

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

5-6(236-237)

1986

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 26

WARSZAWA 1986

NR 5-6/236-237/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - doc. 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 K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: B. Skwara

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 1986.05.09.
Druk ukończono w grudniu 1986 r.

PAWEŁ BUDA

NARAŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE POCHODZĄCE
OD WYBUCHU NUKLEARNEGO

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Mechanizm generacji NEMP-u	2
2.1. Promieniowanie gamma	3
2.2. Efekt Comptona	4
2.3. Przewodność powietrza	5
2.4. Wpływ miejsca wybuchu na proces generacji NEMP-u	7
2.4.1. Wybuch naziemny	7
2.4.2. Wybuch pozaatmosferyczny	9
2.4.3. Impuls elektromagnetyczny generowany wewnątrz systemów	12
2.4.4. Magneto hydrodynamiczny impuls elektromagnetyczny	13
3. Kształt i parametry impulsów NEMP-u	14
3.1. Wybuch naziemny	14
3.1.1. Podziemne pole promieniowania	18
3.2. Wybuch pozaatmosferyczny	19
4. Wpływ pola NEMP-u na systemy i urządzenia łączności	22
4.1. Obliczenia numeryczne	24
4.1.1. Wpływ pola na kable telekomunikacyjne - impedancja transferu	24
4.1.2. Wpływ pola na układy antenowe	27
4.2. Wrażliwość elementów elektronicznych	29
5. Symulacja NEMP-u	31
5.1. Promieniowanie pola impulsowego	33
5.1.1. Źródła napięcia impulsowego	33
5.1.2. Symulator z falą prowadzoną	35
5.1.3. Symulator z falą promieniowaną	39

	Str.
5.2. Symulatory z falą ciągłą	41
5.3. Iniekcja sygnałów ciągłych	42
5.4. Iniekcja sygnałów impulsowych	42
5.5. Metrologiczne problemy symulacji	42
6. Ochrona urządzeń i systemów elektronicznych przed polem NEMP-u	45
6.1. Ekranowanie elektromagnetyczne	46
6.1.1. Ekranowanie pomieszczeń	46
6.1.2. Ekranowanie kabli	47
6.2. Ochrona przed narażeniami przewodzonymi	49
7. Wymagania na odporność urządzeń na pola NEMP-u	50
8. Zakończenie	54
Wykaz literatury	55

NARAŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE POCHODZĄCE
OD WYBUCHU NUKLEARNEGO

1. WPROWADZENIE

W miarę rozwoju cywilizacji społeczeństwa uzależniają się coraz bardziej od sprawności działania licznych systemów i urządzeń elektronicznych. Szczególną rolę w życiu społecznym odgrywają systemy służące do przesyłania i przetwarzania informacji. Sprawność działania urządzeń i sieci telekomunikacyjnej jest tym większa, im mniejsza jest ich podatność na narażenia elektromagnetyczne środowiska; stąd też od co najmniej kilkunastu lat, można zauważyć wzrastające zainteresowanie problematyką kompatybilności elektromagnetycznej sprzętu telekomunikacyjnego. W krajach rozwiniętych wymagania dotyczące kompatybilności sprzętu elektronicznego należą dzisiaj do kategorii wymagań podstawowych, takich jak: wymagania na narażenia mechaniczne czy klimatyczne. Prowadzone są systematyczne badania mające na celu ustalenie wymagań na odporność sprzętu na narażenia elektromagnetyczne. Działania te są prowadzone zasadniczo w następujących kierunkach:

- 1/ poznania zjawisk wywołujących narażenia elektromagnetyczne;
- 2/ poznania mechanizmów oddziaływania tych zjawisk na urządzenia telekomunikacji;
- 3/ opanowania technik pomiaru narażeń i ich symulacji;
- 4/ określenia sposobów oceny zagrożeń;
- 5/ określenia zasad klasyfikacji narażeń elektromagnetycznych.

Ostatnie lata, w szczególności ostatnie dziesięciolecie, przyniosły związane zainteresowanie problemami narazań impulsowych, a zwłaszcza narazań związanych z tzw. impulsem elektromagnetycznym pochodzenia nuklearnego. Wydaje się, że są dwa zasadnicze powody tego stanu rzeczy:

- 1/ układy elektroniczne wykonywane w najnowszych technologiach łatwo ulegają uszkodzeniom przy oddziaływaniu narazań impulsowych; wynika to z wyraźnego obniżenia poziomów sygnałów użytecznych i mocy zasilania struktur LSI i VLSI;
- 2/ impuls elektromagnetyczny pochodzenia nuklearnego stanowi totalne zagrożenie dla wszystkich systemów informatycznych, telekomunikacyjnych i energetycznych na znacznych obszarach kuli ziemskiej. Duża podatność urządzeń elektronicznych na zagrożenia impulsowe powoduje, że dla agresora ewentualny atak za pomocą impulsu pola pochodzenia nuklearnego może być bardzo atrakcyjny. Wywołałoby to ogólny chaos, ułatwiający dalsze posunięcia wojskowe agresora i utrudniający kontrofensywę. Utrata kontroli nad siecią telekomunikacyjną nie pozwoliłaby na podjęcie jakichkolwiek rozmów dyplomatycznych i politycznych w celu uniknięcia eskalacji działań wojennych. Przerwy w dostawach energii elektrycznej mogłyby poważnie zakłócić wszelkie gospodarcze i społeczne funkcje państwa.

Dlatego też wysoko rozwinięte państwa świata nie oszczędzają sił i środków na badania oraz ochronę swoich sieci telekomunikacyjnych i energetycznych przed działaniem impulsu elektromagnetycznego pochodzenia nuklearnego.

2. MECHANIZM GENERACJI NEMP-u

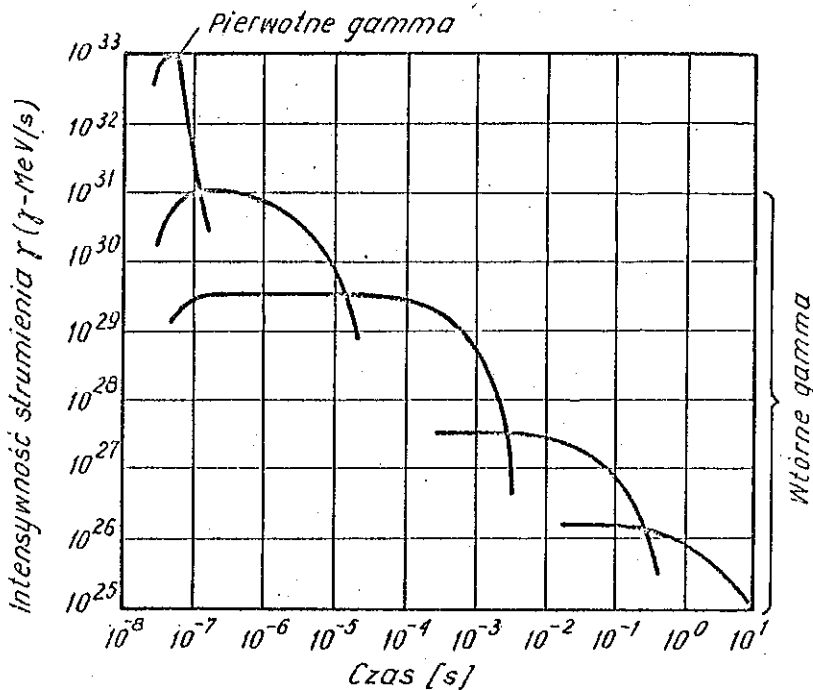
Wybuchowi jądrowemu towarzyszy impuls elektromagnetyczny oznaczany skrótami EMP /Electro - Magnetic Pulse/ lub NEMP /Nuclear Electro - Magnetic Pulse/. Składowe widma tego im-

pulsu zajmują szerokie pasmo częstotliwości począwszy od długich fal radiofonicznych do zakresów wykorzystywanych przez telewizyjne stacje nadawcze. Według wszelkich dotychczasowych danych, nuklearny impuls elektromagnetyczny ma znacznie silniejsze działanie od znanych do tej pory impulsowych zjawisk elektromagnetycznych mogących zasadniczo zmieniać stan środowiska elektromagnetycznego.

Podstawowy mechanizm generacji impulsu elektromagnetycznego jest w istocie procesem transformacji energii. W kilku procesach pośrednich pewna stosunkowo niewielka część energii jądrowej zostaje zamieniona w energię elektromagnetyczną, rozłożoną w widmie radiowym. Pierwszym z tych procesów jest wytwarzanie promieniowania γ , które oddziaływując na cząstki atmosfery, powoduje powstawanie elektronów i jonów dodatnich.

2.1. Promieniowanie gamma

Promieniowanie gamma [1 ÷ 5], [17] przejmuje około 1% energii uwalnianej podczas eksplozji jądrowej. Pierwotny strumień fotonów gamma wychodzi z epicentrum wybuchu, czas narastania impulsu tego promieniowania jest rzędu kilku nanosekund, czas zanikania rzędu kilkudziesięciu nanosekund /rys. 1/. Wtórne fotony gamma powstają w procesie tzw. nieelastycznego rozpraszania wysokoenergetycznych neutronów /energia > 6 MeV/, powstających w wyniku eksplozji jądrowej, na atomach powietrza, ziemi lub jakichkolwiek obiektów znajdujących się w rejonie wybuchu. Czas narastania impulsów promieniowania wtórnego jest rzędu kilku do kilkudziesięciu mikrosekund. Również intensywność tego promieniowania jest znacznie niższa od intensywności pierwotnego strumienia kwantów /rys. 1/. Praktycznie biorąc, tylko pierwotne promieniowanie γ , odpowiedzialne jest za generację impulsu elektromagnetycznego.

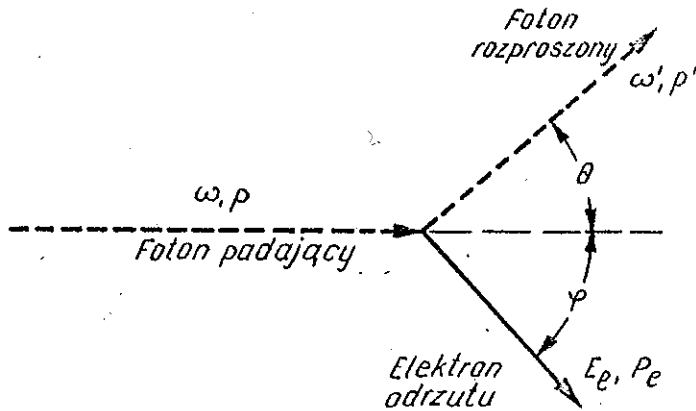


Rys. 1. Intensywność promieniowania gamma w funkcji czasu /siła eksplozji - 1 NT/ [1].

2.2. Efekt Comptona

Wysokoenergetyczne promieniowanie oddziałuje na cząsteczki otaczającej atmosfery w procesie Comptona [1 ÷ 4]. Foton γ , uderzając w atom tlenu lub azotu, uwalnia z nich elektrony - - tzw. komptonowskie elektrony odrzutu /rys. 2/. Obszar w którym promieniowanie oddziałuje na atmosferę, nazywa się rejonem źródła. Elektrony odrzutu poruszają się w kierunku od miejsca wybuchu znacznie szybciej niż wolne i ciężkie jony dodatnie. W wyniku powstałego wzajemnego przesunięcia dodatnich i ujemnych ładunków powstaje silne pole elektryczne. Prąd tworzony przez elektrony odrzutu może osiągać duże war-

tości. Eksplozja naziemna o sile 10 kT tworzy w odległości 500 m prąd o gęstości rzędu kilku kA/m^2 w szczycie. Podczątkowo elektron komptonowski ma energię ok. 0,5 MeV i prędkość bliską połowie prędkości światła.



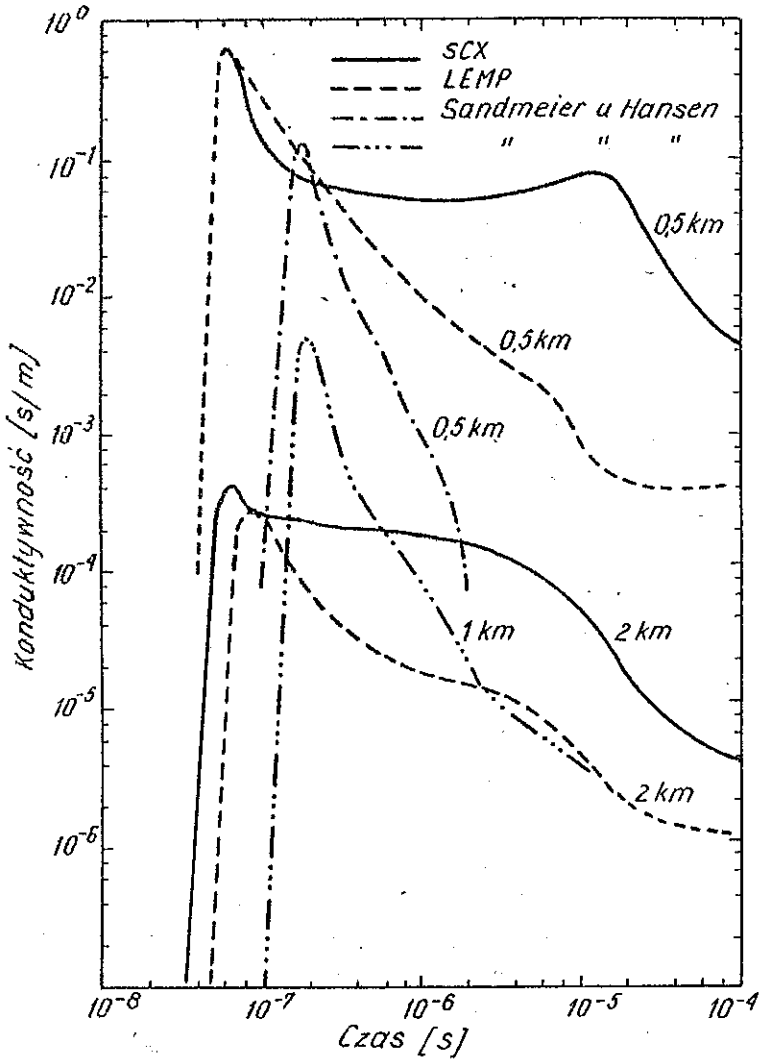
Rys. 2. Zjawisko Comptona [5]

Droga swobodna elektronów komptonowskich wynosi na poziomie ziemi ok. 1-2 m. Podczas ruchu elektronów zderzają się one z atomami powietrza wybijając z nich elektrony wtórne. Proces ten ma zasadniczy wpływ na zmiany konduktywności atmosfery w rejonie oddziaływania NEMP-u.

2.3. Przewodność powietrza

Elektron komptonowski ulega średnio ok. 15000 zderzeniom w czasie których uwalnia zbliżoną liczbę wtórnych elektronów. Wtórne elektrony odgrywają podobną rolę jak wolne elektrony w przewodniku metalicznym, zwiększając lokalnie przewodnictwo powietrza /rys. 3/. Elektrony te tworzą prąd przewodzenia [1], [2], [5] płynący pod wpływem pola elektrycznego, wytworzonego przez elektrony komptonowskie. Prąd przewodzenia płynie w przeciwnym kierunku niż elektrony odrzutu,

ograniczając w ten sposób wartość natężenia pola elektrycznego. Można powiedzieć, że impuls elektromagnetyczny związany z ruchem elektronów komptonowskich jest częściowo absorbowany przez efekt wzrostu konduktywności powietrza.



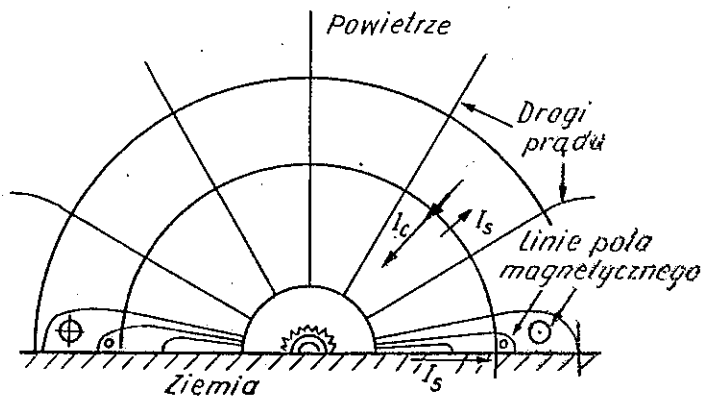
Rys. 3. Zmiany przewodności powietrza w funkcji czasu i odległości od miejsca eksplozji naziemnej [5]

2.4. Wpływ miejsca wybuchu na proces generacji NEMP-u

Położenie miejsca wybuchu jądrowego jest ważnym parametrem [1], [2], [4], [5] decydującym o przebiegu procesów opisanych w punktach 2.1 - 2.3. Decyduje ono o wartościach natężeń generowanych pól, kształtach impulsów NEMP-u, a przede wszystkim o zasięgu oddziaływania zjawisk elektromagnetycznych pochodzenia nuklearnego. W literaturze światowej z reguły analizuje się NEMP związany w dwa podstawowymi rodzajami wybuchów, a mianowicie: impuls od wybuchu naziemnego i impuls od wybuchu pozaatmosferycznego.

2.4.1. Wybuch naziemny

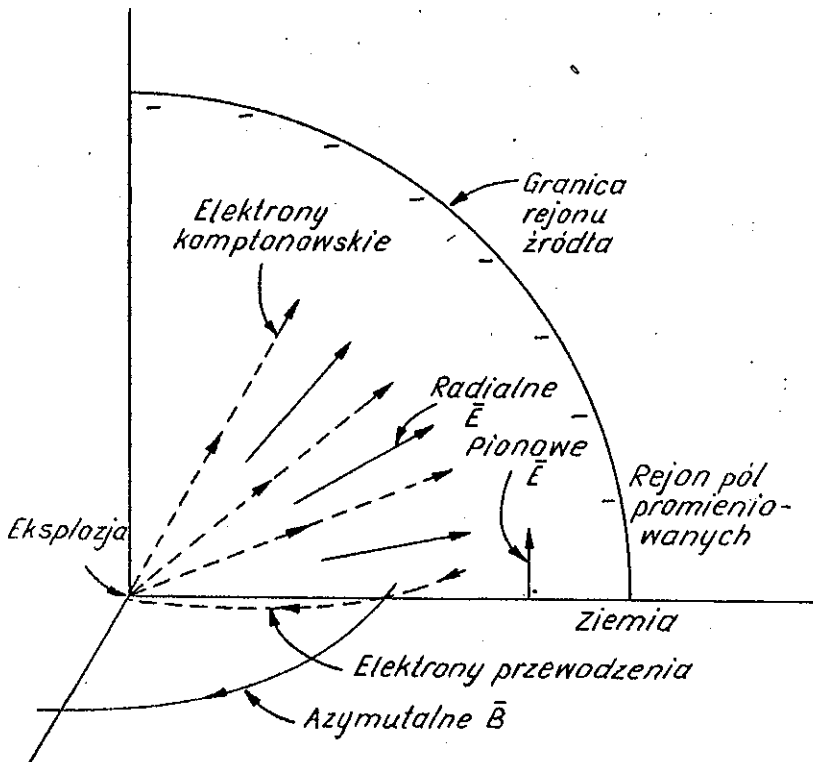
Przy wybuchu jądrowym na powierzchni ziemi /ang. nuclear burst - wybuch dokonany na powierzchni ziemi lub wody albo nad tą powierzchnią - na wysokości mniejszej od maksymalnego promienia tworzącej się kuli ognistej/ typowa średnica, powstającego, półkulistego źródła /rejon, w którym kwanty oddziałują z atmosferą tworząc prąd komptonowski/ wynosi kilka kilometrów [1], [2], [4], [5]. - por. rys. 4.



Rys. 4. Wybuch naziemny [5]

I_c - prąd komptonowski, I_s - prąd elektronów wtórnych, I_b -
- prąd zwarcia w ziemi

Średnia droga swobodna fotonów jest równa ok. 200 m. Gęstość strumienia elektronów komptonowskich maleje ze wzrostem odległości, stając się pomijalnie mała w odległości kilku kilometrów od miejsca wybuchu. Rozmiar źródła zależy bardziej od pochłaniania kwadratów γ w atmosferze niż od mocy eksplozji naziemnej. Tworzące się w pobliżu powierzchni ziemi radialne pole elektryczne jest "zwierane" przez ziemię gdyż zwykle okazuje się ona lepszym przewodnikiem niż powietrze. W pobliżu ziemi elektrony przewodzenia /wtórne/ poruszają się najkrótszymi drogami w kierunku powierzchni ziemi, a następnie z powrotem w kierunku miejsca wybuchu /rys. 5/. W rezultacie powstaje zamknięty obwód, a prąd płynący w



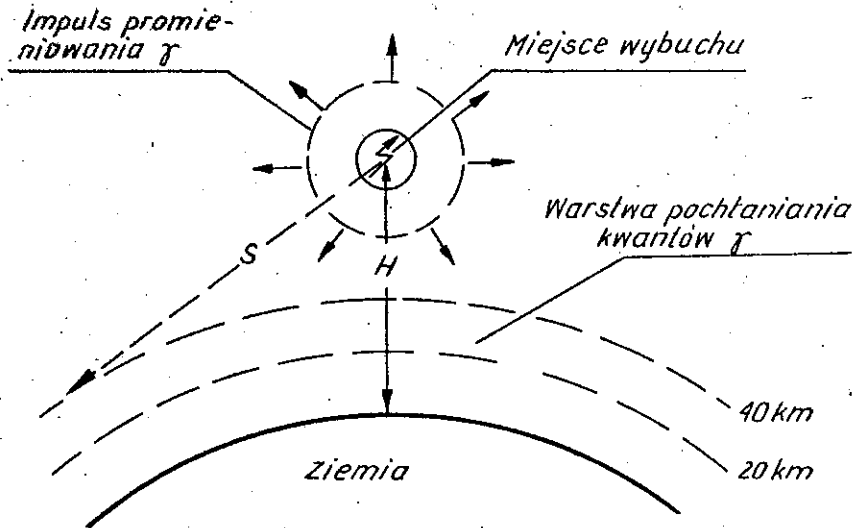
Rys. 5. Mechanizm powstawania NEMP-u eksplozji naziemnej [3]

tym obwodzie wytwarza azymutalne pole magnetyczne. Pionowa składowa prądu przewodzenia jest związana z pionową składową pola elektrycznego, które powstaje między elektronami komptonowskimi w powietrzu a ładunkami wyindukowanymi ziemi.

Przy naziemnym wybuchu jądrowym powstaje zatem radialne oraz pionowe pole elektryczne i azymutalne pole magnetyczne. Nierówności terenu prowadzą ponadto do pojawienia się innych składowych pól. Po początkowym stadium następuje zanikanie pól, którego przebieg jest bardzo złożony. Należy podkreślić, że obszar oddziaływania NEMP-u od wybuchu naziemnego jest stosunkowo niewielki i że NEMP działa wraz z innymi efektami wybuchu nuklearnego, takimi jak: fala uderzeniowa, promieniowanie jonizujące, efekt termiczny.

2.4.2. Wybuch pozaatmosferyczny

Na rys. 6 przedstawiono szkielet sytuacyjny wybuchu pozaatmosferycznego [1 ÷ 5] /ang. exoatmospheric burst - wybuch jądrowy na wysokości większej niż 50 km/. Emitowane kwanty γ



Rys. 6. Eksplozja pozaatmosferyczna [2]

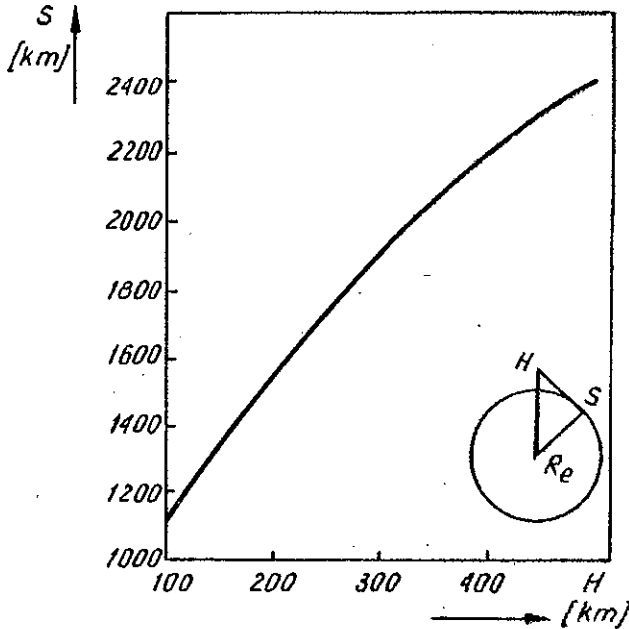
Wysokość wybuchu $H = 400$ km, odległość od horyzontu
 $S = 2250$ km

tworzą kulistą warstwę, rozszerzającą się z prędkością światła. Na wysokościach większych niż 40 km, atmosfera jest mocno rozrzedzona i praktycznie nie ma wpływu na rozchodzenie się wysokoenergetycznych kwantów γ . Poniżej 40 km rozpoczyna się proces pochłaniania energii kwantu podczas zderzeń komptonowskich i już na wysokości 20 km następuje praktycznie całkowita absorpcja energii promieniowania γ . Rejon źródła jest zawarty w przedziale wysokości od 20 do 40 km nad ziemią. Średnia droga swobodna elektronów komptonowskich w rejonie źródła, gdzie atmosfera jest znacznie bardziej rozrzedzona niż tuż nad powierzchnią ziemi, wynosi ok. 100 m. Podczas pokonywania tej drogi elektrony zostają silnie odchylane przez ziemskie pole magnetyczne. Wektor strumienia elektronów komptonowskich ma wskutek tego znaczną składową w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się kwantów γ . Składowe kołowe ruchu elektronów i jonów dodatnich wokół linii pola magnetycznego charakteryzują przestrzenny rozdział naładowanych cząstek.

Ów rozdział ładunków jest procesem zmiennym w czasie, a zatem jest z nim związana emisja energii elektromagnetycznej w postaci impulsu skierowanego w dół i "oświetlającego" powierzchnię ziemi. Elektrony odrzutu poruszające się równoległe do linii sił pola magnetycznego nie są odchylane, co oznacza, że amplituda NEMP-u jest mała na kierunku pokrywającym się z liniami sił pola geomagnetycznego, które przechodzą przez punkt wybuchu i największa na kierunku prostopadłym do tych linii.

Należy podkreślić, że oddziaływanie NEMP-u od wybuchu pozantmosferycznego może obejmować obszar geograficzny o znacznych rozmiarach. Strefę oddziaływania wyznacza tzw. promień styczności /por. rys. 6/. Jest on równy długości łuku pomiędzy linią łączącą środek kuli ziemskiej z punktem wybuchu, a linią łączącą środek kuli ziemskiej z punktem styczności z powierzchnią ziemi prostej poprowadzonej z miejsca wybuchu.

Na rys. 7 przedstawiono zależność długości promienia styczności w funkcji wysokości punktu wybuchu nad powierzchnią ziemi.



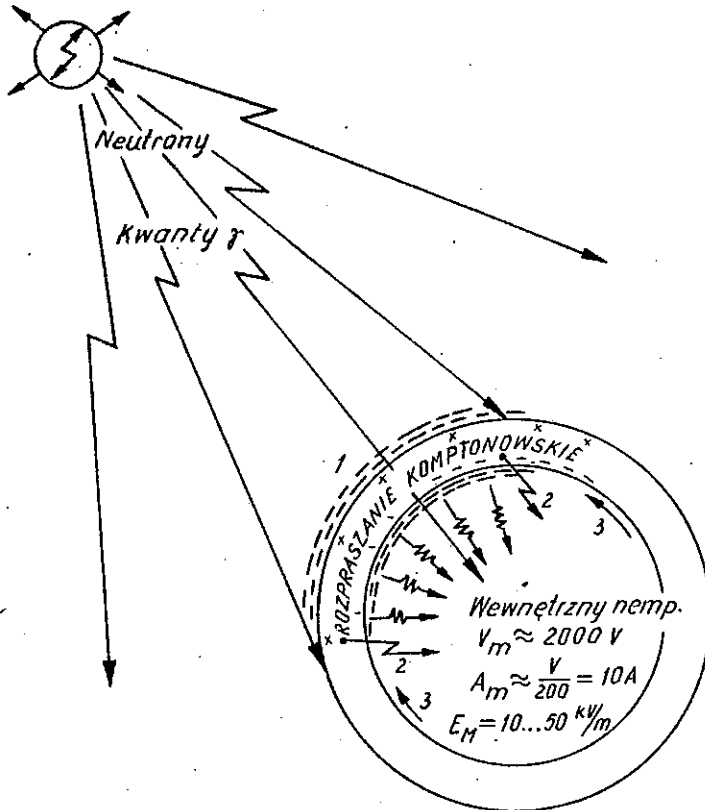
Rys. 7. Długość promienia styczności /S/ w funkcji wysokości wybuchu /H/ nad powierzchnią ziemi [2]

Przykładowo, dla wybuchu bomby na wysokości 300 km, promień styczności wynosi ok. 1900 km. Jest oczywiste, że na obszarze wyznaczonym przez promień styczności będą występowały różnice w natężeniu pola, zależne przede wszystkim od wzajemnego położenia miejsca wybuchu, linii sił pola geomagnetycznego i punktu obserwacji - pomiaru. Rozmiary powierzchni ziemi objęte działaniem NEMP-u od wybuchu pozaatmosferycznego są w pewnym stopniu proporcjonalne do mocy bomby. Na uwagę zasługuje fakt, że na obszarze oddziaływania impulsu NEMP-u, praktycznie nie będą zauważalne inne efekty wybuchu jądowego.

4.3. Impuls elektromagnetyczny generowany wewnątrz systemów

Rejon źródła, tworzony w trakcie wybuchu pozaatmosferycznego jest bardzo duży i istnieje prawdopodobieństwo znajdowania się w nim powietrznych lub kosmicznych aparatów latających [2], [6]. W wyniku wzajemnego oddziaływania fotonów γ z konstrukcją lub obudową systemu mogą zostać wytworzone swobodne elektrony wewnątrz systemu /rys. 8/. Rozdzielanie i rekombinacja ładunków związane

Wybuch pozaatmosferyczny



Statek kosmiczny

Rys. 8. Generacja "wewnętrznego" NEMP-u [2]

ze zmiennym w czasie oddziaływaniem promieni γ i asymetrią konstrukcji może prowadzić do pojawienia się znacznego, tzw. "wewnętrznego" lub "wnętkowego" impulsu elektromagnetycznego /ang. internal electromagnetic pulse - IEMP/.

NEMP generowany wewnątrz systemów może również wystąpić poza granicami atmosfery. Tego typu impuls ma różne właściwości zależnie od konkretnego systemu i dlatego za podstawę jego obliczania bierze się charakterystykę danego systemu a więc geometrię, materiał konstrukcyjny itp., a ponadto rejon prawdopodobnego usytuowania systemu w przestrzeni, gęstość atmosfery itp. Analiza zjawiska jest trudna. Wewnętrzne pole elektryczne i magnetyczne wytwarzają napięcia i prądy typu "dzwoniącego", tzn. w postaci tłumionych drgań obwodu uderowego, które działają na układy i elementy elektroniczne zawarte w systemie. Przebieg tych procesów przejściowych jest zależny od impedancji obwodów, rodzaju materiałów, konfiguracji układów i czułości elementów elektronicznych.

2.4.4. Magnetohydrodynamiczny impuls elektromagnetyczny

Eksplozja nuklearna i towarzyszące jej zjawiska powodują poważne zaburzenia ziemskiego pola magnetycznego [7]. Resultatem owych zakłóceń jest generacja impulsu elektromagnetycznego, tzw. drugiego rodzaju, nazywanego również magnetohydrodynamicznym impulsem elektromagnetycznym /MHD-EMP/. Pole tego impulsu ma znacznie mniejszą amplitudę, lecz o wiele dłuższy czas trwania /dziesiątki milisekund/ niż pola NEMP-u. Impuls tego typu może powodować zniszczenia w bardzo długich przewodnikach, jak np. kablach podmorskich telekomunikacyjnych liniach powietrznych i podziemnych, sieci energetycznej.

3. KSZTAŁT I PARAMETRY IMPULSÓW NEMP-u

3.1. Wybuch naziemny

Środowisko elektromagnetyczne NEMP-u, związanego z eksplozją jądrową na powierzchni Ziemi, jest opisywane [1 + 3], [5], [17] następującymi wielkościami:

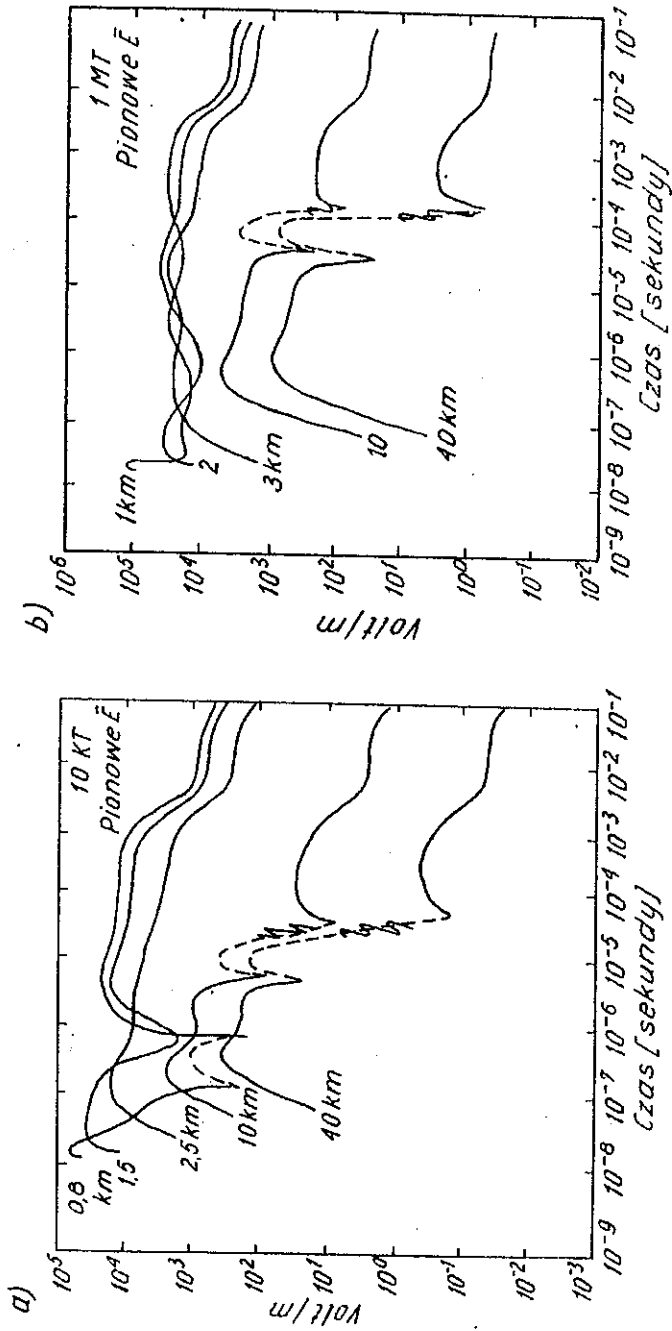
- $E_r(t)$ - radialne pole elektryczne,
- $E_v(t)$ - pionowe pole elektryczne,
- $H_z(t)$ - azymutalne pole magnetyczne,
- $I_c(t)$ - prąd komptonowski,
- $F_\gamma(t)$ - intensywność strumienia kwantów,
- $\delta(t)$ - przewodność powietrza

Trzy ostatnie wielkości odpowiedzialne za generację tzw. "wewnętrznego" - NEMP-u, w systemach znajdujących się w rejonie źródła, mają drugorzędny wpływ na środowisko elektromagnetyczne poza granicami źródła.

Radialne pole elektryczne powstaje w czasie porównywalnym z czasem reakcji jądrowej, tzn. w ciągu ok. 10^{-8} s. Najczęściej podawana w literaturze, średnia wartość natężenia pola elektrycznego w rejonie źródła wynosi ok. 10^5 v/m.

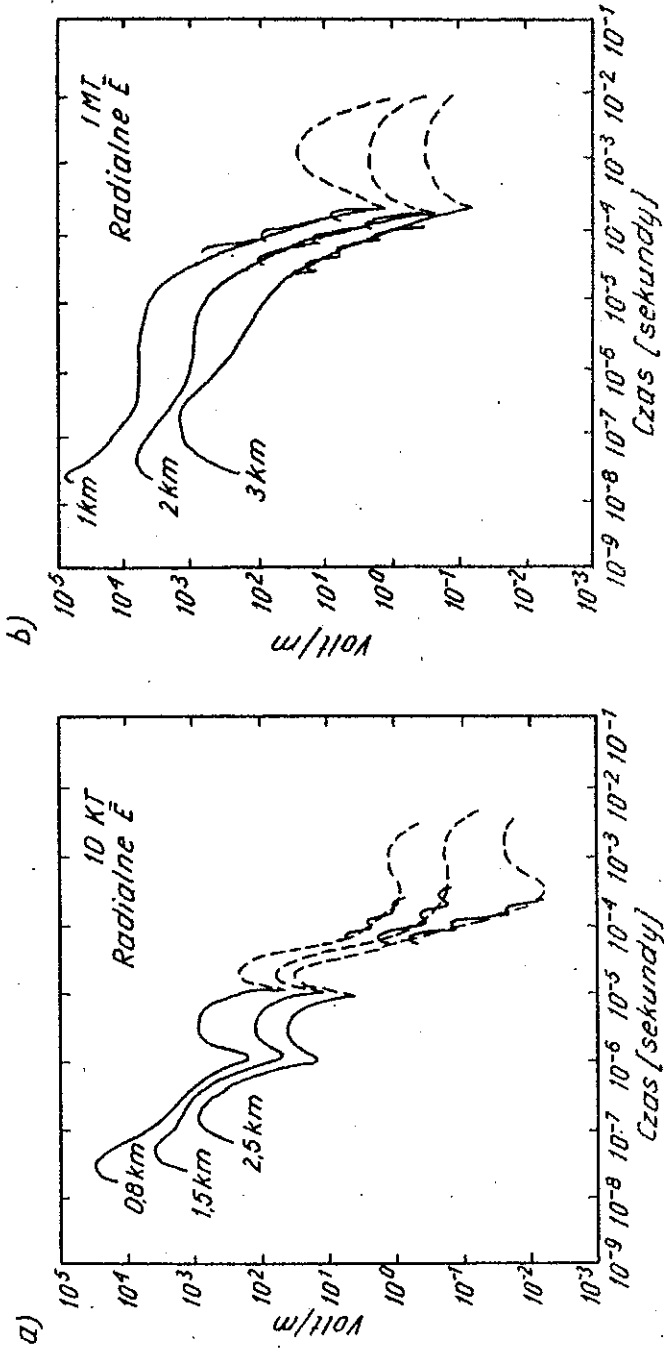
Na rysunkach 9, 10 i 11 przedstawiono kształty i podstawowe parametry pól elektrycznych i pola magnetycznego promieniowanych z rejonu wybuchu naziemnego dla dwóch mocy bomb jądrowych: 10 KT i 1 MT. Trzy mniejsze odległości odpowiadają punktom obserwacji umieszczonym wewnątrz rejonu źródła, dwie pozostałe punktom poza jego granicami. Wykropkowane części krzywych na prezentowanych wykresach oznaczają zmianę kierunku wektora natężenia pola.

Wartości maksymalne są limitowane przez efekt wzrostu konduktywności powietrza i dlatego też wpływ mocy bomby na wartości pól jest stosunkowo niewielki /szczególnie jest to widoczne w rejonie źródła/. Znaczne wartości natężeń pól



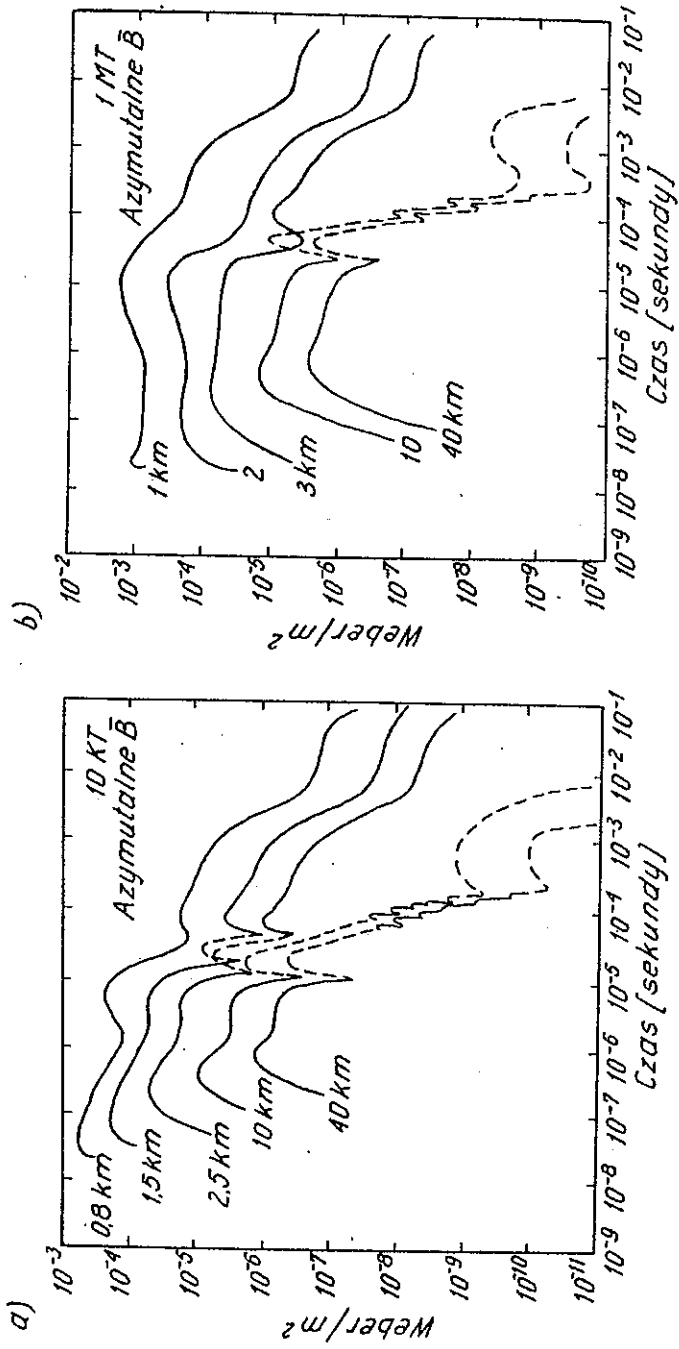
Rys. 9. Składowa pionowa pola elektrycznego naziemnego wybuchu jądrowego o sile [3]:

a - 10 KT; b - 1 MT



Rys. 10. Składowa radialna pola elektrycznego eksplozji naziemnej o sile [3]:

a - 10 kT; b - 1 MT



Rys. 11. Azymutalne pole magnetyczne eksplozji naziemnej o sile [3]:

a - 10 kT; b - 1 MT

w rejonie źródła utrzymują się przez okres kilkudziesięciu mikrosekund i dłużej.

Najważniejszą cechą tego typu promieniowania jest szybki spadek wartości natężeń pola elektromagnetycznego wraz ze wzrostem odległości od epicentrum eksplozji. Zasięg działania NEMP-u wybuchu naziemnego jest więc stosunkowo niewielki i już w odległości ok. 50-100 km natężenia pól mogą nie mieć praktycznie, większego znaczenia. Widmo częstotliwościowe typowego naziemnego NEMP-u rozciąga się od kilku kiloherców do kilkudziesięciu MHz. Ważną cechą naziemnego środowiska NEMP-u jest obecność podziemnego pola elektromagnetycznego.

3.1.1. Podziemne pole promieniowania

Fala promieniowania wybuchu naziemnego [2] rozprzestrzenia się wzdłuż stycznej do powierzchni ziemi, a wektor natężenia pola jest skierowany pionowo. Skończone przewodnictwo ziemi /straty/ powoduje, że kierunek rozchodzenia się fali nachyla się ku powierzchni ziemi. Dla typowych parametrów elektrycznych ziemi ($\epsilon = 5 \div 20$, $\sigma = 10^{-3} \div 10^{-2}$ s/m) wartość składowej radialnej E_v stanowi zaledwie kilka procent wartości składowej pionowej NEMP-u. Tym niemniej radialna składowa pola ma istotny wpływ na pracę urządzeń, systemów i łączy telekomunikacyjnych umieszczonych pod powierzchnią ziemi. Pole składowej E_v wnika w ziemię, przy czym wartość głębokości wnikania zależy od: parametrów elektrycznych gruntu, wilgotności i temperatury otoczenia oraz częstotliwości. Dla podstawowych składowych widma NEMP-u głębokość wnikania może wynosić od jednego do kilkuset metrów. Składowe o większych częstotliwościach wnikają na mniejszą głębokość niż składowe niskoczęstotliwościowe. W tabelicy 1 zestawiono dane, dotyczące głębokości wnikania dla wody morekłej i dwóch charakterystycznych rodzajów gruntu.

Tablica 1

Głębokość wnikania pola dla różnych rodzajów gruntu

Częstotliwość [MHz]	Głębokość wnikania [m]		
	Woda morska $\sigma = 4(\text{om}\cdot\text{m})^{-1}$ $\epsilon_r = 80$	Grunt równinny zalesiony, podsakły $\sigma = 10^{-2}(\text{om}\cdot\text{m})^{-1}$ $\epsilon_r = 10$	Grunt górski, suchy, piaszczyuty $\sigma = 10^{-3}(\text{om}\cdot\text{m})^{-1}$ $\epsilon_r = 5$
10^{-2}	2,5	50	159
10^{-1}	0,8	16	51
1	0,25	5	18
10	0,08	2	12
100	0,026	0,7	12

3.2. Wybuch pozaatmosferyczny

Środowisko NEMP-u pozaatmosferycznego [1], [2], [5], [7], [17] w rejonie źródła zbliżone jest do środowiska rejonu eksplozji naziemnej, z zastrzeżeniem, że koncepcje zwrotnych strumieni elektronów w ziemi, wypadkowego pola magnetycznego i pionowej składowej pola elektrycznego nie obowiązują. Ważnymi parametrami charakteryzującymi ten rejon są: radialne pole elektryczne, prąd komptonowski, przewodność powietrza oraz "wewnętrzny" NEMP - generowany w systemach przebywających w rejonie źródła.

Sygnały pola promieniowanego przy wybuchu pozaatmosferycznym /exoatmosferycznym/ są zwykle podawane w literaturze w postaci formuł matematycznych /dane eksperymentalne stanowią najczęściej obiekt tajemnicy wojskowej/. Poniżej przytoczone informacje, podawane w USA na kursach obrony obywatel-

skiej, o kształtach i parametrach najbardziej prawdopodobnego impulsu NEMP-u [2]:

$$\text{Impulsy: A: } E_a(t) = E_{01} \cdot f_1(t) \quad (1)$$

$$\text{B: } E_b(t) = E_{02} \cdot f_1(t) \quad (2)$$

$$\text{C: } E_c(t) = 1.2 E_{01} \cdot f_2(t) \quad (3)$$

$$\text{D: } E_d(t) = 1.2 E_{02} \cdot f_2(t) \quad (4)$$

$$\text{gdzie: } E_{01} = 5.2 \cdot 10^4 \text{ V/m, } E_{02} = 2.3 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

$$f_1(t) = \exp(-\alpha_{11}t) - \exp(-\alpha_{21}t),$$

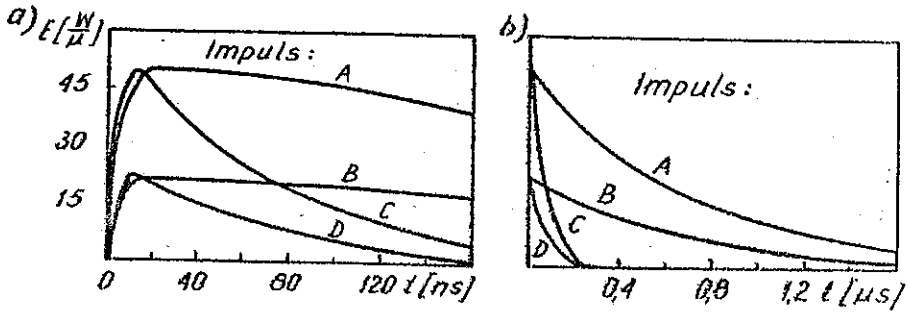
$$f_2(t) = \exp(-\alpha_{12}t) - \exp(-\alpha_{22}t),$$

$$\alpha_{11} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}, \quad \alpha_{21} = 2.6 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1},$$

$$\alpha_{12} = 1.5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}, \quad \alpha_{22} = 2.6 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$$

Funkcje $f_1(t)$ i $f_2(t)$ charakteryzują odpowiednio impuls długi i impuls krótki. Impuls A jest typowym długim impulsem o amplitudzie większej od przeciętnej. Można go traktować jako prawdopodobną składową poziomą pola E na większych szerokościach geograficznych lub jako prawdopodobną składową pola H. Impuls B jest długim impulsem o mniejszej amplitudzie i można go uważać za zbliżoną do przeciętnej składową pionową pół E. Impulsy C i D są zawsze krótsze.

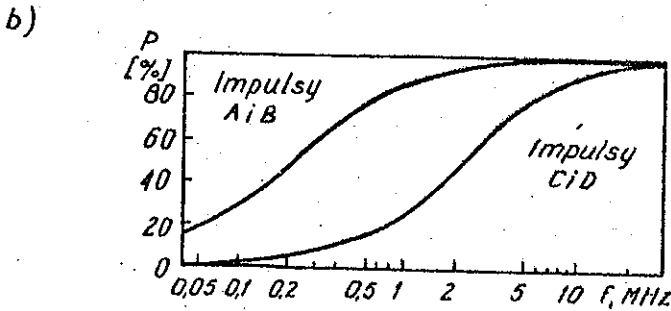
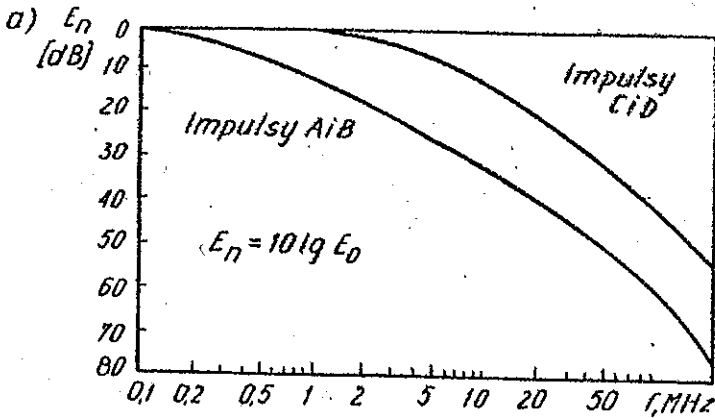
Na rys. 12 przedstawiono typowe postaci impulsów pola elektrycznego pochodzącego od NEMP-u pozaatmosferycznego. Natomiast na rys. 13 pokazano widmo impulsu pola elektrycznego pochodzącego od eksplozji pozaatmosferycznej. Zwraca uwagę fakt, że praktycznie cała energia impulsów jest zawarta w przedziale do 10 MHz. Pole magnetyczne jest związane z polem elektrycznym przez impedancję falową wolnej przestrzeni $\eta_0 = 377 \text{ omów}$ (fala płaska).



Rys. 12. Impuley NEMP-u pozaatmosferycznego [2]

a - początkowa faza wybuchu /do 160 ns/, b - przebieg impulsu do zaniku

Krzywe A, B, C, D charakteryzują różne postaci impulsów /zgodnie ze wzorami 1 + 4/.



Rys. 13. Impuls NEMP-u pozaatmosferycznego [2]

a - widmo impulsu pola elektrycznego, b - skumulowana gęstość mocy impulsu Nemp-u

Krzywe A, B, C, D charakteryzują różne postaci impulsów /zgodnie ze wzorami 1 + 4/.

Moc bomby ma niewielki, choć wyraźniejszy niż dla wybuchu naziemnego, wpływ na wartość amplitudy pola elektromagnetycznego. Rozważane pola rozchodzą się w postaci fal "swobodnych". W analizie środowiska NEMP-u trzeba uwzględnić również odbicie fal od powierzchni mórz lub ziemi. Nakładanie się fali bezpośredniej z odbitą prowadzi do zwiększenia bądź osłabienia pewnych składowych widma. Dokładna analiza tych zjawisk jest trudna.

Należy wyraźnie podkreślić podstawową cechę NEMP-u pozaatmosferycznego - ogromny zasięg oddziaływania. W całym obszarze określonym przez długość promienia styczności (por. rys. 7) można się spodziewać impulsu pola o parametrach (amplituda, czas narastania i trwania) określonych przez wzory (1 + 4). Jest bardzo prawdopodobne, że wojskowe i cywilne systemy, również telekomunikacyjne, mimo iż nie będą bezpośrednimi celami ataku jądrowego, zostaną poddane silnemu działaniu NEMP-u wywołanego takim atakiem na inne - - znajdujące się w znacznej odległości cele, np. stacje satelitarne z bronią laserową.

4. WPŁYW POLA NEMP-u NA SYSTEMY I URZĄDZENIA ŁĄCZNOŚCI

Pole elektromagnetyczne tworzone przez wybuch nuklearny, a w szczególności przez wybuch pozaatmosferyczny, zasięgiem zmienia zasadniczo warunki pracy urządzeń elektronicznych znajdujących się w rejonie oddziaływania NEMP-u [2], [5], [8 + 14]. Impuls elektromagnetyczny indukuje prądy i napięcia we wszelkiego typu strukturach przewodzących (np. kablach telekomunikacyjnych, liniach energetycznych, antenach, metalowych obudowach itp.) poddanych działaniu pola. Indukowana energia może prowadzić do zniszczenia czułych elektronicznych urządzeń, powoduje deformację sygnałów użytecznych lub przerwanie transmisji informacji. W przypadku systemów zakłócenia mogą pojawić się w wielu miejscach równocześnie.

Pole elektromagnetyczne oddziałuje na urządzenia elektroniczne zasadniczo dwoma sposobami:

- 1/ bezpośrednio - przewodzące elementy konstrukcji sprzętu oraz elementy układów elektronicznych poddane bezpośredniemu promieniowaniu zachowują się jak odbiorczy układ antenowy; powstają niepożądane prądy, napięcia lub pola elektromagnetyczne wewnątrz urządzeń;
- 2/ pośrednio - sygnał zakłócający /prąd, napięcie/ jest przewodzony - transmitowany do układu drogą bezpośrednich sprzężeń galwanicznych, np. poprzez sieć zasilającą; impuls zakłócenia w sieci jest generowany bezpośrednio przez NEMP.

Wpływ NEMP-u musi zostać uwzględniony w analizie przewidywanego środowiska elektromagnetycznego projektowanych urządzeń czy systemów elektronicznych. Trafna prognoza wielkości ewentualnych narażeń pozwala już na etapie konstruowania przedsięwziąć odpowiednie kroki uodporniające system.

Badania wpływu impulsowego pola elektromagnetycznego eksplozji nuklearnej na urządzenia i systemy łączności prowadzi się dwiema drogami:

- 1/ Obliczenia numeryczne - symulacja komputerowa interakcji pola i urządzenia;
- 2/ pomiary przy użyciu symulatorów pola NEMP-u.

Każda z tych metod ma swoje wady i zalety. Budowa symulatorów jest trudnym technologicznie i kosztownym przedsięwzięciem, natomiast z rachunkiem numerycznym są związane problemy poprawnego wyboru metod analizy i weryfikacji otrzymanego wyniku.

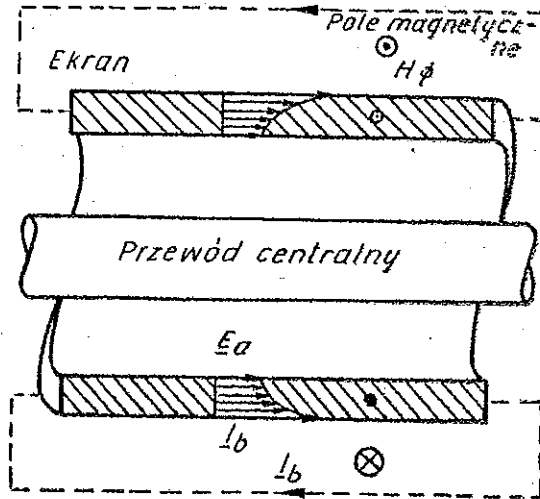
4.1. Obliczenie numeryczne

Zwraca uwagę fakt, że w literaturze przedmiotu najwięcej uwagi poświęca się analizie dość prostych geometrycznie struktur przewodzących – kabli, przewodów sieci energetycznej, anten liniowych bądź struktur dających się modelować siecią "cienkich drutów". Wydaje się, że decydują o tym dwie okoliczności. Po pierwsze, struktury tego typu są narażone na bezpośrednie działanie pola, inaczej niż ma to miejsce w przypadku skomplikowanych systemów kontroli czy sterowania, z reguły starannie ekranowanych i zabezpieczanych. Istotną jest więc dokładna analiza pracy linii w warunkach zagrożenia NEMP-em. Z drugiej strony, ścisła i efektywna analiza wpływu pola na bardzo rozbudowane, pod względem konstrukcyjnym oraz układowym, urządzenia jest bardzo trudna i wymaga stosowania zaawansowanych metod analizy numerycznej, takich jak: MOM (metoda momentów) czy GTD (geometryczna teoria dyfrakcji). Potrzeba również szybkich komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Równocześnie wyniki takiej analizy są obdarzone małym współczynnikiem zaufania. Wszystko to powoduje, że analizę numeryczną z reguły prowadzi się dla linii i kabli telekomunikacyjnych, ewentualnie prostych układów antenowych, symulacja zaś zajmuje się badaniem bardziej złożonych układów.

4.1.1. Wpływ pola na kable telekomunikacyjne – impedancja transferu

Analiza wpływu pola na przewody i kable telekomunikacyjne jest oparta na teorii linii długich [5], [8], [10], [15], [16]. Zainteresowanych bliższymi informacjami odsyła się do literatury [2], [9], [10], [16]. W tym artykule wydaje się konieczne ograniczyć się jedynie do podania niezbędnych informacji o mechanizmie oddziaływania pola na ekranowane kable telekomunikacyjne.

Na rys. 14 przedstawiono fragment przekroju przez kabel koncentryczny z płaszczem wykonanym z litego materiału.



Rys. 14. Kabel koncentryczny z litym płaszczem [5]

Zewnętrzne pole elektromagnetyczne powoduje indukowanie się prądów w płaszczu kabla. Przepływ prądu w płaszczu implikuje powstanie wzdłużnego pola elektrycznego. Rozkład tego pola wzdłuż przekroju płaszcza zależy od efektu naskórkowego. Impedancję transferu definiuje się jako stosunek natężenia pola elektrycznego na wewnętrznej powierzchni płaszcza do natężenia prądu płynącego w płaszczu [5]:

$$Z_1 = \frac{E_a}{I_B} \quad [\Omega/m] \quad (5)$$

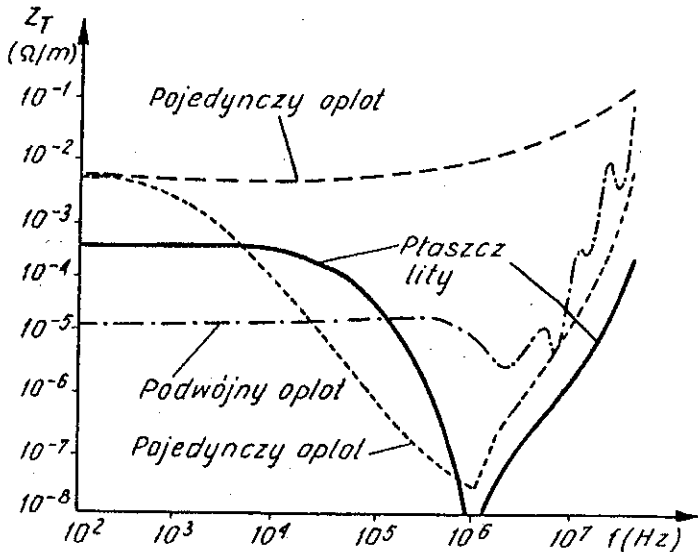
W przypadku gdy rozpatrujemy impulsowe pole elektromagnetyczne, relację (5) przepisujemy w dziedzinie częstotliwości [5]:

$$Z_T \text{ w} = \frac{E_a \text{ (w)}}{I_b \text{ (w)}} \quad (6)$$

Pole wewnątrz ekranu powoduje powstawanie pasożytniczych prądów i napięć w przewodzie centralnym.

Ze wzorów (5) i (6) wynika, że impedancja transferu jest parametrem określającym podatność kabla /efektywność jego ekranowania/ na zewnętrzne pola elektromagnetyczne. Znajomość tej impedancji jest podstawą wszelkich teoretycznych analiz interakcji typu pole NEMP-u - kable.

Na rys. 15 przedstawiono wartość modułu impedancji transferu w funkcji częstotliwości /zakres odpowiada praktycznie zakresowi widma NEMP-u/ zmierzoną dla kabli z płaszczem wykonanym z oplotu i dla kabla z litym ekranem. Wyniki wskazują, jak należało oczekiwać, że dla pojedynczego ekranu wykonanego z oplotu penetracja pola w głąb kabla jest znacznie większa niż dla kabli podwójnie ekranowanych bądź posiadających lity płaszcz.



Rys. 15. Moduł impedancji transferu w funkcji częstotliwości, dla różnych typów ekranu [5]

W tabelicy 2 [5] podano informacje o prądach indukowanych w powietrznych liniach telekomunikacyjnych i kablach przez impuls pola NEMP-u pozaatmosferycznego. Prądy indukowane przez NEMP w przewodnikach /kablach, liniach/ rzadko są groźne dla nich samych. Zakłócenia są jednak transmitowane do rozmaitych urządzeń i systemów dołączonych do linii. Jest to zasadniczy problem właścicieli i użytkowników tych systemów.

Tabelica 2

Prądy indukowane w liniach i kablach telekomunikacyjnych przez pozaatmosferyczny NEMP

	Linia naporowietrzna	Kabiel podziemny
Prąd szczytowy [kA]	5	1,5
Czas narostu [μs]	0.1	0.1-0.5
Czas trwania impulsu [μs]	1	1-5
Szybkość narostu prądu [kA/μs]	50	15

4.1.2. Wpływ pola na układy antenowe

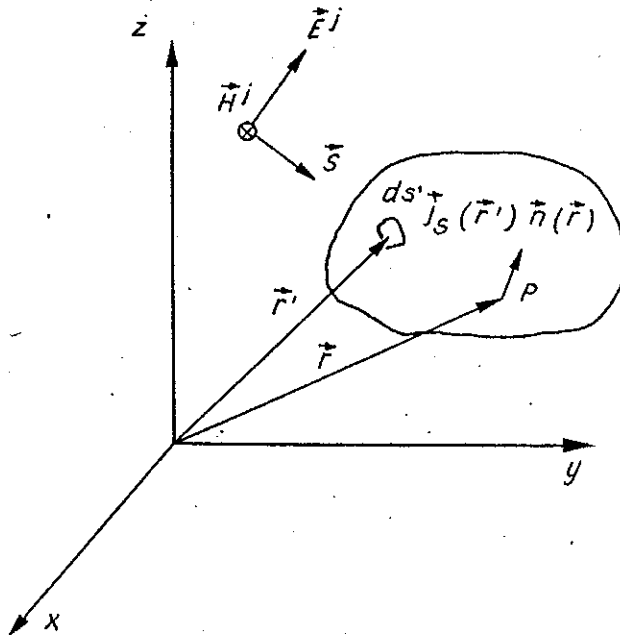
Termin układy antenowe dotyczy tutaj również pewnych innych obiektów, które w obecności pola mogą zachowywać się tak jak anteny odbiorcze /np. metalowe obudowy urządzeń elektronicznych/ [5], [11], [17]. Sprzężenie pomiędzy falą płaską rozchodzącą się w wolnej przestrzeni a ciałem doskonale przewodzącym może być opisane za pomocą, znanych z teorii elektromagnetyzmu, równań całkowych [5]:

$$\vec{n}(\vec{v}) \vec{E}^{\pm}(\vec{r}) = - \frac{j\eta}{4\pi k} \vec{n}(\vec{v}) \left\{ \int_S \vec{J}_S(\vec{v}') \cdot \left| \nabla \left(\frac{e^{-jk|\vec{v} - \vec{v}'|}}{|\vec{v} - \vec{v}'|} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + k^2 \cdot \frac{e^{-jk|\vec{v} - \vec{v}'|}}{|\vec{v} - \vec{v}'|} \right| ds' \right\} \quad (7)$$

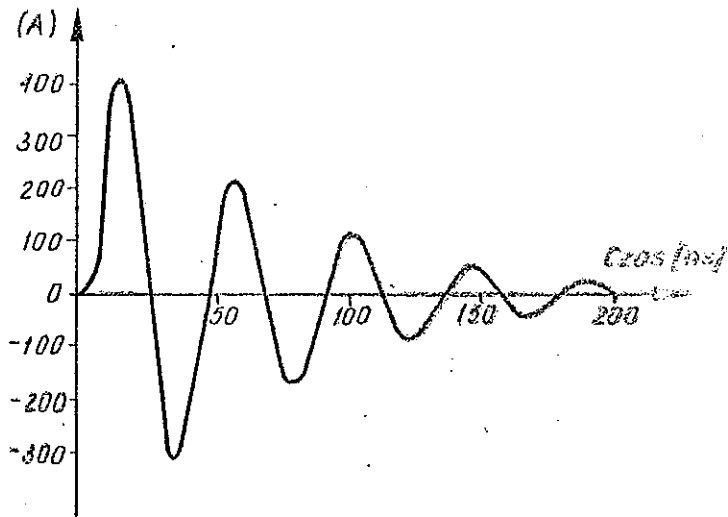
$$\vec{n}(\vec{v}) \vec{H}^{\pm}(\vec{v}) = - \frac{1}{4\pi} \vec{n}(\vec{v}) \left\{ \int_S \vec{J}_S(\vec{v}') \left| \nabla_x \frac{e^{-jk|\vec{v} - \vec{v}'|}}{|\vec{v} - \vec{v}'|} \right| ds' \right\}$$

gdzie /rys. 16/: Z_0 - impedancja falowa wolnej przestrzeni;
 k - liczba falowa; \vec{r} - wektor punktu P , usytuowanego na
 powierzchni ciała przewodzącego; \vec{r}' - wektor położenia elementu
 powierzchni tego ciała; \vec{n} - jednostkowy wektor normalny do
 powierzchni w punkcie P ; \vec{E}^i , \vec{H}^i - pola: elektryczne i magnetyczne;
 $\vec{J}_S(\vec{r})$ - gęstość prądu powierzchniowego wyindukowanego
 w bryle przez pole elektromagnetyczne.

Dla pewnego typu struktur, np: cienkich drutów /średnica
 drutu \ll długości fali i \ll długości drutu/ równania (7)
 znacznie upraszczają się i można je rozwiązać ogólnie przy-
 jętą metodą analizy numerycznej cienkich anten - metodą
 momentów. Rys. 17 przedstawia przebieg prądu zwarcia niesy-
 metrycznego wibratora o długości 3 m umieszczonego w polu
 typowego NEMP-u / $E_{szczyt} = 50$ kV/m; $B_{szczyt} = 150$ A/m;
 $t_{trwanie} = 500$ ns/. Anteny odpowiadają na pobudzenie typu
 NEMP oscylacjami gasnącymi wykładniczo, o okresie drgań
 wyznaczonym przez naturalną częstotliwość rezonansu anteny
 lub innego istotnego elementu w jej układzie.



Rys. 16. Sprzężenie pomiędzy falą TEM i bryłą doskonale
 przewodzącą o powierzchni S [5]



Rys. 17. Przebieg prądu zwarcia niesymetrycznego wibratora umieszczonego w polu elektromagnetycznym NEMP-u [17]

$H = 3 \text{ m}$, $E_{\text{szczyt}} = 50 \text{ kV/m}$, $B_{\text{szczyt}} = 180 \text{ A/m}$, $t_{\text{narostu}} = 10 \text{ ns}$, $t_{\text{trwania}} = 500 \text{ ns}$

Problemy rachunkowe niepomiarnie wzrastają ze stopniem komplikacji struktury antenowej poddanej działaniu pola. W tym momencie, szczególnie gdy zależy nam na dokładnych wynikach, rozwiązaniem alternatywnym, nawet w kwestii kosztów, staje się symulacja techniczna.

4.2. Wrażliwość elementów elektronicznych

Impuls prądu lub napięcia generowany przez NEMP na przykład w kablu telekomunikacyjnym dociera do skomplikowanych układów elektronicznych znajdujących się na końcu linii [5], [17]. Układy te składają się w większej części z wrażliwych, półprzewodnikowych elementów, które pod wpływem energii impulsu zakłócenia mogą ulec uszkodzeniu. W tabelicy 3 podano typowe minimalne poziomy energii powodującej uszko-

Tablica 3

Wrażliwość elementów elektronicznych

	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^0	10^2	10^4	10^6
Generatory,	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna
Transformatory, mierniki	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia			
Lampy elektronowe	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia			
Rezystory drutowe	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia			
Kondensatory	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Cewki	praca poprawna	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Tranzystory	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Diody	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Układy scalone	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Diody μ - falowe	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia					
Wrażliwe elementy komputerów	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia	próg zniszczenia				
Rezonatory elektryczne	praca poprawna	praca poprawna	próg zniszczenia	próg zniszczenia	próg zniszczenia				

□ - próg zniszczenia, ▨ - próg zakłócenia

▩ - praca poprawna

dzienia najczęściej spotykanych elementów obwodów elektronicznych. Przy krótszych impulsach ($t_{\text{trwanie}} < 1 + 0,1 \mu\text{s}$) uszkodzenia powstają w półprzewodnikach przy pewnej stałej energii impulsu, niezależnie od czasu jego trwania, ponieważ energia nie rozprasza się dostatecznie

szybko. Elementy półprzewodnikowe są najbardziej wrażliwe na uszkodzenia, tym niemniej należy spodziewać się uszkodzeń w innych elementach, takich jak: rezystory /szczególnie metalowo-tlenkowe/, kondensatory /elektrolityczne/, przekładniki i wskaźniki wychyłowe. Trzeba zwrócić uwagę na to, że podatność układów półprzewodnikowych na narażenia rośnie wraz ze zmniejszaniem się poziomów sygnałów użytecznych i mocy zasilania, co ma miejsce w przypadku układów LSI i VLSI. Równocześnie trudno sobie wyobrazić nowoczesny sprzęt elektroniczny bez ostatnich osiągnięć technologii elektronicznej.

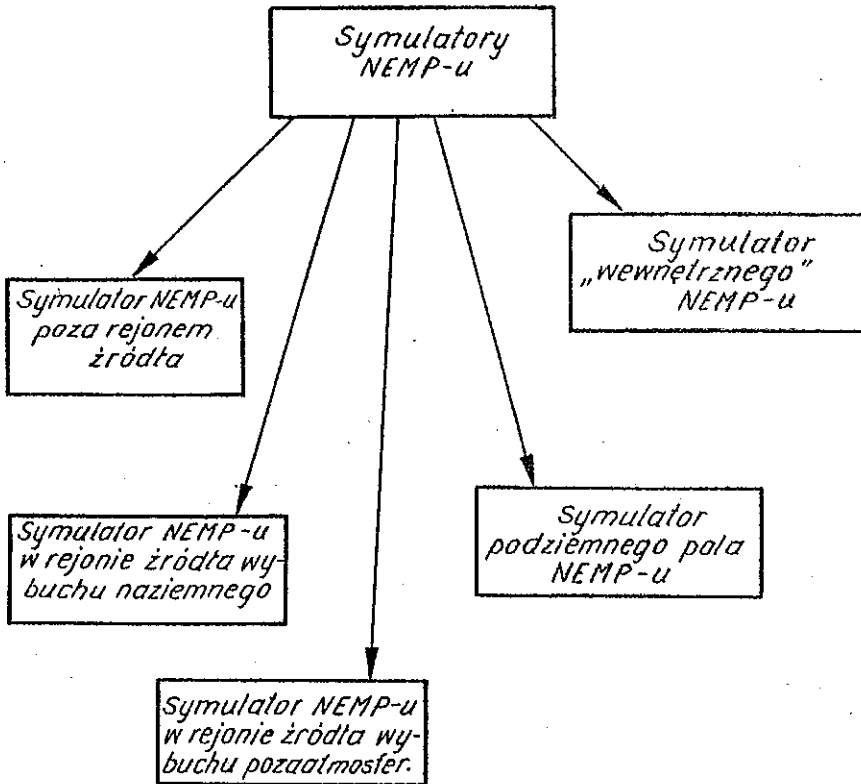
5. SYMULACJA NEMP-u

Zadaniem symulatora NEMP-u jest, w sposób maksymalnie wierny, odtworzyć efekt oddziaływania impulsowego pola elektromagnetycznego na sprzęt lub systemy poddane badaniom [5], [18 + 24], [33]. Niebagatelną rolę odgrywa w tym przypadku umiejętność trafnego przewidywania krytycznych warunków pracy testowanej aparatury. Jest jasne, że innym narażeniem będzie podlegał podziemny kabel telekomunikacyjny, a innym np. nisko lecący samolot, w którego poszyciu będą indukowały się prądy zarówno od fali padającej bezpośrednio z rejonu źródła, jak i od fali odbitej od powierzchni ziemi. Tak więc typ modelowanego środowiska NEMP-u narzuca jeden ze sposobów klasyfikacji symulatorów /rys. 18/.

W literaturze przedmiotu najbardziej eksponowane miejsca zajmują symulatory pola NEMP-u poza rejonem źródła i im zostanie poświęcone więcej uwagi. Istnieje kilka różnych metod symulacji efektów oddziaływania pola NEMP-u na sprzęt elektroniczny:

- promieniowanie polem impulsowym /badania w dziedzinie czasu/,
- promieniowanie polami ciągłymi /badania w dziedzinie częstotliwości/,

- iniekcja /"wetrzykiwanie"/ impulsów zakłócenia w węzły układów elektronicznych,
- iniekcja sygnałów ciągłych.



Rys. 18. Symulatory NEMP-u

Wybór metody symulacji jest determinowany wieloma czynnikami: możliwościami technicznymi i finansowymi inwestorów, rozmiarami testowanych obiektów, typem poszukiwanych informacji itp.

5.1. Promieniowanie pola impulsowego

Symulacji pola dokonuje się na poziomie realnych wartości impulsu pola NEMP-u [5], [18], [23], [25], tzn:

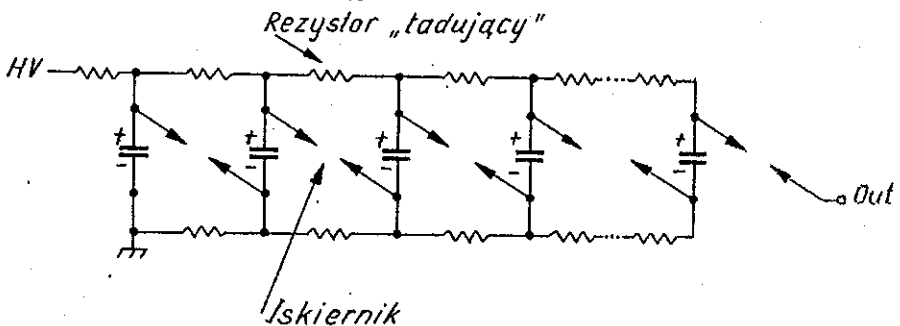
- a/ amplituda - ok. 50 kV/m,
- b/ czas narastania - 10 ns,
- c/ czas trwania - 250 ns,
- d/ polaryzacja - pionowa i pozioma.

Zalety tej metody to przede wszystkim: dokładne odwzorowanie interakcji pole-sprzęt i bezpośredni pomiar odpowiedzi układu na impuls pola NEMP-u. Podstawowymi składnikami symulatora tego typu są: źródło napięcia impulsowego oraz antena.

5.1.1. Źródła napięcia impulsowego

Wymagania narzucone generatorom impulsu [5], [33] o parametrach zbliżonych do wielkości charakterystycznych dla NEMP-u wiążą się przede wszystkim z żądaniem krótkiego czasu narastania zbocza impulsu / $t_{nar} \leq 10$ ns/. Niezbędne w procesach generacji tego typu impulsów są również źródła odpowiednio wysokich napięć / od około 100 kV do 10 MV/.

Na rys. 19 przedstawiono w sposób schematyczny najczęściej stosowany typ źródła napięcia impulsowego, tzw. generator



Rys. 19. Generator Marxa /schemat/ [25]

Marxa. Kondensatory C_0 są ładowane wysokim napięciem U_0 poprzez rezystancję ładowania R_C . Po przekroczeniu pewnego napięcia progowego iskiernik nr 1 zwiera się, po czym lawinowo zaczynają się zwierać następne iskierniki. W ten sposób napięcia na poszczególnych kondensatorach dodają się szeregowo. Napięcie wyjściowe grupy kondensatorów jest n razy wyższe od napięcia naładowania pojedynczego kondensatora. Kondensatory stosowane w tego typu obwodach powinny posiadać dużą zdolność magazynowania energii. Istnieją konstrukcje kondensatorów zdolne magazynować do 200 J na 1 kg swojej masy. Przeciętna wartość tego współczynnika dla typowych pojemności stosowanych w generatorach Marxa wynosi od 10 do 50 J/kg. Typowa bateria kondensatorów generatora impulsu może ważyć nawet kilka ton. Wzrost liczby stopni pojemnościowych, w celu osiągnięcia szczytowego napięcia rzędu megawoltów, powoduje wzrost indukcyjności własnej generatora. Utrudnia to generację impulsów o czasach narastania krótszych od 10 ns.

Istotnym elementem układu, przenoszącym energię zmagazynowaną w pojemnościach do anteny jest iskiernik wyjściowy /ozn.OUT, rys. 19/. Jego parametry są określone przez napięcie progowe /napięcie, przy którym iskiernik zwiera elektrody/ i tzw. czas zamknięcia. Czas zamknięcia zależy od odległości pomiędzy elektrodami iskiernika i powinien być możliwie krótki. Dla odmiany napięcie progowe, które powinno być maksymalnie wysokie, wymaga dużych odległości pomiędzy elektrodami iskiernika. Oba te przeciwstawne wymagania można dobrze pogodzić, umieszczając elektrody w atmosferze odpowiednich gazów / SF_6 , N_2 / o podwyższonym ciśnieniu. Energia wytworzona przez generator jest transmitowana do następnego stopnia układu, jakim jest antena. Słowem "antena" będą określane tutaj również pewne specyficzne struktury, nie promieniujące fali swobodnej, lecz wytwarzające pola w swoim wnętrzu. Zasadniczo, różni się dwa typy anten stosowanych w technice symulacyjnej:

- struktury z falą prowadzoną,
- anteny z falą promieniowaną.

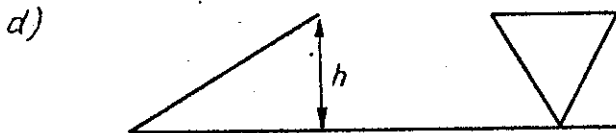
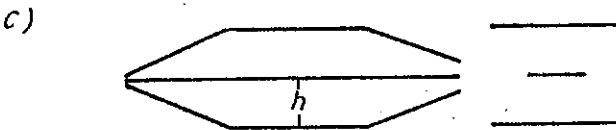
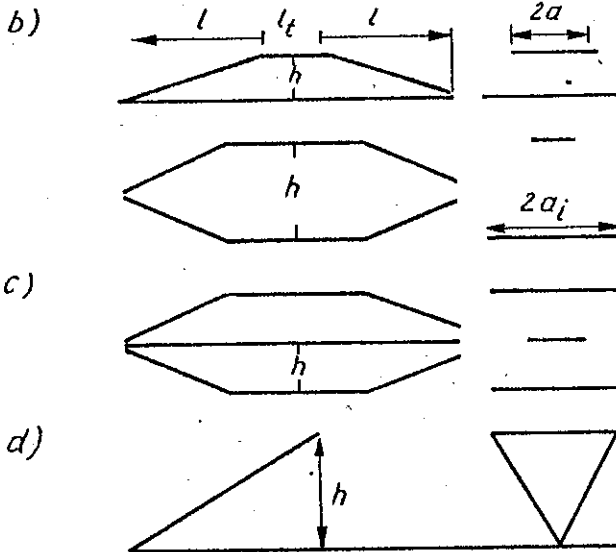
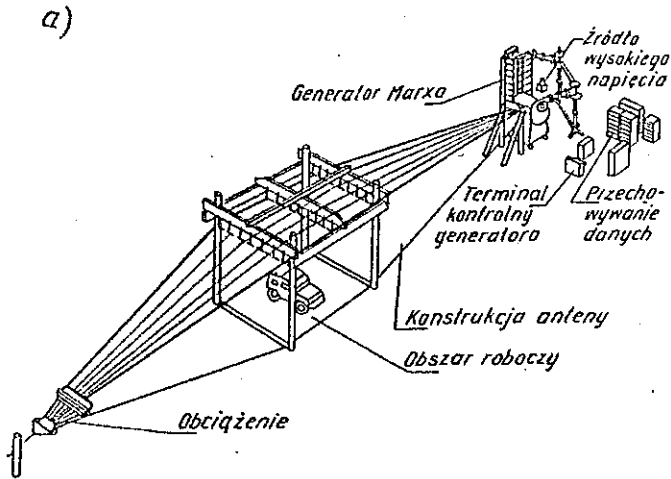
5.1.2. Symulator z falą prowadzoną

Ten typ symulatora wykorzystuje "antnę", będącą szczególnego rodzaju linią transmisyjną, zawierającą pole elektromagnetyczne wewnątrz swojej struktury [5], [18], [22 + 24]. Pola emitowane poza obręb "anteny" są niewielkie. "Anteny" tego typu przybierają różne formy /rys. 20/:

- a/ asymetryczną,
- b/ symetryczną,
- c/ stożkową.

Rezystancja obciążenia "anteny" powinna być równa impedancji falowej linii transmisyjnej dla propagowanego modu fali /w tym przypadku dla modu TEM/. Dokładne dopasowanie obciążenia pozwala uniknąć odbić fali od końca linii i tym samym zakłóceń rozkładu pola /praktycznie warunku tego nie da się zrealizować/. Jeżeli rozmiary anteny na to pozwalają, powinna być ona umieszczona w specjalnie ekranowanym budynku, tak by sprowadzić do minimum wzajemne wpływy środowiska zewnętrznego i symulatora.

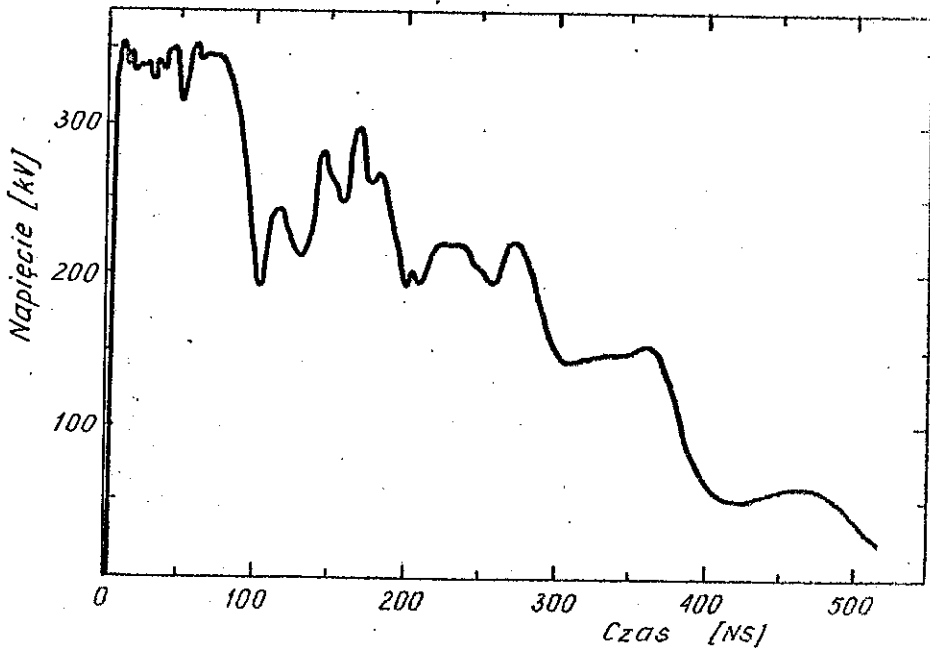
"Anteny" są wykonywane bądź z litych blach, bądź z sieci równoległych cienkich przewodów. W tym drugim przypadku łatwiej jest analizować rozkład pola w antenie metodami numerycznymi, np. metodą momentów /MOM/ stosowaną do analizy tzw. cienkich anten. W ten sposób można uniknąć /przynajmniej częściowo/ trudnego procesu "mapowania" rozkładu pola w antenie za pomocą pomiaru. Aparaturę przeznaczoną do testowania umieszcza się w tzw. obszarze testowym. Obszar ten jest znacznie mniejszy od anteny. Rozkład pola i wartość impedancji falowej anteny w obszarze roboczym powinny być precyzyjnie określone.



Rys. 20. Symulatory z falą prowadzoną:
 a - widok ogólny; b - struktura niesymetryczna; c - symetryczna; d - stożkowa [5]

Na rys. 21 przedstawiono kształt i parametry impulsu pola elektrycznego symulatora GESIBAN w Szwajcarii. Dane techniczne tego symulatora [5] :

typ anteny	- symetryczna,
całkowita długość	- 20 m,
obszar testowy	- $2,5 \times 6 \times 5 \text{ m}^3$,
generator impulsu	- 450 kV/600 J,
t_{narostu}	- 8 ns,
t_{trwania}	- 250 ns,
amplitude pola	- 100 kV/m,
impedancja falowa	- 93 om.



Rys. 21. Impuls napięciowy generatora symulatora GESIBAN /Szwajcaria/ [22]

Następujące przykłady ilustrują inne symulatory tej rodziny:

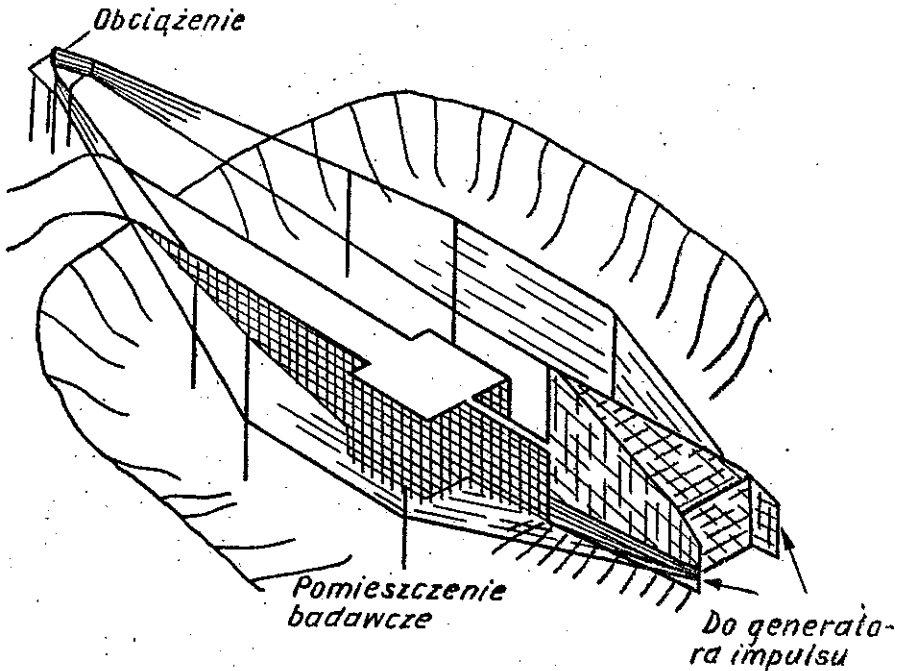
a/ ALECS /Albuquerque, USA/ [5]

typ anteny	- asymetryczna,
długość	- 113 m,
obezar roboczy	- $13 \times 24 \times 15 \text{ m}^3$,
generator Van der Graffa	- 2,2 MV/1,8 kJ,
t_{narostu}	- 6 ns,
t_{trwania}	- 150 ns,
amplituda pola	- 125 kV/m,
impedancja falowa	- 95 omów;

b/ DIESES /RFN/ [5]

typ anteny	- stożek /profilowany siecią cienkich przewodów/,
obezar roboczy	- $8 \times 12 \times 20 \text{ m}^3$,
generator Marxa	- 1 MV,
t_{narostu}	- 10 ns,
t_{trwania}	- 1 ns,
impedancja falowa	- 90 omów.

Największym symulatorem z falą prowadzoną jest ATLAS 1 /USA/ [5] o rozmiarach: 410 m długości, 58 m wysokości i 105 m szerokości. Dwa generatory Marxa wytwarzają przeciwnie skierowane napięcia /po ok. 5 MV/, każde, które po złożeniu pozwalają osiągnąć napięcie 10 MV. We wnętrzu ATLASA zainstalowano drewniany podest, na którym są umieszczane testowane urządzenia lub maszyny /rys. 22/. Unika się, dzięki temu, wpływu skończonej przewodności ziemi na rozkład pola w obezarze roboczym.



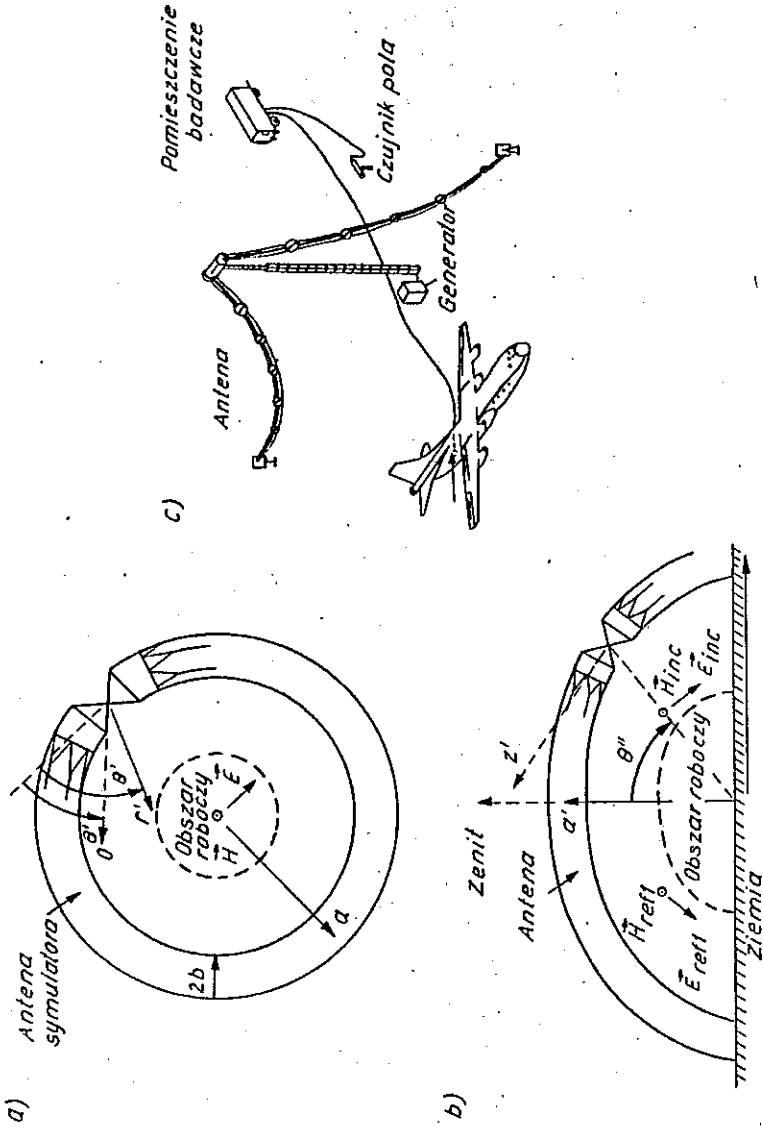
Rys. 22. Symulator ATLAS 1 /USA/ [18]

Jak można zorientować się z tych kilku danych technicznych, podstawową wadą symulatorów z falą prowadzoną może być koszt budowy i trudności technologiczne na etapie konstruowania generatorów impulsu. Zalety to przede wszystkim dość wierne przybliżenie środowiska NEMP-u, możliwość regulacji i zmian parametrów pola, niezła kompatybilność z otoczeniem /brak pola promieniowanego/.

5.1.3. Symulator z falą promieniowaną

Pole elektromagnetyczne w tego typu symulatorach [5], [18], [25] jest swobodnie promieniowane przez strukturę antenową. Są dwa podstawowe rodzaje symulatorów z falą promieniowaną:

- 1/ z poziomą składową pola elektrycznego - wykonywane z dipolem lub dużą anteną ramową, zawieszoną ok. 20-30 m nad ziemią /rys. 23a/,



Rys. 23. Anteny symulatorów z falą promieniowaną [18], [25]:
 a - antena widziana w płaszczyźnie ziemi; b - antena widziana w płaszczyźnie prostopadłej do ziemi; c - widok ogólny

2/ z pionową składową pola elektrycznego - z anteną stożkową lub dipolem /rys. 23b/.

Przykłady realizacji:

a/ składowa pionowa pola E: TEMPS /USA/ [5]

długość - 300 m,
 wysokość - powyżej 30 m,
 generator - 7 MV,
 t_{narostu} - 8 ns;

b/ pozioma składowa pola E: HDP /USA/ [5]

długość - 170 m,
 wysokość - 34 m,
 generator - 2x2,5 MV,
 t_{narostu} - 6 ns

Obiekty poddane badaniom umieszczają się w bezpośredniej bliskości anten bądź wewnątrz obszaru objętego ramą anteny /w przypadku anten ramowych/. Zaletą tego typu symulatorów jest wierność w odtworzeniu sprzężenia pola NEMP-u i obiektu, możliwość testowania b. dużych urządzeń i symulowanie efektu odbicia fali elektromagnetycznej od powierzchni ziemi.

5.2. Symulatory z falą ciągłą

W tej metodzie, urządzenie jest badane [5], [18] przy określonej częstotliwości fali i ustalonej amplitudzie pola. Po pomiarze, zmienia się częstotliwość roboczą /oraz ewentualnie inne parametry/ i dokonuje następnego testu. W ten sposób bada się oddziaływanie kolejnych składowych widma NEMP-u na sprzęt. Pomiaru są bardzo pracochłonne, ale metoda ta nie wymaga tak wysokiego zaangażowania środków technicznych jak te przedstawione w pkt. 5.1.

5.3. Iniekcja sygnałów ciągłych

Metoda ta [5] polega na "wstrzykiwaniu" zakłóceń w postaci prądów o małych amplitudach i określonych częstotliwościach w strukturę badanego urządzenia. Tym sposobem mierzy się m.in. impedancje transferu kabli w funkcji częstotliwości widma NEMP-u. Pomiaru są prowadzone dla obiektów, które z racji swoich rozmiarów /długie przewody, linie, kable/ nie mogą być testowane w inny sposób. Metodą tą symuluje się również podziemne środowisko NEMP-u.

5.4. Iniekcja sygnałów impulsowych

Impuls napięcia lub prądu zostaje wprowadzony bezpośrednio na zaciski wejściowe układu [5]. Wartości wprowadzanych zakłóceń muszą być starannie oszacowane, o ile wyniki badań mają być wiarygodne. Podstawowym problemem tej metody /podobnie jak przy iniekcji sygnałów ciągłych/ jak znalezienie skutecznego sposobu "wstrzykiwania" prądu, tak aby nie zmienić przy okazji charakterystyki generatora impulsu bądź parametrów badanego obiektu. Metoda służy przede wszystkim do badania linii i kabli telekomunikacyjnych.

5.5. Metrologiczne problemy symulacji

Ocena wpływu impulsu elektromagnetycznego na złożone systemy lub układy elektroniczne wymaga setek, a nawet tysięcy, punktów testowych dla określenia indukowanych stanów przejściowych [5], [19], [22], [26 + 28], przede wszystkim prądów w wewnętrznych przewodach systemu.

Realizacja odpowiedniego systemu pomiarowego wiąże się więc z wprowadzeniem w badaną strukturę pewnej liczby czujników połączonych przewodami odprowadzającymi informacje pomiarową z urządzeniami kontroli, sterowania, wizualizacji i przechowywania danych. Nawet nie wdając się w bliższą analizę tego zagadnienia, można zdać sobie sprawę ze skali problemów stojących przed zespołem metrologów:

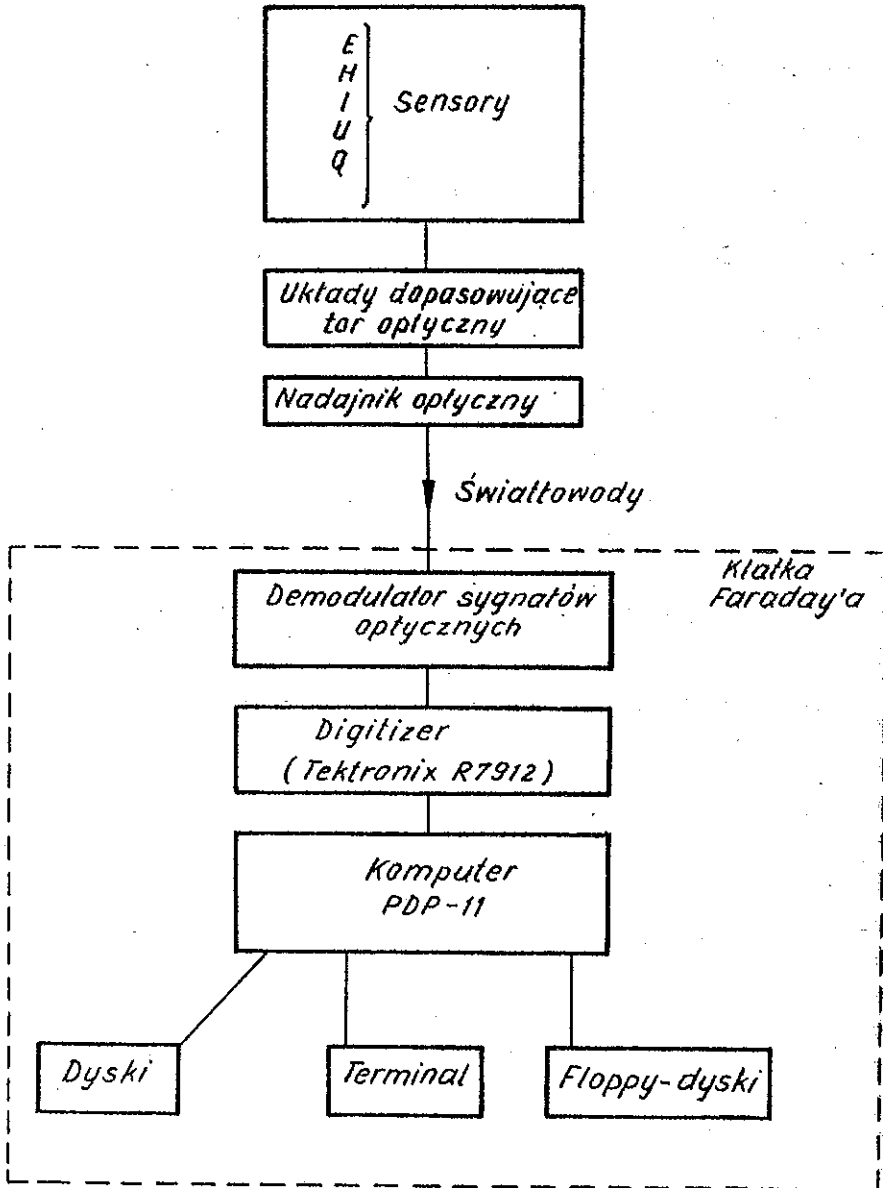
- wszelkie czujniki wprowadzone w konstrukcję urządzenia mogą zmienić jego parametry fizyczne i elektryczne;
- przewody odprowadzające dane pomiarowe zakłócają rozkład pola w symulatorach i na odwrót - pole symulatora deformuje informacje transmitowaną łączem;
- szybkość procesów wymaga odpowiedniego sprzętu do wizualizacji i obróbki danych, takich jak: oscyloskopy impulsowe $f_{gr} > 100$ MHz/ z pamięcią, digitizery sygnałów przejściowych, szybkie kamery do utrwalania obrazów zakłóceń, komputery do składowania i obróbki danych.

Na rys. 24 przedstawiono schemat systemu pomiarowego symulatora GESIBAN Szwajcarii opisanego w punkcie 5.1.2 [22].

Czujniki /sensory/ pola można zgrupować w trzy podstawowe klasy, zależnie od typu realizowanego przez nie pomiaru:

- 1/ sensory pola w wolnej przestrzeni $\{E, H, \text{rys. 24}\}$ - służą przede wszystkim do "mapowania" /oznaczania/ rozkładu pola w symulatorach;
- 2/ sensory przejściowych prądów i napięć $\{U, I\}$ - stosowane do pomiarów prądów i napięć indukowanych w wewnętrznych przewodach układu; wykonywane w postaci szerokopasmowego czujnika transformatorowego, w którym badane przewody służą jako jednozwojowy obwód pierwotny;
- 3/ sensory do pomiaru prądów i ładunków powierzchniowych $\{Q\}$.

Dane z czujników pomiarowych są przesyłane do jednostki kontrolno-sterującej za pomocą łączy światłowodowych - co zapewnia niezbędną izolację informacji zbieranej z czujników od środowiska elektromagnetycznego tworzonego przez symulator. Informacja przesyłana światłowodami wymaga niezbędnej obróbki sygnałów /modulatory, nadajniki i demodulatory sygnałów optycznych/. Wpływa to niekorzystnie na stopień komplikacji stanowiska pomiarowego. Ostatnim członem systemu jest z reguły komputer. Jest on automatycznym kontrolerem i zawiadowcą procesów pomiarowych. Zbiera, obra-



Rys. 24. Schemat systemu pomiarowego GESIBAN /Szwajcaria/
[22]

bia i przechowuje dane. Schemat z rys. 24 nie zawiera wielu pomocniczych, ale istotnych dla całości systemu pomiarowego urządzeń, takich jak: oscyloskopy, multipleksery, kompensatory, kamery filmowe. Wszystko to razem jako system wymaga dużych nakładów finansowych oraz, a może przede wszystkim, dostępu do najnowszych technologii i technik pomiarowych.

6. OCHRONA URZĄDZEŃ I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH PRZED POLEM NEMP-u

Definiując bardzo ogólnie problem ochrony [2], [5], [17], [27], [29], [30 + 32], można powiedzieć, że zabezpieczenie urządzeń i systemów elektronicznych przed wpływem środowiska elektromagnetycznego ma na celu wyeliminowanie indukowanych przejściowych prądów i napięć oraz pól zewnętrznych tak, aby urządzenia nie zostały uszkodzone i funkcje przez nie zrealizowane nie uległy deformacji. Ochrona przed narażeniami musi opierać się na dobrej znajomości źródła zakłóceń i sposobu jego sprzężenia z zabezpieczanym systemem. Zasady ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym NEMP-u są stosunkowo proste. Większość z nich zostało zaczerpniętych z technik zabezpieczenia przed zakłóceniami wysokoczęstotliwościowymi stosowanymi w kompatybilności elektromagnetycznej. Problem pojawia się wtedy, gdy należy zoptymalizować relację kosztów systemu z jego efektywnością. Projektant zabezpieczenia musi zadać sobie kilka zasadniczych pytań:

- czy system musi bezwzględnie przez cały czas i w każdych warunkach funkcjonować?,
- czy dopuszczalne są zakłócenia lub deformacje odwracalne?,
- czy system może wytrzymać krótką awarię?,
- czy dopuszczalne jest uszkodzenie jednego lub wielu podsystemów?,

W praktyce dokładne zweryfikowanie skuteczności zastosowanych środków metodami symulacji komputerowej jest bardzo

trudne, toteż zwykle wybierane są rozwiązania lepsze, a więc i droższe niż byłoby to konieczne.

Technika ochrony systemów i urządzeń elektronicznych przed wpływami impulsowego środowiska elektromagnetycznego obejmuje dwie podstawowe grupy działań:

- zabezpieczanie przed promieniowaniem pola fali "swobodnej",
- ochronę przed narażeniami przewodzonymi galwanicznie do układów /przejściowe prądy i napięcia/.

Ekranowanie elektromagnetyczne jest dominującym sposobem ochrony przed działaniem niepożądanych pól elektromagnetycznych.

6.1. Ekranowanie elektromagnetyczne

6.1.1. Ekranowanie pomieszczeń

Pomieszczenie otacza się ekranem [5], [17], [25] - puszką wykonaną z dobrze przewodzącego bądź ferromagnetycznego materiału. Grubość materiału, jego parametry elektryczne i magnetyczne /przewodność, przenikalność magnetyczna/ decydują o stopniu tłumienia ekranu. Tłumienie fali elektromagnetycznej przez nieskończone rozległą płaszczyznę jest sumą części fali odbitej od płaszczyzny i części fali osłabionej w trakcie dyfuzji przez ścianę [5]:

$$a_3 = a_R + a_D$$

$$a_R = 20 \lg 33.5 \sqrt{\frac{\sigma}{f \cdot \mu_r}} \quad [\text{dB}]$$

$$a_D = 17.3 a \sqrt{\sigma \cdot \mu_r \cdot f} \quad [\text{dB}]$$

gdzie: f - częstotliwość,
 a - grubość ściany,
 σ - konduktywność materiału ściany - ekranu,
 μ_r - względna przenikalność magnetyczna.

Teoretyczne wartości tłumienia nie są osiągnięte w praktyce, ponieważ z reguły ekrany posiadają otwory /okna, drzwi, otwory wentylacyjne itp./ zmniejszające efektywność ekranowania. Należy przestrzegać kilku podstawowych zasad związanych z projektowaniem ekranowanego pomieszczenia:

- blachy ekranu powinny być łączone wzdłuż swoich krawędzi; istotny jest bardzo dobry kontakt wszystkich metalowych części ekranu;
- materiał ekranu powinien mieć jak największą przewodność i przenikalność magnetyczną;
- zewnętrzne linie zasilające, kable i przewody uziemiające należy wprowadzić do ekranu w jednym miejscu; powinny one przechodzić przez odpowiednie filtry umieszczone na zewnątrz ekranu;
- wszelkie instalacje doprowadzające wodę, kanalizację, gaz itp. powinny być złączone z ekranem /kontakt elektryczny/; długość metalowych części wewnątrz ekranu, nie połączonych z jego ścianami powinno być mała w porównaniu z długością fali zewnętrznego pola elektromagnetycznego;
- zasilanie urządzeń wewnątrz ekranu powinno być oddzielone od zewnętrznej linii energetycznej przez zastosowanie prostowników, akumulatorów, przetworników prądu lub napięcia - daje to kilkunastodecybelowe tłumienie procesów przejściowych przewodzonych do wnętrza ekranu.

Przestrzeganie wyżej podanych zasad prowadzi do zminimalizowania strat efektywności ekranowania.

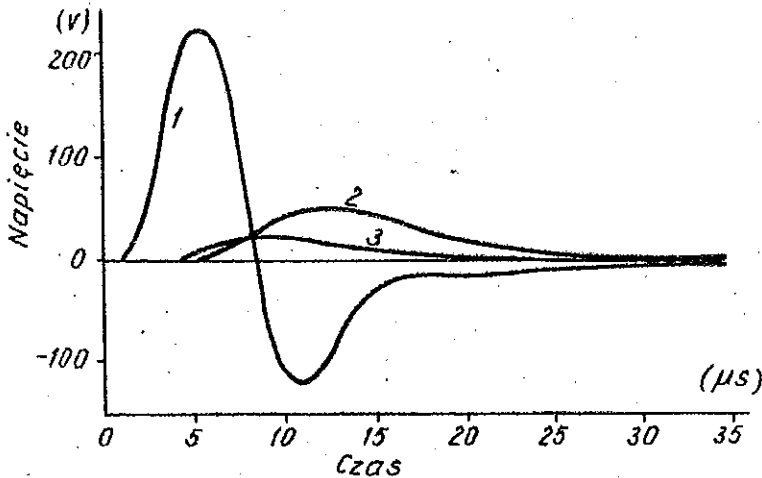
6.1.2. Ekranowanie kabli

Ekranowanie kabli telekomunikacyjnych są wykonywane z jednolitego materiału bądź z tzw. plecionki. Ekranowanie z plecionki, zdecydowanie mniej kosztowne, są mniej odporne na zakłócenia impulsowe o krótkim czasie narostu niż lite płaszczyzno ekranowe [5], [8], [13], [30]. Kryterium skuteczności ekranowania

może być oceniane za pomocą impedancji transferu /pkt.4.1.1/. Im wartość tej impedancji jest mniejsza, tym słabsze są sprzężenia pomiędzy zewnętrznym środowiskiem elektromagnetycznym a centralnym przewodem /przewodami/ kabla. W celu zmniejszenia impedancji transferu stosuje się następujące środki:

- wielokrotnione ekrany /por. rys. 15/,
- podwójne ekrany z tego samego materiału oddzielone dielektrykiem,
- wielokrotne ekrany z różnych materiałów oddzielone dielektrykiem /struktury typu "sandwich"/.

Na rys. 25 przedstawiono porównanie napięć indukowanych wewnątrz kabli ekranowanych trzema różnymi technikami.



Rys. 25. Porównanie napięć indukowanych wewnątrz ekranowanych kabli [5] /prąd w ekranie identyczny we wszystkich trzech przypadkach/

1 - ekran z jednej warstwy Al /0.6 mm/; 2 - ekran podwójny: warstwa stali /0.4 mm/, $\mu_0 = 50$, na niej warstwa Al /0.2 mm/; 3 - struktura typu "sandwich": warstwa Al /0.2 mm/ - zewnętrzna, warstwa stali /0.2 mm/, $\mu_0 = 50$, warstwa Al /0.2 mm/ - wewnętrzna

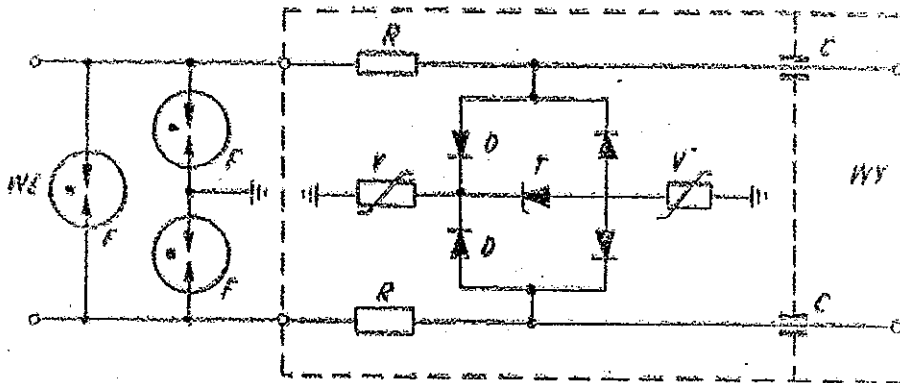
Krzywa 1 reprezentuje ekran pojedynczy, a krzywe 2 i 3 - struktury typu "sandwich". Przewaga ekranów wielokrotnych jest wyraźna, nie należy jednak zapominać o ich zwielokrotnionym koszcie.

6.2. Ochrona przed narażeniami przewodzonymi

Ochrona przed penetracją niepożądanych przejściowych napięć i prądów do wnętrza systemu [5], [17], [29], [31] wykorzystuje albo środki redukujące amplitudę zakłócenia do dopuszczalnego poziomu bądź urządzenia separujące galwanicznie wejścia układu od źródła zakłóceń.

Do środków redukujących amplitudę narażeń należą przede wszystkim różnego typu iskierniki i elementy półprzewodnikowe, takie jak: waryatory i diody Zenera. Iskierników używa się w tych miejscach układu, w których należy spodziewać się dużych wartości indukowanych energii. Napięcie "zapłonu" iskierników jest funkcją szybkości narastania napięcia na elektrodach $U_{\text{prog}} = f\left(\frac{du}{dt}\right)$. Im szybciej napięcie rośnie, tym wyższe jest napięcie "zapłonu" - efekt niekorzystny z punktu widzenia ochrony przed działaniem NEMP-u, indukującym zjawiska przejściowe /por. tabl. 2/ o krótkich czasach narastania. Stosowanie diod Zenera i waryatorów limitowane jest przede wszystkim ich pojemnościami własnymi /rzędu od 100 nF do 1 μ F/, które mogą zmienić charakterystyki urządzeń lub działać jak filtr dolnoprzepustowy. Regułą technik zabezpieczających układy elektroniczne jest stosowanie kombinacji różnych elementów /rys. 26/ tak, aby optymalnie wykorzystać ich własności.

Separacja galwaniczna wejścia układu od źródła zakłócenia polega na korzystaniu z łączy światłowodowych lub falowodów pracujących na częstotliwości nośnej powyżej górnej granicy widma NEMP-u. Z metodą tą związany jest jednak dość istotny wzrost stopnia komplikacji układu. Niezbędne stają się wszelkie stacje pośrednie sygnałów, np.: modulatory optyczne, demodulatory itp.



rys. 26. Obwód ochronny linii transmisji symetrycznej [5]

Na zakończenie warto podać informację, że np. w USA już 10 lat temu wydawano rocznie ok. 250 mln dolarów na zabezpieczanie systemów wojskowych i cywilnych przed skutkami NEMP-u, a w 1981 roku przeznaczono ok. 20 mld tylko na "przebudowę i uodpornienie systemów telekomunikacyjnych i telekontroli na impuls elektromagnetyczny".

7. WYMAGANIA NA ODPORNOŚĆ URZĄDZEŃ NA POLA NEMP-u

Celem kontrolowania i badania odporności urządzeń i systemów na impuls elektromagnetyczny [34] jest ocena kompatybilności sprzętu w przewidywanym środowisku pracy. Proces kwalifikowania musi rozpocząć się od zdefiniowania zbioru danych, łatwo i szybko weryfikowalnych, opisujących oczekiwane środowisko NEMP-u /amplituda, kształt impulsu itp./, przy założeniu najbardziej niekorzystnych warunków pracy sprzętu. Badane urządzenie jest następnie testowane

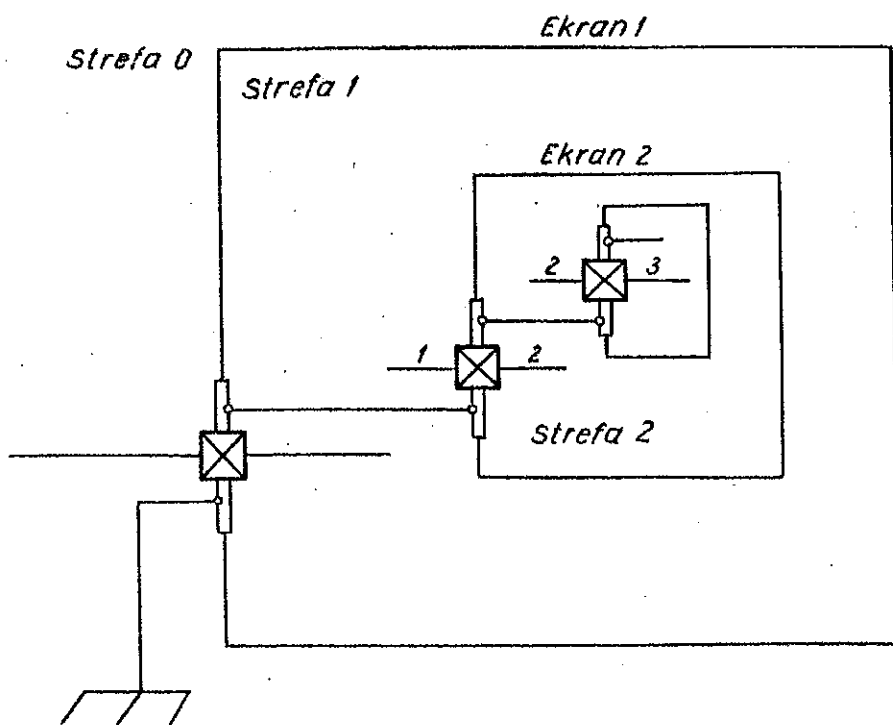
w kontrolowanych warunkach narażenia elektromagnetycznego /symulatory/ celem ostatecznej oceny jego odporności. O ile wynik testu jest zgodny z założonym na etapie konstruowania poziomem odporności, urządzeniu zostaje przydzielona odpowiednia klasa odporności ze względu na NEMP /analogicznie do klas odporności na narażenia klimatyczne czy mechaniczne/.

W świecie do niedawna nie istniały normy kwalifikujące sprzęt ze względu na odporność na impuls elektromagnetyczny pochodzenia nuklearnego. Nawet tak obszerna norma, jaką jest wojskowa norma USA, tj. MIL STD 461 i jej pochodne 462 i 463, zawierające przecież m.in. wymagania co do odporności na narażenia ciągłe i impulsowe, nie uwzględniła narażeń związanych z NEMP-em. Prawdopodobnie najnowsza edycja tej normy /MIL STD 464/ zawiera już wymagania na odporność na NEMP, ale niestety była ona dla autorów opracowania niedostępna. W kilku krajach rozwiniętych stworzono w ostatnich latach normy i przepisy określające odporność urządzeń na impuls elektromagnetyczny pochodzenia nuklearnego. Dla przykładu przedstawiono poniżej wartości parametrów, zdefiniowanych przez Ministerstwo Obrony RFN, do klasyfikacji urządzeń na odporność ze względu na NEMP [34]. Zasadniczo rozróżnia się dwa typy odporności:

- 1/ na narażenia propagowane w postaci pola fali swobodnej;
- 2/ na narażenia propagowane wzdłuż przewodów, tzw. narażenia przewodzone.

Klasy S0 A i B do S4 A i B oznaczają odporność sprzętu na promieniowanie, zaś klasy L1 A i B do L11 A i B - odporność na narażenia przewodzone. Etykieta A informuje, że sprzęt w warunkach narażenia pracuje bez zakłóceń, natomiast B oznacza, że praca układu ulega istotnym zakłóceniom, ale elementy nie uszkodzają się i mogą spełnić swoją rolę po ustąpieniu narażenia.

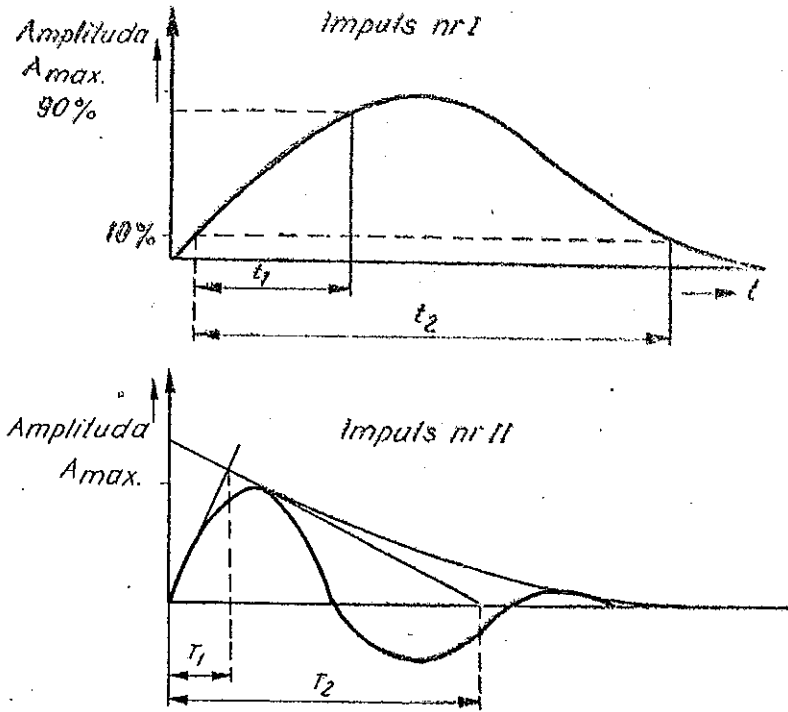
Podstawą wszystkich rozważań poprzedzających ustanowienie klas typu S /promieniowanie/ było tzw. strefowe uporządkowanie poziomu zagrożeń /rys. 27/. Przyjmuje się, że w strefie 0 występuje pole "typowego" pozaatmosferycznego NEMP-u / $E_{szczyt} \approx 50 \text{ kv/m}$, $t_{nar} \approx 10 \text{ ns}$, $t_{trw} \approx 250 \text{ ns}$ /, w strefie 1 pole to jest osłabione o 20 dB, w strefie 2 o 40 dB itd.



Rys. 27. Podział stref zagrożenia impulsem elektromagnetycznym

Zdefiniowano następujące klasy odporności:

- klasa S0 : sprzęt umieszczony w strefie 0 może pracować /A/ lub "przeżywa" /B/ w polu generowanym przez typowy NEMP - pozaatmosferyczny;



KLASY	Impuls	A(max)	t_1	t_2	T_1	T_2
L1A i B	I	$\pm 200 \text{ kV}$	$1 \mu\text{s}$	1ms		
	II	5 kV			5ns	$1 \mu\text{s}$
L2A i B	I	$\pm 50 \text{ kV}$	$1 \mu\text{s}$	1ms		
	II	5 kV			5ns	$1 \mu\text{s}$
L3A i B	I	$\pm 10 \text{ kV}$			5ns	$10 \mu\text{s}$
L4A i B	II	5 kV			5ns	$1 \mu\text{s}$
L5A i B	II	5 kV			5ns	1ms
L6A i B	II	1 kV			5ns	$1 \mu\text{s}$
L7A i B	II	1 kV			5ns	1ms
L8A i B	II	$0,5 \text{ kV}$			5ns	$1 \mu\text{s}$
L9A i B	II	$0,5 \text{ kV}$			5ns	1ms
L10A i B	II	$0,1 \text{ kV}$			5ns	$1 \mu\text{s}$
L11A i B	II	$0,1 \text{ kV}$			5ns	1ms

Rys. 28. Impulsy testujące odporność na narażenia przewodzone

- klasa S1, S2, S3, S4: sprzęt umieszczony w strefach 1, 2, 3, 4 może pracować (A) lub "przeżywa" (B) w polach standardowego NEMP-u osłabionego odpowiednio 20, 40, 60, 80 dB.

Wartości parametrów określających odporność typu L /przewodowa/ zdefiniowano po oszacowaniu wyników testów systemów i sprzętu umieszczonych w symulowanym środowisku NEMP-u. Nie ma bezpośredniej relacji między klasą odporności na narażenia przeprowadzone a odpornością na narażenia promieniowania.

Na rys. 28 przedstawiono kształty i podstawowe parametry impulsów testujących odporność sprzętu na narażenia przewodzone. Tego rodzaju impulsy napięcia podaje się na wszelkie wejścia układu /równocześnie lub szeregowo/ i bada się ich wpływ na pracę lub stan fizyczny elementów układu. W tabeli rys. 28 podano również klasy L odporności i odpowiadające im parametry impulsów testujących.

B. ZAKOŃCZENIE

W materiale tutaj przedstawionym starano się poruszyć wszystkie zasadnicze aspekty i problemy związane z impulsem elektromagnetycznym pochodzenia nuklearnego. Literatura tego przedmiotu jest bardzo bogata i praktycznie dokładne śledzenie wszelkich informacji mających związek z NEMP-em bądź jego wpływem na środowisko elektromagnetyczne jest niemożliwe. Sztaby ludzi zajmują się badaniami obejmującymi zazwyczaj tylko drobny wycinek całości zagadnienia. Praktycznie każdego dnia miliony dolarów są zaangażowane w działania mające na celu uodpornienie wszelkich systemów i urządzeń militarnych, a także tak ważnych, z punktu widzenia funkcjonowania państwa, systemów jak sieci telekomunikacyjne. Zwraca uwagę fakt, że jedną z wiodących ról w dziedzinie badań NEMP-u odgrywają kraje tradycyjnie neutralne, takie jak: Szwecja czy Szwajcaria. Dowodzi to wszystko

razem, że w krajach wysoko rozwiniętych problemowi NEMP-u została nadana bardzo duża ranga. Wydaje się również, że kraje których dotyczy to nie stać było na zajmowanie się zagadnieniami związanymi z impulsem elektromagnetycznym pochodzenia nuklearnego prędzej czy później będą zmuszone podporządkować się wymaganiom na odporność sprzętu elektronicznego na impuls NEMP-u, wymaganiom które już obowiązują w krajach rozwiniętych. Pomijając inne względy może stać się tak dlatego, że w przeciwnym przypadku wszelkie próby eksportu urządzeń elektronicznych będą skazane z góry na niepowodzenie. Uodparnianie urządzeń, systemów czy sieci telekomunikacyjnych na działanie NEMP-u powinno zacząć się już w fazie projektowania tych obiektów. Doprowadzenie urządzenia do stanu odporności na impuls elektromagnetyczny, już po jego wyprodukowaniu może okazać się drogie, nieefektywne, czasochłonne i nie zawsze możliwe. Dlatego też dobry konstruktor sprzętu telekomunikacyjnego powinien posiadać podstawowe informacje o środowisku elektromagnetycznym, w jakim efekt jego pracy będzie się znajdował i jakim narażeniom będzie podlegał. Badania NEMP-u przyniosą wiedzę o jakościowym i ilościowym obrazie narażeń sprzętu i są niezbędne dla całości wiedzy o środowisku elektromagnetycznym.

WYKAZ LITERATURY

1. Longmire C.L.: On the Electromagnetic Pulse Produced by Nuclear Explosion. IEEE Transaction on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
2. Ricketts L.W., Bridges J.E., Miletta J.: EMP Radiation and Protective Techniques. J.Wiley and Sons, New York 1976.
3. Longmire C.L.: EMP Environments from Nuclear Explosions at high - altitude and at the ground surface.

4. Appert K.: On the EMP of high altitude nuclear explosions. EMC-Symp., Montroux 1977.
5. Ianovici M. /edit/; Compatibilit e  lectromagn tique. Presses Polytechniques Romandes, Lozanna 1983.
6. Higgins D.F., Lee K.S.H., Martin L.: System Generated EMP. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
7. URSI factual statement on nuclear EMP and associated effects. Reports, PA.07.84.
8. Casey K.F., Vance E.F.: EMP coupling through cable shields. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
9. Shumpert T.H., Galloway D.J.: Finite length cylindrical scatterer near perfectly conducting ground - a transmission line mode approximation, *ibid.*
10. Scharfman W.E. et al.: EMP coupling to power lines, *ibid.*
11. Lee K.S. et al.: EMP Response of aircraft antennas, *ibid.*
12. Gallon L.: EMP coupling to long cables. EMC-Symp., Rotterdam 1979.
13. Rudy T. et al.: Estimation of NEMP-induced voltages in coaxial cables with the help of transfer impedance. EMC-Symp., Zürich 1981.
14. Ianovici M., Tesche F.M.: EMP effects on a HV Network, EMC-Symp., Tokio 1984.
15. Tesche F.M.: Topological concepts for internal EMP interaction. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
16. Gronhang K.L.: Calculation of current induced in long conductors by exo-atmospheric EMP. EMC-Symp., Zürich 1981.
17. Wik M.: Hardening of telecommunication networks against EMP. Ericsson Review, No 1, 1984.

18. Baum C.E.: EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: An interim categorization. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
19. Lutz M., Frey O.: The simulation of EMP and EMI effects and their influence on measuring and control equipment. EMC-Symp., Zürich 1983.
20. Feser K. et al.: Mobile EMP-System with high flexibility. EMC-Symp., Zürich 1981.
21. Baum C.E.: EMP simulation and its impact on EMP testing. EMC-Symp., Rotterdam 1979.
22. Rüdý T. et al.: NEMP simulation and test in Switzerland, *ibid.*
23. Baum C.E.: Review of hybrid and equivalent-electric dipole EMP simulators. EMC-Symp., Zürich 1983.
24. Giri D.V.: Review of guided wave EMP-simulators, *ibid.*
25. Stewart R.W., Shoup R.W.: A testing approach to EMP hardness surveillance of shielded systems. IEEE-Symp., Washington 1983.
26. Baum C.E. et al.: Sensors for EMP measurements both inside and away from nuclear source regions. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, Feb. 1978.
27. Feser K., Lutz M.: Prüfung von Bauteilen, Baugruppen, Geräten und Systemen auf EMV. Markt und Technik, No 15, 1980.
28. Sower G.D. et al.: Instrumentation for EMP measurements. EMC-Symp., Zürich 1983.
29. Wik M.: Measurement and application of secondary surge arresters for the purpose of NEMP protection. EMC-Symp., Zürich 1981.
30. Fornerod F.: Calculation and measurement of transfer impedance of cable sheaths. EMC-Symp., Zürich 1981.

31. Melville Clark O.: Capabilities and limitations of low voltage transient suppressors. EMC-Symp., Montreux 1977.
32. Vance E.F.: EMP hardening of systems. EMC-Symp., Zürich 1983.
33. Smith J.D., Aslin H.: Pulsed power for EMP simulators. IEEE Trans. on EMC, vol. EM-20, 1978.
34. Kleine J.C.: Qualification requirements for electronic equipment protected against the electric and magnetic strengths and peak voltages generated by a NEMP - a preliminary standard. EMC-symp., Zürich 1983.

ISSN 0209-1046

