

## KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA — GENEZA I EWOLUCJA

### *Electromagnetic Compatibility — Genesis and Evolution*

Władysław MOROŃ

Instytut Łączności Oddział we Wrocławiu

**Streszczenie:** W artykule omówiono genezę pojęcia kompatybilności elektromagnetycznej, rozwój jej definiowania oraz stan obecny. Zwrócono uwagę na znaczenie zagadnienia kompatybilności we współczesnej cywilizacji technicznej, w której elektronika i sterowanie oraz przesyłanie informacji za pomocą sygnałów elektrycznych przeniknęły do wszystkich dziedzin życia.

**Summary:** The paper describes the genesis of the concept of electromagnetic compatibility (EMC), the evolution of the ways of defining it and the present approach to it. The paper also stresses the importance of EMC in modern technical civilization, in which electronics, information transfer and regulation with the use of electrical signals have spread into almost every kind of activity.

Tak jak człowiek nie może obyć się bez zasobów wody i powietrza, tak i współczesna cywilizacja nie może obyć się bez wykorzystywania do celów przesyłu informacji widma elektromagnetycznego. Jest ono ograniczonym zasobem naturalnym, podlegającym niepożądanym oddziaływaniom elektromagnetycznym, które nazywamy zaburzeniami.

Możliwość użytkowania tego zasobu została odkryta przed ponad 150 laty, jeżeli chodzi o telekomunikację przewodową, i przed ok. 110 laty, jeżeli myślimy o radiokomunikacji. Henryk Rudolf Hertz przeprowadził swój słynny eksperyment odbioru fali elektromagnetycznej w 1886 r.

Warto tu zwrócić uwagę na interesującą właściwość widma elektromagnetycznego, które jest jedynym praktycznie niezniszczalnym zasobem naturalnym. Gdyby w jakiejś chwili całkowicie przerwać użytkowanie widma, to jego stan będzie natychmiast taki sam, jak w chwili, gdy możliwość eksploatacji została odkryta.

Pierwszy raz energii elektromagnetycznej do przesyłu informacji użyto w telegrafie. Pierwszy telegraf elektryczny założono w Anglii, w 1839 r., na 21-milowym odcinku, a w 1845 r. został wypróbowany system Morse'a między Baltimore i Waszyngtonem w USA. W 1852 r. Anglia miała już 6500 km linii telegraficznych, a USA

ok. 120 000 km.

Warto w tym miejscu przypomnieć, że słowo „telegraf” zostało po raz pierwszy użyte w związku z telegrafem optycznym (semaforowym), uruchomionym w 1774 r. pomiędzy Lille i Paryżem (odległość między stacjami wynosiła ok. 8 km, a zasada działania opierała się na użyciu szkieł powiększających). W 1852 r. Francja miała 556 stacji telegrafu optycznego, o długości ok. 4800 km. W tym czasie telegraf optyczny zaczął być już wypierany przez telegraf elektryczny.

Kiedy zaczęto przysyłać telegramy między krajami, niezbędne stały się uzgodnienia międzynarodowe, dotyczące tak kwestii technicznych, jak i finansowych oraz prawnych. W 1865 r., podczas konferencji w Paryżu z udziałem 20 państw, powołano pierwszą organizację międzynarodową do spraw telekomunikacji i przyjęto pierwszą konwencję ujmującą kwestie telegraficzne. Warto zdać sobie sprawę, że obecny Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny ITU, którego członkami są praktycznie wszystkie kraje świata, jest bezpośrednim spadkobiercą tej organizacji i jedną z najstarszych organizacji międzynarodowych w ogóle.

W następnych dziesięcioleciach rozpoczął się burzliwy rozwój telekomunikacji, trwający do dzisiaj. W roku 1876 został wynaleziony telefon, co doprowadziło w 1885 r.

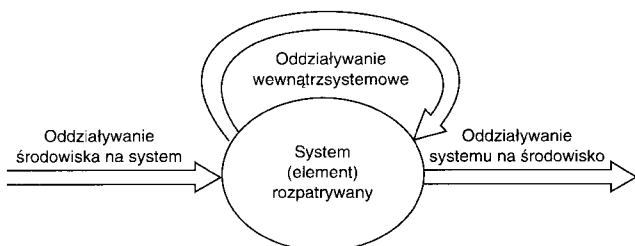
do konferencji w Berlinie, gdzie sformułowano międzynarodowe przepisy dotyczące połączeń telefonicznych. Nieco później miały miejsce historyczne eksperymenty radiokomunikacyjne i w 1906 r., również w Berlinie, odbyła się pierwsza konferencja radiowa. Od tego czasu miało miejsce szereg konferencji, na których ustalano zakresy częstotliwości i opracowywano przepisy dotyczące dalekopisów, radiodifuzji (radiofonia i telewizja), radionawigacji morskiej i lotniczej, radiokomunikacji stałej i ruchomej, w tym także radiokomunikacji satelitarnej.

Bez wątpienia już w pierwszych latach telekomunikacji przewodowej pojawiły się zaburzenia, ale nie były one jako takie identyfikowane i można sądzić, że nie były bardzo dużym problemem; stosowano urządzenia elektro-mechaniczne, które pracowały przy dużych poziomach napięć.

W początkach rozwoju radiokomunikacji jedynymi ograniczeniami użytkowania widma były w zasadzie tylko te, które wynikały z właściwości naturalnego środowiska elektromagnetycznego ziemskiego i kosmicznego oraz technicznych możliwości budowanych urządzeń. Nieliczne działające urządzenia mogły być znacznie od siebie oddalone oraz mogły pracować na różnych częstotliwościach i problem ochrony widma w dzisiejszym znaczeniu nie istniał.

W miarę rozwoju techniki sytuacja zaczęła ulegać zmianie. Wprowadzane coraz liczniej do ziemskiego środowiska elektromagnetycznego urządzenia i systemy elektryczne, teletechniczne oraz radiotechniczne zaczęły w sposób istotny wpływać na jego stan. Nowo wprowadzane systemy przekazywania informacji napotykały interakcję degradującą ich działanie ze strony systemów i urządzeń już działających w środowisku, a z kolei nowe — poprzez stwarzanie nowych źródeł promieniowania — często degradowały działanie istniejących. Te wzajemne wpływy ilustruje rysunek 1, na którym pokazano także oddziaływania wewnątrzsystemowe.

Stan taki powoli się nasilał w okresie między I i II wojną światową i nikt wówczas nie przypuszczał, że w niedługim czasie dojdzie do sytuacji, w której kluczem do dalszego rozwoju telekomunikacji będzie opanowanie zaburzeń, a więc rozwiązanie problemów skażenia środowiska elektromagnetycznego, a w przypadku radiokomunikacji także rozwiązanie specyficznych problemów jednoczesnego użytkowania ograniczonych zasobów widma elektromagnetycznego przez wiele służb.



Rys. 1. Objasnienia w tekście

Chociaż problem ochrony środowiska elektromagnetycznego stał się naprawdę krytyczny dopiero niedawno, to zjawisko zaburzeń radioelektrycznych, spowodowanych działalnością człowieka, stwierdzono prawie w początkach istnienia łączności radiowej; pierwsze doniesienia o zaburzeniach pochodzą z roku 1902. Spowodowane one były przez nadajnik radiowy i silnik spalinowy samochodu. Tak więc już wówczas pojawiły się dwa podstawowe rodzaje zaburzeń:

- zaburzenia interferencyjne (lub inaczej międzysystemowe), tj. zaburzenia, jakie istnieją między różnymi systemami przesyłania informacji celowo promieniującymi energię elektromagnetyczną;
- zaburzenia przemysłowe, tj. zaburzenia powodowane przez urządzenia, w których energia elektromagnetyczna jest generowana w innych niż przesyłanie informacji celach (np. urządzenia grzejne w.c.) lub jej wytwarzanie jest efektem niezamierzonym (np. silniki elektryczne), towarzyszącym pracy urządzenia, a promieniowanie tej energii jest szkodliwym zjawiskiem ubocznym.

Do radykalnej zmiany sytuacji doszło w ostatnich 50 latach, jakie minęły od wynalezienia tranzystora, kiedy wraz z niesłychanie szybkim rozwojem elektroniki półprzewodnikowej z jednej strony zwiększyło się zapotrzebowanie na różne systemy i urządzenia radiokomunikacyjne, a z drugiej ogromnie wzrosło nasycenie wszelkiego rodzaju urządzeniami elektrycznymi, zarówno wśród ludności, jak i w przemyśle. Wszystko to wprowadziło poważne zmiany do ziemskiego środowiska elektromagnetycznego, w którym nader istotną rolę zaczęły odgrywać źródła promieniowania wytworzone przez człowieka. Źródłami promieniowania są 4 zasadnicze grupy urządzeń:

- Urządzenia, w których energia elektromagnetyczna rozłożona w widmie częstotliwości powstaje jako efekt uboczny podczas ich normalnej pracy. Takie urządzenia wymagają jedynie filtrowania i ekranowania, aby zapobiec ucieczce tej energii w postaci zaburzeń na zewnątrz, a także takiego projektowania, w którym uwzględnia się minimalizowanie tego efektu ubocznego, aby przyjęte rozwiązania techniczne były rozsądne ekonomicznie.
- Urządzenia, które celowo generują energię elektromagnetyczną na określonych częstotliwościach; jest ona używana do innych celów niż przekazywanie informacji. Podobnie jak poprzednie wymagają one filtrowania i ekranowania, ale ponieważ bywa to trudne i nigdy nie jest idealne, stosowane są w nich elementy gospodarki widmem, na przykład urządzenia grzejne pracujące na specjalnie do tego celu wydzielonych częstotliwościach.
- Urządzenia, które celowo generują energię elektromagnetyczną na określonych częstotliwościach do przesyłu informacji w systemach zamkniętych. W warunkach idealnych nie wpływają one na środowisko zewnętrzne i ono również nie wpływa na ich pracę. Ponieważ w praktyce zawsze można spodziewać się „ucieczki” energii elektromagnetycznej z takich systemów i przenikania do nich energii z zewnątrz, należy stosować zasady gospodarki widmem, aby uniknąć za-

kłóceń. Przykładem mogą tu być urządzenia i systemy telewizji kablowej. Oczywiście zasadą powinno być, że generowane moce powinny być na poziomie niezbędnego minimum.

- Urządzenia, które celowo generują energię elektromagnetyczną na określonych częstotliwościach do przesyłu informacji w systemach otwartych, promieniując ją równomiernie (jak np. w większości systemów radiodfuzyjnych) lub kierunkowo (jak np. w liniach radiowych). Tu mają w pełni zastosowanie zasady gospodarki widmem elektromagnetycznym i odpowiednie przepisy regulacyjne.

Także telekomunikacja przewodowa z elektromechaniczną zaczęła zamieniać się w elektroniczną i obecnie jedyną różnicą pomiędzy systemami radiokomunikacyjnymi i telekomunikacyjnymi jest medium propagacyjne. W ten sposób problem zaburzeń i minimalizowania efektów zakłóceń stał się tak samo ważny w całej telekomunikacji.

Jak łatwo teraz zakłócać pracę urządzeń elektronicznych, obrazuje wielkość energii niezbędnej do uszkodzenia elementu układu. Dla przekaźników i lamp elektronowych było to  $10^{-3}$  Ws, dla tranzystorów jest to rzędu  $10^{-6}$  Ws, a dla układów scalonych już od  $10^{-7}$  do  $10^{-8}$  Ws.

Ponadto trzeba pamiętać, że teraz, kiedy systemy elektroniczne przeniknęły praktycznie do każdej dziedziny życia, sprawa zaburzeń i ich skutków nabrała zupełnie innego wymiaru niż w początkach ich rozwoju — przed drugą wojną światową, czy bezpośrednio po niej. Wówczas problem dotyczył przede wszystkim radiofonii, a potem telewizji. Jeżeli ktoś miał trzaski, czy szумы w głośniku odbiornika radiowego lub, później, zniekształcenia obrazu telewizyjnego to nie było to przyjemne, ale nie pociągało za sobą poważniejszych konsekwencji. Obecnie jest całkiem inaczej.

Aby zdać sobie wyraźniej sprawę z wagi problemu zaburzeń, warto przytoczyć kilka spektakularnych przykładów spowodowanych przez nie wypadków:

- Wypadek w stalowni USA. Promieniowanie przenośnego radiotelefonu zakłóciło sterowanie mikroprocesorowe dźwignicy przenoszącej kładź z ciekłą stalą. Przedwczesne otwarcie kadzi spowodowało śmierć robotnika i poważne obrażenia czterech innych.
- Zatopienie brytyjskiego niszczyciela w wojnie o Falklandy. Powodem zatopienia był brak kompatybilności między odbiornikiem radarowego systemu wykrywania obiektów w bliskim obszarze i jednocześnie pracującym nadajnikiem pokładowym do satelitarnej transmisji danych do naczelnego dowództwa w Anglii. Odbiornik był *oślepiony* i nie wykryta rakietka Exocet uderzyła w okręt.
- Rozbicie się samolotu w RFN. W myśliwcu lecącym na małej wysokości i w niedużej odległości od maszty radiostacji krótkofalowej dużej mocy zakłócony został system kontroli lotu i samolot rozbił się.

Pierwszą organizacją międzynarodową powołaną do zajmowania się problemem zaburzeń był, powstały w 1934 r., Międzynarodowy Komitet Specjalny ds. Za-

kłóceń Radioelektrycznych CISPR. Zajmował się on początkowo wyłącznie radiofonią, potem telewizją, rozszerzając swoją działalność wraz z rozwojem technicznym. Po drugiej wojnie światowej został wcielony do Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC), która zajęła się problemem generowanych zaburzeń i powstających zakłóceń. Komisja ta została powołana w 1906 r. podczas konferencji przedstawicieli 13 krajów w Londynie. Pierwszym jej prezydentem był lord Kelvin. Była to pierwsza organizacja międzynarodowa zajmująca się normalizacją określonej branży przemysłu. Powstanie jej wynikało z potrzeb rozwijającego się przemysłu elektrotechnicznego, dla którego unifikacja podstawowych parametrów urządzeń okazała się absolutną koniecznością i jedyną drogą umożliwienia współpracy gospodarczej w tej dziedzinie. Obecnie członkami IEC jest 48 państw, które reprezentują ok. 80% ludności świata, wytwarzają i zużywają ok. 95% energii elektrycznej, produkują maszyny i urządzenia elektryczne i elektroniczne oraz eksportują i importują 90% tych urządzeń.

Koncepcja pojęcia kompatybilności elektromagnetycznej powstała w latach 60. w USA i jak to najczęściej bywa motorem postępu były badania zastosowań wojskowych elektroniki. Powstały kłopoty przy zgromadzeniu większej liczby urządzeń i systemów radioelektrycznych na małych powierzchniach, na okrętach i samolotach, gdyż wywoływało to nadmierne zakłócenia w ich pracy.

Pierwsze definicje kompatybilności pochodzą z Departamentu Obrony USA, z 1967 r. Wprowadził on pojęcie kompatybilności w ogóle, kompatybilności konstrukcyjnej oraz kompatybilności operacyjnej. Definicje te są następujące:

***Kompatybilność elektromagnetyczna.*** Zdolność elektronicznych urządzeń przesyłu informacji, zespołów lub systemów takich urządzeń do pracy w przewidywanych dla nich warunkach środowiska bez doznawania lub powodowania niedopuszczalnego pogorszenia tej pracy na skutek niezamierzonego promieniowania elektromagnetycznego lub niezamierzonej wrażliwości na nie.

Uwaga: *Problem kompatybilności nie stanowi odrębnej gałęzi techniki, ale stawia zadania pogłębiania wiedzy w zakresie teorii i praktyki elektrotechniki i elektroniki w celu ujęcia i opanowania wszystkich aspektów zjawisk elektromagnetycznych.*

Uwaga dodana do tej definicji jest bardzo istotna. Podkreśla fakt, że zjawiska związane z kompatybilnością są trudne do opanowania i że jest ona trudna do osiągnięcia. Kompatybilność wiąże się ze zjawiskami ubocznymi podstawowych funkcji urządzenia, czy systemu, które są trudne do ujęcia teoretycznego. W swoich początkach, i do niedawna jeszcze, kompatybilność była raczej sztuką niż dziedziną wiedzy. Liczyło się przede wszystkim doświadczenie i wycucie. Teraz to się zmienia. Powstaje coraz doskonalsza teoria i formalny opis zjawisk, ale wszystko jest ciągle raczej w początkowym stadium rozwoju.

**Kompatybilność konstrukcyjna.** *Kompatybilność osiągnięta w rezultacie nadania określonych właściwości wszystkim urządzeniom promieniującym i odbierającym energię elektromagnetyczną (łącznie z antenami) w celu wyeliminowania lub zmniejszenia tak zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez te urządzenia, jak i zaburzeń zewnętrznych oraz w celu polepszenia możliwości operacyjnych w obecności naturalnych i przemysłowych zaburzeń elektromagnetycznych.*

**Kompatybilność operacyjna.** *Kompatybilność osiągnięta w rezultacie takiego wykorzystania właściwości elektronicznych urządzeń łączności, które zapewnia działanie wolne od zakłóceń w rozmaitych warunkach środowiska. Wymaga ona właściwej gospodarki częstotliwościami i jasnych koncepcji osiągnięcia maksymalnej efektywności operacyjnej.*

Uwaga: *Kompatybilność operacyjna zależy silnie od osiągniętej kompatybilności konstrukcyjnej.*

Powyższe amerykańskie definicje wojskowe nie znalazły, właściwie nie wiadomo dlaczego, międzynarodowego uznania i w 1973 r. IEC przyjęła własną definicję:

**Kompatybilność elektromagnetyczna.** *Możliwość współistnienia sygnałów i zaburzenia bez straty informacji zawartej w sygnale pożądanym.*

Definicja taka świadczy dobitnie o telekomunikacyjnym, czy radiowym rodowodzie i o tym, jak trudno było początkowo pojęcie kompatybilności oderwać od przesyłania sygnałów niosących informację. Zrobiono to dopiero w 1976 r. wprowadzając poniższą definicję:

**Kompatybilność elektromagnetyczna (między urządzeniem i jego otoczeniem lub między urządzeniami).** *Zdolność urządzenia do funkcjonowania w sposób zadowalający w danym środowisku elektromagnetycznym bez wprowadzania nadmiernych zaburzeń do tego środowiska (lub do innych urządzeń).*

Tak więc obecnie pojęcie kompatybilności obejmuje nie tylko problemy związane z przesyłem informacji. Wchodzą w jego zakres również problemy wzajemnych oddziaływań między urządzeniami i systemami, wykorzystującymi zjawiska elektromagnetyczne do innych celów niż ten przesył, a także oddziaływania tych urządzeń i systemów na naturalne środowisko elektromagnetyczne i na biosferę, a więc wszelkie zjawiska jakiegokolwiek niezgodności elektromagnetycznej.

Trzeba podkreślić, że ta ostatnia definicja zwraca już pośrednio uwagę na sprawę odporności na zaburzenia, którą w początkach rozwoju niewiele się zajmowano. Cały wysiłek szedł na zmniejszanie zaburzeń u ich źródeł. Poszukiwanie rozwiązań wyważonych (w jakimś sensie optymalnych) technicznie i ekonomicznie zapoczątkowano naprawdę niedawno.

W 1976 r. powstała także definicja ekologii elektro-

magnetycznej, która nie upowszechniła się. Jest ona następująca:

**Ekologia elektromagnetyczna.** *Jest to studiowanie zależności pomiędzy „elektromagnetycznie żywymi” elementami i środowiskiem elektromagnetycznym (naturalnym i sztucznym).*

Uwaga: *Przez analogię z definicją ekologii, która jest studiowaniem zależności pomiędzy organizmami żywymi i ich środowiskiem naturalnym.*

Teraz, kiedy elektronika jest wszędzie, pojęcie kompatybilności jest też wszechogarniające, czasem może do przesady. Rzeczywiście, bez bardzo ostrych działań mogą powstawać sytuacje bardzo niebezpieczne, podobne do tych, o jakich była mowa wcześniej, a ponadto wręcz mogą wystąpić zahamowania w rozwoju. Stąd tak zdecydowana Dyrektywa Komisji Europejskiej dotycząca kompatybilności w krajach Unii, która jej przestrzeganie czyni bezwzględnie obowiązkowym. W przeciwnym razie, w obliczu ciągle rosnących zastosowań elektroniki, grozi nam chaos. A zjawisk, które należy brać pod uwagę jest bardzo dużo, jak to widać z przedstawionego niżej zestawienia. Z jednej strony trzeba te zjawiska ograniczać (tam gdzie nie są one celowe), a z drugiej uodparniać na nie urządzenia wrażliwe.

## Podstawowe rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych

Zjawiska w zakresie niskiej częstotliwości, rozchodzące się drogą przewodową:

- harmoniczne, podharmoniczne,
- sytemy sygnalizacji,
- wahania napięcia,
- spadki i przerwy,
- niesymetria napięcia,
- zmiany częstotliwości napięcia zasilania,
- indukowanie napięcia niskiej częstotliwości,
- składowa stała w sieciach prądu zmiennego.

Pola w zakresie niskiej częstotliwości:

- pola magnetyczne (ciągłe lub przejściowe),
- pola elektryczne.

Zjawiska w zakresie wielkiej częstotliwości rozchodzące się drogą przewodową:

- indukowane napięcia lub prądy w.c. o charakterze ciągłym,
- jednokierunkowe stany przejściowe (pojedyncze lub powtarzające się — serie),
- oscylacyjne stany przejściowe (pojedyncze lub powtarzające się — serie).

Pola w zakresie wielkiej częstotliwości:

- pola magnetyczne\*
- pola elektryczne\*
- pola elektromagnetyczne\*

\* *fale ciągłe lub stany przejściowe (pojedyncze lub powtarzające się)*

Wyładowania elektrostatyczne (ESD)

Impuls elektromagnetyczny związany z wybuchem nuklearnym na dużej wysokości (HEMP)



**Mgr inż. Władysław Moroń**

Jest kierownikiem Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności, Oddział we Wrocławiu. Brał udział w pracach Międzynarodowego Komitetu Specjalnego ds. Zakłóceń Radioelektrycznych IEC-CISPR (1960–1988) oraz był członkiem Krajowej Komisji Normalizacyjnej ds. Zakłóceń. Obecnie jest przewodniczącym NKP 104 „Kompatybilność Elektromagnetyczna”, członkiem IEC-ACEC, członkiem NYAS, oraz uczestniczy w pracach Europejskiego Komitetu Radiokomunikacyjnego CEPT. Jest współtwórcą Międzynarodowego Wrocławskiego Sympozjum Kompatybilności Elektromagnetycznej, najstarszego regularnego sympozjum kompatybilności w Europie.