

Ochrona odgromowa obiektów budowlanych i ich wyposażenia

Zdobysław Flisowski

Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na specyficzne zagadnienia związane z ochroną obiektów budowlanych i ich wyposażenia przed oddziaływaniem wyładowań piorunowych. Poruszono też kwestie związane z normalizacją w ochronie odgromowej, istniejącym chaosem prawnym, nieodpowiednią reakcją urzędów państwowych, brakiem profesjonalizmu oraz ignorancją instalatorów i inspektorów nadzoru. Omówiono także zagadnienia związane z wrażliwością obiektów i wyposażenia na wyładowania piorunowe, wybiórczością piorunów przez zwody oraz bezpiecznym odprowadzaniem prądu wyładowania do ziemi.

Ochrona odgromowa, piorunowa wrażliwość obiektów, uwarunkowania prawne ochrony odgromowej

Wprowadzenie

Skuteczna ochrona odgromowa obiektów budowlanych i ich wyposażenia zależy od wielu czynników. Jest ona możliwa do osiągnięcia pod warunkiem, że jej realizatorzy dysponują dobrym rozeznanieniem istniejącej sytuacji, umiejętnością rozwiązywania problemów, profesjonalizmem w realizacji swoich zadań i uczciwością. W ostatnich latach sytuacja nieco się skomplikowała, a powodem są m.in.:

- niedoskonałość norm ochrony odgromowej i ich częste zmiany,
- brak jednoznacznej spójności ustaw i przepisów oraz zła wola urzędów państwowych,
- brak profesjonalizmu w zakresie zasad ochrony odgromowej,
- pogoń za zyskiem z pominięciem zasad naukowo-technicznych, handlowych, prawnych, a nawet etycznych,
- zmiany we wrażliwości elektromagnetycznej obiektów i ich wyposażenia elektronicznego.

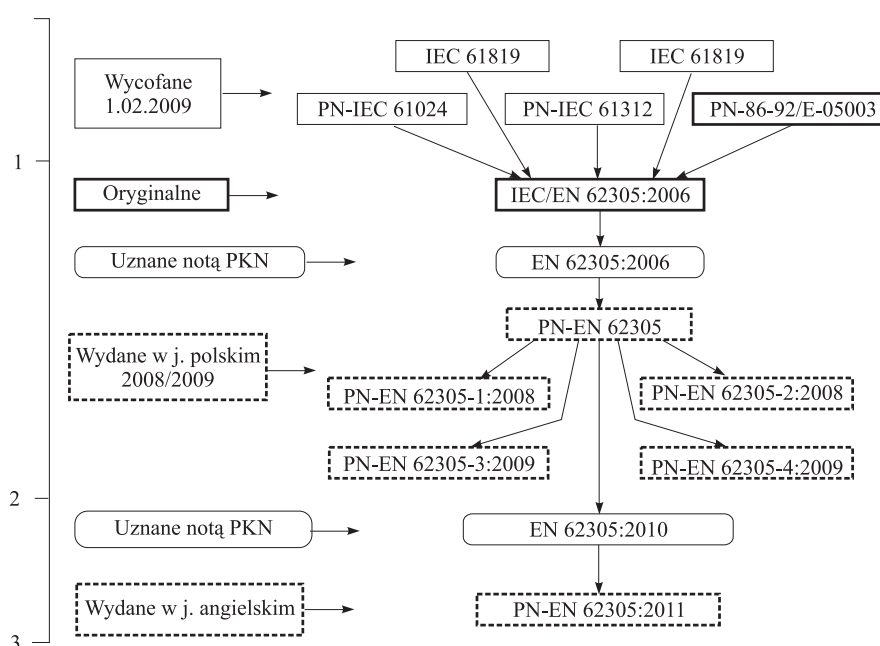
Kwestie merytoryczne podejścia do problemów ochrony budowli przed piorunami i przepięciami, wymagają przede wszystkim zwrócenia uwagi na wybiórczość piorunów przez zwody, skutki fizyczne oddziaływania wyładowań trafiających w zwody, elektromagnetyczne oddziaływanie wyładowań bezpośrednich i pobliskich na urządzenia elektryczne i elektroniczne oraz na właściwy dobór środków ochrony. Należy więc przyjrzeć się bliżej powodom wspomnianych komplikacji.

Normy ochrony odgromowej

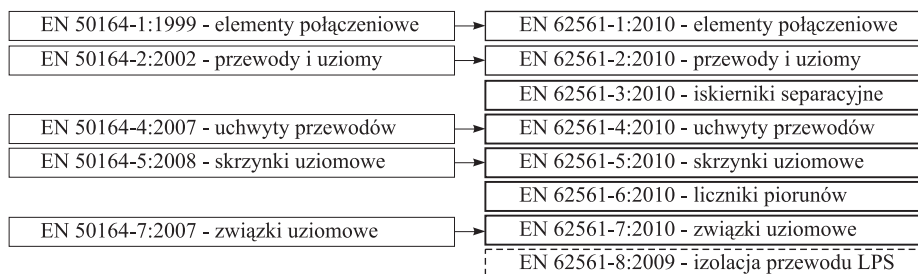
Zasady skutecznej ochrony odgromowej i oparte na nich postanowienia standardowe [10]-[13] są często modyfikowane. Aktualną wersję stanowi seria norm PN-EN 62305:2011. Jest to trzecia faza modyfikacji norm IEC i druga faza modyfikacji norm CENELEC (rys. 1). Ma ona niestety w Polsce status norm uznaniowych i jest nadal poddawana modyfikacjom w TC 81 IEC i TC 81X CENELEC przez MT (Maintenance Teams). Obok tej serii istnieje jeszcze 8 norm EN 50164 - obecnie EN 62561 [14], dotyczących komponentów urządzenia piorunochronnego (LPS), poddanych również modyfikacjom w TC 81 IEC i w TC 81X CENELEC (rys. 2).

Do realizacji ochrony przepięciowej instalacji elektrycznych, konieczne jest też respektowanie norm pokrewnych, jak: PN-EN 61643 -11 i -12 oraz -21 i -22, PN-EN 60364- (4-443, 4-444, 5-534) oraz (5-54), IEC 61000- (4-5, 4-9, 4-10), a także zaleceń ITU-T – K.11, K21 i K.22 oraz raportu technicznego IEC 62066 TR.

Prowadzona od 2004 r. europeizacja normalizacji w Polsce zdaniem niektórych specjalistów nie sprzyja porządkowi w ochronie odgromowej. Wprowadzono bowiem obligatoryjność norm europejskich, z obowiązkiem wycofania dotychczasowych własnych krajowych i opartych na IEC norm sprzecznych, ale nie dotyczy to wszystkich państw członkowskich i regulacji, a ponadto sprzeczne jest to z ustawodawstwem polskim, które w tym samym czasie znosi obligatoryjność norm polskich, identycznych z normami europejskimi [18].



Rys. 1. Schemat aktualizacji norm ochrony odgromowej



Rys. 2. Schemat blokowy przejścia od norm EN 50164 CENELEC do norm wspólnych z IEC

Chaos prawny i reakcja urzędów państwowych

Niespójność przepisów i brak w nich konsekwencji jest powszechnie widoczny [16], [17]. W Prawie Budowlanym wymaga się zapewnienia podstawowych zasad bezpieczeństwa (Art. 5. 1) i zezwala się na stosowanie tylko urządzeń wprowadzonych do obrotu zgodnie z przepisami (Art. 10). Tymczasem trudno jest uznać za zgodne z przepisami wprowadzenie na rynek krajowy tzw. „piorunochronów aktywnych”, pod dziwną nazwą okuć budowlanych, które nie tylko nie zapewniają przypisywanej im skuteczności, ale wręcz przeciwnie zwiększają zagrożenie ludzi i mienia. Z kolei w Rozporządzeniach Ministra Infrastruktury [16] wymaga się (Art. 53 ust. 2 i w Art. 184, ust. 3) wykonywania urządzeń piorunochronnych zgodnie z polskimi normami (PN) [10]-[13] i precyzuje się wymagania dotyczące jakości projektu ich instalacji, a w tym samym czasie w Ustawie o normalizacji, wbrew zasadzie bezpieczeństwa i obligatoryjności EN, likwiduje się obligatoryjność PN [18]. Bezkarne pozostaje nadużycie polegające na zaliczeniu „zwołów aktywnych” do okuć budowlanych (art. 270 K.K.) oraz zagrożenie życia, zdrowia lub mienia przez stosowanie tych „zwołów” (art. 163 i 164 K.K.). Natomiast działanie urzędów państwowych sprzyja lekceważeniu zasad ochrony i zwiększeniu zagrożenia piorunowego ludzi i mienia. Na przykład Ministerstwo Infrastruktury nie odnosi się do postulatu wyodrębnienia specjalizacji „ochrona odgromowa i przeciwprzebieciowa” ze specjalności „instalacje elektryczne”, ze względu na „negatywne tego skutki na rynku pracy”, a nie wyjaśnia, dlaczego zgadza się – wbrew własnemu rozporządzeniu - na urządzenia piorunochronne niezgodne z polskimi normami i na zwiększenie piorunowego zagrożenia ludzi i mienia przez urządzenia piorunochronne (LPS) wykonywane i odbierane przez niefachowy personel i nadzór budowlany.

Brak profesjonalizmu i ignorancja

Realizacja skutecznej i zgodnej z polskimi normami ochrony odgromowej wymaga dużej fachowości i solidności. Tymczasem nie ma obecnie w kraju najmniejszej możliwości dokonywania profesjonalnej weryfikacji kompetencji projektantów, wykonawców i odbiorców urządzeń piorunochronnych. Natomiast jest pogoń za zyskiem i brak skrupułów w preferowaniu bezwartościowych wyrobów. Występująca wśród wymienionej kadry ignorancja, prowadzi do obniżki jakości wykonania urządzeń piorunochronnych i przyczynia się do zwiększenia zagrożenia ludzi i ich mienia. Przykłady tego są pokazane na rys. 3, gdzie zilustrowano skutki niewłaściwego doboru i wykonania zwołów i przewodów odprowadzających oraz na rys. 4, gdzie uwidoczniono kolizję urządzeń piorunochronnych z innymi zagrożonymi w ten sposób instalacjami.



Rys. 3. Przykłady skutków bylejakości w doborze i instalowaniu elementów LPS



Splecione instalacje i pętla w przewodzie odprowadzającym

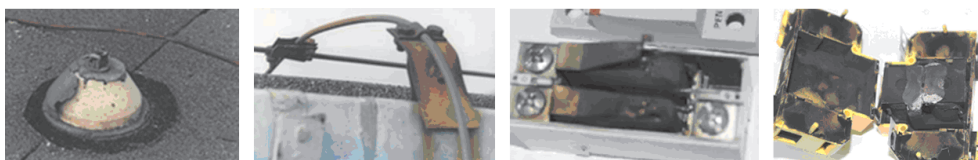
Nadmierne zbliżenie między instalacjami

Kolizja różnych instalacji

Kolizja różnych instalacji

Rys. 4. Przykłady braku koordynacji urządzeń piorunochronnych z innymi instalacjami

Na rys. 5 pokazano przykłady braku solidności w doborze elementów ochrony (uchwytów, złączy i urządzeń do ograniczania przepięć, niesłusznie reklamowanych, jako urządzenia typu 1+2 i typu 1+2+3), a także zaniedbywania okresowych przeglądów i konserwacji.

**Rys. 5.** Przykłady błędów w doborze wyrobów złej jakości

Rażąca niesolidność i brak fachowości występuje przy ocieplaniu styropianem budynków wyposażonych w urządzenia piorunochronne. Dowodem mogą być pokazane na rys. 6 zdjęcia nieistniejących lub zastąpionych atrapami zacisków probierczych.



Rzekomy dostęp do zacisków przewodu ukrytego pod styropianem

Atrapa zacisku

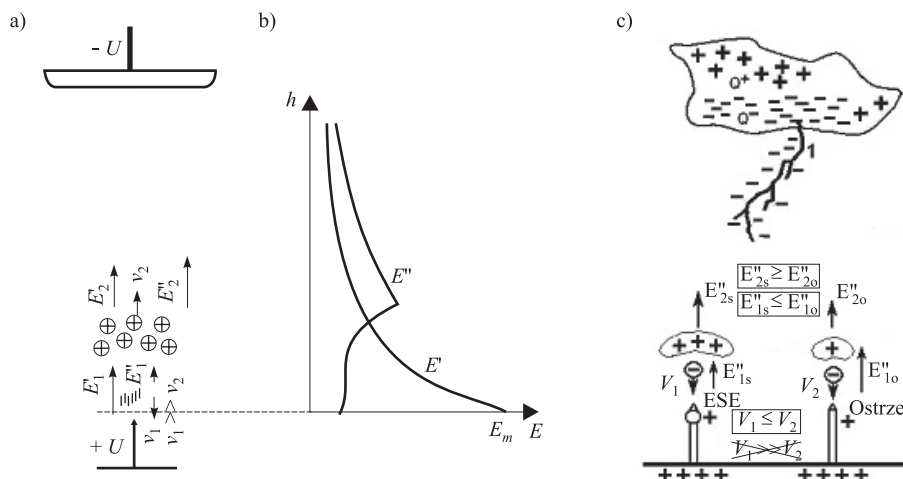
Zaciski niedostępne

Rura zamiast zacisków

Rys. 6. Przykłady nieprawidłowości towarzyszących ocieplaniu styropianem budynków wyposażonych w urządzenia piorunochronne

Największe problemy związane z lekceważeniem zasad rzetelnej ochrony odgromowej występują wśród dostawców „piorunochronów aktywnych” oraz dokonujących ich odbioru inspektorów nadzoru budowlanego. Osoby te powinny, ale nie wiedzą, że w Polsce jest ok. 90% wyładowań ujemnych, a zwód ma biegunowość dodatnią i że nad takim zwodem szybko następuje przekroczenie krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego E_{cr} , szybkie elektrony zostają wchłonięte przez zwód, nad którym narasta dodatni ładunek przestrzenny (rys. 7), a pod nim następuje zasadnicza redukcja pola elektrycznego, przyhamowanie wyładowań oddolnych i nie może być tam mowy o żadnej wczesnej emisji

strimerów [2]. Intensyfikacja jonizacji w warunkach naturalnych, bez dodatkowego źródła, jest niemożliwa, a nawet, gdyby taka możliwość istniała, to sprzyjałaby tylko redukcji pola nad ostrzem (rys. 7c).



Rys. 7. Przykład skutków jonizacji nad zwodem dodatnim: E' – natężenie pola przed jonizacją, E'' – natężenie pola przy jonizacji, v_1 – prędkość elektronów, v_2 – prędkość jonów dodatnich

Należy zdecydowanie stwierdzić, że „technologia ESE” nie istnieje i jej wytwórcy postępują niesolidnie. Instalują na dachu okucia budowlane twierdząc, że są to nadzwyczaj skuteczne piorunochrony. Dążą do ich instalowania na obiektach o niewielkim zagrożeniu, np. na obiektach metalowych (rys. 8a) lub osłoniętych przez obiekty wyższe [3]. Twierdzą, że technologia ESE, dzięki wczesnym strimerom, sprzyja wybiórczości piorunów [9], a jednocześnie, że je odpycha, czyniąc ze zwodów eliminatory piorunów (rys. 8b-c) [8]. Osoby te unikają terenowych badań tej skuteczności, wiedząc, że wyniki są negatywne (rys. 9) [3]-[6], a nawet ujawniające zagrożenia śmiertelne (rys. 10) [15].

„Zwody aktywne” wyposaża się w jedno odprowadzenie prądowe, twierdząc, że pole magnetyczne w obiekcie nie zależy od ich liczby. Prowadzi się też długi przewód odprowadzający na dachu metalowym, twierdząc, że w tym przewodzie płynie rzekomo prąd piorunowy. Instaluje się te urządzenia wg dokumentu NF C 17-102 [9], który jest całkowicie sprzeczny z polską i europejską normą [1], a wydaje się certyfikaty ich zgodności z tą normą. Inspektorzy nadzoru budowlanego udają, że tego nie widzą, a UOKiK twierdzi, że nie jest powołany do tępienia nadużyć.

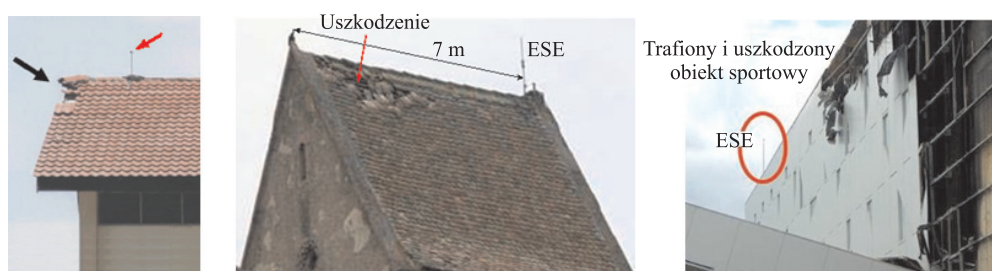


„Zwód” na budynku metalowym

„Eliminator” pojedynczy wieloostrzowy

Grupy „eliminatorów” wieloostrzowych

Rys. 8. „Zwody ESE i eliminatory piorunów



Rys. 9. Przykłady uszkodzenia budynków tuż przy „zwodach ESE”



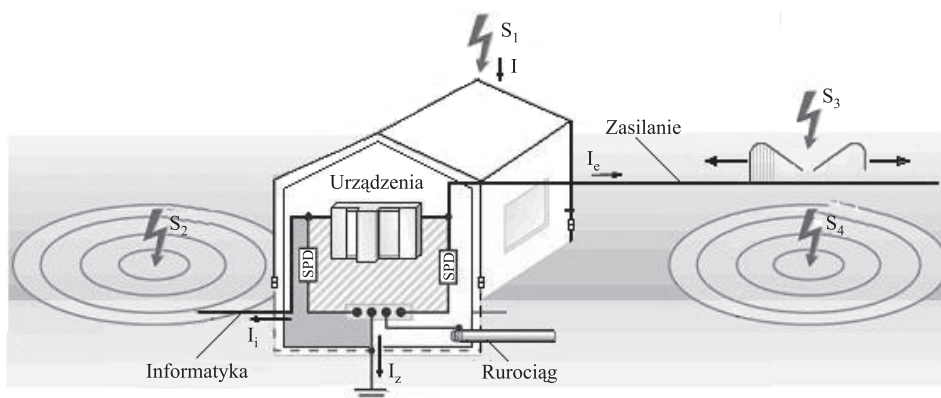
Rys. 10. Śmiertelny wypadek na drodze X-Y (trasa ześlizgu wodnego) zdarzył się między „zwodami ESE” A-B, których deklarowany zasięg ochrony oznaczono strzałkami

W opisaney sytuacji należy mocno skoncentrować uwagę na realizacji prawidłowych zasad ochrony budowli i ich wyposażenia przed bezpośrednimi wyładowaniami piorunowymi i przed elektromagnetycznym ich oddziaływaniem.

Piorunowa wrażliwość obiektów i wyposażenia

Wprowadzane wraz z postępem techniki zmiany konstrukcyjne i wyposażeniowe w budownictwie sprzyjają zwiększeniu odporności obiektów budowlanych na bezpośrednie wyładowania piorunowe i radykalnemu zmniejszeniu odporności wyposażenia elektrycznego i elektronicznego tych obiektów na oddziaływanie elektromagnetyczne wyładowań piorunowych.

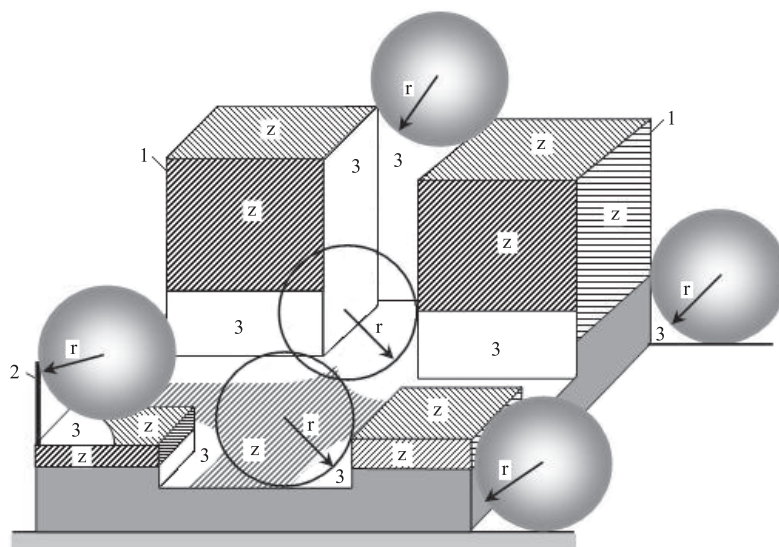
Konsekwencją jest znaczny wzrost częstości zagrożeń piorunowych wyładowaniami pobliskimi w porównaniu z częstością zagrożeń powodowanych przez wyładowania bezpośrednie w obiekt. Szacuje się, że częstość pobliskich oddziaływań piorunowych S_2 , S_3 , S_4 (rys. 11) przekracza aż o ponad dwa rzędy wielkości częstość oddziaływań powodowanych przez wyładowania bezpośrednie S_1 . Dlatego profesjonalne podejście do ochrony obiektów budowlanych i ich wyposażenia wymaga uwzględnienia wszystkich przypadków oddziaływań piorunowych [11], [13].



Rys. 11. Przypadki trafień piorunowych: S_1 – w obiekt, S_2 – obok obiektu, S_3 – we wprowadzane instalacje, S_4 – obok tych instalacji oraz rozptyw prądu pioruna: I – prąd całkowity, I_2 – prąd w uziemieniu, I_e – prąd w linii zasilającej, I_1 – prąd w linii informatycznej

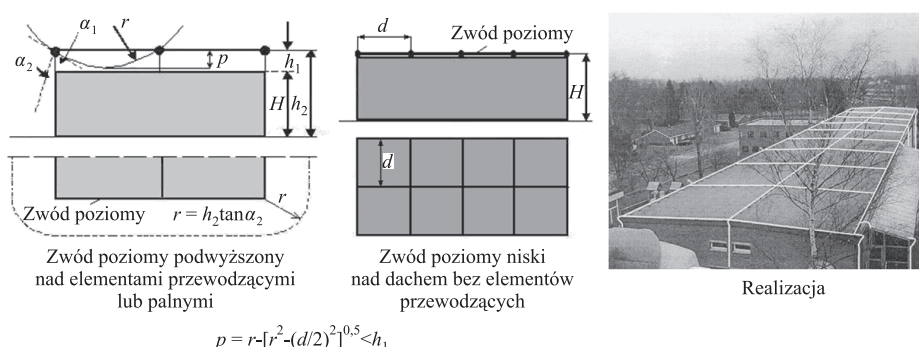
Wybiórczość piorunów przez zwody

O skuteczności działania osłonowego zwodów decydują parametry wyładowań piorunowych i geometria oraz właściwości narażonego na nie układu. Wyróżnia się trzy metody rozmieszczania zwodów: uniwersalną metodę toczącej się kuli RSM (rys. 12), metodę oczkową właściwą dla dachów płaskich (rys. 13) i metodę kąta ochronnego [12].



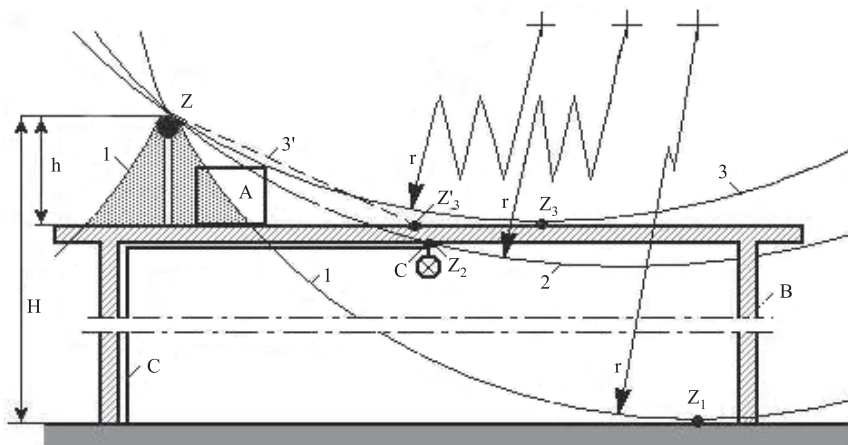
Rys. 12. Przykład zastosowania metody toczącej się kuli do rozmieszczania zwodów w układzie kilku obiektów: 1 – obiekt, 2 – zwód pionowy, 3 – obszar chroniony, z – powierzchnia styku obiektu z kulą, r – promień toczącej się kuli (zależny od poziomu ochrony)

Przykład zwodów poziomych podwyższonych (z aplikacją RSM) i zwodów poziomych niskich (z aplikacją metody oczkowej) oraz widok ich rzeczywistego układu pokazano na rys. 13.



Rys. 13. Przykład zwodów poziomych

Metoda kąta ochronnego wzbudza pewne kontrowersje. Jej głównym problemem jest płaszczyzna odniesienia, którą może być przewodząca powierzchnia ziemi, przewodząca i uziemiona płaszczyzna nad ziemią, płaszczyzna izolacyjna wyposażona w zwód wzdłuż śladu granicznej strefy - Z_3 i Z'_3 na rys. 14.



Rys. 14. Przykład wyznaczania strefy zwodu pionowego Z na przewodzącym i nieprzewodzącym płaskim dachu budynku B

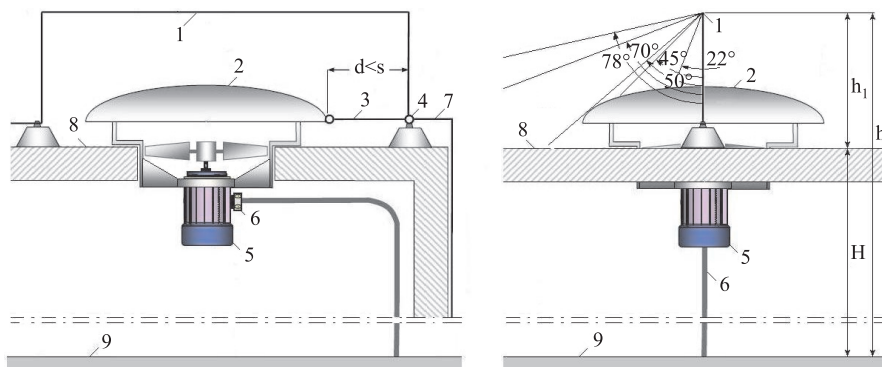
Aby wyjaśnić sygnalizowane kontrowersje należy na rys. 14 wyróżnić trzy przypadki ochrony urządzenia A przez zwód Z:

- dach izolacyjny a brak instalacji przewodzących,
- dach izolacyjny, a pod nim uziemione instalacje przewodzące,
- metalowe pokrycie dachu.

W pierwszym przypadku strefę chronioną wyznacza łuk 1 o promieniu r , przebiegający przez wierzchołek zwodu Z stycznie do powierzchni ziemi w punkcie Z_1 . Jak widać urządzenie A jest poza tą strefą.

W drugim przypadku strefę chronioną wyznacza łuk 2, przechodzący przez wierzchołek zwodu Z i przez skrajny punkt Z_2 instalacji przewodzącej C pod powierzchnią dachu. Urządzenie A ani instalacja C nie są chronione, jeżeli nie zainstaluje się dodatkowego zwodu na dachu. W przypadku trzecim strefę chronioną wyznacza łuk 3 stycznie do powierzchni dachu w punkcie Z_3 . Urządzenie A znajduje się zarówno w tej strefie, jak i w strefie równoważnej, wyznaczonej prostą $3'$ przechodzącą przez punkty Z i Z_3 .

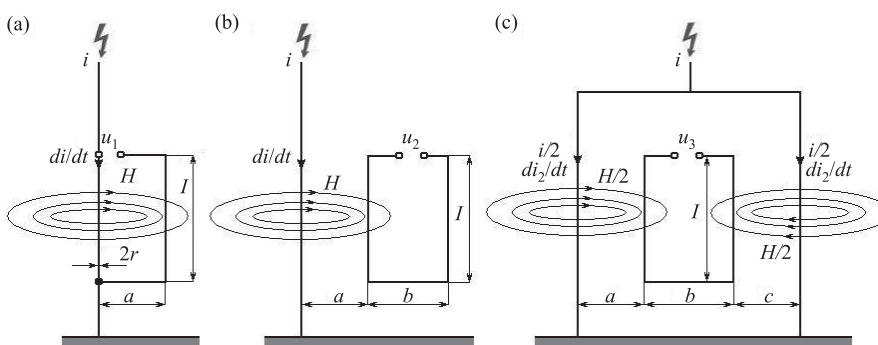
Przy stosowaniu zwodów poziomych wysokich na dachu powstaje problem ochrony urządzenia 2 w kierunku prostopadłym do płaszczyzny zwodu (rys. 15). Powstają różne kąty ochrony tego urządzenia w zależności od istnienia i rozmieszczenia w obrębie dachu uziemionych elementów przewodzących. Jeżeli na powierzchni dachu lub pod jego izolacyjnym pokryciem znajdują się konstrukcje lub instalacje przewodzące, to stają się one naturalnymi zwodami, a jeżeli nie mogą być za nie uznane, to powinny podlegać dodatkowej ochronie. Podane na rys. 15 różne kąty ochrony są podyktowane poziomem ochrony oraz wysokością zwodu nad ziemią i nad przewodzącym lub nieprzewodzącym dachem.



Rys. 15. Przykład strefy chronionej w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny zwodu poziomego: h_1 – wysokość zwodu od powierzchni dachu, h_2 – wysokość zwodu od powierzchni ziemi, H – wysokość powierzchni dachu nad ziemią, 8 – powierzchnia dachu, 9 – powierzchnia ziemi

Bezpieczne odprowadzanie prądu piorunu do ziemi

Przy uderzeniu piorunu w zwody, prąd jego, odprowadzany najkrótszą drogą do ziemi, nie powinien powodować wzdłuż tej drogi skutków termicznych i mechanicznych, a wokół tej drogi - skutków elektromagnetycznych. Do eliminacji skutków termicznych i mechanicznych służą proste zabiegi, polegające na doborze właściwego przekroju przewodu i solidnym jego umocowaniu. Natomiast redukcja skutków elektromagnetycznych wymaga już pewnych analiz z ukierunkowaniem na dwojakiego rodzaju pętle, tj. tworzone w kompozycji ze zwodem i z przewodem odprowadzającym, dla minimalizacji ich powierzchni (rys. 16a) oraz pętle tworzone w odseparowaniu od tego przewodu, gdzie dodatkowo chodzi o radykalne ich oddalenie od niego (rys. 16b-c).



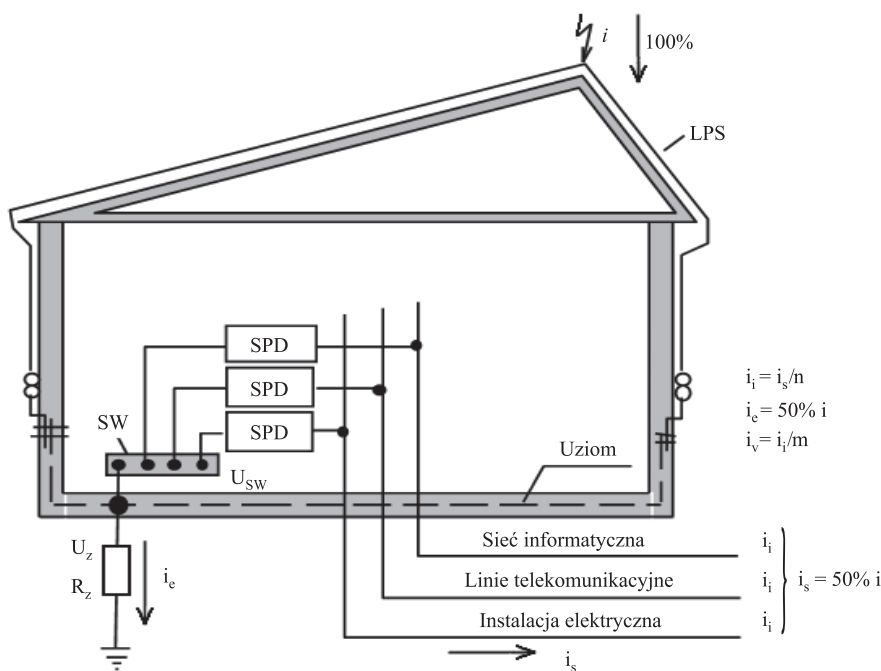
Rys. 16. Pętle indukcyjne utworzone: a) z udziałem przewodu odprowadzającego, b) w odseparowaniu od przewodu odprowadzającego, c) między dwoma przewodami odprowadzającymi

Od rodzaju i od usytuowania pętli istotnie zależy wartość indukowanego w niej napięcia, na przykład, jeżeli na rys. 16 założymy, że $a = 2$ m, $l = 3$ m, $r = 0,005$ m, $di/dt = 100$ kA/ μ s, $b = 3$ m, $c = 5$ m lub $c = a$, to w przypadku a) $u_1 = 359$ kV, w przypadku b) $u_2 = 55$ kV, a w przypadku c), gdy $c = 5$ m, $u_3 = 14$ kV, a gdy $c = a$, $u_3 = 0$ kV.

Wskazane jest odsuwanie pętli od przewodu odprowadzającego na bezpieczną odległość również przy istnieniu większej niż jeden liczby przewodów odprowadzających.

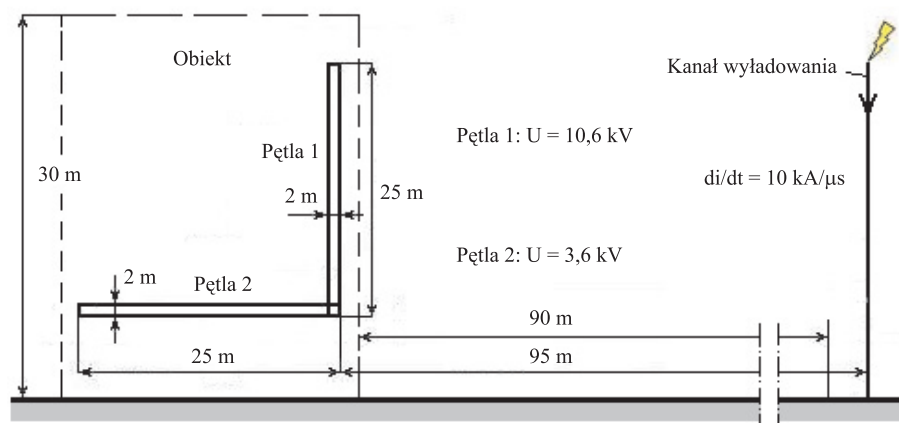
Konstrukcje stalowe i żelbetonowe obiektów powinny być wykorzystywane, jako zwody i przewody odprowadzające. Jeżeli jest to niemożliwe, to należy zainstalować dodatkowe zwody i przewody, łącząc je z konstrukcją, w celu uniknięcia niekontrolowanych przeskoków iskrowych. Nieprawidłowością jest też zbliżanie przewodu odprowadzającego do innych instalacji przewodzących obiektu bez ich połączenia wyrównawczego. Instalacje te powinny być chronione przed niekontrolowanymi przeskokami iskrowymi (np. łączone wyrównawczo) i przed przepięciami indukowanymi (np. ekranowane) oraz przed ich skutkami (np. za pomocą SPD).

Obok napięć indukowanych ważną rolę odgrywa uziomowy spadek napięcia U_z wymuszający wysoki potencjał U_{SW} na szynie wyrównawczej (rys. 17), skąd przenosi się na inne połączone z nią urządzenia w rozpatrywanym obiekcie i na przyłączone do niego instalacje zewnętrzne.

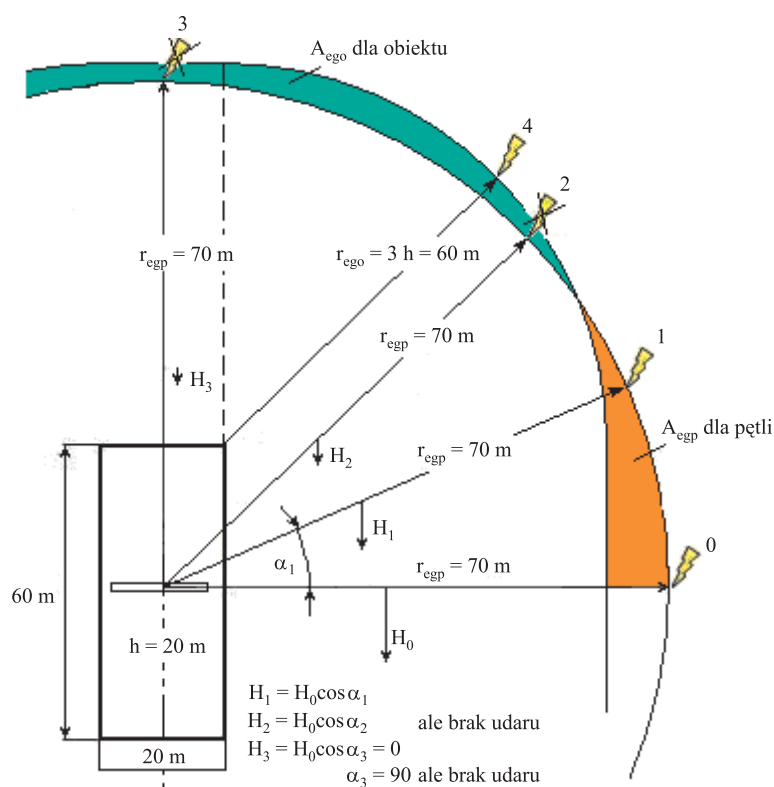


Rys. 17. Rozpływ prądu: i_i – prąd wpływający do każdej linii (sieci), i_s – jego suma, i_v – prąd w przewodach linii, m – liczba żył w linii, n – liczba wchodzących linii, SW – szyna wyrównawcza, U_{SW} – napięcie szyny

Przy wyładowaniach pobliskich w ziemię, napięcia indukowane w instalacjach przewodzących obiektu nie powinny przekraczać poziomów kategorii przepięć, przypisanych elektrycznemu wyposażeniu. Ich wartość zależy od parametrów charakteryzujących zarówno pętlę, jak i wyładowanie piorunowe (rys. 18), przy czym zasadniczą też rolę odgrywają, pokazane na rys. 19, powierzchnie równoważne A_{eqo} dla obiektu i A_{eqp} dla pętli.



Rys. 18. Przykład wpływu układu pętla-kanal wyładowania na napięcia indukowane



Rys. 19. Przykład wpływu lokalizacji kanalu i długości budynku na powierzchnie równoważne A_{ego} i A_{esp} oraz na napięcia indukowane

Napięcia indukowane przez wyładowania, związane z powierzchnią A_{esp} dla pętli, są zwykle znacznie liczniejsze niż związane z A_{ego} dla obiektu, ale w znacznej części mają mniejszą wartość, gdyż promień równoważny r_{esp} dla pętli może być znacznie większy niż promień r_{ego} dla obiektu i wynika z zależności:

$$U = 0,2 / \ln \frac{r_{eqp} + 0,5a \frac{di}{dt}}{r_{eqp} - 0,5a \frac{di}{dt}}, \quad (1)$$

gdzie: $a = \frac{S}{h}$ – szerokość pętli, S – jej powierzchnia, h – wysokość pętli/obiektu.

Gdy napięcie indukowane U jest większe niż napięcie wytrzymałowe U_w i spełniony jest warunek $U > U_w$ oraz gdy $I = h$, wówczas

$$U_w = 0,2 h \ln \frac{r_{eqp} + 0,5 \frac{S}{h} \frac{di}{dt}}{r_{eqp} - 0,5 \frac{S}{h} \frac{di}{dt}} \quad (2)$$

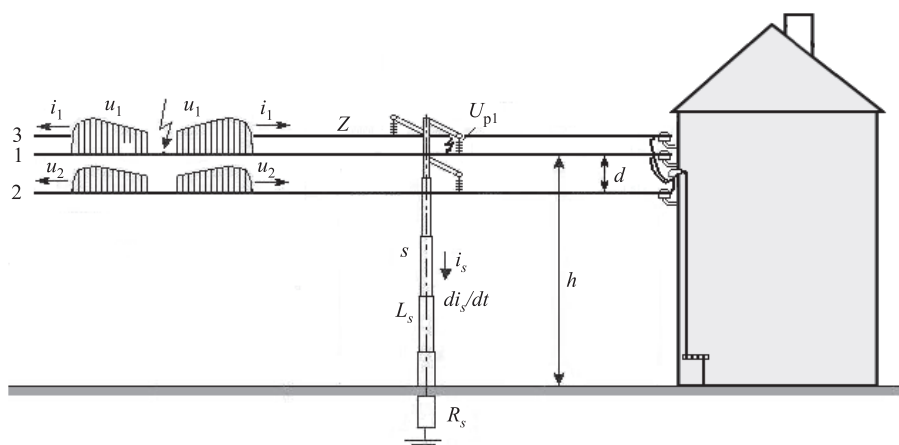
oraz

$$r_{eqp} < -0,5 \frac{S}{h} \left[1 + \exp \left(\frac{U_w}{0,2h \frac{di}{dt}} \right) \right] \times \left[1 - \exp \left(\frac{U_w}{0,2h \frac{di}{dt}} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Z zależności (3) wynika, że jeżeli: $S = 15 \text{ m}^2$, $h = 20 \text{ m}$, $U_w = 2,5 \text{ kV}$ i $di/dt = 30 \text{ kA}/\mu\text{s}$, lub jeżeli $S = 26 \text{ m}^2$, $h = 20 \text{ m}$, $U_w = 1,5 \text{ kV}$ i $di/dt = 20 \text{ kA}/\mu\text{s}$, to wówczas $r_{eqp} \approx 70 \text{ m}$.

W przypadku trafień piorunowych we wchodzącą do obiektu linię powstaje kwestia liczby trafień i przepięć w liniach napowietrznych i kablowych oraz kwestia naturalnego i ingerencyjnego (za pomocą SPD) ograniczania przepięć, a także wzrostu napięcia ponad napięcie ograniczone w obwodzie chronionym.

Sytuacja linii napowietrznych, przy trafieniach bezpośrednich, została zobrazowana na rys. 20. Przyjmuje się tak, jak dla obiektu budowlanego, że zasięg powierzchni równoważnej tej linii $r_{egl} = 3h$, przy czym h – wysokość przewodu linii nad ziemią.



Rys. 20. Przykład trafienia piorunu we wchodzącą do obiektu linię

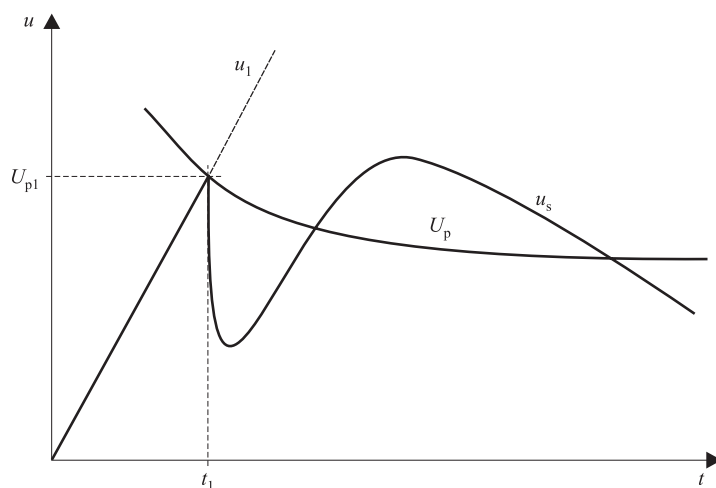
Powstające w linii przepięcia bezpośrednie mogą być wyznaczone z zależności:

$$u_1 = 0,5 I Z, \quad (4)$$

w której I – prąd piorunu, Z - impedancja falowa przewodu linii.

Już przy niewielkich wartościach, np. $I = 15 \text{ kA}$ i przy impedancji falowej $Z = 450 \Omega$, napięcie w przewodzie trafionym mogłoby osiągnąć wartość $u_1 = 6,75 \text{ MV}$, gdyby nie przeskok na izolatorze o wytrzymałości $U_w = U_{p1} = 60 \text{ kV}$. Wskutek przeskoku napięcie - jak pokazano na rys. 21 - zostaje naturalnie ograniczone, a dalszy jego przebieg ma charakter spadku napięcia na indukcyjności L_s słupa i na jego uziemieniu R_s , wg zależności:

$$u_s \approx R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad (5)$$



Rys. 21. Przebieg napięcia wejściowego do obiektu

W przypadku linii kablowej zasięg powierzchni równoważnej jest uzależniony od rezystywności gruntu ρ , według zależności:

$$r_{eqk} = 0,5\sqrt{\rho} \quad (6)$$

Napięcie na kablu może sięgać również MV i jest przenoszone do obiektu ekranem lub po przebiciu izolacji żyłami. Uszkodzenie kabla stwarza poważniejsze niż w liniach napowietrznych problemy identyfikacyjne i naprawcze.

Ingerencyjna redukcja przepięć na wejściu linii do obiektu polega na zastosowaniu urządzeń do ograniczania przepięć (SPD), których dobór wymaga monitorowania wartości ryzyka szkód piorunowych i zależy głównie od poziomu ochrony U_p , napięcia pracy ciągłej U_c , wartości prądów wyładowczych I_n i I_{imp} , wartości napięć wytrzymywanych (kategorii przepięć) U_w chronionych urządzeń i długości chronionego obwodu oraz od charakteru i wartości jego obciążenia. Ryzyko R jest monitorowane na podstawie warunku [11]:

$$R < R_T \quad , \quad (7)$$

przy czym:

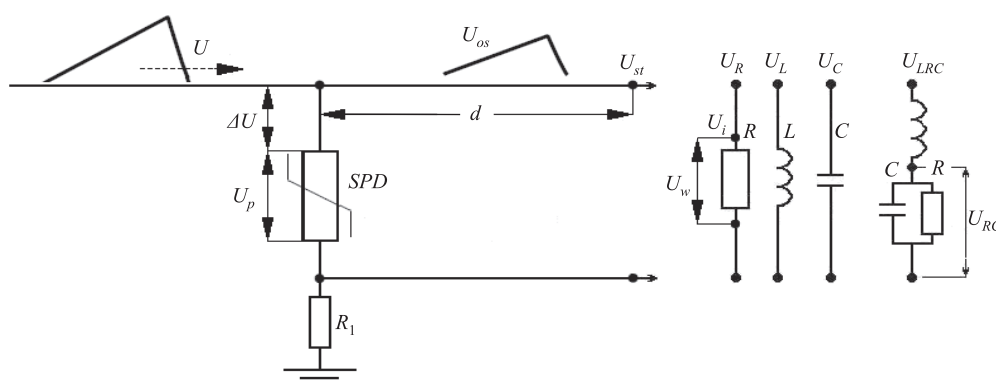
$$R \approx NPL \quad , \quad (8)$$

gdzie: N – liczba wyładowań oddziałujących na obiekt, P – prawdopodobieństwo wywołania szkody przez wyładowanie, L – względny rozmiar szkody, R_T – tolerowana wartość ryzyka.

Poziomy napięć U_p , U_w , U_c powinny być skoordynowane, a wartości napięć U_w w instalacjach elektrycznych, telekomunikacyjnych i informatycznych dostosowane do znamionowych napięć i kategorii przepięć zainstalowanych urządzeń. Prądy wyładowcze znamionowe i impulsowe SPD, powinny - w zależności od lokalnych warunków – osiągać wartości: $I_n \geq 5 \text{ kA}$, 10 kA , 20 kA ($8/20 \mu\text{s}$), a $I_{imp} \geq 12,5 \text{ kA}$, 25 kA , 50 kA ($10/350 \mu\text{s}$). Długość chronionego obwodu d (rys. 22) powinna być powiązana ze zjawiającym się na zaciskach chronionego urządzenia napięciem:

$$U_{st} = U_p + \Delta U + U_i + U_{os} \leq U_w \quad , \quad (9)$$

gdzie: U_p – poziom ochrony, ΔU – spadek napięcia w gałęzi SPD, U_i – napięcie indukowane, U_{os} – napięcie oscylacyjne w chronionym obwodzie, U_w – napięcie wytrzymywane chronionego urządzenia.



Rys. 22. Schemat analizowanego obwodu z alternatywnym obciążeniem w postaci kombinacji elementów RLC

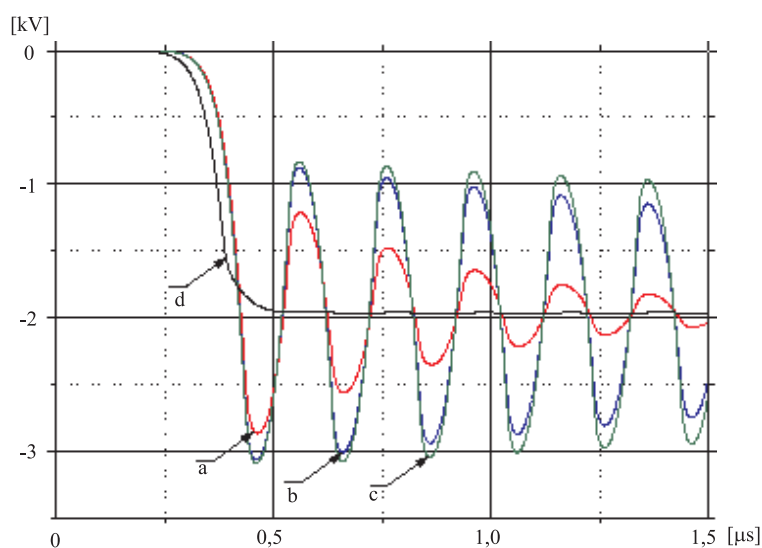
Krytyczna długość chronionego obwodu $d = d_c$ wynika z warunku:

$$d_c \leq \frac{U_w - U_p}{u_d} \quad , \quad (10)$$

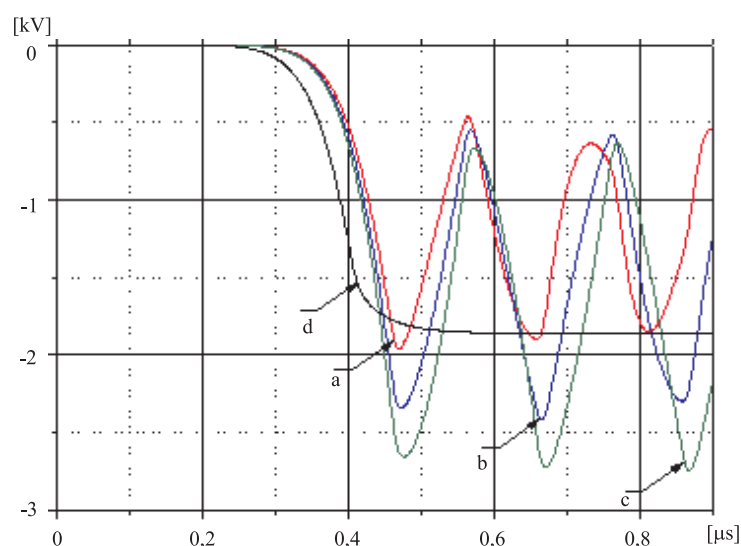
w którym u_d - jednostkowy przyrost napięcia na drodze d między SPD a chronionym urządzeniem, zależy od kształtu fali przepięciowej i od charakteru obciążenia.

Jeżeli różnica napięć ($U_w - U_p$) jest mała, to d_c też jest mała, a jeżeli rzeczywista długość obwodu d jest większa niż d_c , to również napięcie U_{st} jest większe niż napięcie wytrzymywane U_w i wówczas należy zaciski chronionego urządzenia wyposażyć w dodatkowe SPD.

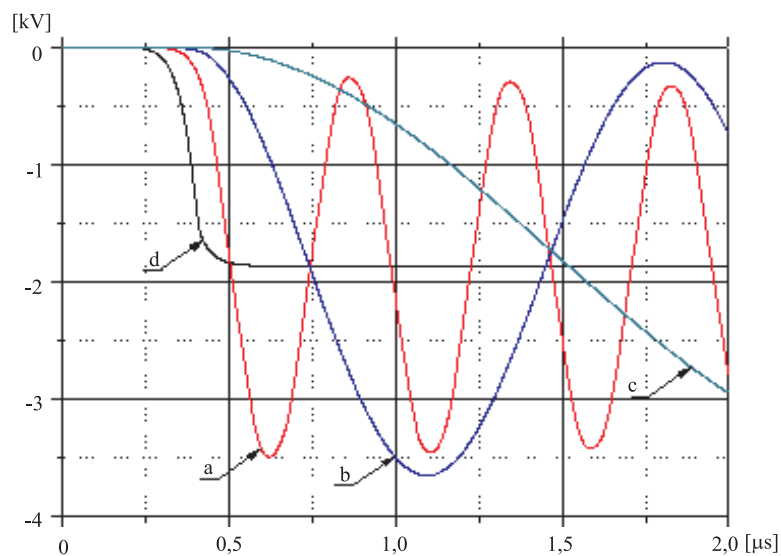
Wzrost napięcia U_{st} na końcu chronionego obwodu z rys. 22, w zależności od jego parametrów, można wyznaczyć za pomocą PSPICE [7]. Do symulacji przebiegów napięciowych, na początku obwodu (napięcie U_p) i na jego końcu (napięcie U_{st}), przyjęto pięć wariantów jego parametrów, przy pobudzeniu udarem prądowym o kształcie $0,25/100 \mu s$ i dodatkowo jeden (szósty) wariant, przy pobudzeniu udarem prądowym o kształcie $10/350 \mu s$. Wyodrębnione krzywe dla różnych wariantów pokazano na rys. 23-28.



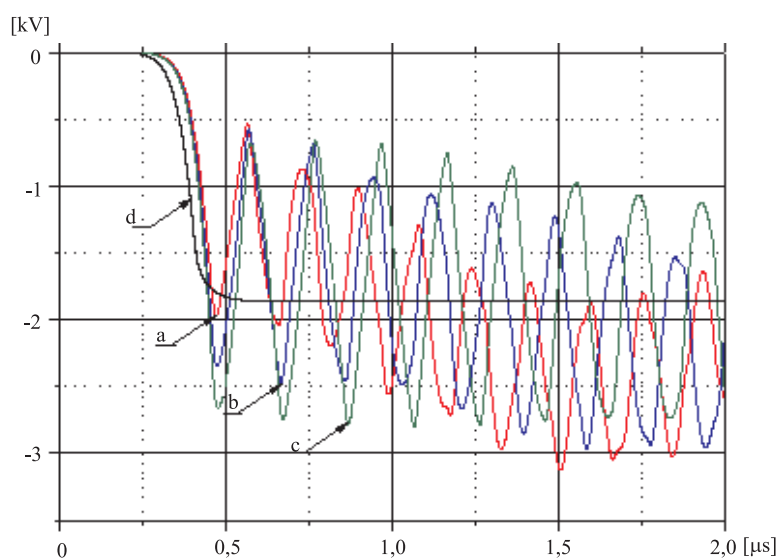
Rys. 23. U_{st} dla: a) $R = 1 \text{ k}\Omega$, b) $R = 10 \text{ k}\Omega$, c) $R = 1 \text{ M}\Omega$, d) U_p dla $R_l = 10 \Omega$



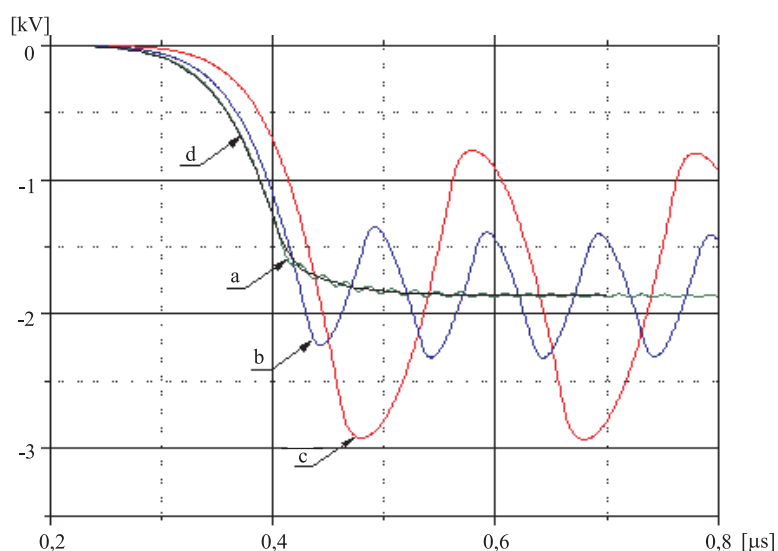
Rys. 24. U_{st} dla: a) $L = 10 \mu H$, b) $L = 20 \mu H$, c) $L = 50 \mu H$, d) U_p dla $R_l = 10 \Omega$



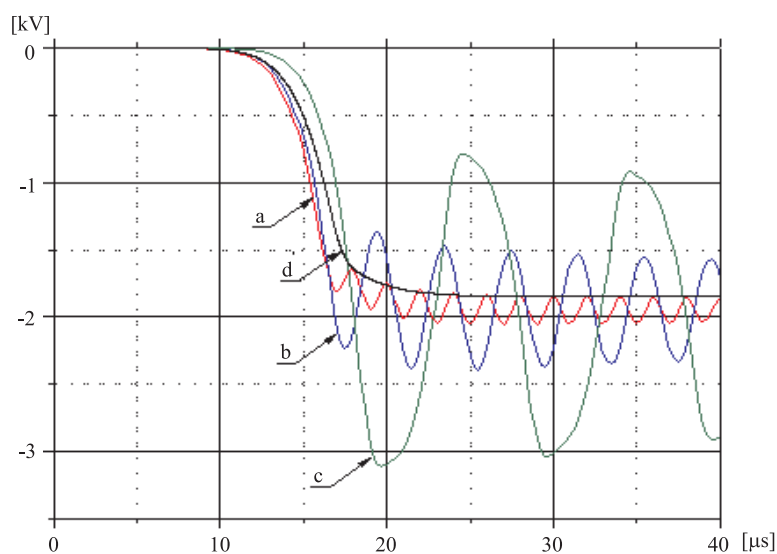
Rys. 25. U_{st} dla: a) $C = 1 \text{ nF}$, b) $C = 10 \text{ nF}$, c) $C = 100 \text{ nF}$, d) U_p dla $R_l = 10 \Omega$



Rys. 26. U_{st} dla: a) $R = 100 \text{ k}\Omega$, $L = 10 \mu\text{H}$, $C = 10 \text{ nF}$, b) $R = 100 \text{ k}\Omega$, $L = 20 \mu\text{H}$, $C = 10 \text{ nF}$, c) $R = 100 \text{ k}\Omega$, $L = 50 \mu\text{H}$, $C = 10 \text{ nF}$, d) U_p dla $R_l = 10 \Omega$



Rys. 27. U_{si} dla: a) $d = 1$ m, b) $d = 5$ m i c) $d = 10$ m, przy obciążeniu $R = 1$ M Ω oraz d) U_p dla $R_l = 10$ Ω



Rys. 28. U_{si} dla: a) $d = 100$ m, b) $d = 200$ m, c) $d = 500$ m, przy obciążeniu $R = 1$ M Ω oraz d) U_p dla $R_l = 10$ Ω

Jak już wspomniano należy jeszcze zwrócić uwagę na potrzebę uwzględnienia wpływu wyładowań występujących w pobliżu linii wchodzących do obiektu, które wprawdzie nie wpływają dodatkowo na dobór SPD, z uwagi na mniejsze wartości przepięć indukowanych niż bezpośrednich, ale mają istotny wpływ na zwiększenie częstości występowania przepięć. Przeciętna roczna częstość bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekt odosobniony, o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ m, w klimacie umiarkowanym na równinie, nie przekracza wartości rzędu 10^{-2} , a roczna częstość wyładowań piorunowych bezpośrednich we wchodzące do obiektu linie o wysokości 8 m nie przekracza wartości rzędu 10^{-1} . Nato-

miast roczna częstość oddziaływań na obiekt wyładowań pobliskich szacowana jest na poziomie $1,5 \times 10^0$, a analogiczna częstość oddziaływań piorunowych, na wchodzące do obiektu linie, jest szacowana na poziomie $2,0 \times 10^0$. Większa częstość występowania przepięć indukowanych wynika z większego zasięgu powierzchni równoważnych. Zasięg ten, wyrażony w metrach, wynosi dla linii napowietrznych:

$$r_{eqI} = 500 \quad (11)$$

i dla linii kablowych:

$$r_{eqk} = 12,5\sqrt{\rho} \quad (12)$$

Wzrost częstości występowania przepięć może stwarzać potrzebę stosowania innych środków ochrony, jak redukcja pętli przez odpowiednie trasowanie obwodów instalacyjnych, ekranowanie przestrzeni i przewodów oraz połączenia wyrównawcze.

Podsumowanie

W realizacji ochrony odgromowej występują obecnie w Polsce znaczne nieprawidłowości. Są one powodowane niespójnością przepisów, zaniedbaniami ze strony przedstawicieli instytucji państwowych i brakiem profesjonalizmu realizatorów ochrony. Istnieje wyraźnie pilna potrzeba podjęcia zdecydowanych kroków, w celu wyeliminowania tych zjawisk. Działania Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej, przy Stowarzyszeniu Elektryków Polskich, okazują się niewystarczające. Wymagają one silnego, powszechnego i pełnego inicjatyw wsparcia ze strony całego środowiska technicznego.

Bibliografia

- [1] CLC/TC 81X (Secretariat) 0101/RM. Unconfirmed minutes of the 9th meeting held in Brussels (Belgium) on 2nd September 2009, Items: 6.1, 6.4, 6.5.
- [2] Flisowski Z., Stańczak B., Mazzetti C.: *Conditions for corona discharge on installation shielded against lightning stroke*, Int. Symposium on High Voltage Engineering (ISH), New Orleans (USA), September 1989.
- [3] Gomes C, Abidin Ab Kadir M. Z.: *Lightning protection: Getting it wrong*, IEEE Technology and Society Magazine, Summer 2011 1932-4529/11
- [4] Hartono Z. A., Robiah I.: *Conventional and Un-conventional Lightning Air Terminals: An Overview*. Forum on Lightning Protection, Hilton Petaling Jaya, January 2004
- [5] <http://www.lightningsafetyalliance.org>
- [6] http://www.lightningsafetyalliance.org/documents/acem_air_terminals.pdf
- [7] Krasowski D., and oth.: *On critical distance between an SPD and protected appliance with respect to their voltage coordination*, ICLP 2010, Cagliari, Italy
- [8] Lightning Eliminators: <http://www.lightningprotection.com>
- [9] NF C 17-102:1995. Protection contre la foudre. Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage.

- [10] PN-EN 62305-1:2008 - Ochrona odgromowa - część 1: Ogólne zasady
- [11] PN-EN 62305-2:2008 - Ochrona odgromowa - część 2: Zarządzanie ryzykiem
- [12] PN-EN 62305-3:2009 - Ochrona odgromowa - część 3: Uszkodzenie fizyczne obiektu i zagrożenie życia
- [13] PN-EN 62305-4:2009 - Ochrona odgromowa - część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach
- [14] PN-EN 62561:2010. Elementy urządzenia piorunochronnego (LPSC) - Wymagania dotyczące: część 1 - elementów połączeniowych, część 2 - przewodów i uziomów, część 3 - iskierników separacyjnych, część 4 - uchwyty przewodów, część 5 – uziomowych skrzynek inspekcyjnych i uszczelek, część 6 – liczników piorunowych (LSC), część 7 – związków poprawiających uziemienie, część 8 – elementów izolowanego LPS (wstępny projekt).
- [15] Robbyn Mitchell: *Adventure Island employee dies after being struck by lightning*, Tampa Bay Times September 10, 2011
- [16] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.).
- [17] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz. U. Nr 156, poz. 1118 z późn. zm.).
- [18] Ustawa z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji (Dz. U. Nr 169, poz. 1386, z późn. zm.)

Zdobysław Flisowski



Prof. dr hab. Zdobysław Flisowski ukończył studia na Politechnice Warszawskiej, w 1952 roku został pracownikiem naukowym tej uczelni. W 1966 obronił doktorat, a w 1980 r. habilitację. W 1987 r. został profesorem nadzwyczajnym, w 1992 profesorem zwyczajnym. Przez kilkanaście lat pełnił funkcję prodziekana Wydziału Elektrycznego, w latach 1989-1992 prorektora PW. W 1991 roku został kierownikiem Zakładu Techniki Wysokich Napięć. Specjalizuje się w technikach wysokich napięć, elektrotechnologiach i ochronie odgromowej. Przewodniczy Polskiemu Komitetowi Ochrony Odgromowej SEP, należy do Towarzystwa Naukowego Warszawskiego.

e-mail: zdobyslaw.flisowski@ee.pw.edu.pl