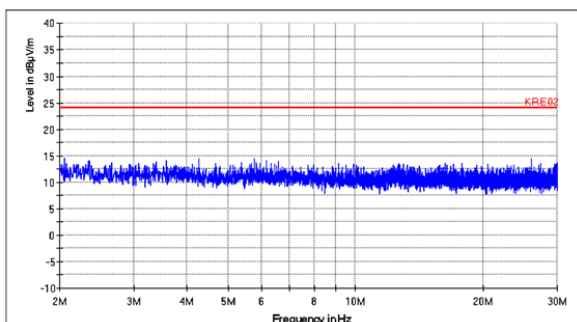
powtórnym włączeniu zasilania (zerowanie układów logicznych) może ponownie skutecznie zadziałać.

Wyniki badań elektromagnetycznych

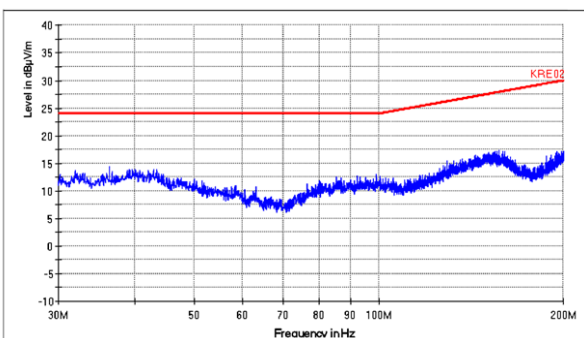
Weryfikacja spełnienia wymagań elektromagnetycznych następuje w wyniku proceduralnych badań w certyfikowanym laboratorium, np. Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej WIL-PIB, które posiada akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (certyfikat AB149) oraz certyfikat Służby Kontrwywiadu Wojskowego (1/2008/JCW/SKW) [15]. Badanie polega na sprawdzeniu, czy w założonym paśmie częstotliwości poziom promieniowania nie przekracza dopuszczalnych wartości, na Rysunkach 5, 6, 7, 8 i 9 zaznaczonych czerwonymi liniami. Niebieskie wykresy pod tymi liniami obrazują zmierzone poziomy natężenia pola elektrycznego w odległości 1 m od urządzenia. Nie należy jednak przypisywać tych poziomów w całości urządzeniu. Najpierw bada się referencyjne tło szumów (*noise floor*) w mierzonym zestawie, ale z wyłączonym i niepracującym urządzeniem, a następnie włącza się urządzenie, doprowadza do pełnej funkcjonalności i jeszcze przeprowadza pomiar. Jeśli różnice między oboma poziomami są niezauważalne, to za tło szumów odpowiada aparatura pomiarowa (antena, okablowanie i szczególnie odbiornik poziomu promieniowania) oraz szcztakowy poziom zakłóceń, panujący w ekranującej kabinie pomiarowej. Można tylko wspomnieć, że taka kabina musi zapewniać tłumienność na poziomie od 80 dB do nawet 100 dB, a niedomknięcie, nie mówiąc o uchyleniu drzwi do takiego obiektu powoduje wzrost poziomu pola elektromagnetycznego o kilkadziesiąt dB i aparatura mierzy nie poziom promieniowania urządzenia, ale całe widmo otoczenia, zawierające składowe od stacji UKF, telewizji, telefonii komórkowej i niezliczonej liczby innych, zwykle trudno identyfikowanych źródeł. Poziom tła w czasie poprawnie realizowanych pomiarów w dowolnym czasie powinien być stacjonarny i ergodyczny, ale zawsze jest niezerowy – oczywiście im jest niższy, tym lepiej świadczy to o jakości (niskoszumowości) aparatury i poziomie ekranowania komory pomiarowej. Generalnie głównym źródłem ekwiwalentnego poziomu tła w takich pomiarach są jednak szumy własne odbiornika pomiarowego i stąd ciągła walka o ich minimalizację, sprowadzająca się do zakupów coraz doskonalszej i niestety coraz kosztowniejszej aparatury. Osiągnięcie poziomów emisji od badanego urządzenia, które znajdują się pod poziomem szumów aparatury pomiarowej jest praktycznie niemożliwe, jeśli poprawnie nie zastosuje się opisanych, kompleksowych zabiegów zabezpieczających – konstrukcyjnie szczelnej i starannie zmontowanej obudowy. Współczesne układy elektroniczne emitują w zasadzie w całym paśmie częstotliwości od kiloherców do gigaherców, ale najbardziej krytycznym zakresem emisji od układów mikrokomputerowych i układów programowalnych jest pasmo od 100 MHz do 1 GHz, gdzie przy otwartej obudowie mierzone poziomy przekraczają „czerwone linie” nawet o 60 dB – widać stąd, skąd się bierze wymaganie, by wynikowa tłumienność obudowy przekraczała 100 dB. Można wspomnieć, że kiedy przed kilkoma laty w układach elektronicznych zaczęto powszechnie stosować układy mikrokomputerowe czy programowalne, pracujące z częstotliwościami rzędu 1 GHz, a laboratoria zaczęły uzyskiwać akredytacje do badań w paśmie do 40 GHz, to pojawiły się obawy, czy nie spowoduje to konieczności zmiany metod i technologii ekranowania, spełniającego nowe wymagania. Okazało się, że były one znacząco przesadzone. *Primo* – mimo zwiększenia częstotliwości do 1 GHz, zasadnicze widmo zakłóceń pozostało w paśmie od 100 MHz do 1 GHz. *Secundo* – nawet przy otwartej obudowie zakłócenia powyżej 1 GHz są wyraźnie widoczne,

ale spełniają nowe wymagania i przewyższają poziom tła zaledwie o kilka-kilkanaście dB – Rysunek 9. Oczywiście dotyczy to poziomu tła, jakie występuje przy użyciu obecnie dostępnej aparatury i w przyszłości będzie on zapewne jeszcze niższy. *Tertio* – można domniemywać, że za tak niski poziom emisji w tym paśmie odpowiada technologia wykonania współczesnych, wielowarstwowych płytek drukowanych i użycie układów w obudowach BGA. Płytki co najmniej 8-warstwowe mają tak obszerne warstwy masy i zasilania, że stanowią one swoiste ekrany przed promieniowaniem, a setki niskostratnych pojemności w postaci miniaturowych kondensatorów SMD w obudowach 402 (1.0x0.5x0.35 mm³) odprężających napięcia zasilania, umieszczone w mniej niż milimetrowych odległościach od pinów układów BGA skutecznie tłumią zakłócenia już u źródła. Mechanizmy te wspiera ponadto stosowanie innych zabiegów, np. optymalizacja konfiguracji układów na płycie, użycie do komunikacji między układami niepromieniujących, bo niskonapięciowych i symetrycznych linii paskowych itp.

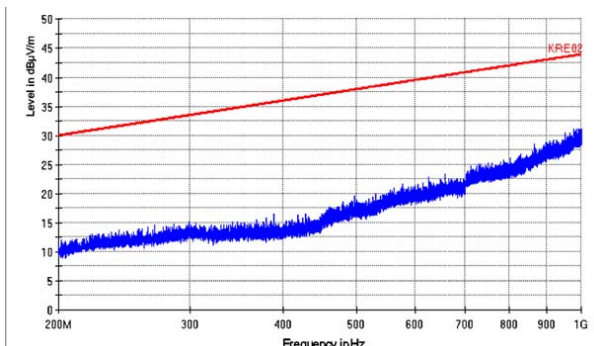
Ostatnim badaniem z dziedziny kompatybilności elektromagnetycznej jest sprawdzenie odporności, a więc niewrażliwości na typowe wyładowania ESD o napięciu rzędu kilku kV w czasie pracy urządzenia, a następnie jego wytrzymałość na wyładowania o napięciach sięgających 16 kV. O ile kiedyś badania takimi narażeniami często kończyły się poważnymi uszkodzeniami urządzeń, o tyle wobec opisywanej konstrukcji są one niezauważalne.



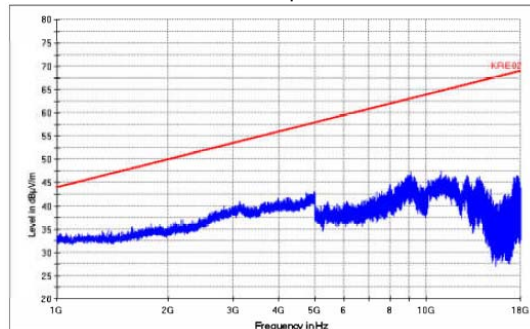
Rys.5. Widmo zakłóceń zestawu w paśmie od 2 MHz do 30 MHz



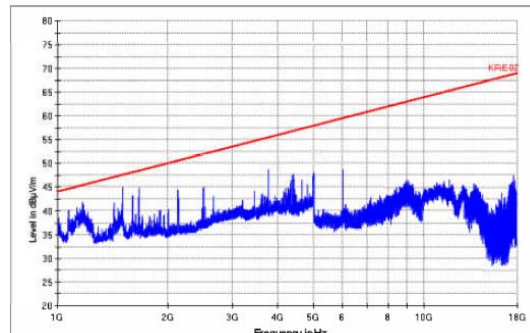
Rys.6. Widmo zakłóceń zestawu w paśmie od 30 MHz do 200 MHz



Rys.7. Widmo zakłóceń zestawu w paśmie od 200 MHz do 1 GHz



Rys.8. Widmo zakłóceń zestawu w paśmie od 1 GHz do 18 GHz



Rys.9. Widmo zakłóceń zestawu w paśmie od 1 GHz do 18 GHz przy otwartej obudowie urządzenia

Można jeszcze wspomnieć o wymaganiach dotyczących elektromagnetycznego przenikania informacji, które zwykle są niejawne i jako takie nie są wykonywane w laboratoriach cywilnych, a wyłącznie w laboratoriach służb ochrony państwa, w Polsce ABW i SKW.

Można więc zadać pytanie, jak konstruktor ma spełnić nieznane sobie wymagania? Odpowiedź jest pośrednia – musi spełnić wymagania kompatybilności elektromagnetycznej z takim zapasem, aby domniemany poziom przenikania informacji był praktycznie niemierzalny. Jest to o tyle proste, że nikt lepiej od konstruktora nie wie, jakie są potencjalne źródła i drogi takiego przenikania oraz jakie jest ich miejsce tak fizyczne, jak i sygnałowe. Natomiast niezorientowany w takich szczegółach badacz przeników może tylko żmudnie skanować widmo, co wiąże się z dużą pracochłonnością i czasem takich badań. Ponieważ jednak konstruktor i badacz służą interesom tego samego państwa, to zawsze zgodnie współpracują w tym sensie, że w pierwszym podejściu badana jest *pro forma* opisana poprzednio postać referencyjnego tła szumów i nie dopuszcza się wykrycia jakichkolwiek, nawet śladowych różnic między widmami z urządzeniem wyłączonym i niepracującym, a włączonym i pracującym – samo spełnienie wymagań kompatybilności w sensie poziomów poniżej czerwoną linią jest w tym przypadku niewystarczające. W drugim podejściu konstruktor ujawnia wszystkie moce i częstotliwości sygnałów, będących potencjalnie nośnikami przeników, jak również elementy konstrukcji, w których one występują i z których można się spodziewać ich emisji. W tym momencie następuje bardzo precyzyjna inspekcja konstrukcji i potencjalnych emisji w sensie pomiarów widma. Przykładowo – ethernetowy interfejs elektryczny ze złączem RJ45 typu 100Base-TX nadaje ciąg danych o przepływności 100 Mbit/s. Szukanie przeników w prążku 100 MHz nie ma jednak sensu, ponieważ w wyniku kodowania liniowego 4/5 wynikowy sygnał w kablu ma główny prążek na częstotliwości 125

MHz, a uwzględniając synchroniczny skrambling jego widmo jest prążkowo-ciągłe. Skupiając się na poszukiwaniach prążka o częstotliwości 125 MHz wykrywa się go na tle szumów tym łatwiej, im to tło jest niższe, co łatwo osiągnąć, zawężając pasmo filtra odbiornika nawet do 1 Hz, co pozwala osiągnąć czułość odbiornika na poziomie sięgającym -170 dBm/Hz. Trzeba jednak pamiętać, że częstotliwość 125 MHz może być niedokładna (dopuszcza się odchyłkę do ± 50 ppm) i prążek może znajdować się w przedziale od 124.993.750 Hz do 125.006.250 Hz, co wymaga sprawdzenia 12.500 przedziałów o paśmie 1 Hz, bo w nominalnym punkcie 125.000.000 Hz może nie być żadnego prążka, a jedynie szum tła. Trzeba też pamiętać, że generatory kwarcowe mają określoną stabilność i ich częstotliwość może zmieniać się w funkcji temperatury. Jeśli badacz jest wspierany nawet przez automat, to jest to niezwykle żmudna praca, ale każdy „podejrzany” prążek ponad poziomem tła szumów musi zostać zidentyfikowany i sklasyfikowany jako nieistotny lub niebezpieczny.

Takich prążków we współczesnym układzie elektronicznym mogą być jednak tysiące i praktycznie jedynym sposobem na uniemożliwienie emisji wszystkim sygnałom, które je niosą, jest szczelna obudowa o tłumienności 100 dB i nieemisyjne interfejsy wejścia-wyjścia, ze wskazaniem na optyczne interfejsy komunikacyjne. Właśnie interfejsy, niezależnie od zastosowanej technologii, bada się bardzo starannie i daleko bardziej zaawansowanie, niż to powyżej opisano – najskuteczniejsze są metody korelacyjne, polegające na szukaniu śladów potencjalnych sygnałów przenikających przez porównywanie ich z referencyjnymi wzorcami, ze wskazaniem na nową technikę odbioru *lock-in* [16].

Wracając do poziomów – trzeba pamiętać, że mierzy się je typową anteną o dużym zysku kierunkowym z odległości 1 m, a przy dokładniejszych pomiarach specjalną sondą z odległości nawet 1 cm. Jednak potencjalny przeciwnik nigdy nie podejździe do urządzenia na odległość jednego, a nawet dziesięciu metrów, co uwzględniając prawa propagacji fal radiowych w praktyce nie daje mu żadnych szans na odbiór szczytkowych emisji o opisanych powyżej poziomach.

Wnioski

Dzięki zastosowaniu powiązanych ze sobą mechanizmów zabezpieczających, opisana konstrukcja spełnia wszystkie wymagania w zakresie odporności i wytrzymałości na narażenia klimatyczne i mechaniczne oraz kompatybilności i elektromagnetycznego przenikania informacji:

- metalowa, odpowiednio skonstruowana obudowa zabezpiecza odporność i wytrzymałość na narażenia mechaniczne, gwarantuje szczelność klimatyczną i elektromagnetyczną, zabezpiecza przed wyładowaniami ESD oraz skutecznie pomaga w chłodzeniu urządzenia,
- sposób chłodzenia można uznać za optymalny, ponieważ korzystają z niego wszystkie elementy urządzenia, co w naturalny sposób podnosi jego niezawodność,
- system uszczelnień obudowy zabezpiecza szczelność klimatyczną i elektromagnetyczną, a ponadto jest prosty produkcyjnie i niekłopotliwy serwisowo.

Można zauważyć, że takie podejście konstrukcyjne dotyczy większości współczesnych urządzeń elektronicznych, zwłaszcza zawierających zaawansowane układy elektroniczne. Popularny smartfon jest tylko pozornie daleki od opisywanego tutaj urządzenia, bo jego konstruktorzy muszą rozwiązywać takie same problemy i – pomijając zastosowanie wiatraka – przy większości problemów w bardzo podobny sposób.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda i wyniki badań potwierdzają możliwość konstrukcji urządzeń elektronicznych, pracujących w skrajnie niekorzystnych warunkach klimatycznych, spełniających jednak nawet bardzo wysokie wymagania dotyczące odporności i wytrzymałości na oddziaływanie narażeń mechanicznych oraz kompatybilności i elektromagnetycznego przenikania informacji. Przebieg prac dowiódł, że przy ogólnej poprawności zastosowanych metod i mechanizmów, szczegóły konstrukcyjne każdego urządzenia muszą być jednak rozważane indywidualnie i optymalizowane doświadczalnie. Ponadto potwierdzono tezę, że mechanizmy zapobiegające przed narażeniami jednego rodzaju mogą jednocześnie skutecznie służyć do ochrony przed innymi narażeniami, pod warunkiem intencjonalnego zaprojektowania ich już na wczesnych etapach procesu konstrukcyjnego.

Autorzy dziękują kierownikowi Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej WIL-PIB, koledze Sławomirowi Musiałowi, za udostępnienie cytowanych wyników badań, a kolegom technikom – Jerzemu Zającowi, Ryszardowi Fabisiakowi i Wojciechowi Szulęckiemu za sprawne przeprowadzenie badań klimatycznych.

Autorzy: dr hab. inż. Marek Leśniewicz, profesor WIL-PIB, dr inż. Tomasz Rachwałik, mgr inż. Janusz Zabłocki, Zakład Kryptologii WIL-PIB, mgr inż. Wiesław Sierpiński, mgr inż. Krzysztof Sokołowski, Biuro Konstrukcyjno-Technologiczne WIL-PIB, 05-130 Zegrze, ul. Warszawska 22A, E-mail: m.lesniewicz@wil.waw.pl

LITERATURA

1. *Norma Obronna* NO-06-A502 – Klimatyczne badania środowiskowe.
2. *Norma Obronna* NO-06-A503 – Ekstremalne warunki klimatyczne – Dane do opracowania wymagań dotyczących projektowania i badań.
3. *Norma Obronna* NO-06-A200 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Poziomy dopuszczalne emisji ubocznych i odporności na narażenia elektromagnetyczne.
4. *Norma Obronna* NO-06-A201 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Tłumienność obiektów ekranujących – Wymagania.
5. *Norma Obronna* NO-06-A203 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Obiekty ekranujące – Wymagania konstrukcyjne.
6. *Norma Obronna* NO-06-A500 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Procedury badań zaburzeń elektromagnetycznych i odporności na narażenia elektromagnetyczne.
7. *Norma Obronna* NO-06-A501 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Tłumienność obiektów ekranujących – Metody badań.
8. Więckowski T., Pomiar emisyjności urządzeń elektrycznych i elektronicznych, *OW PWR*, 1997.
9. Hasse L. i inni, Zakłócenia w aparaturze elektronicznej. *re*, 1995.
10. Šir M., Feňo I., Cooling of minimized surface-mount packages in power electronics applications, *Przegląd Elektrotechniczny*. 96 (2020) nr.11 151-154.
11. Ray E., Gozdur E., Lisik Z., Sołyga M., Stanowisko do badania parametrów cieplnych materiałów stosowanych w elektronice *Przegląd Elektrotechniczny*. 91 (2015) nr.2 205-207
12. Kisiel R., Podstawy technologii montażu dla elektroników, wyd. 2, *BTC*, 2012.
13. Stępień S. (red.) i inni, Poradnik konstruktora sprzętu elektronicznego, *WKiŁ*, 1981.
14. Pelc T., Borczyński J., Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych, *WKiŁ*, 1986.
15. https://www.wil.waw.pl/wil_pl_lab.html
16. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/basic-fundamentals-of-lock-in-amplifiers/>