

Pomiary oddziaływań elektromagnetycznych urządzeń w warunkach ich eksploatacji (IN-SITU)

Measurements of electromagnetic interactions of devices in their operating conditions (IN-SITU)

Streszczenie. Publikacja dotyczy problematyki realizacji badań kompatybilności elektromagnetycznej (KEM) urządzeń w docelowym miejscu ich eksploatacji (IN-SITU). Badania obejmują pomiary poziomów emisji promieniowanej w zakresie oddziaływań w strefie bliskiej (pole elektryczne i magnetyczne) oraz w strefie dalekiej (pole elektromagnetyczne). Poddano analizie problemy z oceną rzetelności wyników pomiarowych. Rozważono wady i zalety kompromisów przyjmowanych w parametrach poligonu pomiarowego. Wskazano dodatkowe źródła błędów w wynikach, spowodowane pomiarami w środowisku przemysłowym. Zamieszczono praktyczne wskazówki, wynikające z własnych doświadczeń autora pracy.

Abstract. The paper deals the issue of carrying out electromagnetic compatibility tests (EMC) of devices at their target location of operating (IN-SITU). The tests embrace measurements of radiated emission levels in the range of interactions in the near zone (electric and magnetic fields) and in the far zone (electromagnetic field). The problems with assessing the reliability of measurement results are analyzed. The advantages and disadvantages of compromises adopting in the parameters of the measuring area are considered. Additional error sources in the results caused by measurements in an industrial environment are pointed. Practical tips resulting from the author's own experience are included in the paper.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, pomiary poziomów emisji promieniowanej, badania in-situ.

Keywords: electromagnetic compatibility, measurements of radiated emission levels, in-situ testing.

Wprowadzenie do zagadnienia

Badania kompatybilności elektromagnetycznej dotyczą zarówno pomiarów poziomów emisji przewodzonej i promieniowanej, generowanej przez urządzenie EUT (*ang. Equipment under test*) oraz szerokiego zakresu standardowych testów odporności EUT na zaburzenia przewodzone i promieniowane w postaci pola elektrycznego PE, magnetycznego PM, a także elektromagnetycznego PEM. W przypadku urządzeń wielkogabarytowych lub innych, lecz wymagających do poprawnego działania np. docelowej instalacji w miejscu przeznaczenia, badania kompatybilności elektromagnetycznej KEM wykonuje się często w opcji *in-situ*. O ile realizacja testów odporności w wielu przypadkach nie stanowi znacznych problemów technicznych, szczególnie dla zaburzeń wprowadzanych przewodowo, zarazem otrzymane wyniki mogą też być traktowane jednoznacznie, to kłopoty zaczynają się w obszarze pomiarów emisyjności.

Metrologia pól elektromagnetycznych należy do bardziej skomplikowanych procesów pomiarowych z punktu widzenia oceny rzetelności pomiaru i zapewnienia, że otrzymany wynik pomiarowy, to faktycznie wartość emisji elektromagnetycznej, pochodzącej od badanego obiektu, wyrażonej z ustalonym poziomem niepewności. Pole elektromagnetyczne jest medium kierunkowym, zwykle zmiennym w czasie i przestrzeni, jest w wielu przypadkach niejednorodne oraz nie jest wykrywalne organoleptycznie. Dodatkowym czynnikiem, pogarszającym proces badawczy, jest wpływ tzw. tła elektromagnetycznego, szczególnie w przypadku pomiarów urządzeń lub większych systemów rozproszonych, wielkogabarytowych w docelowym miejscu ich zainstalowania. W takim przypadku, poligonem pomiarowym jest zazwyczaj hala zakładu przemysłowego lub otwarta przestrzeń, co nie zapewnia w większości sytuacji dostatecznie niskiego poziomu tła elektromagnetycznego, rozumianego jako oddziaływania identyfikowane w punkcie pomiaru przy wyłączonym obiekcie badań. W badaniach pól elektromagnetycznych w strefie bliskiej dla PE i PM, jak również w strefie dalekiej dla PEM, bardzo ważną rolę odgrywa doświadczenie pomiarowca, który musi w indywidualny sposób opracować stanowisko pomiarowe, dostosowane do badanego obiektu, w rozumieniu przygotowania optymalnej przestrzeni

pomiarowej oraz doboru „najkorzystniejszej” aparatury pomiarowej. Należy to zrealizować dążąc do spełnienia wszystkich wymagań stawianych przez rozporządzenia formalno-prawne, co nie zawsze jest wykonalne z uwagi na szereg ograniczeń, wynikających ze specyfikacji środowiska przemysłowego. Niniejszy problem nie występuje w warunkach laboratoryjnych, gdzie domyślnie pomiary realizuje się w komorach bezodbićowych ze standardowym poligonem pomiarowym z normatywnym dystansem 3 m lub 10 m. Badania *in-situ* zazwyczaj wymagają rozważenia szeregu kompromisów i czasem użycia uproszczonych systemów i procedur pomiarowych z uwagi na trudną dostępność do miejsc pomiarów.

Ważną rolę odgrywa doświadczenie w interpretacji wyników przez metrologa, umiejętność wyselekcjonowania zaburzeń tła oraz oszacowania niepewności pomiaru, na którą w warunkach przemysłowych składa się wiele czynników. Powyżej zasygnalizowana problematyka jest przedstawiona przez autora w niniejszej publikacji i w dużej mierze opiera się na przykładach zaczerpniętych z własnych doświadczeń badawczych, realizowanych na przestrzeni kilku ostatnich lat.

Wstępny rekonesans obiektu badań

Przygotowanie procesu pomiarowego w warunkach docelowej eksploatacji obiektu EUT, wymaga sporo przygotowań wstępnych, a niejednokrotnie kilku wcześniejszych wizyt pomiarowców w przewidzianym miejscu badań. Poznanie poligonu pomiarowego, pozwala przede wszystkim ocenić, czy jest możliwość realizacji pełnego zakresu badań, zgodnie z wytycznymi formalno-prawnymi bez uproszczeń i kompromisów, czy będzie konieczność zawężenia zakresu pomiarów, a jeśli tak, to w jakim stopniu.

Wizja lokalna umożliwiła podjęcie decyzji, co do doboru aparatury pomiarowej, oszacowania instalacji tej aparatury w przestrzeni poligonu pomiarowego oraz przygotowania spersonalizowanych procedur pomiarowych, zgodnych z zaleceniami norm ogólnych i przedmiotowych. W każdym przypadku należy starać się używać przyrządów pomiarowych, które wykorzystywane są w trybie badań laboratoryjnych, o ile nadają się do pracy portatywnej i nie będą zbyt narażane na niekorzystne warunki

środowiskowe infrastruktury przemysłowej. W niektórych przypadkach, zleceniodawca zdając sobie sprawę, że nie ma możliwości realizacji „poprawnych” badań, chce wyłącznie oszacowania, czy EUT stanowi zagrożenie jako obiekt emisji elektromagnetycznej, czy też nie. W takich sytuacjach, nie ma potrzeby implementacji w badaniach zaawansowanej aparatury pomiarowej o najwyższej dokładności.

Aparatura, poligon i procedury pomiarowe

Proces pomiarów należy rozpocząć od identyfikacji głównego źródła zaburzeń, co może być często trudne. Dobrą praktyką jest zapoznanie się z dokumentacją techniczną mierzonego obiektu lub pozyskanie wiedzy od osoby kompetentnej w niniejszym temacie.

Istotną kwestią jest poznanie wartości głównej częstotliwości oddziaływań elektromagnetycznych, co zazwyczaj jest jednoznaczne w przypadku urządzeń, które w sposób zamierzony generują pola elektromagnetyczne, np. dedykowanych do nagrzewania indukcyjnego, czy pojemnościowego w branży przemysłowej lub urządzeń używanych w medycynie, np. do diatermii. Trudniejszym jest ustalenie częstotliwości pola elektromagnetycznego, generowanego przez urządzenie jako efekt uboczny i wynikającego ze specyfikacji pracy urządzenia. W takiej sytuacji należy zlokalizować obwód lub moduł, który może być głównym źródłem PEM. W praktyce są to zwykle duże wartości prądów przemiennych, płynące w obwodach elektrycznych okablowania lub ścieżek obwodów drukowanych (PCB).

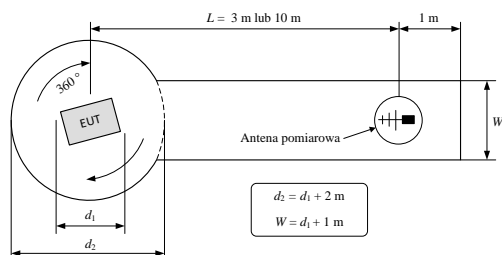
Znajomość częstotliwości podstawowej może wystarczyć jeżeli wytwarzane PEM jest efektem prądów harmonicznych, jednak w przypadku prądów odkształconych, czy modulowanych, spodziewamy się szerszego widma częstotliwości. Mając powyższą wiedzę można określić, czy pomiary będą dotyczyły strefy oddziaływań bliskich, czy dalekich. Granica między strefami l_g definiowana dla obiektów małych, w rozumieniu urządzeń przemysłowych (np. nie masztów anten TV), obliczana jest na podstawie relacji [1]

$$(1) \quad l_g = c/2\pi f$$

gdzie: $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s prędkość światła, f – oszacowana częstotliwość oddziaływań polowych badanego obiektu.

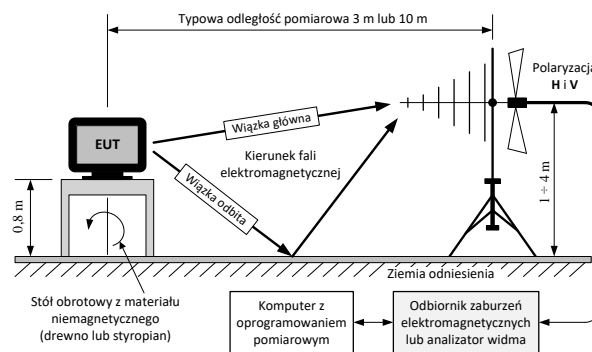
Stefa bliska, czyli dystans między EUT, a l_g , wymaga niezależnego pomiaru pola elektrycznego PE i magnetycznego PM, dedykowanymi miernikami tych wielkości m.in. o odpowiednich zakresach i pasmach częstotliwości. Stefa daleka, czyli odległość od źródła $> l_g$, dotyczy analizy PEM sprzężonego (fali EM), gdzie wymagane są przyrządy mierzące np. gęstość mocy PEM w W/m^2 lub natężenie składowej elektrycznej, czy magnetycznej PEM, odpowiednio w jednostkach V/m i A/m .

Standardowe wymiary poligonu pomiarowego znajdują się w treści norm podstawowych, np. [2]. Normatywny widok z góry poligonu pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Widok z góry szkicu znormalizowanych wymiarów poligonu pomiarowego [2]

Na rys. 2 pokazano przykładowy szkic planu sytuacyjnego stanowiska do pomiaru poziomów emisji promieniowanej [3], zainstalowanego na powierzchni, spełniającej kryteria z rys. 1.



Rys. 2. Szkic sytuacyjny stanowiska laboratoryjnego dedykowanego do pomiaru poziomów emisji promieniowanej

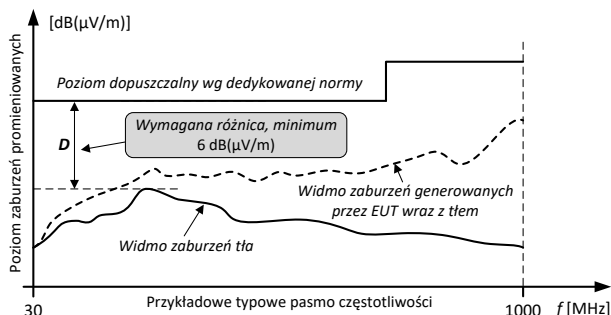
Rys. 1 i 2 dotyczą wymogów dla parametrów przestrzennych w przypadku pomiarów realizowanych w strefie dalekiej. Najczęściej takie ustawienie ma miejsce w dedykowanym, zamkniętym laboratorium kompatybilności elektromagnetycznej, gdzie przestrzeń z rys. 1 zastępuje się większą kubaturą komory bezodbićowej lub semi-bezodbićowej w kształcie prostopadłościanu. Wymiary komory dla dystansu pomiarowego 3 m mogą wynosić np. 10 m długości, 6 m szerokości i 6 m wysokości. W praktyce na hali przemysłowej w warunkach *in-situ* zachowanie powyższych wymiarów jest zwykle mało realne, zwłaszcza, że i tak przestrzeń nie będzie stanowić pomieszczenia absorbującego (bezodbićowego). Ponadto w przestrzeni przemysłowej zapewne będą się znajdować inne urządzenia w bliskim otoczeniu EUT, które nawet wyłączone z eksploatacji na czas pomiarów, mogą skutecznie zaburzać obszar pomiarowy.

Stefa bliska, czyli pomiary PE i PM z reguły wykonuje się na stanowiskach pracy lub w miejscach, w których mogą przebywać ludzie, celem określenia ekspozycji/narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne. Pomiary muszą być odniesione do wartości dopuszczalnych, zgodnych z rozporządzeniem [4]. Pomiary w obrębie infrastruktury mieszkaniowej, należy wykonywać zgodnie z zaleceniami rozporządzenia [5], wyznaczając granice stref, w których mogą się bezpiecznie poruszać ludzie. Należy pamiętać, że pomiary natężeń PE lub PM w danym punkcie powinno się mierzyć przy wyłączonych innych obiektach, emitujących pola i wtedy wynik określa wprost poziomy emisji EUT. Jeżeli w miejscu zainstalowania EUT pracują również inne źródła oddziaływań bliskich, to wskazane jest, aby pomiary powtórzyć dla stanu normalnej pracy infrastruktury przemysłowej z uwagi na fakt, że celem nadrzędnym pomiarów jest ocena narażenia człowieka. Może się okazać, że tym razem wartości będą wyższe od wyników otrzymanych dla samodzielnej pracy EUT, co wynika z superpozycji wszystkich oddziaływań składowych. Znacznym kłopotem w realizacji pomiarów pól superpozycyjnych są zwykle różne częstotliwości PEM składowych, co skłania do stosowania mierników szerokopasmowych kierunkowych lub bezkierunkowych.



Rys. 3. Przykładowe portatywne mierniki PEM

Realizując pomiary w opcji *in-situ*, należy szczególnie starannie dokonać analizy tła elektromagnetycznego. Tło stanowią oddziaływania identyfikowane przy wyłączonym docelowym obiekcie badań. W strefie bliskiej tło nie stanowi znaczącego kłopotu z uwagi na zwykle małe wartości częstotliwości oddziaływań. Znane są jego źródła, które raczej da się wyłączyć na czas pomiaru emisji EUT. Problem z „czystością” tła może wystąpić w analizie wysokoczęstotliwościowej strefy dalekiej. W tym przypadku tłem mogą być urządzenia pracujące nawet w znacznej odległości od zakładu przemysłowego i nie stanowiące jego instalacji, np. identyfikowane stacje RTV lub inne urządzenia informatyczne, pokrywające pasmo częstotliwości analizy. Przykładowy widok graficznej prezentacji wyników poziomów emisji promieniowanej pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Szkic graficznej prezentacji wyników pomiarów poziomów emisji promieniowanej

Zaznaczona na rys. 4 różnica poziomów D między wartością dopuszczalną, wynikającą z konkretnej normy, a widmem tła elektromagnetycznego powinna z zalecenia wynosić co najmniej 6 dB, w rozumieniu najmniejszego dystansu między rozważanymi poziomami (jednostka dB(μV/m) dla emisji promieniowanej lub dB(μV) w przypadku emisji przewodzonej). Jest to warunek realizacji docelowych pomiarów emisyjności, podczas których nie eliminuje się widma tła z końcowego wyniku odnoszącego się do EUT. Po spełnieniu warunku dla D , widmo zaburzeń od obiektu badań, zawierające także wpływ tła jest wprost porównywane z dedykowanymi wartościami (limitami) dopuszczalnymi (rys. 4). Eliminacja tła nie jest procesem zalecanym w pomiarach pola elektromagnetycznego w strefie dalekiej.

Warunki badań *in-situ* sprawiają, że zapewnienie minimalnego odstępu D często nie jest realne. Dla mniejszej wartości różnicy między zmierzonym widmem tła elektromagnetycznego, a poziomem dopuszczalnym, czyli dla $D < 6$ dB, można skrócić odległości pomiarowe L między anteną i EUT (rys. 1), normatywnie wynoszące 3 m lub 10 m [6]. Dla skróconych odległości oblicza się skorygowane (podwyższone) wartości poziomów dopuszczalnych, co sprawia zapewnienie wymaganego warunku dla D . Tabela 1 zawiera zestawienie parametrów korygujących limity L_L dla skróconych dystansów L poligonu pomiarowego.

Tabela 1. Współczynniki korygujące dla skróconego dystansu L

Dystans pomiarowy L		Wartość dopuszczalna	
Standardowy	Skrócony 2x	Standardowa wg normy	Dla skrócenia 2x
10 m	5 m	L_L	$L_L + 6$ dB
3 m	1,5 m	L_L	$L_L + 6$ dB
Standardowy	Skrócony 3x	Standardowa wg normy	Dla skrócenia 3x
10 m	3,33 m	L_L	$L_L + 10$ dB
3 m	1 m	L_L	$L_L + 10$ dB

Wartość współczynnika korygującego k standardowy poziom dopuszczalny L_L dla ustalonej n -krotnej redukcji normatywnej odległości pomiarowej L , obliczana jest z zależności [6]

$$(2) \quad k = 20 \log(n)$$

Wartość k podnosi poziom dopuszczalny w rozważanym paśmie częstotliwości analizy. W praktyce nie można bezkrytycznie zbliżać się z anteną do obiektu pomiarowego z uwagi na znaczący wpływ niejednorodności emitowanego pola elektromagnetycznego, mogącej zafałszować wyniki pomiarowe. Z doświadczeń autora, skrócenie odległości pomiarowej powinno być jak najmniejsze, aby tylko zapewnić minimalny „odstęp” 6 dB między poziomami dopuszczalnymi, a widmem tła.

Pomiary w miejscu zainstalowania EUT mogą być niestabilne w dziedzinie czasu, co przede wszystkim jest efektem fluktuacji tła. Fluktuacje są pomijalne lub nie występują w stabilnym środowisku elektromagnetycznym komory bezekhowej. W przypadku zauważenia fluktuacji widma podczas analizy tła lub pomiarów docelowych, czas pomiarów należy wydłużyć. W takim przypadku, czas ten powinien wynosić minimalnie 15 s. Dobrą praktyką jest wykorzystanie funkcjonalności odbiornika zaburzeń lub analizatora widma polegającej na zapamiętaniu najwyższych wartości widma, np. funkcja MAX HOLD. W celu rekonesansu podczas analizy tła, pomocnym jest też nasłuch akustyczny, który pozwala wyekstrahować składowe widma odpowiadające stacjom radiowym. Warunkiem jest posiadanie takiej możliwości przez wykorzystywany odbiornik zaburzeń.

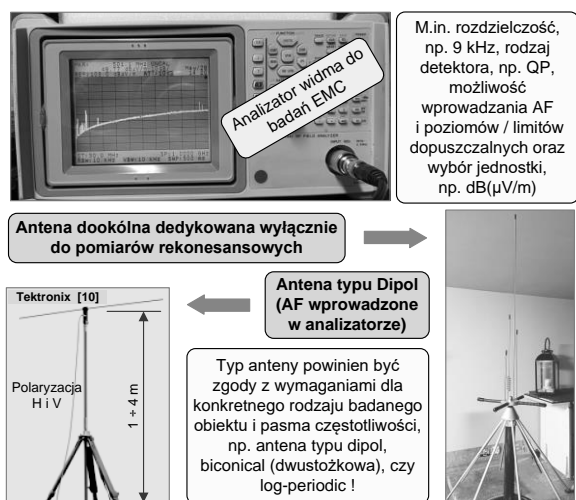
Jeżeli tylko jest możliwość, w badaniach *in-situ* należy używać aparatury zgodnej z wymaganiami standardów [6], czyli takiej jaką wykorzystuje się w laboratorium oraz starać się zachowywać zalecane dystanse pomiarowe. Zarówno w pomiarach PE i PM w strefie bliskiej należy używać mierników spełniających wymagania norm – najlepiej w opcji bezkierunkowej, jak również w analizie PEM w strefie dalekiej, odbiorniki zaburzeń i zespoły antenowe powinny być takie jakie zaleca się do pracy w laboratoriach.

Dla konkretnego przypadku badań istotny jest dobór dedykowanej anteny pomiarowej ze znanym wykresem współczynnika antenowego AF (*ang. Antenna factor*) wyrażonym w paśmie częstotliwości pracy anteny. Współczynnik AF wyraża stosunek natężenia składowej elektrycznej PEM występującego w miejscu anteny pomiarowej do napięcia indukowanego na wyjściu anteny. Współczynnik powinien dotyczyć kompletnej anteny i uwzględniać wszystkie jej parametry, włącznie z parametrami dołączonego przewodu współosiowego (wpływ tłumienia przewodu). Parametr AF powinien być zaimplementowany w odbiorniku pomiarowym lub analizatorze widma, co daje w efekcie dopasowany zestaw pomiarowy i normuje jednostki, w których prezentowane są wyniki pomiarów [7, 8]. Ewentualną opcją dla braku możliwości wczytania AF wprost do analizatora widma jest zewnętrzne opracowanie końcowego wyniku, polegające na dodaniu współczynników AF do zmierzonego widma napięciowego, obrazującego poziom sygnału na wyjściu anteny $U_{[dB(\mu V)]}$ [7]

$$(3) \quad E_{[dB(\mu V/m)]} = U_{[dB(\mu V)]} + AF_{[dB(1/m)]}$$

gdzie: $E_{[dB(\mu V/m)]}$ jest obliczoną wartością składowej elektrycznej PEM i stanowi w analizie sygnał zaburzający, porównywany z poziomem dopuszczalnym. Proces dodawania wg (3) jest operacją złożoną z uwagi na zależność AF od częstotliwości. Dodawanie krzywej AF do zmierzonego widma napięciowego, realizowane jest więc w dedykowanym oprogramowaniu pomiarowym.

Pasma częstotliwości rozważane w badaniach emisji promieniowanej zawierają się w przedziale 30 MHz ÷ 1 GHz [2]. Górna granica może wynosić 3, 6 lub nawet 40 GHz. Dla pewnych rodzajów EUT, pasma mogą być węższe, np. dla urządzeń oświetleniowych jest to 30 MHz ÷ 300 MHz [9]. W celu jednoznacznej oceny niepewności pomiarowej, dąży się do zastosowania anteny pokrywającej całe pasmo analizy. Zalecane anteny w opcji *in-situ* to biconical (dwustożkowa) lub log-periodic. W każdym przypadku badania wykonuje się dla polaryzacji poziomej H i pionowej V, zmieniając wysokość masztu w zakresie 1 ÷ 4 m (rys. 2), szukając największego poziomu zakłócenia dla danej częstotliwości. W praktyce, zakłócenia mogą występować jako wąsko lub szerokopasmowe, co powinno się zidentyfikować podczas pomiarów wstępnych i w efekcie dobrać „szerokości” filtrów pasmowych. Rys. 5 pokazuje przykład własnego (autora) „terenowego” zestawu pomiarowego, złożonego z analizatora widma Advantest U4941 i anten, który może być zasilany akumulatorowo.



Rys. 5. Przykładowy zestaw do pomiarów poziomów zaburzeń promieniowanych w miejscu zainstalowania EUT (*in-situ*)

Wnioski i sugestie wynikłe z własnych doświadczeń

Na rys. 6 przedstawiono niektóre ekstremalne własne przypadki autora, w których podczas badań występowały ograniczenia dostępności do EUT lub pojawiały się zakłócenia związane z parametrami poligonu pomiarowego.



Rys. 6. Przykłady pomiarów oddziaływań elektromagnetycznych, podczas których występowały znaczące problemy techniczne

Pomiary w miejscu zainstalowania obiektu są trudne w realizacji, a czasem bywa że niewykonalne. Pomiary *in-situ* można opisać pewnymi wspólnymi charakterystycznymi cechami. Przed przystąpieniem do ich realizacji, należy również znać odpowiedzi na kilka kluczowych pytań:

- Czy zlecającego zadowoli okrojony zakres badań, np. brak wyznaczenia wszystkich/wymaganych granic stref ekspozycji dla PE i PM?
- Czy jest możliwość techniczna użycia wymaganego miernika, sond i anten. Jeżeli nie, to w jakim stopniu pomiary wykonane inną aparaturą są rzetelne?
- Analiza konkretnego przypadku – czy badania mają sens i w jakim stopniu otrzymane wyniki mogłyby być zbieżne z wynikami uzyskanymi w laboratorium?
- Skrócenie dystansu pomiarowego: dla dużych EUT możliwy błąd niejednorodności i wyniki mogą być zafałszowane. Może dla pasm z przekroczonym tem pomiary pominąć?
- Od jakiego punktu wyznaczać dystans pomiarowy dla wieloskładnikowych, rozległych EUT?
- Konieczność wykonania studium dokumentacji EUT, celem poznania parametrów źródeł zakłóceń.
- Nabycie doświadczenia w interpretacji wyników, umiejętności wyselekcjonowania zaburzeń tła oraz oszacowania niepewności pomiaru, na którą w warunkach przemysłowych składa się wiele czynników.
- Zaleta badań *in-situ*, to realny układ geometryczny dla rozproszonych EUT (np. system sterowania skipu szybów wydobywczych). Zmierzone zaburzenia wynikają także z superpozycji oddziaływań PEM, co jest przydatne chociażby w ocenie ekspozycji pracowników na stanowiskach pracy.

Autorzy: dr inż. Damian Gonszcz, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: damian.gonszcz@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Morgan D., A handbook for EMC testing and measurement, The Institution of Engineering and Technology, UK, 2007
- [2] PN-EN 55011:2016-05/A11:2020-07, Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne – Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru
- [3] Gonszcz D., Pomiarowe i normatywne aspekty badań kompatybilności elektromagnetycznej, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11, 2023
- [4] DzU RP, Poz. 952, Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej, zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, 30.06.2016
- [5] DzU RP, Poz. 2448, Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, 19.12.2019
- [6] CISPR 16-2-3:2016/AMD2:2023, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity - Radiated disturbance measurements
- [7] Tyrawa P., Kałuski M., Procedury wzorcowania anten pomiarowych, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, 1-2/2005, Instytut Łączności, Warszawa, 2005
- [8] Tyrawa P., Kałuski M., Zestaw anten pomiarowych do badania emisyjności urządzeń w zakresie częstotliwości od 30 do 1000 MHz, Telekomunikacja i Techniki Informacyjne 1-2/2005, Instytut Łączności, Warszawa, 2005
- [9] PN-EN IEC 55015:2019-11, Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez elektryczne urządzenia oświetleniowe i urządzenia podobne
- [10] Antena pomiarowa typu dipol model Advantest TR1722, https://www.testequipmentconnection.com/specs/ADVANTEST_TR1722.PDF