

Jacek PAŚ

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Zakłócenia generowane podczas impulsu wyładowania atmosferycznego - a proces eksploatacji systemów bezpieczeństwa na obszarze kolejowym

Dr inż. Jacek PAŚ

Adiunkt N-D/Kierownik Zakładu Eksploatacji Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki WAT. Zainteresowania naukowe obejmują elektronikę analogową, modulację i detekcję, pomiary pól elektromagnetycznych z zakresu małych częstotliwości, kompatybilność elektromagnetyczną, niezawodność i eksploatację systemów technicznych. Uczestnik wielu krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych - autor lub współautor ponad 150 publikacji naukowych.



e-mail: jpas@wat.edu.pl

Streszczenie

Impulsowe zakłócenia generowane podczas wyładowania atmosferycznego są przyczyną zakłócenia procesu eksploatacji elektronicznych systemów bezpieczeństwa (ESB). Prądy i napięcia występujące podczas wyładowania indukują w liniach dozorowych zakłócenia. Odpowiednia organizacja ESB na obszarze kolejowym i urządzenia przepięciowe to zabezpieczenie przed zakłóceniami. Występowanie zakłóceń podczas użytkowania systemu wymaga stosowania innego algorytmu do wyznaczania wskaźników oceny bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: zakłócenia, eksploatacja, ekranowanie, wyładowanie.

Disturbances generated during a lightning impulse and the process of operation of security systems in the rail area

Abstract

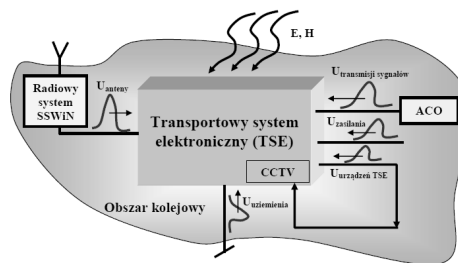
This paper presents the results of electromagnetic interference generated during lightning on the process of operation of security systems - ESB. Electric and magnetic fields which are generated during atmospheric discharge may have very high values near to the main channel of lightning discharge (1). The impulse of the electromagnetic field that occurs during this phenomenon, induces electromagnetic interferences (voltages and currents) having very high values (Fig. 1) also in power ground lines and in transmission buses of the ESB system. The pulse amplitudes of surge signals (main and return discharge) may affect operation of the ESB or cause total or partial damage. The ESB may be present at the set of different exploiting states, which result from "normal" or electromagnetic interferences exploitation process. The proper usage of the ESB in enormous railway is an absolutely complicated technical issue, where, in addition to the "normal" exploitation specified in technical standards, there are issues related to the problem of ensuring electromagnetic compatibility (3). The occurrence of electromagnetic interference with high power levels can lead to a catastrophic failure in the system of the ESS. The research allowed determining the effect of the pulse electromagnetic field generated during lightning on the test systems.

Keywords: disruption, exploitation, screening, atmospheric discharge.

1. Zakłócenia elektromagnetyczne generowane podczas wyładowania atmosferycznego

Generowane podczas wyładowania atmosferycznego pola elektryczne i magnetyczne osiągają bardzo duże wartości w pobliżu kanału głównego wyładowania. Impulsowe pole elektromagnetyczne występujące podczas tego zjawiska indukują w liniach zasilających, uziemiających i magistralach transmisyjnych systemu ESB zakłócenia elektromagnetyczne (napięcia i prądy) o bardzo dużych wartościach - rys. 1. ESB rozmieszczone na rozległym obszarze kolejowym tworzą transportowy system elektroniczny (TSE) którego celem jest wykrywanie zagrożeń występujących w procesie transportowym (zarówno dla obiektów stacjonarnych jak i rucho-

mych). Impulsowe amplitudy sygnałów przepięcia (wyładowanie główne i powrotne) mogą zakłócić pracę ESB lub spowodować ich uszkodzenie - całkowite lub częściowe. Systemy te mogą przebywać w zbiorze różnych stanów eksploatacyjnych. Stany te są wynikiem procesu „normalnej” lub wynikającej z oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych na system ESB. Proces „normalnej” eksploatacji ESB związany jest z występowaniem rzeczywistych warunków eksploatacyjnych na rozległym obszarze kolejowym - warunki atmosferyczne (temperatura, wilgotność, ciśnienie, itd.) i istniejące naturalne pola elektromagnetyczne.



Rys. 1. Oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych na TSE, gdzie: ACO - Alarmowe Centrum Odbiorcze; CCTV - System Telewizji Przemysłowej; SSWiN - System Sygnalizacji Włamania i Napadu
Fig. 1. Influence of interferences of type A on ESB, where: ACO - Alarm Receiving Centre, CCTV - Closed Circuit Television System, SSWiN - The burglary and assault signaling system

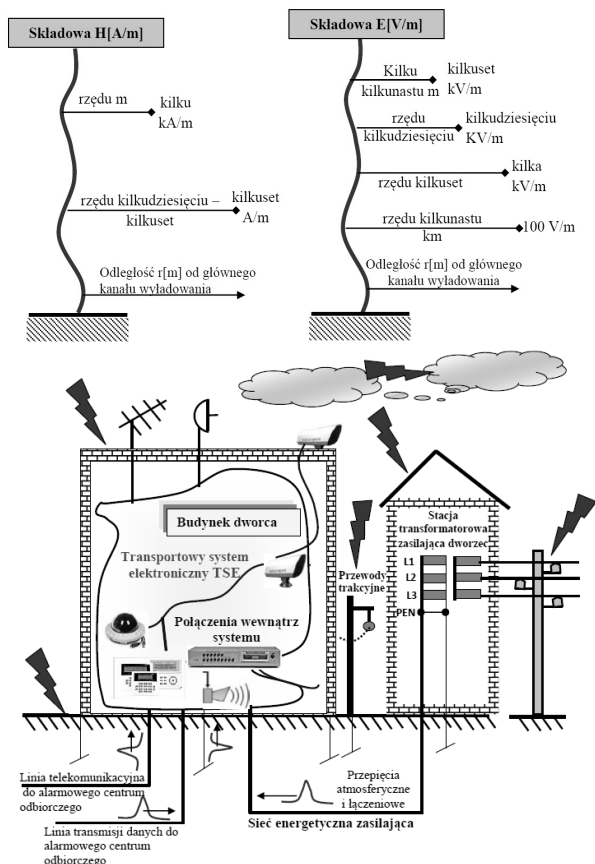
„Normalna” eksploatacja TSE określona jest w normach dotyczących systemów bezpieczeństwa jako warunki środowiskowe - $I \div IV$ [1, 2, 9, 10]. Wystąpienie zakłócenia elektromagnetycznego na obszarze kolejowym powoduje zmianę w/w warunków procesu „normalnej” eksploatacji. Zakłócenie pola elektromagnetycznego, które jest generowane w czasie wyładowania atmosferycznego może oddziaływać na TSE poprzez:

- bezpośrednie uderzenie prądu pioruna w obwody sieci zasilającej, uziemiającej lub linie transmisyjne TSE (rys. 1);
- wyładowanie bezpośrednie w obiekty budowlane zlokalizowane na rozległym obszarze kolejowym - np. dworzec kolejowy, nastawnia, perony, itd., na których zainstalowane są urządzenia TSE. Powoduje to że część prądu piorunowego może przedostać się bezpośrednio przez linie zasilające, magistrale transmisyjne do urządzeń, elementów systemu (np. centrale alarmowe, moduły rozszerzeń) mimo zainstalowania instalacji odgromowej na tych budynkach [1, 2, 10];
- wyładowanie atmosferyczne w pobliżu obwodów zasilających, uziemiających, magistral lub urządzeń systemu TSE. W tym wypadku zakłócenia są indukowane przez impulsowe pola elektromagnetyczne wywołane przez prąd piorunowy płynący w kanale głównym wyładowania oraz część prądu piorunowego dopływającego do podziemnych kabli zasilających obszar dworca kolejowego lub uziemień budynków - rys. 2 [5, 7];
- wyładowania w chmurach lub między chmurami (indukowane są duże wartości pola elektrycznego i magnetycznego, zmiana wartości naturalnego pola ziemskiego);
- wyładowania wstępne poprzedzające wyładowania doziemne;
- odległe wyładowania doziemne (bez zastosowania odpowiednich układów zabezpieczających TSN urządzenia znajdujące się w obszarze o promieniu 1,5 km od miejsca uderzenia pioruna mogą ulec zniszczeniu - rys. 2) [4, 5, 7].

Wynikiem procesu eksploatacji TSE podczas oddziaływania zakłóceń jest zbiór stanów eksploatacyjnych, które mogą różnić się od "normalnych stanów", tzn. kiedy na rozległym obszarze nie występują zakłócenia. Z punktu kryterium bezpieczeństwa pracy

TSE, zbiór stanów eksploatacyjnych można podzielić na określone podzbiory. W TSE można wyróżnić następujące podzbiory stanów bezpieczeństwa:

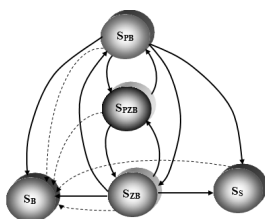
- podzbiór stanów eksploatacyjnych, do którego między innymi zalicza się stany zdadności, pośredniej zdadności, niezadności, itd. podczas "normalnej" eksploatacji systemu i oddziaływania zakłóceń o małej amplitudzie (np. wyładowanie atmosferyczne w dużej odległości od urządzeń, linii TSE);



Rys. 2. Wartości pola H, E indukowane podczas wyładowania atmosferycznego w funkcji odległości od głównego kanału wyładowania; rozmieszczenie systemu na rozległym obszarze kolejowym

Fig. 2. Values of the field H, E induced during lightning as a function of the distance from the main channel discharges; distribution system over a wide area railway

- podzbiór stanów gotowościowych, do którego między innymi zalicza się stany stałej gotowości, pełnej gotowości, niegotowości, itd.;
- wystąpienie zakłócenia elektromagnetycznego w postaci wyładowania atmosferycznego może spowodować przejście z każdego w/w stanów eksploatacyjnych lub bezpieczeństwa do stanu zawadności bezpieczeństwa (system TSE niezadany) - rys. 3 (przejście to na rysunku oznaczono linią przerywaną).



Rys. 3. Graf stanów bezpieczeństwa TSE, gdzie: S_{PB} – stan poczucia bezpieczeństwa, S_{PZB} – stan poczucia zagrożenia bezpieczeństwa, S_{ZB} – stan zagrożenia bezpieczeństwa, S_B – stan zawadności bezpieczeństwa, S_S – stan zawadności sprawności [13, 14]

Fig. 3. Graf TSE safety conditions, where: S_{PB} - state security, S_{PZB} - as a sense of security threats, S_{ZB} - state of security threats, S_B - state security failures, S_S - state reliability performance [13, 14]

- podzbiór stanów bezpieczeństwa, do których zalicza się stany bezpieczeństwa, „poczucia zagrożenia bezpieczeństwa - SPZB”, zagrożenia bezpieczeństwa - SZB, zawadności bezpieczeństwa - SB, zawadności sprawności - SS, itd.

2. Opis zakłócenia elektromagnetycznego indukowanego w podczas wyładowania

Stan zawadności bezpieczeństwa S_B - rys. 3, może wystąpić w repertuarze eksploatacyjnym także podczas oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych. Uzależnione jest to od wartości szczytowej impulsów prądów A_{pn} występujących w TSN. A_{pn} jest funkcją zależną np. od środowiska, w którym są zainstalowane np. urządzenia systemu TSN. Aby ocenić środowisko należy uwzględnić:

- czynniki związane z właściwościami terenu na którym zainstalowano system;
- gęstość powierzchniowa wyładowań atmosferycznych - mapa burzowa Polski opracowana wg. np. W. Wiszniewskiego;
- rezystywność gruntu;
- rodzaj zabudowy w sąsiedztwie rozległego obszaru kolejowego.
- stopień wyeksponowania systemu na działanie wyładowań atmosferycznych;
- prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w dworzec kolejowy;
- sposób ułożenia kabli zasilających i sygnałowych TSE na obszarze kolejowym;
- ułożenie kabli zasilających i sygnałowych dochodzących do obszaru kolejowego;
- prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowania w bliskim sąsiedztwie obszaru;
- uzbrojenie techniczne terenu (np. metalowe elementy, szyny w ziemi, ekrany kabli).

warunki stwarzane wewnątrz kolejowych obiektów budowlanych:

- sposobów uziemienia i zasilania urządzeń, obiektów i systemów kolejowych;
- zasady układania przewodów zasilających zewnętrznych i wewnętrznych;
- stosowania elementów, układów zabezpieczających w liniach zasilających [8, 10].

Do oceny zagrożenia piorunowego TSE zainstalowanego na obszarze kolejowym wymaga się określenia wartości charakteryzujących dany prąd piorunowy [4, 5, 7, 8]:

- wartość szczytowa - I_m ;
- maksymalna stromość narastania

$$S_{\max} = \left(\frac{di_p}{dt} \right)_{\max} \quad (1)$$

- ładunek przenoszony przez prąd udarowy

$$Q_{\max} = \int i_p dt \quad (2)$$

- impulsu kwadratu prądu (tj. energia właściwa wydzielona na $R=1\Omega$)

$$W = \int i_p^2 dt \quad (3)$$

Do opisu matematycznego przebiegu czasowego pierwszego i kolejnych doziemnych wyładowań atmosferycznych można stosować następujące równanie [1]:

$$i(t) = k_i I_m [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (4)$$

gdzie: I_m – wartość maksymalna prądu; k_i – współczynnik korekcji; α, β – współczynniki określające czas trwania czoła i czas do półszczytu.

Widmo prądu wyładowania można przedstawić za pomocą równania [1]

$$I(\omega) = k_i I_m \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) = \frac{k_i I_m (\beta - \alpha)}{(\alpha + j\omega)(\beta + j\omega)} \quad (5)$$

Wiele zależności opisujących przebiegi prądu wyładowań atmosferycznych wykorzystuje zależność Heidlera [2, 4].

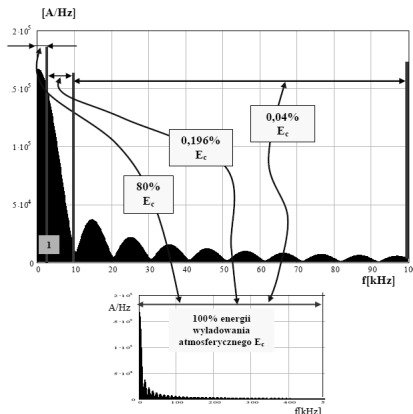
$$i(t) = \frac{I_m}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^N}{1 + (t/\tau_1)^N} \exp(-t/\tau_2) \quad (6)$$

gdzie: $2 \leq N \leq 10$, a współczynnik korekcyjny η wynosi odpowiednio:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)(N \frac{\tau_2}{\tau_1})^{\frac{1}{N}}\right] \quad (7)$$

Analiza widmowa przebiegu wyładowania atmosferycznego w kanale głównym wykazuje, że w paśmie do kilkudziesięciu kHz zgromadzona jest większa część energii impulsu wyładowania:

- poniżej 1 kHz zawarte jest około 80 % całkowitej energii tego impulsu;
- w paśmie do 10 kHz zawarte jest około 99,5 % całkowitej energii tego impulsu;
- w paśmie poniżej 100 kHz zawarte jest około 99,6 % całkowitej energii wyładowania kanału głównego – rys. 4.



Rys. 4. Przebieg widma wyładowania atmosferycznego dla przypadku 100 kA, 10/350 μ s

Fig. 4. Mileage lighting spectrum for the case 100 kA, 10/350 μ s

TSE rozmieszczony jest na terenie otwartym oraz zamkniętym (budynki) rozległego obszaru kolejowego. W przypadku wystąpienia zakłóceń elektromagnetycznych obiekty budowlane (np. dworzec kolejowy, nastawia, peron) wykazują właściwości ekranujące. Ekranowanie pola elektromagnetycznego przez ściany, przegrody budowlane jest efektem znanym szczególnie dla zakresu wyższych częstotliwości i składowych natężenia E pola elektrycznego dla zakresu małych częstotliwości [1, 3, 4, 10]. Przewody instalacji odgromowej rozmieszczone znacznie rzadziej niż pręty zbrojeniowe powodują redukcję pola wewnątrz dworca kolejowego. Osiągnięty efekt ekranowania można scharakteryzować za pomocą parametru zwanego skutecznością ekranowania. Oznaczając przez E_0 i H_0 natężenia pól istniejących w danym miejscu przy braku instalacji odgromowej, a przez E_1 i H_1 – natężenia pól w tym samym miejscu, ale otoczone instalacją odgromową, skuteczność ekranowania wynosi:

$$S_E = 20 \log \frac{E_{0max}}{E_{1max}} \quad (7)$$

$$S_H = 20 \log \frac{H_{0max}}{H_{1max}} \quad (8)$$

Obliczenia skuteczności ekranowania dla punktu znajdującego się wewnątrz budynku dworca dla różnych wymiarów oka siatki odgromowej zostały przedstawione w tab. 1.

Tab. 1. Ocena skuteczności ekranowania w funkcji wymiarów oka siatki [4, 5]
Tab. 1. Evaluation of the effectiveness of shielding as a function of the dimensions of the eye grid

Oko siatki, m	E_{0max}/E_{1max}	S_E , dB	H_{0max}/H_{1max}	S_H , dB
Odpowiedź na impuls wyładowania dwu-wykładniczy o parametrach - 20 kA, 2/25 μ s				
20x20	2,16	6,7	2,3	7,2
10x10	3,22	10,2	2,55	8,1
5x5	6,19	15,8	3,68	11,3

Jeżeli TSE zainstalowany jest w obiekcie budowlanym, należy uwzględnić ekranujące działanie oka siatek instalacji odgromowej. Uwzględniając wpływ instalacji odgromowej (ekranowanie) w budynku na wartość natężenia pola E , H dla wyładowania określonego jak w tab. 1, tłumienie składowych pola E , H wynosi:

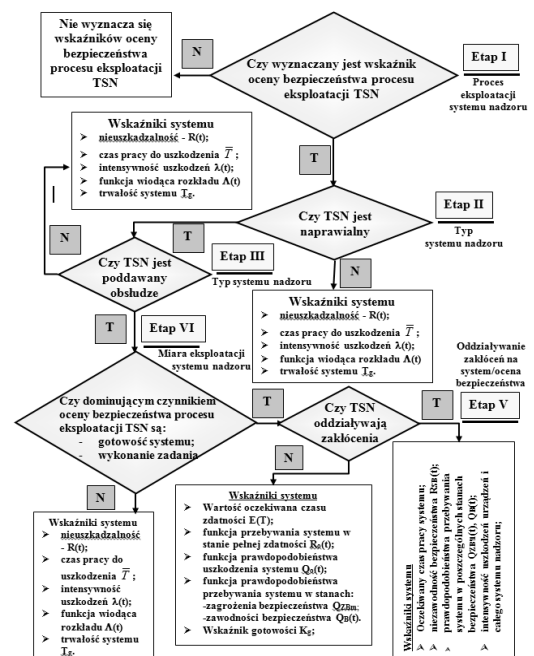
dla składowej natężenia E pola elektrycznego:

- oczko siatki 20x20 m – $E_1 = 60$ KV/m – tłumienie pola $\sigma_{Ed1} = E/E_1 = 2,08$;
- oczko siatki 10x10 m – $E_2 = 40$ KV/m – tłumienie pola $\sigma_{Ed2} = E/E_2 = 3,13$;
- oczko siatki 5x5 m – $E_3 = 20$ KV/m – tłumienie pola $\sigma_{Ed3} = E/E_3 = 6,25$.

dla składowej indukcji B pola magnetycznego:

- oczko siatki 20x20 m – $H_1 = 40$ A/m $\Rightarrow B = 50 \mu$ T tłumienie pola $\sigma_{Hd1} = H/H_1 = 2,81$;
- oczko siatki 10x10 m – $H_2 = 37$ A/m $\Rightarrow B = 46,25 \mu$ T tłumienie pola $\sigma_{Hd2} = H/H_2 = 3,04$;
- oczko siatki 5x5 m – $H_3 = 25$ A/m $\Rightarrow B = 31,25 \mu$ T tłumienie pola $\sigma_{Hd3} = H/H_3 = 4,5$.

W celu określenia podstawowych wskaźników procesu eksploatacji TSE użytkowanych na obszarze kolejowym gdzie występują zakłócenia elektromagnetyczne należy wprowadzić wskaźniki oceny bezpieczeństwa eksploatacji. Wskaźniki te są określane dla systemu na obszarze kolejowym dla dwóch przypadków - przy braku i występowaniu zakłóceń. Algorytm wyznaczania wskaźników oceny bezpieczeństwa procesu eksploatacji TSE został przedstawiony na rys. 5.

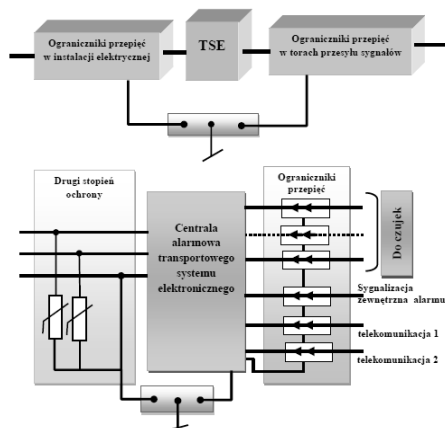


Rys. 5. Algorytm wyznaczenia wskaźników oceny bezpieczeństwa procesu eksploatacji TSN

Fig. 5. The algorithm appointment of indicators to assess the safety of the operation process TSN

3. Wnioski

Właściwa eksploatacja TSE na rozległym obszarze kolejowym to skomplikowane zagadnienie techniczne, gdzie oprócz „normalnej” eksploatacji określonej w normach technicznych dochodzą zagadnienia związane z problemem zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej [1, 9, 10]. Środowisko elektromagnetyczne istniejące na rozległym obszarze kolejowym jest zniekształcone przez występujące źródła zakłóceń, które generują pola elektromagnetyczne wytwarzane w sposób zamierzony lub niezamierzony (źródła zakłóceń mogą być także stacjonarne lub ruchome) [1, 3, 7, 10]. W/w zakłócenia elektromagnetyczne mają jednak zbyt małą amplitudę aby zakłócić pracę całego systemu TSE. Wystąpienie zakłócenia elektromagnetycznego powstałego podczas wyładowania atmosferycznego może doprowadzić do uszkodzenia katastroficznego w systemie. Zakłócenie to można tylko porównać do impulsu elektromagnetycznego który powstaje podczas wybuchu jądrowego. Odpowiednio zaprojektowana i wykonana instalacja odgromowa na rozległym obszarze kolejowym dla systemów: np. TSE, SRK, telekomunikacji, itd. powoduje zwiększenie odporności w/w systemów na narażenia elektromagnetyczne, w tym impulsowe - rys. 6. Jednym z parametrów instalacji ochrony odgromowej jest jej skuteczność. Skuteczność można zdefiniować jako prawdopodobieństwo, z jakim urządzenie ochronne (instalacja odgromowa, ograniczniki przepięć, w instalacjach trakcji kolejowej ograniczniki rozkwe - umieszczone, co 600[m] lub 1200 [m][7, 8]) przejmą energię udaru, nie dopuszczając do wyłączenia szkody w zabezpieczanym obiekcie [4, 5, 7].



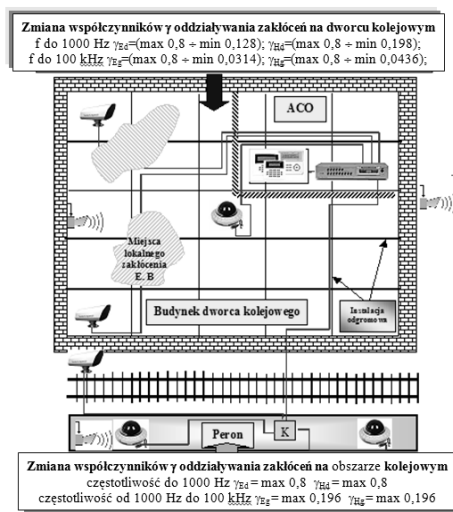
Rys. 6. Zabezpieczenie TSE przed zakłóceniem typu A - wyładowanie atmosferyczne
Fig. 6. Securing the TSE before the disturbance type A - atmospheric discharge

Wyróżnia się cztery poziomy ochrony, którym odpowiadają różniące się podstawowe parametry prądu pioruna. Poziom ochrony odgromowej może być także definiowany słownie, wtedy używa się następujących pojęć: ochrona podstawowa, ochrona obostrzona i specjalna. Zakres zmian współczynnika γ oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych generowanych na rozległym obszarze kolejowym podczas wyładowania atmosferycznego przedstawiono na rys. 7.

Wartość wskaźnika γ oddziaływania zakłóceń na TSN dla zakresu częstotliwości ELF i VLF powinien być uwzględniony podczas wyznaczania wskaźników oceny bezpieczeństwa procesu eksploatacji. Algorytm wyznaczenia wskaźników oceny bezpieczeństwa procesu eksploatacji systemu należy wyznaczać następujące wskaźniki bezpieczeństwa:

- wszystkie charakterystyki probabilistyczne zmiennej losowej, którą jest czas funkcjonowania systemu do chwili jego przejścia do stanu zawadności bezpieczeństwa Q_{ZB} ;
- charakterystyki probabilistyczne żywotności systemu;
- charakterystyki probabilistyczne czasu przebywania systemu w poszczególnych stanach bezpieczeństwa - rys. 3;

- charakterystyki probabilistyczne opisujące przejścia pomiędzy stanami bezpieczeństwa systemu.



Rys. 7. Zakres zmian współczynnika γ oddziaływania zakłóceń na TSN dla zakresu częstotliwości ELF i VLF wynikająca z wyładowania atmosferycznego i wpływu ekranującego działania instalacji odgromowej

Fig. 7. The range of changes of interference impact coefficient γ on TSN for the frequency range of ELF and VLF resulting from lightning and shielding effect of the action of lightning protection

4. Literatura

- [1] Paś J., Duer S.: Determination of the impact indicators of electro-magnetic interferences on computer information systems, Neural Computing & Applications, Volume: 23, Issue: 7-8, Special Issue: SI, Pages: 2143-2157, ISSN: 0941-0643, Published: DEC 2013.
- [2] Duer S., Zajkowski K., Duer R., Paś J.: Designing of an effective structure of system for the maintenance of a technical object with the using information from an artificial neural network, Neural Computing and Applications, September 2013, Volume 23, Issue 3-4, pp 913-925, ISSN: 0941-0643, DOI: 10.1007/s00521-012-1016-0.
- [3] Siergiejczyk M., Paś J., Rosiński A.: Assurance of the electromagnetic compatibility in the chosen transport telematic systems, Archives of Telematics Transport System. ISSN 1899-8208 Volume 6 Issue 3 September 2013 str. 38 – 41.
- [4] Aniserowicz K.: Analiza zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej w obiektach narażonych na wyładowania atmosferyczne, Politechnika Białostocka, 2005.
- [5] Sowa A.: Zagrożenia piorunowe urządzeń elektronicznych, Politechnika Wroclawska, 1994.
- [6] Dyduch J., Paś J.: Zakłócenia elektromagnetyczne oddziałujące na transportowy system bezpieczeństwa, Pomiary Automatyka Robotyka PAR, nr 5, 2009.
- [7] Floryński R., Augustyniak I., Sowa A.: Kompleksowa ochrona urządzeń elektronicznych przed zakłóceniami impulsowymi LEMP i NEMP, URSI VII Krajowe Sympozjum Nauk Radiowych Komunikaty Gdańsk, 1993.
- [8] Laskowski M., Frankiewicz W.: Ochrona przeciwprzepięciowa elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym, SEMTRAK, 2008.
- [9] PN-EN 50130-4:2002 Systemy alarmowe - Część 4: Kompatybilność elektromagnetyczna.
- [10] Choromański W., Dyduch J., Paś J.: Minimizing the Impact of Electromagnetic Interference Affecting the Control System of Personal Rapid Transit in the Context of the Competitiveness of the Supply Chain, Archives Of Transport, Polish Academy of Sciences, Volume 23, Issue 2, Warsaw 2011.