

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

9(250)

1987

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 27

WARSZAWA 1987

NR 9/250/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - dr inż. Krystyn Plewko
Z-ca Redaktora Naczelnego - dr inż. Stanisław Sońta

Redaktorzy Działów:

dr inż. Alina Karwowska-Lamparska,
mgr inż. Mirosław Żurawski

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juszkiewicz
Montaż tekstu: techn. Grażyna Woźnica

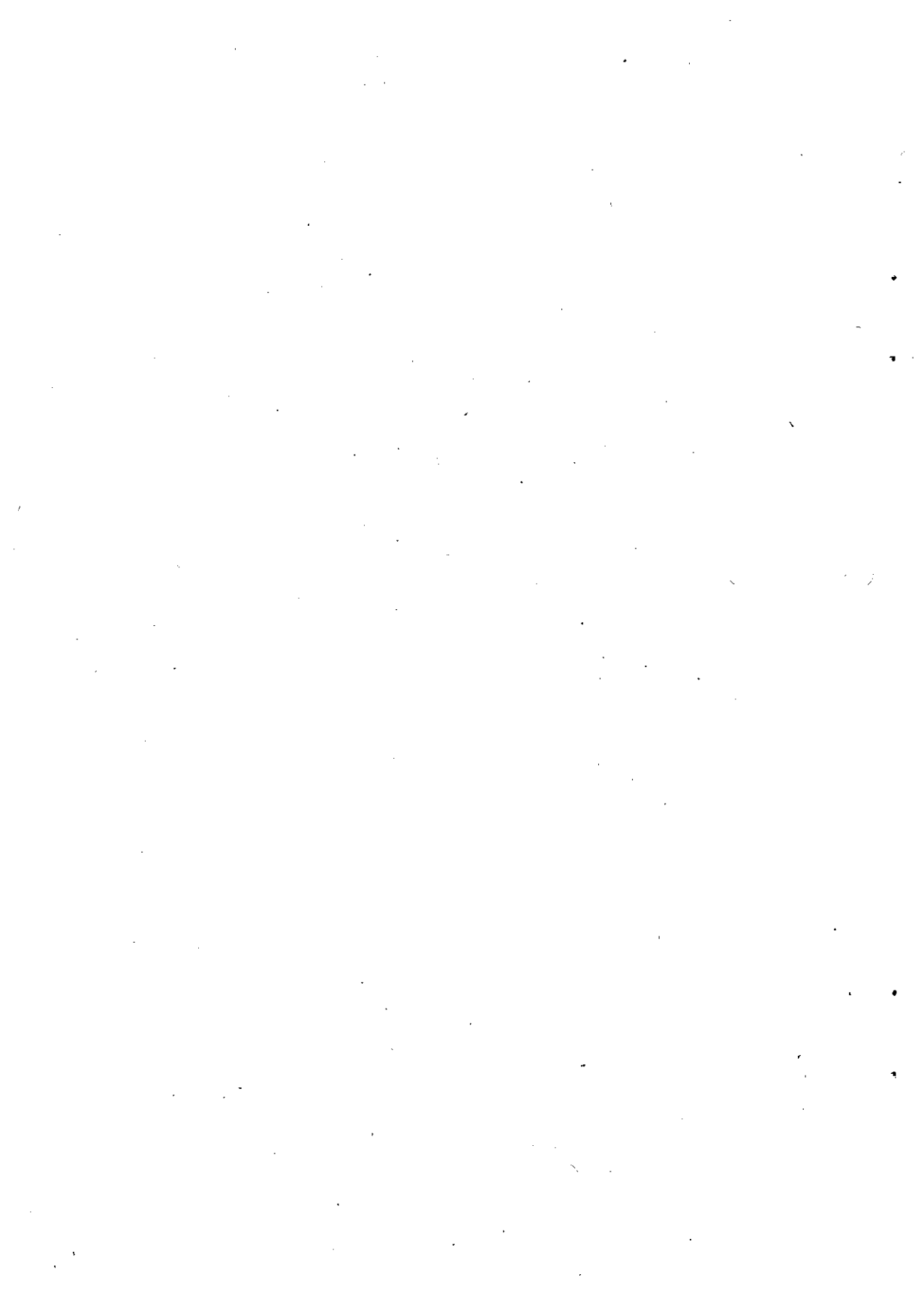
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 1987.08.13.
Druk ukończono w grudniu 1987 r.

Olga Beskid-Wójcicka

PROBLEMY PODATNOŚCI NA ZAKŁÓCENIA ELEKTROMAGNETYCZNE
NOWOCZESNYCH APARATÓW TELEFONICZNYCH

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	37
2. Konstrukcja elektronicznego aparatu telefonicznego	37
3. Podstawowe pojęcia	40
4. Źródła i rozprzestrzenianie się zakłóceń elektromagnetycznych	41
5. Model zakłóceńowy elektronicznego aparatu telefonicznego	43
6. Wpływ niektórych zakłóceń elektromagnetycznych na elektroniczny aparat telefoniczny	45
6.1. Wyładowania atmosferyczne	45
6.2. Wyładowania elektrostatyczne	47
6.3. Zakłócenia o częstotliwościach radiowych	57
6.4. Zakłócenia wynikające z wpływu linii energetycznych na sieć telekomunikacyjną	61
6.5. Zakłócenia impulsowe	64
7. Elektroniczny aparat telefoniczny jako źródło zakłóceń	65
Wykaz literatury	66



PROBLEMY PODATNOŚCI NA ZAKŁÓCENIA ELEKTROMAGNETYCZNE NOWOCZESNYCH APARATÓW TELEFONICZNYCH

1. WPROWADZENIE

Przy rozpatrywaniu problemów niepożądanego wzajemnego oddziaływania środowiska elektromagnetycznego i urządzeń telekomunikacyjnych stosuje się pojęcie "kompatybilności elektromagnetycznej" /KEM/ rozumianej jako niezakłócone współistnienie środowiska i urządzenia.

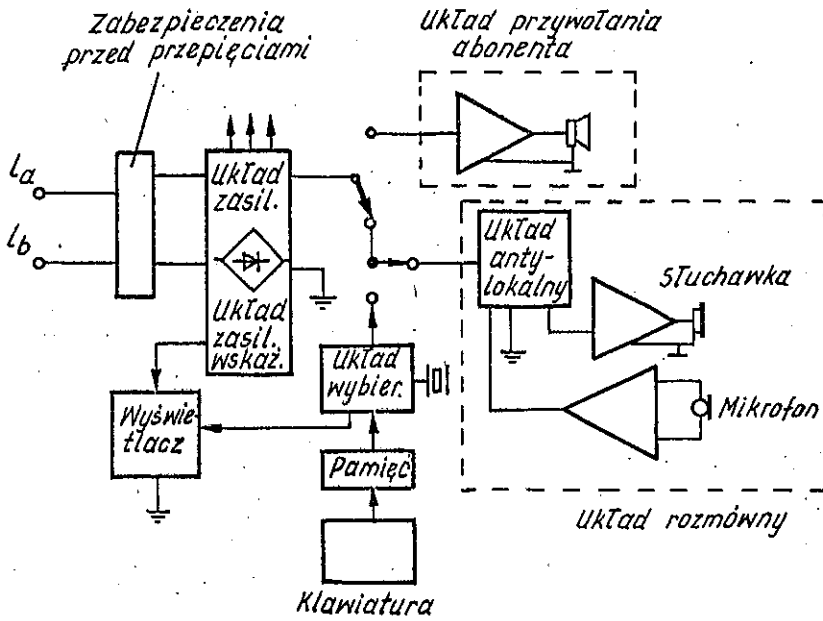
W niniejszym artykule przedstawiono problematykę KEM na przykładzie elektronicznego aparatu telefonicznego /EAT/. Sformułowano propozycję podstawowych określeń oraz podano model wzajemnego oddziaływania środowiska i aparatu. Omówiono w sposób ogólny metody pomiarów zakłóceń elektromagnetycznych /ZEM/ oraz metody badań odporności EAT na ZEM.

Systemy telekomunikacyjne powinny charakteryzować się wysoką niezawodnością. Niestety użytkownicy często obserwują i doświadczają skutków nieprawidłowego ich działania. Objawia się ono w postaci występowania przypadkowych połączeń, zakłóceń radiowych lub zrozumiałych przesłuchów, trzasków, kasowania albo błędów w pamięciach numerów. Badania polskie i zagraniczne wykazały, że główną przyczyną nieprawidłowego działania jest niekontrolowane oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych środowiska na aparat.

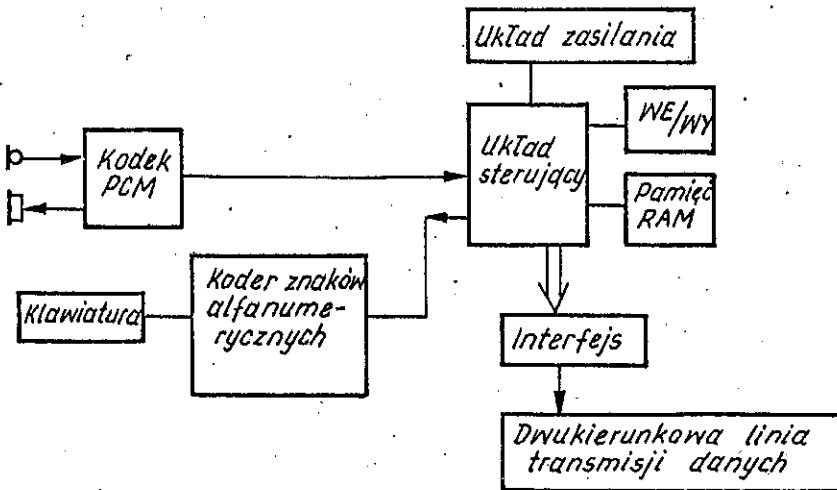
2. KONSTRUKCJA ELEKTRONICZNEGO APARATU TELEFONICZNEGO

Rozwój elektroniki półprzewodnikowej oraz zmiany rozwiązań technicznych w systemach central telefonicznych umożliwiły wprowadzenie podzespołów czynnych, tj. bloków elektronicznych w postaci monolitycznych układów scalonych /u.sc./ również do aparatu telefonicznego. Taki aparat, w którym obok elementów klasycznych zastosowano elementy elektroniczne, nazwano elektronicznym aparatem telefonicznym EAT.

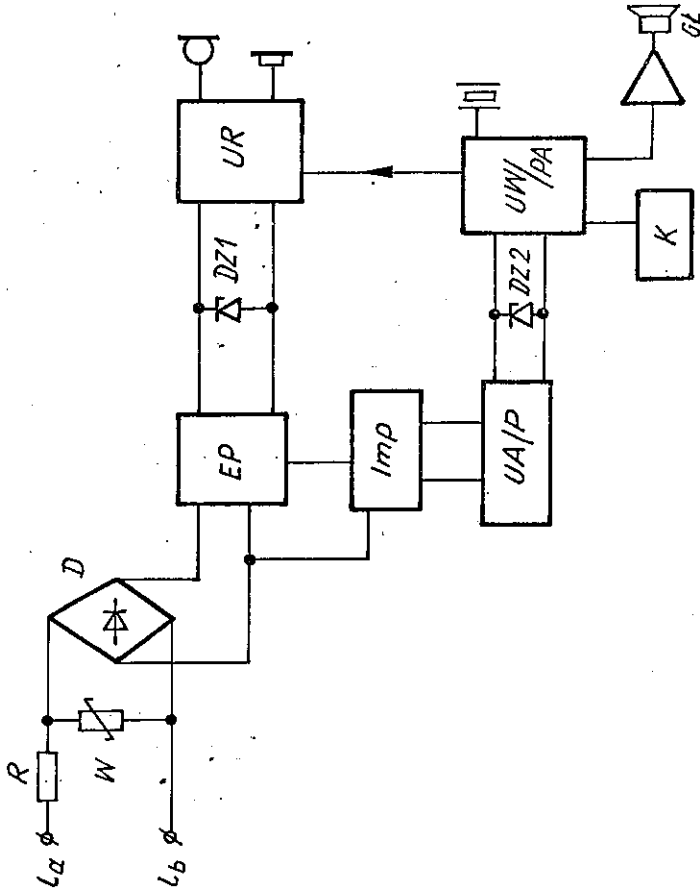
Z punktu widzenia podstawowych funkcji, jakie pełnić powinien aparat telefoniczny, EAT można podzielić na bloki: rozmówny, wybierczy i przywołania abonenta. Obecnie najczęściej powyższe bloki nie występują w postaci od-



Rys. 1. Przykładowy schemat EAT



Rys. 2. Schemat blokowy "inteligentnego" EAT



R - rezystor, Gt - przetwornik elektroakustyczny, W - warystor, D - mostek diodowy zabezpieczający zasilający, EP - elektroniczny przełącznik /klucz tranzystorowy/, Imp - impulsator, UA/P - układ analizy sygnału przychodzącego z linii /amplitudowo-czasowy/, UR - układ rozmówny oparty o u.s.c. UL 1370 w odpowiednim układzie aplikacyjnym, UW/PA - układ wybierczo-przywołania abonenta oparty o u.s.c. MC 8930 w odpowiednim układzie aplikacyjnym, K - klawiatura, DZ1, DZ2 - diody zabezpieczające UR i UW/PA

Rys. 3. Schemat blokowy polskiego EAT

dzielnych bloków elektronicznych, lecz ich funkcje łączą w sobie dwa podzespoły /rozmówny i wybierczo-przywołania abonenta/ lub nawet jeden układ scalony. W skład EAT wchodzi, jako elementy klasycznych aparatów telefonicznych, przewody doprowadzające i sznur skrętny mikrotelefonu, przetworniki elektroakustyczne /dynamiczne, elektretowe/ oraz obudowa aparatu. Elementami elektronicznymi EAT są: u.sc. rozmówny, u.sc. wybierczy /dekadowy lub wieloczęstotliwościowy/, układ wytwarzający sygnał akustyczny przywołania abonenta, pamięć, elementy zabezpieczające i zasilające.

Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat blokowy EAT z zaznaczeniem podzespołów funkcjonalnych.

Obecnie na świecie, szczególnie w miarę rozpowszechniania telefonii cyfrowej, powstaje ogromna liczba modeli EAT prostych /tego typu, jak na rys. 1/ oraz bardziej skomplikowanych /rys.2/ umożliwiających wykonywanie dodatkowych funkcji, a więc zawierających, np. interfejsy, kodeki.

Równocześnie zmieniają się technologie, w których najczęściej są wykonywane elementy składowe nowoczesnych aparatów. Początkowo najbardziej popularne technologie bipolarne i PMOS są wypierane przez technologie CMOS i 1^2L /szczególnie w EAT telefonii cyfrowej lub aparatach zbudowanych z zastosowaniem jednego układu scalonego/.

W Polsce od kilku lat są prowadzone prace nad oryginalnym EAT. Jak do tej pory powstał tylko układ rozmówny, natomiast układ wybierczy /dekadowy/ jest w fazie uruchamiania. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy krajowego EAT.

3. PODSTAWOWE POJĘCIA

Kompatybilność elektromagnetyczna /KEM/ między urządzeniem i środowiskiem lub między urządzeniami jest to zdolność urządzenia do zadowalającej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym bez wprowadzenia nietolerowanych zakłóceń elektromagnetycznych do środowiska lub innego urządzenia.

Zakłócenie elektromagnetyczne jest to energia pola elektromagnetycznego, która niezależnie od sposobu i celu jej wytwarzania oraz mechanizmu rozprzestrzeniania się może stanowić przyczynę niewłaściwego działania różnych elektrycznych i elektronicznych urządzeń i systemów. Środowisko elektromagnetyczne w miejscu zainstalowania urządzenia charakteryzowane jest określonym poziomem zakłóceń przy działających urządzeniach, znajdujących się w środowisku i występujących zjawiskach fizycznych wytwarzających

energię elektromagnetyczną. Podstawową konsekwencją przyjętego określenia KEM jest konieczność traktowania urządzenia nie tylko jako receptora zakłóceń, podatnego na zakłócenia środowiska, ale i jako źródła zakłóceń emitowanych do środowiska oraz innych urządzeń, które występują w tym środowisku. Każde urządzenie powinno być charakteryzowane następującymi parametrami technicznymi z dziedziny KEM: podatnością lub odpornością i wytrzymałością na zakłócenia elektromagnetyczne środowiska oraz poziomem zakłóceń emitowanych do środowiska.

Podatnością urządzenia na zakłócenia elektromagnetyczne /zakłócalnością/ nazywamy reakcję urządzenia wyrażoną zmianami właściwości urządzenia spowodowanymi oddziaływaniem określonych zakłóceń elektromagnetycznych.

Odpornością urządzenia na zakłócenia elektromagnetyczne nazywamy zdolność urządzenia do zachowania swoich właściwości przy oddziaływaniu określonych zakłóceń. Odporność wyraża zdolność urządzenia do poprawnego działania w określonych warunkach zakłóceń.

Wytrzymałość urządzenia na zakłócenia to zdolność urządzenia do zachowania pierwotnych właściwości po ustąpieniu oddziaływania określonych zakłóceń elektromagnetycznych.

Poziom podatności /odporności, wytrzymałości/ jest to wyrażenie podatności /odporności, wytrzymałości/ urządzenia na zakłócenia za pomocą parametrów zakłóceń.

Poziom emitowanych zakłóceń jest to ilościowe określenie zakłóceń generowanych przez urządzenie podczas jego działania. Poziom ten wyrażony jest wartościami napięcia, prądu, natężenia pola lub mocy zakłóceń przy określonych warunkach pomiarów.

4. ŹRÓDŁA I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Źródła zakłóceń elektromagnetycznych można podzielić ogólnie na dwie grupy:

- zakłócenia powstające w wyniku naturalnych zjawisk elektromagnetycznych, np. wyładowań atmosferycznych, zgromadzonych na ciele operatora ładunków elektryczności statycznej;
- zakłócenia powstające w wyniku działalności człowieka, np. wytwarzanie sygnałów użytkowych obwodów urządzeń elektrycznych i elektronicznych, zakłóceń niezamierzonych towarzyszących normalnej pracy tych urządzeń

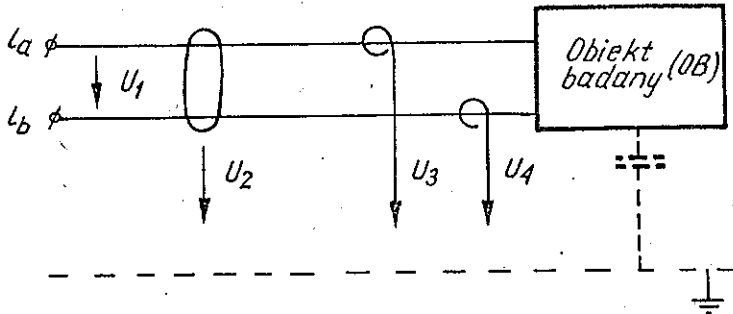
/przy czym źródłami tych zakłóceń mogą być, np. systemy radiokomunikacyjne i radiolokacyjne celowo promieniujące energię do otoczenia/, stany nieustalone występujące podczas normalnej pracy obwodów elektrycznych i systemów energetycznych, powodujące niezamierzoną emisję zakłóceń o wysokim poziomie, a także wybuch nuklearny powodujący powstanie tzw. impulsu elektromagnetycznego /EMI/.

O poziomie zakłóceń oddziałujących na urządzenia decyduje charakterystyka kanału sprzężenia rozpatrywanego urządzenia ze źródłem zakłóceń.

Najczęściej zakłócenia, ze względu na mechanizm rozprzestrzeniania się, dzieli się na przewodzone i polowe.

Zakłócenia przewodzone docierają do urządzenia poprzez doprowadzenia /linie, kable/ zasilające, sygnałowe i mogą to być, np. zakłócenia komutacyjne, impulsy przepięciowe powstające na skutek zwarcia linii telefonicznej z linią energetyczną lub komunikacyjną, impulsy zaindukowane w kablach a pochodzące od środków komunikacji, trakcji elektrycznej, przepięć atmosferycznych, a także wynikające z działalności różnych urządzeń, np. mechanicznych, medycznych.

Zakłócenia polowe polegają na oddziaływaniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego poprzez obudowę na wewnętrzne układy, np. aparatu telefonicznego. Określa się to zjawisko mianem indukcji od bliskich i dalekich pól elektromagnetycznych i często jest ono rozpatrywane jako sprzężenie pojemnościowe lub indukcyjne. Przykładem może tu być usytuowanie aparatu telefonicznego w polu elektromagnetycznym odbiornika radiowego, w pobliżu kabla zasilającego linii 220 V/50 Hz /np. ściennie aparaty/, zapalenie zalpalcniczki piezoelektronicznej w odpowiednim miejscu w pobliżu aparatu telefonicznego. Określenie czy dane pole jest "bliskie", czy "dalekie", jest sprawą umowną /różni autorzy publikacji różnie to definiują/. Zależy to od rozmiarów źródła zakłóceń, odległości badanego obiektu od tegoż źródła. Przyjmuje się np. że dla źródeł o wymiarach znacznie mniejszych od emitowanych długości fali pole bliskie występuje w odległości mniejszej niż $\lambda/2\pi$. Ponadto zakłócenia EM mogą docierać do badanego obiektu jako symetryczne lub niesymetryczne /rys. 4/. Niekiedy dokonuje się podziału zakłóceń ze względu na czas ich trwania. Mówi się wtedy o zakłóceniach impulsowych i ciągłych.



Rys. 4. Typy zakłóceń

U_1 - symetryczne, U_2, U_3, U_4 - niesymetryczne, l_a, l_b -
- zaciski liniowe badanego obiektu

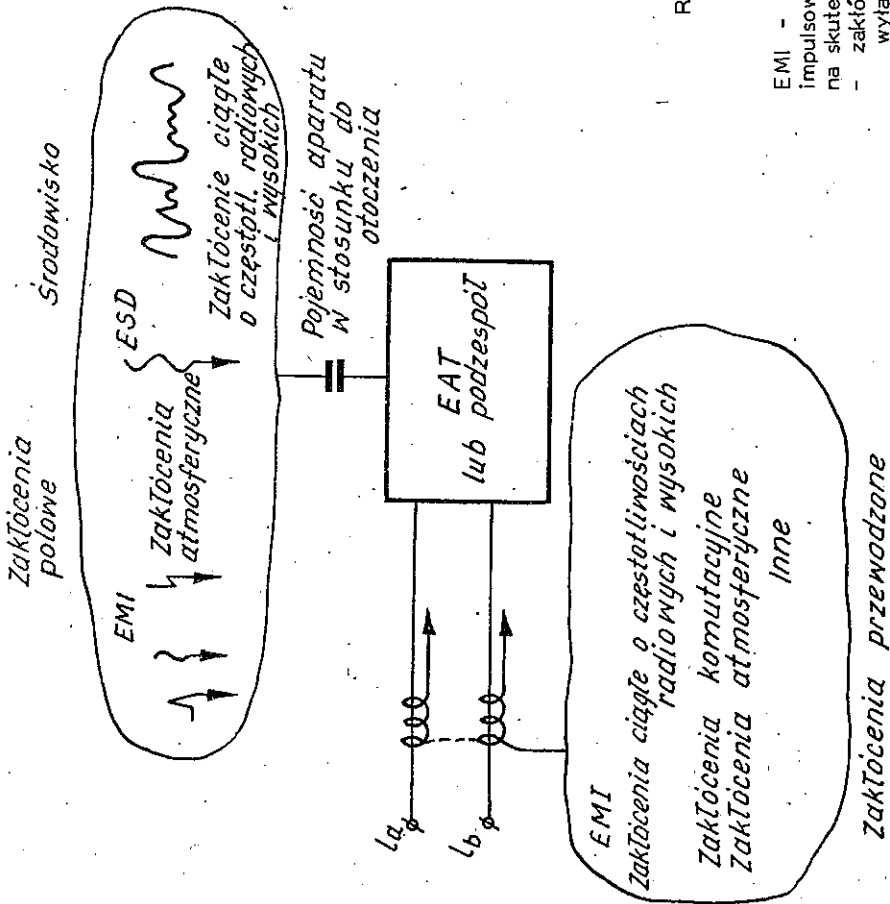
5. MODEL ZAKŁÓCENIOWY ELEKTRONICZNEGO APARATU TELEFONICZNEGO

W niniejszym artykule są rozpatrywane elektroniczne aparaty telefoniczne powszechnego użytku montowane w pomieszczeniach mieszkalnych, biurowych i ewentualnie w przemysłowych zakładach produkcyjnych.

Na rys. 5 przedstawiono model wzajemnego oddziaływania środowiska i EAT. Za granicę pomiędzy środowiskiem i aparatem przyjęto obudowę aparatu /wypraski z tworzywa sztucznego/ oraz zaciski użytkowe aparatu, tj. zaciski przewodu doprowadzającego i sznura mikrotelefonu.

Rozpatrując ten uproszczony model należy pamiętać, że:

1. Wzajemne oddziaływanie działającego aparatu telefonicznego i środowiska EM w dziedzinie KEM może być określone zbiorem chwilowych wartości napięć zakłócających występujących na zaciskach aparatu, a także rozkładem natężenia pola elektromagnetycznego przy obudowie aparatu.
2. Zbiór chwilowych wartości napięć i pól może także określać poziom emitowanych zakłóceń przez aparat telefoniczny, jeśli wyeliminujemy lub usuniemy wpływ zakłóceń środowiska EM, np. poziom zakłóceń emitowanych przez aparat podczas wybierania numeru /np. cyfry "0"/, przy czym podczas badań aparat powinien być umieszczony w specjalnie przygotowanej ekranowanej obudowie /komorze/ pomiarowej.
3. Przeprowadzając analizę zarejestrowanych poziomów zakłóceń zewnętrznych i emitowanych przez działający aparat telefoniczny możliwe jest określenie



Rys. 5. Schemat zakłóceń wpływających na EAT podczas eksploatacji

EMI - zakłócenia elektromagnetyczne impulsowe /w tym impuls powstający na skutek wybuchu nuklearnego/, ESD - zakłócenie powstające na skutek wyładowania elektrostatycznego

parametrów zakłóceń środowiska EM /poziom, charakter/ tolerowanych przez EAT /lub jego podzespoły/ i odpowiednio - nietolerowanych. Przy odpowiednio licznych zbiorze pomiarów możliwe jest określenie poziomu podatności /odporności/ EAT na określone zakłócenia zewnętrzne.

4. Znając charakter i intensywność zakłóceń zewnętrznych oddziałujących na EAT można w sposób sztuczny odtworzyć warunki zakłóceń w środowisku laboratoryjnym i przeprowadzić odpowiednie badania. Badania takie wymagają zastosowania odpowiednich zastępczych źródeł zakłóceń EM imitujących zakłócenia występujące w rzeczywistości.

Zarówno w kraju jak i za granicą powstały liczne symulatory zakłóceń, np. symulator impulsowych zakłóceń sieciowych NSG22 /firmy Schaffer/, symulator wyładowań elektryczności statystycznej ESD-1 /MERA-PIAP; Schaffer/, symulator przepięć atmosferycznych /Instytutu Łączności/, symulator zakłóceń impulsowych w sieci telekomunikacyjnej /firmy Rohde-Schwarz/ i inne.

Podstawową trudnością w przeprowadzeniu badań, w zapewnieniu powtarzalności i porównywalności wyników pomiarów jest fakt, że wartości zakłóceń generowane przez źródło zależą od wielu czynników wewnętrznych i zewnętrznych zmiennych w czasie pomiarów, a także iż muszą być one rozpatrywane w zakresie wielkich częstotliwości. Dla zapewnienia więc powtarzalności i jednoznaczności wyników badania muszą być przeprowadzane w ściśle określonych warunkach, odwzorowujących w miarę możliwości, warunki normalnej eksploatacji, ale takiej, gdy zjawiska fizyczne zachodzące w czasie eksploatacji EAT można uznać za stacjonarne. Konieczna jest ponadto znormalizowana konfiguracja przestrzenna badanego obiektu, np. należyte ułożenie mikrotelefonu względem pozostałej części aparatu, podczas badań wpływu zakłóceń polowych.

6. WPLYW NIEKTÓRYCH ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA ELEKTRONICZNY APARAT TELEFONICZNY

6.1. Wyładowania atmosferyczne

W momencie wprowadzenia elementów elektronicznych do aparatu telefonicznego stał się on obiektem bardzo wrażliwym na działanie zakłóceń EM, powstających na skutek wyładowań atmosferycznych. Zjawiska burzy i zwią-

zanych z nią wyładowań elektrycznych są złożonymi procesami i nadal stanowią podmiot licznych badań eksperymentalnych i dociekań teoretycznych [5, 13, 16].

Symulacja wyładowań atmosferycznych dla celów oceny odporności urządzeń elektronicznych na ten typ zakłóceń jest bardzo trudna. Istotny jest bowiem sam charakter wyładowania /w rzeczywistości jest to kilkakrotny przepływ ładunku/, kształt impulsu zakłócającego /czas narastania pioruna sztucznego jest zazwyczaj mniejszy niż naturalnego/ oraz jego energia, która wymaga zastosowania urządzeń wysokoenergetycznych. Zakłócenie powstające na skutek wyładowania atmosferycznego jest zakłóceniem impulsowym, a dociera do aparatu telefonicznego zarówno poprzez otoczenie, jak i przewody zasilające. Pierwsze ze zjawisk jest trudne do zbadania. Naturalne uderzenia pioruna w ściśle określony punkt, wokół którego są ustawione urządzenia pomiarowe jest bardzo mało prawdopodobne. Równocześnie warunki propagacji zakłócenia /ukształtowanie terenu, pora dnia, roku, pogoda/ mają istotne znaczenie dla pola elektromagnetycznego emitowanego przez piorun. Wraz ze wzrostem odległości od miejsca wyładowania amplituda pola maleje. Zjawiska te muszą być wzięte pod uwagę podczas analizy wyników pomiarów z punktów kontrolnych rozmieszczonych w terenie [13, 15, 16].

Przeprowadzone badania laboratoryjne u.sc. wybierczego dekadowego CMOS we wzorcowym polu elektromagnetycznym wysokiej częstotliwości /300 ÷ 900 Hz/ i dużym natężeniu pola /20 ÷ 100 V/m/ wykazały, że praca u.sc. może ulec zakłóceniu, np. przekłamanie wybieranego numeru, utrata wartości pamięci. W przypadku u.sc. wybierczego wieloczęstotliwościowego może to być generacja innego niż żądany ciąg sygnałów.

Najczęściej zakłócenia pochodzące od wyładowania atmosferycznego bada się jako przewodzone. Uznaje się, że najistotniejszym jest fakt, że aparat telefoniczny jest urządzeniem końcowym /o stosunkowo małych wymiarach/ sieci telefonicznej, w której w liniach telekomunikacyjnych /zarówno podziemnych jak i nadziemnych/ ciągnących się na dużych odległościach indukuje się impuls przepięciowy. W licznych krajach /np. USA, Francji, Danii, Czechosłowacji, Polsce/ przeprowadzono badania statystyczne tego typu zakłócenia i na tej podstawie opracowano kształt i parametry standardowego impulsu oraz opracowano metodę badania odporności EAT.

W Polsce badania odporności EAT oraz jego podzespołów na przepięcia atmosferyczne przeprowadza się zgodnie z odpowiednią normą [3].

Na rys. 6 i 7 przedstawiono schemat symulatora oraz kształt standardowego impulsu.

Zasadniczą różnicą polskiej metody w porównaniu do norm lub zaleceń innych krajów /Francja, Włochy/ jest to, że badany obiekt wg warunków polskich jest niezasilany, natomiast wg innych - pracuje w typowych warunkach eksploatacyjnych. Ponadto każdy podzespół EAT jest poddawany działaniu tylko dwóch a nie np. dziesięciu impulsów /Ferranti, SGS-ATES, Philips, Rifa, Ericson, Tesla/.

W Polsce, pomimo że panuje klimat umiarkowany, trzeba liczyć się z wpływem przebiegów atmosferycznych na urządzenia telekomunikacyjne. Wg danych IMiGW ustalono, że w Warszawie przypada 23 dni burzowe w roku, a w Tatrach 34 /za dzień burzowy uważa się taki, w ciągu którego w zasięgu 20 km od punktu pomiarowego zarejestrowano co najmniej 1 piorun/.

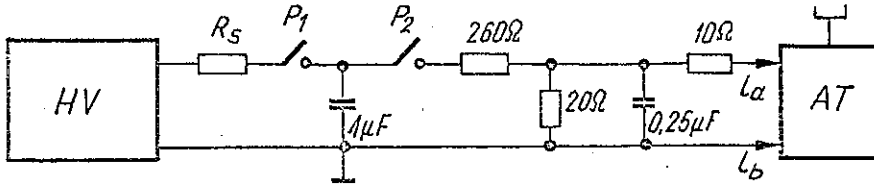
6.2. Wyładowania elektrostatyczne

Obecnie w miarę rozwoju różnych dziedzin techniki, w tym elektroniki, wyładowanie elektrostatyczne staje się jednym z ważniejszych zjawisk zakłócających pracę obiektów elektrycznych lub niekiedy niszczących je /przez czym może to nastąpić nie tylko podczas pracy, ale również podczas transportu/.

Zjawisko wyładowania elektrostatycznego występuje w przypadku zetknięcia się lub zbliżenia uprzednio naładowanego przedmiotu /np. wskutek pocierania o siebie dwóch izolatorów o różnych stałych dielektrycznych/ do przedmiotu przewodzącego. W zależności od wielkości zgromadzonego ładunku rozładowanie może mieć różny charakter aż do silnego łuku włącznie. Wyładowanie takie powoduje reakcję kompensującą i powstanie pola elektromagnetycznego o dużej wartości szczytowej natężenia pola.

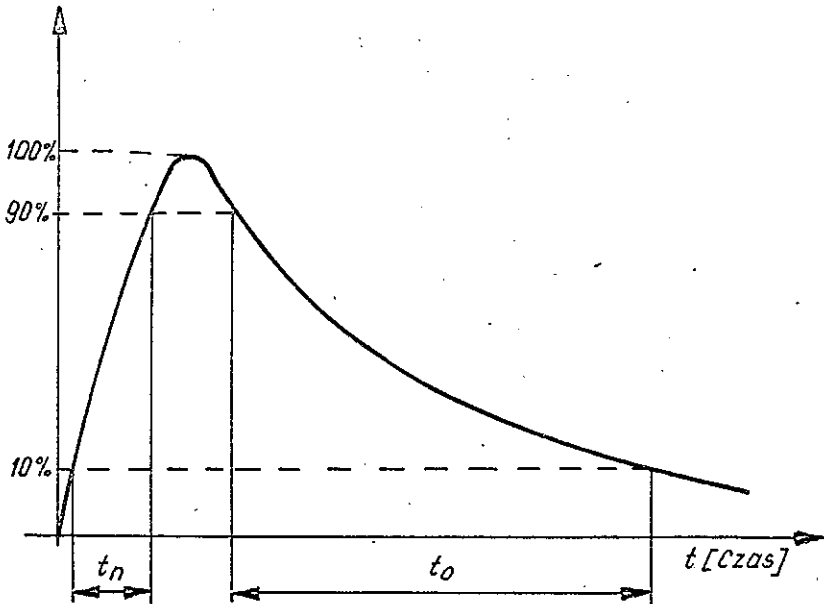
Ogólnie rozpatrywać można trzy modele zjawiska wyładowania elektromagnetycznego /ESD^{*}/: spowodowane przez człowieka /The Human Body Model - HBM/, spowodowane przez ładunek zgromadzony w danym obiekcie, który jest montowany lub pakowany i podczas tego procesu dotyka do przewodnika /Charge Device Model - CDM/ oraz zaindukowane przez zbliżenie danego obiektu do zewnętrznego pola /Field Induced Model - FIM/. Bezpośrednio dla użytkownika EAT największe znaczenie ma pierwsze i trzecie

* / ESD - Electrostatic Discharge.



Rys. 6. Schemat symulatora przepięć atmosferycznych /wartości elementów wg [3]/

HV - zasilacz wysokonapięciowy, R_s - rezystancja źródła, AT - aparat telefoniczny, P1, P2 - przełączniki wysokonapięciowe



Rys. 7. Kształt standardowego impulsu symulującego przepięcie atmosferyczne. Krzywa opisana wzorem analitycznym:

$$u(t) = U_{\max} \left\{ \exp(-t/\tau_o) - \exp(-t/\tau_n) \right\}$$

τ_o - stała czasowa rozładowania symulatora, τ_n - stała czasowa opisująca czas narastania impulsu, t_o - czas opadania impulsu standardowego 700 μs [3], t_n - czas narastania impulsu standardowego 10 μs [3]

zjawisko, natomiast dla producenta - zjawisko drugie odgrywa nie mniejszą rolę /np. uszkodzenie układów wybierczych MOS podczas nieprawidłowego montażu lub przechowywania tych układów/.

6.2.1. Model wyładowania elektrostatycznego indukowanego zewnętrznym polem /FIM/

Model ten ma najmniejszą szansę występowania w warunkach polskich. Zjawisko to można bowiem zaobserwować w przypadku układów o dużej impedancji, np. MOSFET, które jak do tej pory w polskich EAT nie były wykorzystywane.

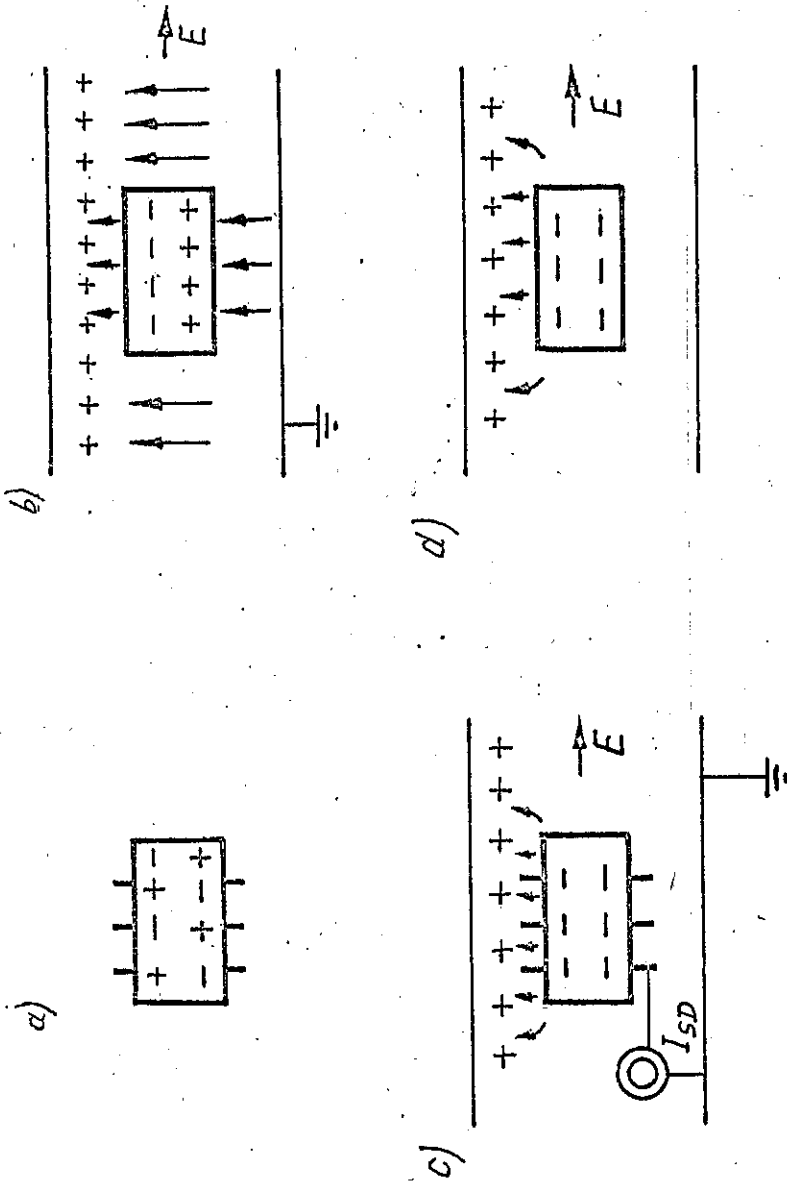
Obecność zewnętrznego pola /pochodzącego np. od naładowanego użytkownika - zbliżanie ręki do aparatu, trzymanie mikrotelefonu/ może zakłócić pracę elementów elektronicznych EAT. Wystąpić może wówczas zjawisko przedstawione na rys. 8.

Pod wpływem zewnętrznego pola w danym obiekcie /np. układzie scalonym EAT/ dotychczas obojętnym elektrycznie następuje rozdział ładunków. Jeśli w obecności pola układ zostanie zetknięty z przewodnikiem /np. lutownica, palec/, wystąpi klasyczne kompensujące wyładowania ESD. Może się też zdarzyć, że dotykamy układ przed wystąpieniem zewnętrznego pola, a następnie przenosimy poza zasięg pola przy użyciu nieprzewodzącego materiału. Pozostawione urządzenie jest dalej narażone na wystąpienie ESD.

Niestety zjawisko FIM nie jest jeszcze dostatecznie zbadane i nie istnieje żadna metoda symulacyjna oceny jego wpływu na elementy elektroniczne.

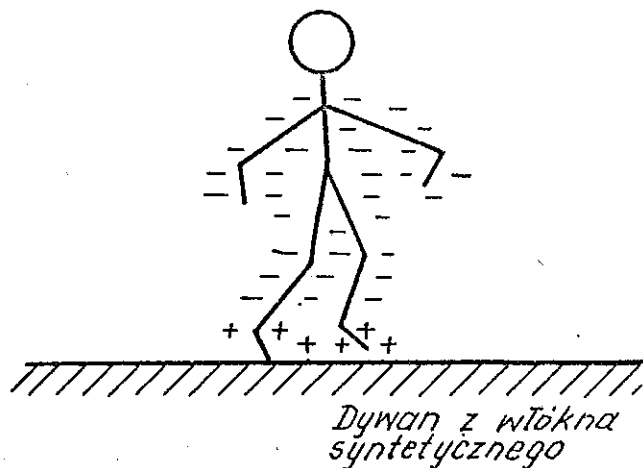
6.2.2. Wyładowanie elektrostatyczne spowodowane przez użytkownika /HBM/

Typowy przypadek ładowania się i rozładowania ma miejsce /rys. 9/, gdy osoba idzie po izolowanym dywanie w dobrze izolowanych podszewkach z innego izolacyjnego materiału. W tym przypadku wzrasta ładunek na spodniej części buta - zełwce. Ciało ludzkie może być potraktowane w tym przypadku jako przewodnik. Ładunek zgromadzony na zełwkach powoduje rozdział i separację ładunku na ciele ludzkim. Po każdym kroku wielkość ładunku powiększa się, przy czym prąd elektrostatyczny wytworzony w tych warunkach jest bardzo mały /rzędu pA/, natomiast zgromadzony ładunek - kilka μC .



Rys. 8. Kolejne fazy zjawiska ESD spowodowanego przez wpływ zewnętrznego pola na uziemiony lub nieziemiony obiekt, np. układ scalony (model FIM)

a/ obiekt obojętny elektrycznie; b/ pole zewnętrzne powodujące rozdział ładunków; c/ ESD powstałe w wyniku uziemienia przewodnika; d/ obiekt nataładowany i "przygotowany" na przepięcie ESD, jeśli tylko przewodnik będzie uziemiony

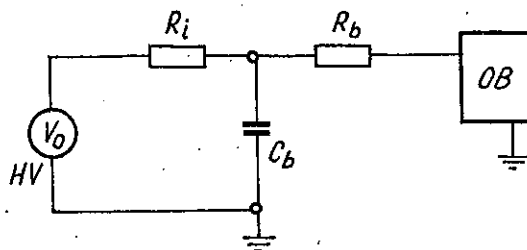


Rys. 9. Proces ładowania się człowieka poruszającego się po dywanie wykonanym z włókna syntetycznego

/Na wielkość zgromadzonego ładunku wpływają, np.: względna wilgotność powietrza, temperatura, sposób poruszania się osoby, jej prędkość i tempo, rodzaj podeszwy/. Napięcie, do jakiego ładuje się poruszająca się osoba, zależy od jej pojemności w stosunku do otoczenia. Pomiedzy krokami zawsze występuje wyładowanie. Po kilku sekundach zostaje osiągnięta równowaga między ładowaniem i rozładowaniem i jeżeli tak naładowana osoba dotknie uziemionego przewodnika, następuje bardzo szybkie, swobodne rozładowanie.

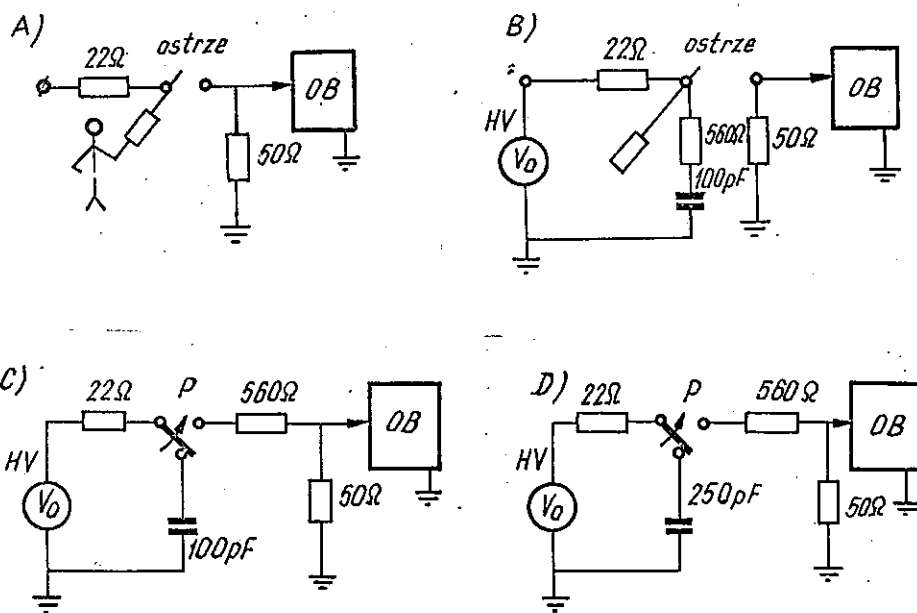
Wpływ ESD na układy scalone oraz urządzenia wykorzystujące je jest na tyle duży, że może zachwiać rachunek ekonomiczny producenta, zarówno układów, jak i obiektów technicznych. Oznacza to konieczność stałej kontroli podatności i odporności urządzeń elektronicznych na ESD oraz konieczność konstrukcji odpowiednio niezawodnych symulatorów tego zakłócenia.

Konstrukcja i budowa obwodu symulatora, przez który odbywa się wyładowanie, ma bardzo duży wpływ na charakterystykę czasową impulsu przepięciowego ESD w modelu HGM /rys. 10 ÷ 14/. Jeżeli, na przykład, łuk jest spowodowany metalowym przedmiotem, trzymanym przez badaną osobę /często w praktyce spotykane - klucze, obrączki, bransoletki, lutownica/, uzyskuje się bardzo mały czas narastania impulsu oraz równocześnie dobry kontakt między ręką i przedmiotem prowadzi do bardzo dużego impulsu prądu /rys. 15 ÷ 17/. Niestety jak do tej pory brak jest jednoznacznej metody określania wpływu ESD na elementy elektroniczne. W momencie prezentacji wyników



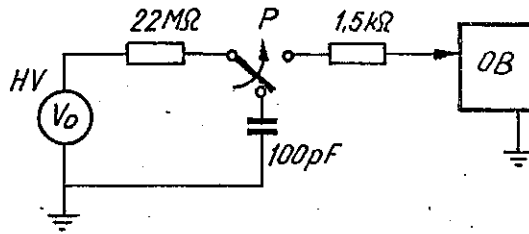
Rys. 10. Schemat symulatora ESD /model HBM/ [12]

HV - zasilacz wysokonapięciowy, R_i - rezystor ograniczający prąd ładowania $100\text{ M}\Omega \pm 10\%$, R_b , C_b - rezystancja i pojemność ciała ludzkiego, OB - obiekt badany, np. element EAT

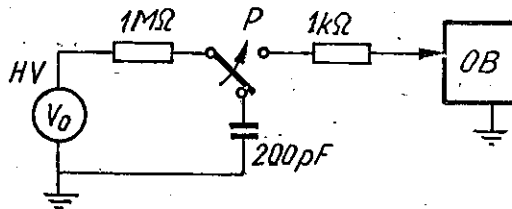


Rys. 11. Ewolucja schematu symulatora ESD /model HBM/ wg firmy RCA /wersja A, B, C, D/

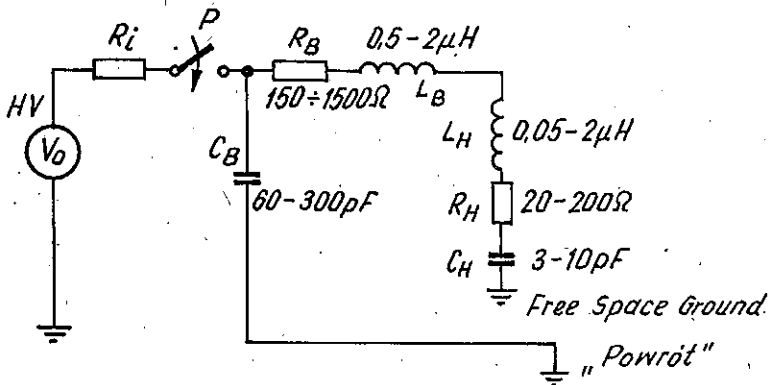
P - przetwornik bezdrganiowy, np. rtęciowy, HV - zasilacz wysokonapięciowy



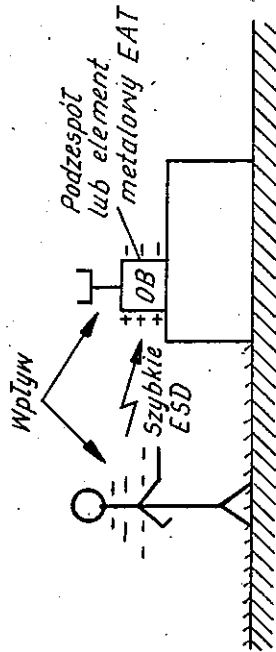
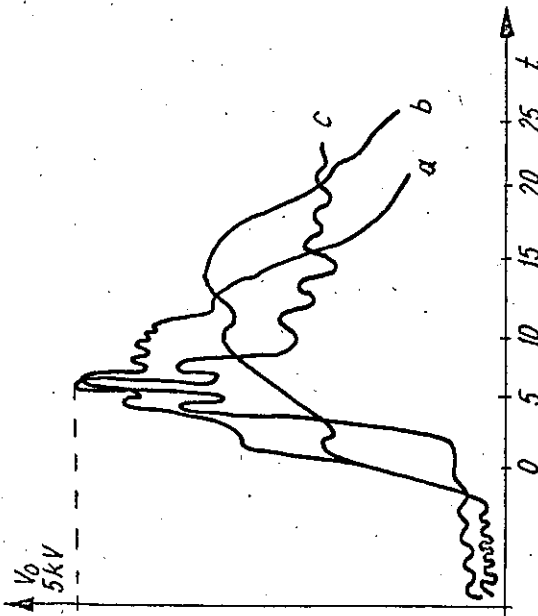
Rys. 12. Schemat symulatora ESD /model HBM/ stosowany od 1983 r. przez firmę RCA do oceny układów MOS /szczególnie CMOS/ i układów bipolarnych



Rys. 13. Schemat symulatora ESD /typ HBM/ wg firmy Thomson /1985 r./

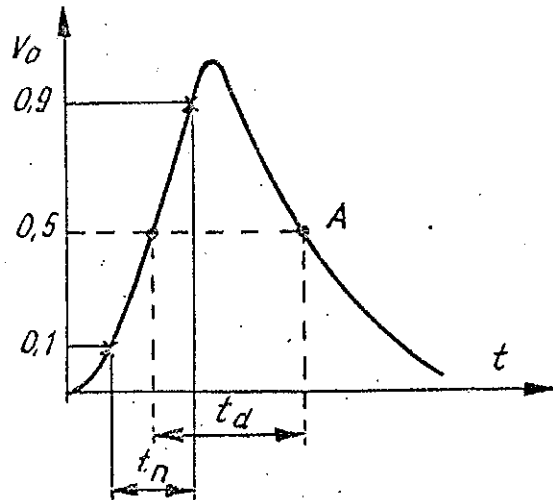


Rys. 14. Schemat symulatora ESD /model HBM/ opracowany przez firmę Key-Tek Instruments Corporation w 1985 r. /tzw. podwójny model RLC/ C_H , R_H , L_H - schemat zastępczy ciała ludzkiego, C_B , R_B , L_B - schemat zastępczy ręki ludzkiej



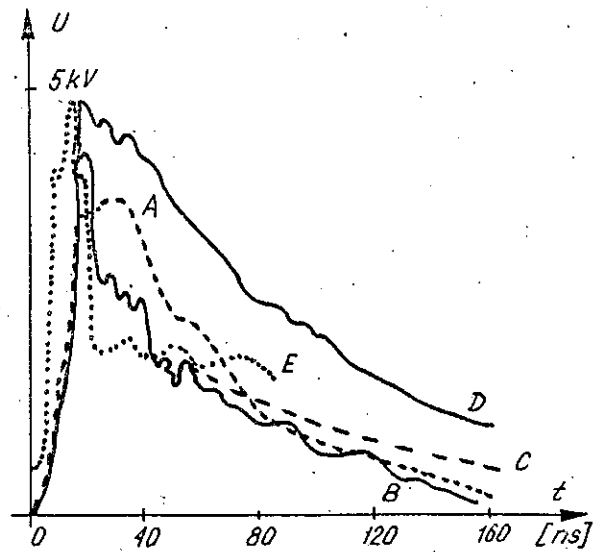
Rys. 15. Kształt impulsu "przewodniwego" odnotowany przez oscyloskop podczas rozładowania człowieka przez metalowe ostrze i dla porównania wytworzony przez symulator z rys. 14

krzywa a - max szybkie rozładowanie, zerowa "droga powrotu", krzywa b - - droga powrotu np. 2 m, krzywa c - - impuls wytworzony przez symulator z rys. 14



Rys. 16. Kształt impulsu standardowego wytwarzanego przez symulator z rys. 10

t_n - czas narastania impulsu $0,5 \div 50$ ns, t_d - czas trwania impulsu $5 \div 100$ ns, V_0 - amplituda impulsu $0 \div 20$ kV



Rys. 17. Kształt impulsów wytwarzanych przez kolejne modele symulatorów pokazanych na rys. 11 /A,B,C,D/ oraz na rys. 14 /E/

pomiarów każdorazowo konieczne jest ściśle sprecyzowanie warunków pomiarów i rodzaju symulatora ESD.

Według zaleceń IEC /IEC 801-2/ należy badać objekty impulsem o polaryzacji dodatniej, napięciu 2 do 16,5 kV i kształcie zgodnie z rys. 16. Model ten jest jednak bardzo uproszczony i nie odzwierciedla kształtu impulsu faktycznie występującego /brak wstępnego szybkiego narastania prądu/.

Poszczególni producenci układów scalonych /np. RCA, Thomson/ wprowadzają własne normy dotyczące symulatorów i warunków badań /rys. 11 ÷ 14/.

Uwzględniając poszczególne uogólnienia modelu elektrycznego człowieka opracowano w USA symulator przepięć ESD, jak do tej pory najbliższy rzeczywistości /rys. 14/. Dla zastosowań praktycznych model ten jest dość skomplikowany, niemniej daje w miarę rzeczywisty obraz przepięć ESD. Jest on aktualnie wykorzystywany przez firmy amerykańskie do oceny ich wyrobów [19].

W tabelicy 1 przedstawiono wartości napięć przebicia impulsem standardowym /wg IEC/ różnych elementów elektronicznych. Niestety w dalszym ciągu, po-

Tabela 1

Napięcie przebicia elementów półprzewodnikowych
poddanych działaniu standardowego impulsu ESD [9]

Napięcie przebicia	Stopień wrażliwości	Rodzaje układów
30 - 400 V	Najbardziej wrażliwe	Ukł. MOS bez zabezpieczenia, dyskretne diody Schottkiego
400 - 1500 V	Wrażliwe	LSTTL, STTL Logic. RF tranzystory. CD 4000A CMOS. LSI MOS Logic.
1500 - 4000 V	Mało wrażliwe	ECL Logic. Druga generacja CD4000B. JFET i inne dyskretne bipolarnie.
4000 - 15000 V	Bardzo mało wrażliwe	Niektóre analogowe bipolarnie. TTL Logic. Niektóre dyskretne bipolarnie.
powyżej 15000 V	Niewrażliwe	Niektóre analogowe bipolarnie. Układy mocy. Diody Zenera.

mimo konstruowania nowych zabezpieczeń, układy MOS pozostają najbardziej wrażliwe. W aparacie telefonicznym jest co najmniej jeden układ tego typu, dlatego konieczne jest zachowanie ostrożności podczas montażu EAT oraz jego eksploatacji, np. przy wymianie uszkodzonego elementu.

Na rys. 18 przedstawiono kolejne etapy oceny odporności układów MOS na zakłócenie ESD spowodowane przez użytkownika. Natomiast na rys. 19 podano sposób badania odporności bipolarnych układów scalonych. Okazuje się, że najczęściej spotykanym uszkodzeniem elementów bipolarnych jest przebicie między bazami tranzystorów pary różnicowej, np. wzmacniaczy operacyjnych.

6.3. Zakłócenia o częstotliwościach radiowych

Zakłócenia o częstotliwościach radiowych /tzw. RFD^{*/}/, z punktu widzenia możliwości uszkodzeń EAT, nie są tak istotne jak poprzednie, niemniej powodują znaczne utrudnienie w korzystaniu z aparatów z elementami elektronicznymi.

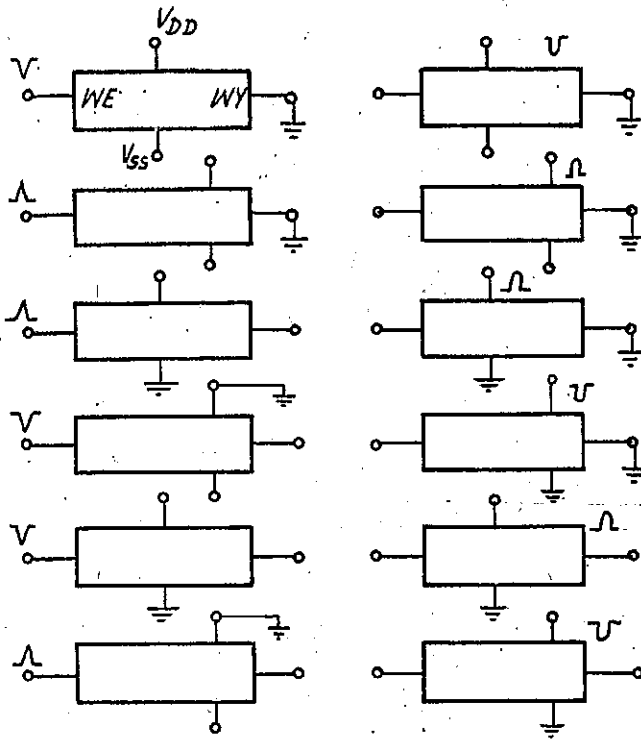
Zakłócenia radiowe przewodzone pojawiają się rzadko, szczególnie tam gdzie stosowane są telefoniczne linie podziemne. Większe prawdopodobieństwo występowania RFD jest w przypadku linii napowietrznych i w odcinkach kabli przewodzonych wewnątrz budynków. Najczęściej jednak zakłócenia te docierają do aparatu drogą indukcji jako zakłócenia polowe.

W układach pracujących w zakresie częstotliwości akustycznych interferencja sygnałów zakłócających powstaje na skutek detekcji i demodulacji sygnału radiowego przez element nieliniowy w aparacie telefonicznym. Powstały sygnał jest najczęściej niezrozumiałym szumem, mogącym zawierać częstotliwości leżące w pasmie częstotliwości badanego obiektu /np. w zakresie częstotliwości słyszalnych/, co wpływa ujemnie na jakość jego działania. Powoduje to bowiem zmniejszenie stosunku sygnału do szumu.

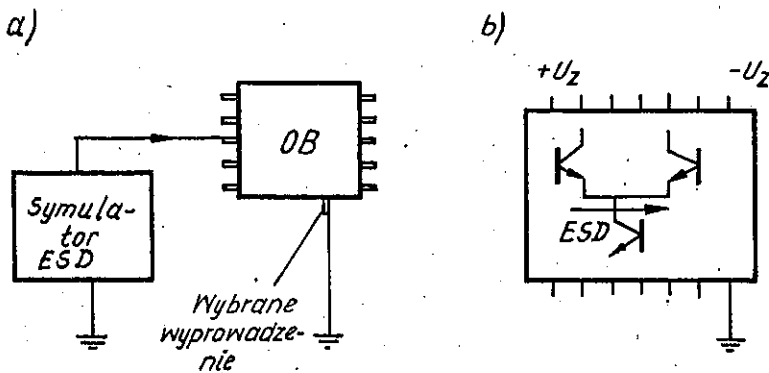
Zakłócenia RFD mogą pojawiać się nie tylko bezpośrednio przy stacji radiowej, ale także w pewnej odległości, np. kilku km, jako że moc stacji radiowej bywa rzędu dziesiątków setek kW, a nawet MW /rys. 20/:

Dotychczas w kraju nie ma ustalonej metodyki pomiarów odporności aparatów na detekcję sygnałów radiowych z modulacją amplitudy. W dostępnej literaturze zagranicznej spotykamy się często z problemem występowania zakłóceń

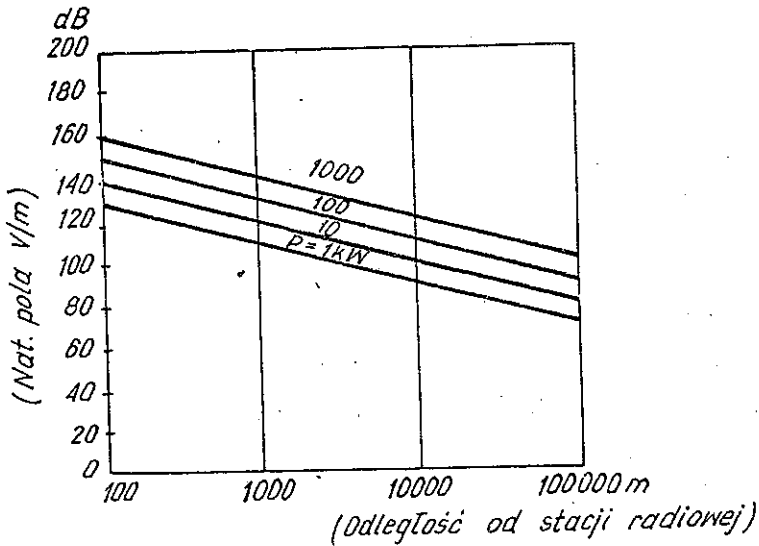
^{*/} Radio Frequency Disturbances.



Rys. 18. Określenie odporności układów scalonych MOS na przepięcia ESD



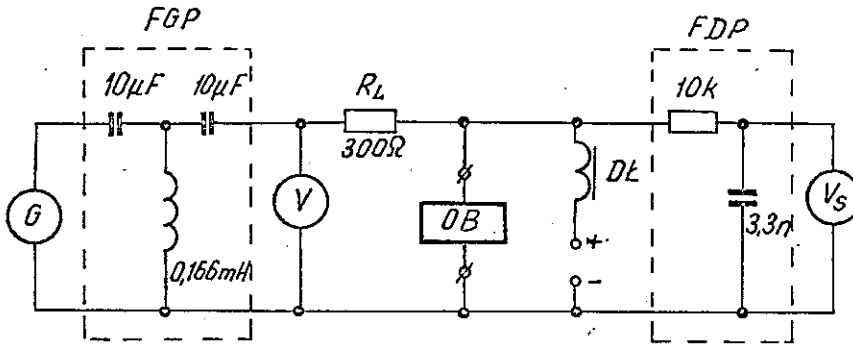
Rys. 19. Badanie odporności układów scalonych bipolarnych na przepięcia ESD
a/ sposób badania; b/ fragment wewnętrznej struktury układu scalonego



Rys. 20. Zależność natężenia pola EM od odległości od stacji radiowej i mocy nadajnika /0 dB = 1 μ V/m/

RFD w nowoczesnym sprzęcie elektronicznym, w tym także w aparatach telefonicznych. Podawane przez niektóre firmy /np. Ericsson, KTAS, NTT/ wielkości wartości skutecznej napięcia na zaciskach liniowych EAT dochodzą nawet do kilkudziesięciu mV. W związku z tym firmy zachodnioeuropejskie opracowały program komputerowej analizy i wyznaczania wpływu tego typu zakłóceń na układy scalone, szczególnie LSI i VLSI /programy NCAP i NCAP2/. Metody te są pomocne na etapie projektowania elementów elektronicznych także dla nowoczesnej telefonii i stosowanie ich znacznie zmniejsza podatność EAT na zakłócenia RF. Brak jest natomiast nadal ścisłych wymagań bądź zaleceń pomiarowych. Pewne sugestie podała firma Ericsson. Pomiary wykonane przez tę firmę wskazały na możliwość indukowania się w linii telefonicznej sygnałów radiowych nawet 4 V między żyłą a ziemią. Firma ta twierdzi, że sporadycznie natrafia się na linię o jeszcze wyższym napięciu zakłócającym, ale takie przypadki nie są już uwzględniane przy projektowaniu aparatów telefonicznych. W Polsce brak jest jakichkolwiek danych na ten temat, a na podstawie pomiarów - własnych, funkcjonujących już zagranicznych i krajowych EAT - przyjęto uznawać zakłócenia o wartości 1 mV na słuchawce za dyskwalifikujące /w aparatach bez filtrów zabezpieczających/ dany typ EAT.

Zgodnie z propozycją poczty szwajcarskiej proponuje się badać wpływ sygnałów radiowych na EAT dwiema metodami, wg rys. 21 i rys. 22.

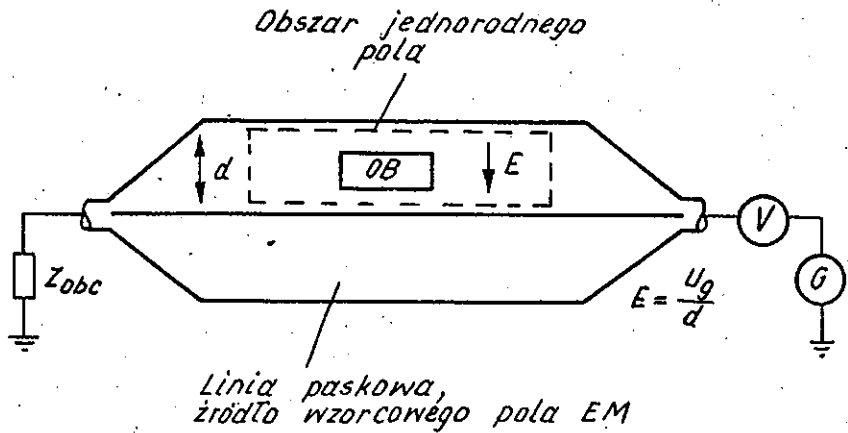


Rys. 21. Określenie wpływu zakłóceń radiowych na EAT lub jego podzespół metodą zakłóceń przewodzonych

R_L - rezystancja linii telefonicznej dla częstotliwości radiowej, $R_L = 300\Omega$, G - generator sygnału radiowego AM o parametrach: $f_H = 1\text{ MHz}$, $f_M = 1\text{ kHz}$, głębokość modulacji 50%, $U_{g_{max}} = 1\text{ V}$, V - pomocniczy woltmierz, pomiar sygnału wysokiej częstotliwości na zaciskach liniowych badanego obiektu /EAT lub podzespół rozmówny/, V_S - woltmierz selektywny, pomiar wartości skutecznej sygnału po detekcji na zaciskach liniowych badanego obiektu, $D\acute{L}$ - typowy dławik telefoniczny, dopasowany do odpowiedniego typu zasilania

Metoda przedstawiona na rys. 21 jest prostsza i ma wartość raczej tylko informacyjną. Badając tą metodą niektóre aparaty występujące na polskim rynku stwierdzono dla $f_H = 1\text{ kHz}$, $U_g = 1\text{ V}$ /50% modulacji/ zakłócenia o wartości od 10 mV do 25 mV na słuchawce.

Metoda przedstawiona na rys. 22 jest trudniejsza do stosowania. Wymaga bowiem specjalistycznej aparatury. Jest jednak jakby bardziej naturalna, bowiem umożliwia zbadanie zachowania EAT w zewnętrznym, ściśle kontrolowanym polu EM, symulującym rzeczywiste warunki eksploatacji. W ten sposób można określić poziom sygnałów: indukującego się na przewodach i po detekcji bezpośrednio na wejściu układu scalonego rozmównego.

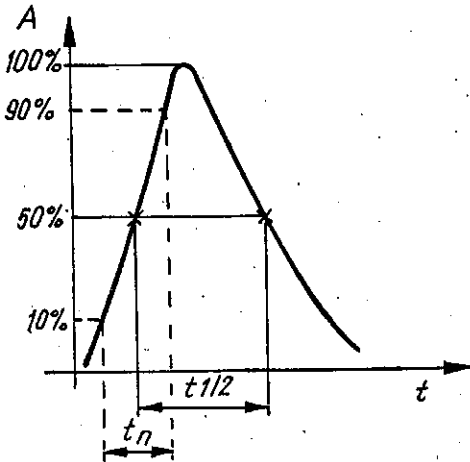


Rys. 22. Układ do badania wpływu zakłóceń radiowych na EAT lub jego podzespół metodą zakłóceń polowych

Z_{obc} - obciążenie dopasowane, G - generator sinusoidalny, źródło wzorcowego pola EM, V - woltmierz pomiarowy napięcia z generatora U_g
 Zakres parametrów pola EM: $f_M = 1$ kHz, głębokość modulacji do 60%, $f_H = 0,150 \div 300$ MHz, $E = 1 \div 100$ V/m

6.4. Zakłócenia wynikające z wpływu linii energetycznych na sieć telekomunikacyjną

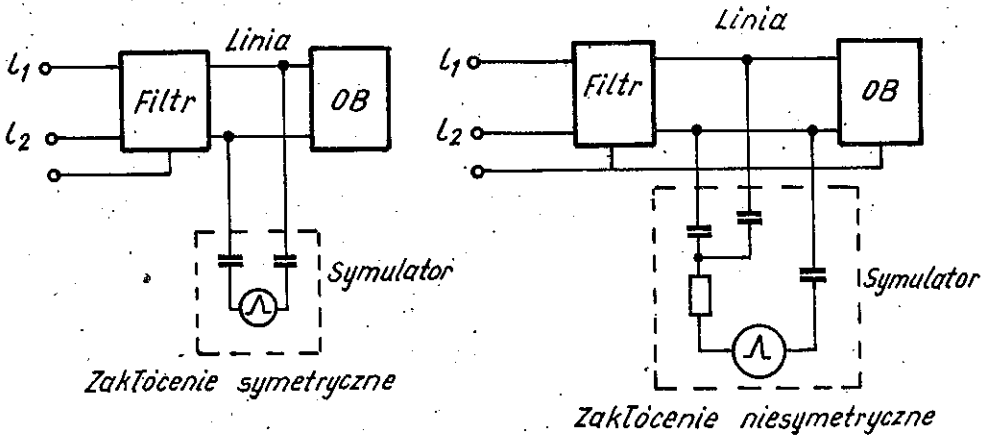
Linie i urządzenia energetyczne stanowią jedno z poważniejszych źródeł zakłóceń dla sieci telefonicznej. Najbardziej niebezpieczne oddziaływania występują w przypadku zwarcí doziemnych w liniach energetycznych powodujących powstanie dużego prądu niezrównoważenia, który płynąc wzdłuż linii powoduje zaindukowanie przepięcia w znajdującej się w sąsiedztwie linii telefonicznej. Impuls przepięciowy może osiągnąć amplitudę o wartości kilku kV i trwać $200 \div 2000$ ms. Z kolei wskutek burzy, pożaru czy wypadku może dojść do zwarcia linii energetycznej z linią telefoniczną. Najczęściej wstrzymywane jest wówczas przesyłanie energii elektrycznej, niemniej w momencie zwarcia powstaje zakłócenie impulsowe rzędu kilku kV. Oddziaływanie zakłócające może również występować w czasie normalnej pracy linii energetycznej w wyniku asymetrii torów telefonicznych w stosunku do ziemi.



Typowe parametry impulsu standardowego

A	t_n	$t_{1/2}$	Częstotliwość powtarzania
300V	1ms	1ms	≤ 12 Hz
500V	5ms	100ms	10 Hz
1500V	25ns	μ S	≤ 12 Hz

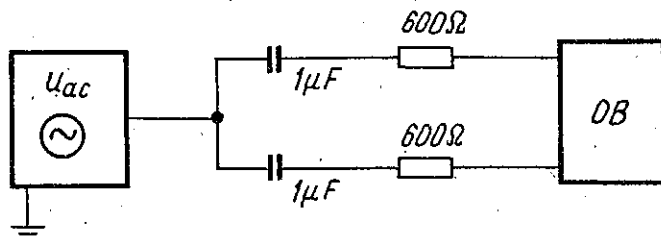
Rys. 23. Kształt impulsu standardowego służącego do określenia wpływu zakłóceń impulsowych pochodzących od linii energetycznych na EAT [18]



Rys. 24. Określenie wpływu zakłóceń impulsowych pochodzących od linii energetycznej na EAT lub jego podzespół /OB/

Linie telefoniczne powinny być tak usytuowane względem linii energetycznych, aby ich wzajemne oddziaływanie było jak najmniejsze. Ponadto specjalne elementy zabezpieczające w torze telefonicznym powodują, iż zakłócenie

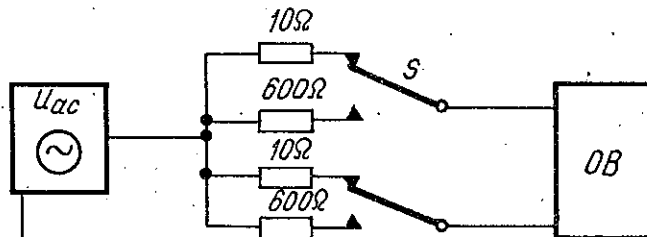
docierające bezpośrednio do aparatu telefonicznego ma amplitudę oraz energię o wiele mniejszą. Może to być jednak w dalszym ciągu impuls niszczący podzespoły EAT.



Rys. 25. Określenie wpływu zakłóceń indukowanych przez sieć energetyczną w sieci telefonicznej na EAT lub jego podzespół /OB/

Przykładowe parametry pomiaru [6]:

$U_{ac} = 300 V_{rms}$; $f = 50 Hz$; czas trwania próby - 200 ms; liczba prób - 5



Rys. 26. Określenie wpływu bezpośredniego kontaktu linii telefonicznej z linią energetyczną na EAT lub jego podzespół /OB/

Przykładowe parametry pomiaru [6]:

$U_{ac} = 230 V_{rms}$; $f = 50 Hz$; czas trwania próby - 15 min. dla każdego położenia przełącznika S; liczba prób - po 1 dla każdego położenia przełącznika S, przy czym po każdej obiekty powinien pracować prawidłowo

Istnieją liczne wymagania i zalecenia pomiaru odporności aparatów na zakłócenia przewodzone powstające na skutek wpływu linii energetycznych. Wytyczne zawarto w zaleceniach CCITT oraz pochodnych od nich publikacjach, np. niemieckich, polskich, czeskosłowackich czy firm producentów układów telefonicznych. Zgodnie z zawartymi tam informacjami [2, 5, 7, 8, 13, 14] należy rozpatrywać tego typu zakłócenia jako:

- impulsowe /rys. 23, rys. 24/ symetryczne i niesymetryczne;
- ciągle /jak do tej pory określone tylko symetryczne/ zaindukowane w sieci telefonicznej /rys. 25/ lub powstające przy zwarciu z linią energetyczną /rys. 26/.

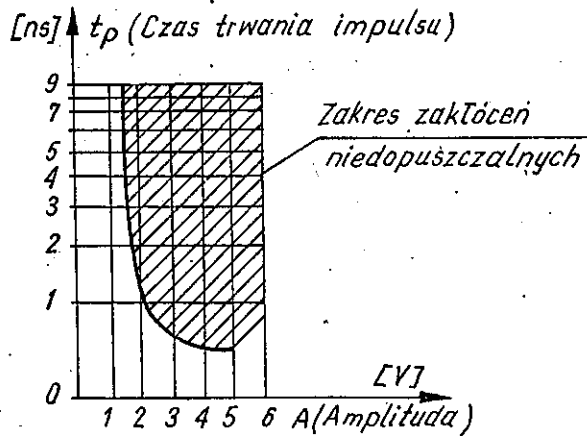
Zgodnie z polskimi wymaganiami [2] wykonuje się pomiar wytrzymałości aparatu telefonicznego na sygnał o napięciu skutecznym 500 V i czasie trwania 1 min. Sygnał przykładą się między liniowe zaciski gniazda przyłączeniowego i zewnętrzne części metalowe, przy czym aparat przebywać powinien w normalnych warunkach klimatycznych lub w warunkach podwyższonej wilgotności.

6.5. Zakłócenia impulsowe

Jest to określenie mylące, gdyż rozpatrywane już poprzednio zakłócenia elektrostatyczne lub atmosferyczne także były impulsowymi. Niemniej wyróżnia się je spośród innych. Do grupy EMI /elektromagnetyczne impulsy/ zalicza się bowiem zakłócenia polowe i przewodzone, powstające na skutek technicznej działalności człowieka - rzadziej naturalne zjawiska przyrody. Źródłem EMI mogą być środki komunikacji, urządzenia radiolokacyjne, urządzenia medyczne i naukowe w.cz., urządzenia przemysłowe /np. zgrzewarki i suszarki w.cz., silniki i elementy wnikowe/, procesy komutacji, wybuch nuklearny i wiele innych.

Dla układów cyfrowych EAT zakłócenia impulsowe są szczególnie niebezpieczne. W układach analogowych mogą być słyszalne w postaci trzasków i nie muszą powodować uszkodzenia, natomiast w układach cyfrowych - mogą powodować błędy w pamięci /do wykasowania pamięci włącznie/, podczas wybierania numeru. W momencie współpracy EAT z komputerem impulsy te mogą być odczytane jako jeden z ciągu impulsów użytecznych. Symbolem niemal stał się amerykański aparat wrzutowy, który można było uruchomić za pomocą zapalanej zapalniczki piezoelektrycznej.

Firmy zagraniczne starają się opracować model EMI, analizując podatność na zakłócenia cyfrowych układów scalonych. Szczególnie niebezpieczne są impulsy o małym czasie narastania i dużej amplitudzie /zwykle impuls o wolniej narastającym zboczu jest mniej niebezpieczny od tzw. szybkiego zakłócenia/. Na rys. 27 przedstawiono wpływ zakłóceń na bramkę NAND. Ponieważ technologia MOS przeżywa ogromny rozwój i co roku powstają nowe typy układów scalonych, sformułowanie norm ogólnych na ich zakłócalność jest bardzo trudne



Rys. 27. Odporność na zakłócenia bramki NAND. Zależność dopuszczalnego czasu trwania impulsu od amplitudy impulsu

I na ogół określane są jedynie wytyczne dotyczące poszczególnych typów układów. W krajach zachodnich, tam gdzie układy MOS są montowane, m.in. w automatach telefonicznych, ich warunki eksploatacji są szczególnie trudne. Pod uwagę muszą być brane zarówno warunki klimatyczne, jak i właśnie zakłócenia EMI. w USA i krajach europejskich prowadzi się pomiary i analizy tego typu zakłóceń, brak jest jednak informacji o poziomie podatności nowoczesnych aparatów na EMI oraz wytycznych co do modelu symulatora. Nadal zakłócenia EMI stanowią najmniej poznana gałąź zakłóceń EM.

7. ELEKTRONICZNY APARAT TELEFONICZNY JAKO ŹRÓDŁO ZAKŁÓCEŃ

Do tej pory w klasycznych aparatach telefonicznych zalecane było [2] określanie zakłóceń emitowanych przez aparat telefoniczny podczas wykręcania cyfry "0". Na temat EAT brak jest dotychczas jakichkolwiek zaleceń krajowych. Prodecenci zagraniczni także nie publikują swoich danych. EAT jest rozpatrywane raczej jako źródło błędów i przekłamań w cyfrowych sieciach telefonicznych, niż jako źródło zakłóceń o określonym widmie częstotliwości, np. radiowych.

WYKAZ LITERATURY

1. Bienia K., Kołodziejski J., Redlich J.: Diody zabezpieczające dla urządzeń telekomunikacyjnych.
2. BN-81/3221-04. Aparaty telefoniczne CB. Ogólne wymagania i badania.
3. BN-82/3221-04. Aparaty telefoniczne CB. EAT. Odporność na przeciążenia elektryczne. Wymagania i badania.
4. Bogard J.K.: The hazard of lightning. The International Journal of Aviation Safety, vol. 2, No 2, IX, 1984.
5. Buda P.: Narażenia elektromagnetyczne - piorun. Biuletyn Informacyjny IL, nr 1, 1985.
6. CCITT: COM V, KY /Zalecenie Tokijskie i Genewskie/, luty 1985.
7. CCITT: Księga Czerwona, vol. IX. Zalecenia: K.11, K.12, K.17, K.18.
8. ČSN 3340. Requirements for connection and transmission equipment for telecommunication.
9. Funk R.: Susceptibility of Semiconductors to Electrostatic Damage, Electronic Engineering, March, 1983, pp. 51-59.
10. Gallace L.J., Pujon H.L.: The Evaluation of CMOS Static-Charge Protection Networks and Failure Mechanisms Associated with Overstress Conditions as Related to Device Life. Mat. RCA przedstawione w 1977 Reliability Physics Symposium Las Vegas, Newada, April 1977.
11. Janović M. i inni: Compatibilite electromagnetique. Presse Polytechnique Romandes. Lozanne 1983.
12. IEC Publ. 801-2.
13. Katalog SGS-ATES Telecommunications Products 2 and Edition 1983. Określenie odporności diod zabezpieczających dla EAT na niektóre zakłócenia.
14. Kunz H.: Origin and Simulation of Mains Interference, IEEE Conference on EMC, 1981, Boulder, pp. 465-474.
15. Mat. 7th i 8th. International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility, Wrocław, 1984, 1986.
16. Materiały IEEE International Symposium on EMC, 1983, Hyatt Regency Crystal City, Arlingtonon V1.

17. Materiały szkoleniowe ITE do laboratorium z "Miernictwa układów scalonych" dla studentów elektroniki PW, 1980.
18. Materiały szkoleniowe Schaffer Instruments AG.
19. Richman P.: An ESD Circuit Model with Initial Spikes to Duplicate Discharges from Hands with Metal Objects. EMC Technology, vol. 4, No 2, 1985, pp. 53-59.

ISSN 0209-1046

