

Analiza wpływu uziomu na wymagany odstęp separacyjny od instalacji piorunochronnej

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ zastosowanego typu uziomu oraz wartości rezystywności gruntu na wymagany minimalny odstęp separacyjny pomiędzy zewnętrzną instalacją piorunochronną (LPS), a wewnętrzną instalacją elektryczną budynku. Przeprowadzono modelowanie i symulację komputerową oraz na podstawie uzyskanych wyników obliczono wymagany odstęp separacyjny dla różnych wariantów, następnie porównano je z wartościami referencyjnymi obliczonymi na podstawie wzorów przedstawionych w normie odgromowej IEC 62305-3.

Abstract. This article presents the influence of the applied grounding type and value of soil resistivity on the required minimum separation distance between the external lightning protection system (LPS) and internal electrical system of the building. Computer modeling and simulation was conducted, and based on the obtained results, the required separation distance was calculated for different variants, and then they were compared with reference values calculated based on formulas presented in IEC 62305-3 lightning protection standard. (Analysis of the impact of the earth electrode on the required separation distance from lightning protection systems)

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, urządzenie piorunochronne (LPS), przebicie izolacji, odstęp separacyjny.

Keywords: lightning protection, lightning protection system (LPS), insulation breakdown, separation distance.

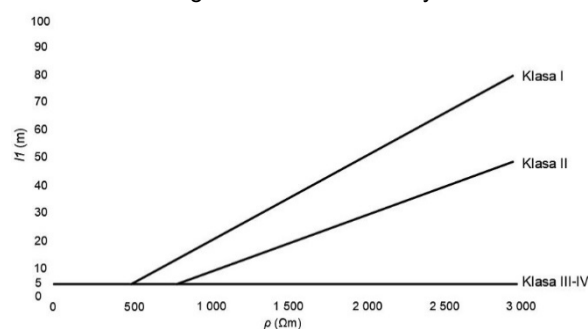
Wstęp

Jednym z aspektów ochrony odgromowej jest zapewnienie wymaganego odstępu separacyjnego pomiędzy instalacją odgromową (LPS), a przewodzącymi elementami znajdującymi się w obiekcie (instalacje wewnętrzne oraz konstrukcje metalowe) [1]. Na odstęp iskrobezpieczny poza parametrami uwzględnionymi we wzorze międzynarodowej normy IEC 62305-3 prawdopodobnie mogą mieć wpływ inne czynniki, takie jak rezystancja uziomu (rezystywność gruntu) i jego konfiguracja oraz długość i trasa pętli, w której indukuje się napięcie.

Norma IEC 62305-3 zaleca realizować uziom w taki sposób, aby uzyskać dostatecznie małą rezystancję poniżej 10Ω , ale również przewiduje inne minimalne rozwiązania opierające się na parametrach fizycznych uziomu, których spełnienie nie jest równoważne z zapewnieniem dostatecznie niskiej wartości rezystancji uziomu. Zgodnie z wyżej wymienioną normą przy projektowaniu instalacji odgromowej w klasie LPS IV, minimalnym wymogiem dla uziomu typu A, niezależnie od rezystywności gruntu (rys.1) jest zastosowanie u podstawy przewodów odprowadzających uziomów indywidualnych poziomych o długości l_I nie mniejszej niż 5 m. W przypadku zastosowania uziomów indywidualnych pionowych minimalną wymaganą długość pojedynczych prętów uziomowych można zredukować dwukrotnie do wartości 2,5 m. W przypadku zastosowaniu uziomu typu B (uziom otokowy, kratowy) minimalnym wymogiem jest wartość średnia promienia r_e obszaru objętego tym uziomem, która nie może być mniejsza niż l_I [2].

Zastosowanie wyżej przedstawionych podstawowych wymagań dotyczących konfiguracji i długości elementów układu uziomowego może okazać się niewystarczające do zapewnienia bezpieczeństwa przed przeskokiem iskrowym. Głównie dotyczy to projektowania LPS w klasie III i IV, przy której nie uwzględnia się wpływu zmiany rezystywności gruntu na zmianę parametrów (długości) elementów uziomu. W przypadku realizacji uziomu w gruncie o dużej rezystywności różnica potencjałów w miejscu rozpatrywanego odstępu separacyjnego może być wyższa niż przy niskiej rezystywności gruntu. Zastosowanie uproszczonego wzoru oraz przyjęcie minimalnych wymagań przedstawionych w normie IEC 62305 może prowadzić do niedoszacowania odstępu separacyjnego, a w konsekwencji przyjęcia złych rozwiązań projektowych. Prowadzi to ostatecznie do przebicia izolacji oraz wpłynięcia części

prądu piorunowego do instalacji elektrycznych lub telekomunikacyjnych, co z kolei może skutkować uszkodzeniem urządzeń, zniszczeniem konstrukcji, pożarem a nawet zagrożeniem zdrowia i życia.



UWAGA: Klasa III i IV są niezależne od rezystywności gruntu.

Rys.1. Minimalna długość l_I każdego uziomu zgodnie z przyjętą klasą LPS [2]

W artykule został zbadany wpływ rezystywności gruntu oraz konfiguracji układu uziomowego na wartości napięć indukowanych w miejscu zbliżenia LPS i instalacji elektrycznej, a w konsekwencji na wymagany odstęp separacyjny. Na podstawie wyników obliczeń uzyskanych za pomocą programu zrewidowano wartości wymaganego odstępu separacyjnego uzyskiwane za pomocą wzoru przedstawionego w aktualnej normie ochrony odgromowej.

Przegląd literatury

Artykuły dotyczące ochrony odgromowej w głównej mierze odnoszą się do wyników otrzymanych za pomocą wzorów przedstawionych w aktualnej normie odgromowej IEC 62305 oraz porównania ich z wynikami uzyskiwanymi podczas badania symulacyjnego lub eksperymentalnego.

W [3] zostało przeprowadzone porównanie metod symulacyjnych bazujących na teorii obwodów i na teorii pola, oraz wykonana walidacja tych metod za pomocą badania eksperymentalnego, gdzie w obu przypadkach wzrost rezystancji uziomu/rezystywności gruntu prowadził do zmniejszenia procentowego udziału prądu piorunowego płynącego w przewodzie odprowadzającym zlokalizowanym bezpośrednio pod miejscem wyładowania piorunowego. Wynika z tego, że rezystywność gruntu wpływa na rozptył prądu pioruna w szczególności w przewodzie odprowadzającym, nad którym bezpośrednio doszło do

wyładowania pioruna oraz przy założeniu, że zastosowano uziom zajmujący małą powierzchnię w gruncie (uziom typu A składający się z indywidualnych uziomów, np. stopa fundamentowa, której zbrojenie zostało wykorzystane jako uziom do celów ochrony odgromowej).

W badaniach symulacyjnych [4, 5] zbadano zależność odstępu separacyjnego od kształtu prądu udarowego oraz kształtu i lokalizacji pętli w obiekcie poddawany ochronie, w której indukuje się napięcie wywołane przepływem prądu piorunowego. Rezultaty wykazały, że spośród wszystkich typów udarów prądowych scharakteryzowanych w normie ochrony odgromowej, to podczas wyładowania pierwszego udaru ujemnego wymagany odstęp iskrobezpieczny był największy, w niektórych przypadkach nawet dwukrotnie przekraczał wartość uzyskiwaną za pomocą wzoru przedstawionego w normie.

W pracy [6] poprzez przeprowadzone symulacje komputerowe stwierdzono, że obliczanie odstępu separacyjnego wg wzoru normy prowadzi do jego niedoszacowania lub przeszacowania, a znaczący wpływ na to ma miejsce uderzenia pioruna. W przypadku uderzenia pioruna bezpośrednio nad zwodem odprowadzającym (na rogu budynku), w którym rozpatrujemy odstęp separacyjny dochodzi do niedoszacowania wymaganej odległości iskrobezpiecznej uzyskiwanej za pomocą obliczeń teoretycznych normy ochrony odgromowej.

Badanie symulacyjne przedstawione w [7] wykonano przy założeniu, że grunt jest idealny (rezystywność równa zero), oraz przy braku uwzględnienia indukowanego napięcia w pętli (zmierzono tylko wartość napięcia na przewodzie odprowadzającym w odniesieniu do potencjału gruntu i założono, że taki sam potencjał gruntu panuje na przewodzącej instalacji/elementie konstrukcji w rozpatrywanym miejscu zblżenia). Badanie pierwotnie zakładało, że najbardziej niebezpieczny pod kątem zachowania odstępu iskrobezpiecznego jest kolejny udar ujemny ze względu na największą stromość narastania czoła prądu piorunowego (niedoszacowanie odstępu separacyjnych za pomocą wzoru z normy w odniesieniu do badań symulacyjnych), ale tylko przy założeniu takiej samej wartości szczytowej prądu udarowego jak dla pozostałych udarów. Wzięcie pod uwagę klasy LPS i odpowiadających jej parametrów udarów, tj. dwukrotnie mniejszej wartości szczytowej prądu piorunowego dla kolejnego udaru ujemnego w odniesieniu do pierwszego udaru ujemnego, prowadzi do wniosku, że wymagany odstęp separacyjny jest jednak największy dla pierwszego udaru ujemnego. Zbadano również wpływ parametrów uziomu na odstępy separacyjne. Z badań tych wynikało, że rezystancja uziomu ma największy wpływ przy przepływie pierwszego udaru dodatniego, a indukcyjność uziomu przy przepływie kolejnego udaru ujemnego.

W badaniu [8] również wykazano, że obliczany odstęp separacyjny za pomocą wzoru z normy ochrony odgromowej dla budynków wysokich (powyżej 30 m) jest mniejszy w porównaniu do wartości otrzymywanych na podstawie obliczeń symulacyjnych, nawet dwukrotnie. Wymusza to stosowanie połączeń wyrównawczych w przypadku jednoczesnego występowania dedykowanych przewodów odprowadzających oraz zbrojenia konstrukcji w postaci stalowych prętów, będących w znacznym zbliżeniu, ponieważ w takim przypadku odstęp separacyjny nie może być zachowany i prawdopodobnie wystąpi przebiecie izolacji pomiędzy nimi.

Dotychczasowe badania wskazują, na to, że najbardziej sprzyjające warunki do wystąpienia przeskoków iskrowych wystąpią w przewodzie odprowadzającym zlokalizowanym w narożniku budynku bezpośrednio pod miejscem, w którym dojdzie do wyładowania, w przypadku prądu

piorunowego pierwszego udaru ujemnego, przy zastosowaniu słabej jakości uziomu, tj. układu uziomów indywidualnych typu A w gruncie o wysokiej rezystywności. Z powyższych artykułów wynika, że zastosowanie wzorów z normy ochrony odgromowej do celów obliczania odstępu separacyjnych nie sprawdza się we wszystkich konfiguracjach i często prowadzi do niedoszacowania odstępu separacyjnych. Badanie przedstawione w niniejszym artykule ma na celu przeprowadzenie symulacji dla skrajnie niebezpiecznych przypadków, dlatego zostało przeprowadzone dla sytuacji, którą powyżej określono jako sprzyjającą pojawieniu się przebiecia izolacji.

Założenia

Modelowanie i symulacja komputerowa została przeprowadzona w pakiecie oprogramowania CDEGS, a dokładnie w modułach FFTSES [9] oraz HIFREQ [10]. Poprawność oraz dokładność obliczeń wyżej wymienionego oprogramowania do celów obliczania procentowego podziału prądu piorunowego rozprzyskującego się w instalacji odgromowej oraz instalacji elektrycznej została potwierdzona w [3] poprzez stworzenie rzeczywistego modelu laboratoryjnego w skali oraz przeprowadzenie badania eksperymentalnego.

W programie cała modelowana struktura instalacji odgromowej jest reprezentowana w postaci cylindrycznych przewodów o zdefiniowanych przez użytkownika parametrach elektrycznych, natomiast zależności opisujące warunki brzegowe formułowane są w oparciu o równania Maxwella, rozwiązywane numerycznie metodą momentów. Przeprowadzone obliczenia rozprzysku prądów w badanej strukturze obiektu bazują na sformułowaniach:

- warunków brzegowych na granicy warstw ośrodków oraz na powierzchni przewodów,
- praw Kirchhoffa w węzłach struktury,
- prądów źródłowych wpływających do układu.

Warunek brzegowy dla ośrodka wielowarstwowego opisywany jest ciągłością składowych stycznych wektorów pola elektrycznego i magnetycznego na granicach tych warstw, które mają różne właściwości elektryczne. Warunek brzegowy dla prostoliniowych cienkich przewodów wymaga zachowania ciągłości składowych stycznych pola elektrycznego oraz pola magnetycznego na ich powierzchni. Wynika z tego, że składowa styczna natężenia pola elektrycznego jest równa iloczynowi impedancji wewnętrznej przewodu oraz przepływającego w nim prądu.

Metodyka przeprowadzenia badania na modelu symulacyjnym, którego dotyczy niniejszy artykuł była następująca. Utworzono plik wejściowy prądu piorunowego opisanego w dziedzinie czasu oraz transformowano go do dziedziny częstotliwości za pomocą transformaty Fouriera w module FFTSES. W module HIFREQ zostały przeprowadzone obliczenia przebiegów napięć w dziedzinie częstotliwości w rozpatrywanych miejscach zblżenia instalacji LPS oraz instalacji elektrycznej wewnętrznej. Otrzymane wyniki w dziedzinie częstotliwości z powrotem sprowadzono do dziedziny czasu za pomocą odwrotnej transformaty Fouriera w module FFTSES.

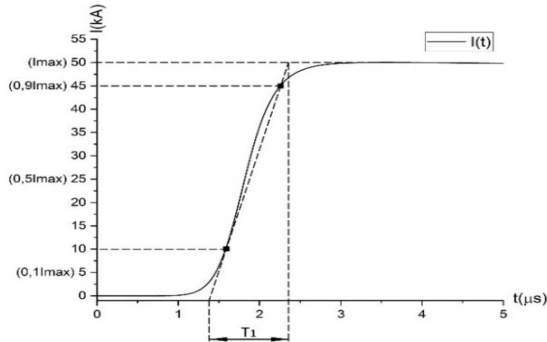
Symulacja została przeprowadzona dla pierwszego udaru ujemnego wyładowania piorunowego dla przyjętej klasy LPS IV, o następujących parametrach: maksymalnym prądzie udarowym $I = 50$ kA oraz kształcie udaru $T_1/T_2 = 1/200$ μ s [1]. Generowane za pomocą programu prądy piorunowe znacznie odbiegają od charakterystyk prądów udarowych określonych normą IEC 62305-3, dlatego do przeprowadzenia symulacji utworzono własny plik przebiegu prądu udarowego za pomocą wzoru Haidler'a (1), który został przedstawiony poniżej [1]:

$$(1) \quad i = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \times \exp(-t/T_2)$$

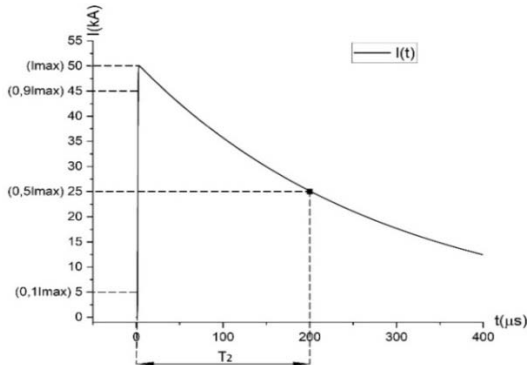
gdzie [1]: I – wartość szczytowa prądu, k – współczynnik korekcyjny, t – czas, T_1 – stała czasu czoła (1,82 μ s dla pierwszego udaru ujemnego i IV klasy LPS), T_2 – stała czasu grzbietu (285 μ s dla pierwszego udaru ujemnego i IV klasy LPS).

Poniżej przedstawiono wygenerowany przebieg pierwszego udaru ujemnego, który został użyty do przeprowadzenia symulacji.

a)



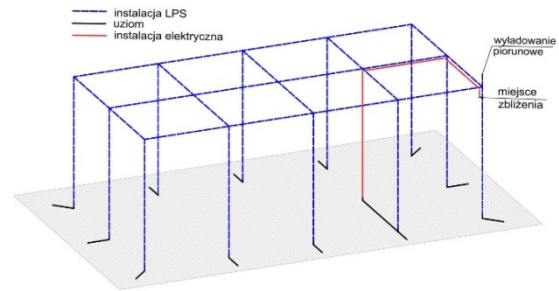
b)



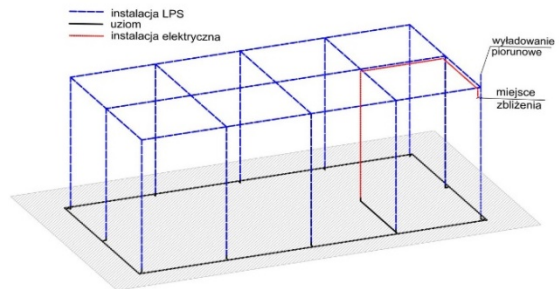
Rys.2. Przebieg prądu pierwszego udaru ujemnego. I_{max} – wartość szczytowa prądu, T_1 – czas trwania czoła, T_2 – czas do półszczytu na grzbiecie

W badaniu zamodelowano przykładowy układ instalacji odgromowej oraz instalacji elektrycznej budynku mieszkalnego wielorodzinnego dwuklatkowego. Przyjęto następujące wymiary budynku: długość: 80 m, szerokość: 40 m, wysokość: 30 m. Zastosowano klasę LPS IV, w tym celu na dachu obiektu rozmieszczono zwody poziome w kształcie siatki o bokach oka: 20 x 20 m, zwód pionowy na rogu budynku o wysokości 3 m oraz przewody odprowadzające rozmieszczone równo co 20 m. Zastosowany rodzaj materiału oraz jego parametry techniczne odnoszące się do pola powierzchni przekroju, dla elementów instalacji LPS, instalacji elektrycznej oraz układu uziomowego zostały zestawione poniżej w tabeli 1. Nietypowe wymiary w odniesieniu do lokalnie występujących materiałów w Polsce, wynikały z ograniczonej dostępności wyboru w programie. Celem było określenie najbliższej wartości powierzchni przekroju dla elementów instalacji LPS wykonanej z drutu o średnicy $d = 10$ mm, uziomu wykonanego z bednarki 25x4 mm oraz przewodu ochronnego (PE) wewnętrznej linii zasilającej mieszkanie typu YDY5x6 mm². O ile w dalszej części artykułu będzie wspomniana instalacja elektryczna należy przez to rozumieć wyłącznie brany pod uwagę przewód PE. Pętla utworzona z instalacji LPS, uziomu oraz instalacji elektrycznej, w której indukowało się napięcie, została pokazana na rysunkach 3, 4 i 5. Miejscem uderzenia

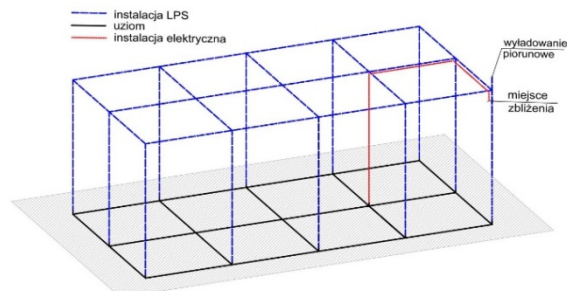
pioruna był wyżej wymieniony 3 metrowy zwód pionowy zlokalizowany na rogu budynku.



Rys.3. Modelowana instalacja LPS klasy IV, uziom typu A



Rys.4. Modelowana instalacja LPS klasy IV, uziom typu B - otok



Rys.5. Modelowana instalacja LPS klasy IV, uziom typu B - kratowy

Tabela 1. Parametry techniczne materiałów wykorzystanych w symulacji

Element	Materiał	Wymiar
Zwód poziomy/pionowy	stal	$r = 4,6355$ mm
Przewód odprowadzający	stal	$r = 4,6355$ mm
Uziom (bednarka)	stal	$s = 25 \times 4$ mm
Instalacja elektryczna (PE)	miedź	$r = 1,45288$ mm

Badanie symulacyjne przeprowadzono dla różnych wartości rezystywności gruntu: 100, 500, 1000, 2000 [Ω m] oraz dla różnych konfiguracji układu uziomowego: uziom typu A – indywidualne uziomy w konfiguracji poziomej (rys.3), uziom typu B – otok (rys.4), uziom typu B – kratowy (rys.5). Modelowany układ symulacyjny był zlokalizowany w dwuwarstwowym ośrodku o różnych właściwościach elektrycznych (powietrze oraz ziemi). Dla każdej z wymienionych konfiguracji uziom został zamodelowany na głębokości 0,8 m pod powierzchnią ziemi. Do badania zastosowano grunt jednorodny (jednowarstwowy) o jednakowych właściwościach elektrycznych (rezystywności) w całej jego objętości.

W celu zilustrowania do czego prowadzi bezrefleksyjne przyjęcie minimalnych wymagań przedstawionych w normie ochrony odgromowej, pierwszą konfiguracją zamodelowano z układem uziomowym typu A, składającym się z zaledwie 5 metrowych elektrod poziomych o liczbie odpowiadającej liczbie przewodów odprowadzających. Wymiary oraz geometria pozostałych dwóch konfiguracji uziomowych została zdeterminowana ze względu na kształt budynku,

gdzie również starano się spełnić tylko minimalne wymagania, czyli zastosowanie otoku odsuniętego metr od ściany zewnętrznej budynku oraz uziomu kratowego o wymiarach oka 20 x 20 m.

Aby sprawdzić, czy na wymagany odstęp separacyjny wpływ ma tylko ilość zakopanego w gruncie uziomu (długość materiału przewodzącego wyrażona w metrach), czy też jego konfiguracja (rozmięszczenie przestrzenne), przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla uziomu typu A o parametrach fizycznych, tj. sumarycznej długości bednarki zakopanej w gruncie równej sumarycznej długości bednarki wykorzystanej do utworzenia uziomu otokowego oraz kratowego. W tym celu zamodelowano układ uziomowy typu A o dłuższych indywidualnych uziomach poziomych, równych 20 m oraz 37 m dla porównania odpowiednio z uziomem otokowym oraz z uziomem kratowym. Powyższe przypadki zbadano tylko dla rezystywności gruntu równej 2000 Ωm

Obliczenia

W celu weryfikacji dokładności obliczeń odstępów separacyjnych otrzymywanych za pomocą wzorów przedstawionych w normie ochrony odgromowej IEC 62305 obliczono za ich pomocą wymagany odstęp iskrobezpieczny s , a następnie porównano z odstępami separacyjnymi obliczonymi na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonej symulacji komputerowej. W celu uproszczenia obliczeń założono, że materiałem izolacyjnym w obu przypadkach jest powietrze. Wymagany odstęp separacyjny zgodnie z normą IEC 62305-3 obliczono za pomocą wzoru (2) [2] dla dwóch, różnych współczynników podziału prądu pioruna oraz współczynnika k_c , określonego metodą dokładną wg (3) [2] oraz metodą uproszczoną wg tabeli 2.

$$(2) \quad s = \frac{k_i}{k_m} \cdot k_c \cdot l$$

$$(3) \quad k_{c1} = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{h}}$$

gdzie [2]: s – wymagany odstęp izolacyjny (separacja elektryczna zewnętrznego LPS), k_i – zależy od wybranej klasy LPS (0,04 dla LPS IV), k_m – zależy od materiału izolacji elektrycznej (powietrze: 1), k_c – zależy od (częściowego) prądu pioruna, płynącego w zwodzie i/lub przewodzie odprowadzającym, l – długość, w metrach, mierzona wzdłuż zwodu i przewodu odprowadzającego od punktu, w którym jest rozpatrywany odstęp separacyjny, do punktu najbliższego połączenia wyrównawczego lub do uziomu, n – całkowita liczba przewodów odprowadzających, c – odległość pomiędzy przewodami odprowadzającymi, h – wysokość pomiędzy przewodami otokowymi (wysokość pomiędzy zwodami poziomymi a uziomem).

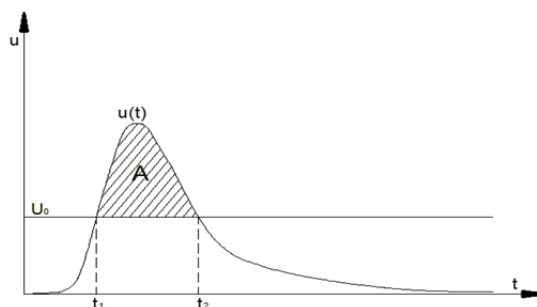
Wartość wymaganego odstępów separacyjnego s w przypadku metody dokładnej była mniejsza niż w przypadku metody uproszczonej i wyniosła odpowiednio **0,43 m** w stosunku do wartości **0,53 m** uzyskanej metodą uproszczoną.

Tabela 2. Przybliżone wartości współczynnika k_c – metoda uproszczona [2]

Liczba przewodów odprowadzających n	k_c
1 (tylko w przypadku odseparowanego LPS)	1
2	0,66
3 i więcej	0,44
UWAGA: Wartość z tablicy stosuje się do wszystkich układów uziemienia typu B i do układu uziemienia typu A pod warunkiem, że rezystancja uziemienia sąsiednich uziomów nie różni się więcej niż dwukrotnie, jeśli uziomy nie spełniają tego warunku należy przyjąć $k_c = 1$.	

Wynikiem przeprowadzonych symulacji były przebiegi napięć indukowanych w rozpatrywanym miejscu zbliżenia, czyli napięcie panujące na przewodzie odprowadzającym instalacji LPS (linia niebieska na rys. 3, 4 i 5) oraz na przewodzie ochronnym instalacji elektrycznej wewnętrznej mieszkania (linia czerwona na rys. 3, 4 i 5), w odniesieniu do potencjału ziemi. Na podstawie uzyskanych przebiegów czasowych obliczono różnicę potencjałów w miejscu zbliżenia, a następnie za pomocą kryterium stałego obszaru (rys.6) dokonano oceny ilościowej maksymalnej odległości, przy której nastąpi przebicie izolacji.

Kryterium stałego obszaru zostało omówione w [4, 5, 6]. Zgodnie z tym kryterium przebicie izolacji pomiędzy dwoma elementami, gdzie występuje różnica potencjałów nastąpi, jeśli wartość obszaru ograniczonego od góry przebiegiem napięcia w funkcji czasu i od dołu statycznym napięciem przebicia U_0 będzie większa niż wartość referencyjna A (wzór (7), rys.6).



Rys. 6. Kryterium stałego obszaru

Wartości referencyjne U_0 i A zależą od odległości rozpatrywanego odstępów separacyjnego oraz od kształtu elementów, pomiędzy którymi może wystąpić przebicie izolacji. Wzajemne powiązania pomiędzy wielkościami referencyjnymi, przebiegiem napięcia i odległością elektrod, wyznaczone na podstawie wyników badań przebicia izolacji typu pręt-pręt, opisano za pomocą zależności analitycznych [7]:

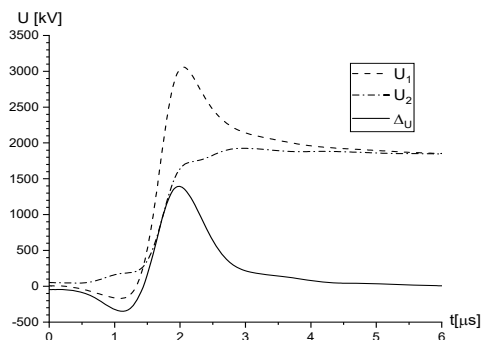
$$(4) \quad U_0 = 630 \cdot d$$

$$(5) \quad U_0 = 2 + 534 \cdot d \rightarrow 0,25m \leq d \leq 2,5m$$

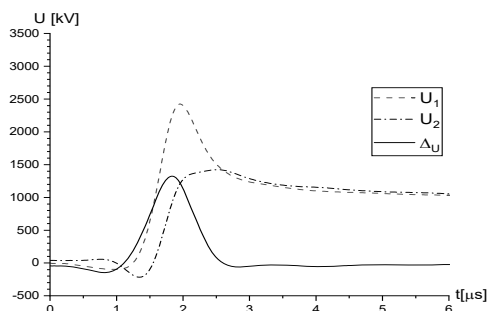
$$(6) \quad A = 590 \cdot d$$

$$(7) \quad \int_{t_1}^{t_2} [u(t) - U_0] \cdot dt \geq A$$

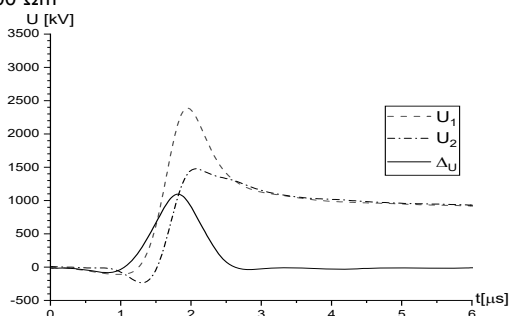
gdzie: d – maksymalna odległość, przy której nastąpi przeskok iskrowy [m], U_0 – statyczne napięcie przebicia [kV], A – wartość referencyjna po przekroczeniu, której nastąpi przebicie izolacji [kV*μs], $u(t)$ – przebieg różnicy potencjałów w rozpatrywanym miejscu zbliżenia [kV].



Rys. 7. Przebiegi indukowanych napięć w rozpatrywanym miejscu zbliżenia dla uziomu typu A poziomego przy $\rho = 2000 \Omega m$



Rys. 8. Przebiegi indukowanych napięć w rozpatrywanym miejscu zbliżenia dla uziomu typu B otokowego przy $\rho = 2000 \Omega m$



Rys. 9. Przebiegi indukowanych napięć w rozpatrywanym miejscu zbliżenia dla uziomu typu B kratowego przy $\rho = 2000 \Omega m$

gdzie: U_1 – napięcie w przewodzie odprowadzającym LPS, względem potencjału ziemi odniesienia w rozpatrywanym punkcie zbliżenia, U_2 – napięcie w instalacji elektrycznej, względem potencjału ziemi odniesienia w rozpatrywanym punkcie zbliżenia, Δ_U – różnica napięć pomiędzy LPS a instalacją elektryczną.

Wyniki

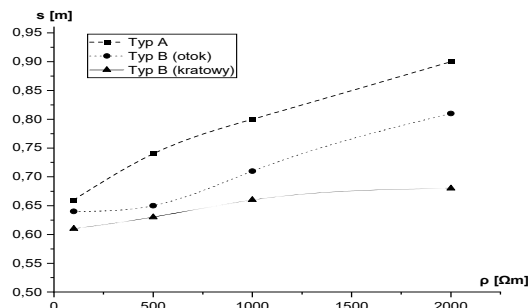
Na podstawie przeprowadzonej symulacji obliczono różnicę potencjałów obliczono różnicę potencjałów pomiędzy przewodem odprowadzającym LPS i przewodem ochronnym PE instalacji elektrycznej w miejscu ich zbliżenia, zlokalizowanym 25 cm poniżej dachu budynku. Przebiegi potencjałów przewodów względem ziemi odniesienia oraz uzyskane różnice potencjałów w rozpatrywanym miejscu zbliżenia zostały zilustrowane dla rezystywności gruntu $\rho = 2000 \Omega m$ oraz dla trzech różnych konfiguracji układu uziomowego na rysunkach 7-9. Największa różnica potencjałów pomiędzy LPS a przewodem PE wyniosła $\Delta_U = 1400$ kV dla uziomu typu A (rys.7), natomiast najmniejsza $\Delta_U = 1100$ kV dla uziomu typu kratowego (rys.9). Przy zastosowaniu uziomu otokowego (rys.8) różnica potencjałów wyniosła $\Delta_U = 1300$ kV. W przypadku bardziej rozbudowanych uziomów (otokowy i kratowy) różnica potencjałów wywołana przepływem prądu udarowego zanikała do nieznacznych wartości po około 2,5 μs , natomiast w przypadku układu uziomowego utworzonego z indywidualnych poziomych uziomów dopiero po około 4 μs .

Tabela 3. Zestawienie obliczonych odstępów separacyjnych w zależności od rezystywności gruntu oraz konfiguracji uziomu

Rezystywność gruntu	Typ uziomu		
	Typ A	Typ B (otok)	Typ B (kratowy)
100	0,66 m	0,64 m	0,61 m
500	0,74 m	0,65 m	0,63 m
1000	0,80 m	0,71 m	0,66 m
2000	0,90 m	0,81 m	0,68 m

W tabeli 3 zestawiono wartości wymaganych odstępów separacyjnych, które zostały określone poprzez przyjęcie wartości odległości o 1 cm większej od wartości maksymalnej odległości d , przy której nastąpi przeskok

iskrowy. Odległość d obliczono za pomocą kryterium stałego obszaru na podstawie otrzymanych wartości napięć w rozpatrywanym miejscu zbliżenia podczas symulacji. Porównano różne rezystywności gruntu oraz różne konfiguracje uziomu.



Rys. 10. Wykres zależności wymaganego odstępu separacyjnego od konfiguracji uziomu oraz rezystywności gruntu

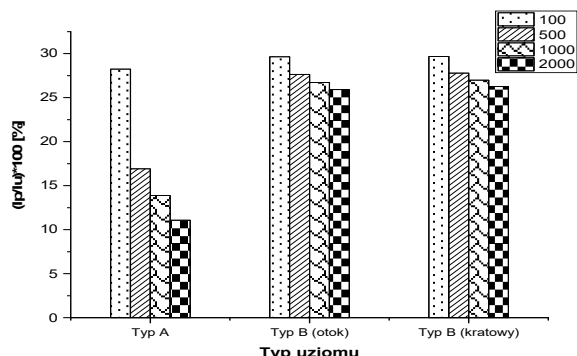
Najmniejszy wymagany odstęp iskrobezpieczny o wartości $s = 0,61$ m uzyskano dla uziomu kratowego i rezystywności gruntu 100 Ωm , natomiast największy wymagany odstęp separacyjny o wartości $s = 0,90$ m otrzymano przy zastosowaniu uziomu indywidualnego typu A i rezystywności gruntu 2000 Ωm . Widać, że wraz ze wzrostem rezystywności gruntu wymagany jest większy odstęp separacyjny. Spośród wszystkich konfiguracji uziomów, w przypadku zastosowania konfiguracji typu A widać najsilniejszą zależność pomiędzy wzrostem rezystywności gruntu, a wzrostem wymaganego odstępu separacyjnego. Przy zmianie rezystywności gruntu z $\rho = 100 \Omega m$ do $\rho = 2000 \Omega m$ dla uziomu typu A odstęp separacyjny zwiększył się o 36%, natomiast dla uziomu otokowego wzrósł o 27%, a dla uziomu kratowego o 12%. Wraz z rozbudową uziomu widać, że zależność wymaganego odstępu separacyjnego od rezystywności gruntu maleje (rys.10).

Niepokojącym faktem jest, że dla wszystkich przebadanych konfiguracji uziomu oraz rezystywności gruntu (nawet o bardzo dobrych właściwościach przewodzących $\rho = 100 \Omega m$) otrzymane odstępów separacyjne były większe niż te które obliczono za pomocą wzoru normy, które wynosiły $s = 0,43$ i $s = 0,53$, odpowiednio dla metody dokładnej oraz metody uproszczonej wyznaczania współczynnika podziału prądu piorunowego k_c .

Dodatkowo dla wszystkich wyżej omówionych przypadków obliczono procentowy udział prądu piorunowego w przewodzie odprowadzającym względem, którego był rozpatrywany odstęp separacyjny. Wyniki przedstawiono w formie wykresu na rysunku nr 11.

Wzrost rezystywności gruntu prowadził do ograniczenia wartości prądu piorunowego płynącego w przewodzie odprowadzającym zlokalizowanym w pobliżu miejsca uderzenia pioruna. W praktyce oznacza to, że zwiększenie rezystywności gruntu prowadzi do bardziej równomiernego rozplywu prądu udarowego w instalacji LPS. We wszystkich przypadkach procentowy udział prądu piorunowego płynącego w przewodzie odprowadzającym zlokalizowanym bezpośrednio pod miejscem uderzenia pioruna był mniejszy niż obliczony za pomocą normy ochrony odgromowej, który wyniósł **0,36** w przypadku zastosowania metody dokładnej oraz **0,44** przy zastosowaniu metody uproszczonej na podstawie tabeli 2. Tylko w przypadku uziomu typu A odnotowano dużą podatność rozplywu prądu udarowego w instalacji LPS od rezystywności gruntu, dla której udział prądu piorunowego płynącego w przewodzie odprowadzającym wynosił 28,3% oraz 11,1% wartości

całkowitego prądu udarowego, odpowiednio przy rezystywności gruntu 100 Ω m oraz 2000 Ω m. Pomimo, że wraz ze wzrostem rezystywności gruntu, wartość prądu w przewodzie odprowadzającym malała to wymagana wartość odstępów separacyjnych w tym samym miejscu rosła, co wskazuje na silną zależność odstępów separacyjnych od panującego potencjału gruntu podczas wyładowania atmosferycznego.



Rys.11. Wykres procentowego udziału prądu piorunowego płynącego w przewodzie odprowadzającym w zależności od rezystywności gruntu i typu uziomu (I_p – prąd w przewodzie odprowadzającym, I_w – całkowity prąd pioruna)

W celu sprawdzenia, czy na wymagany odstęp separacyjny wpływ ma tylko ilość zakopanego w gruncie uziomu, czy również jego konfiguracja (roz rozmieszczenie w przestrzeni), przeprowadzono dodatkowe symulacje dla układu uziomowego typu A, o takich długościach indywidualnych uziomów, aby ich łączna długość była równa sumarycznej długości uziomu otokowego oraz uziomu kratowego.

Tabela 4. Porównanie konfiguracji uziomu typu A z uziomem otokowym i kratowym przy założeniu zbliżonej sumarycznej długości uziomu i rezystywności $\rho = 2000 \Omega$ m

Typ uziomu	Długość [m]	s [m]
otokowy	240	0,81
A równoważny otokowemu	12 x 20 = 240	0,79
kratowy	440	0,68
A równoważny kratowemu	12 x 37 = 444	0,80

Warto zauważyć, że w przypadku uziomu otokowego równoważny uziom A skutkowało nieco mniejszą wartością odstępów separacyjnych, natomiast w przypadku uziomu kratowego równoważny uziom A dawał znacznie większą wartość odstępów. Stąd ważny wniosek, potwierdzający zresztą aktualną wiedzę, że uziom rozległy (w tym przypadku długi typu A) nie jest równoważny uziomowi skupionemu (w tym przypadku kratowy) pod względem odprowadzania prądów udarowych, nawet jeżeli te uziomy mają tę samą wartość rezystancji stałoprądowej. Zgodnie z teorią o długości/powierzchni efektywnej uziomu. Zaobserwowano, że w układzie uziomowym typu A, rozbudowywanie (wydłużanie) indywidualnych uziomów powyżej 30 m nie przynosi pożądanych efektów w postaci obniżenia wymaganego odstępów separacyjnych. Poprzez wydłużenie indywidualnych uziomów z 5 m do 30 m udało się uzyskać tylko 11% redukcję odstępów iskrobezpiecznego z 0,90 m do 0,79 m.

Wnioski

Projektowanie ochrony odgromowej, w tym w szczególności obliczanie wymaganego minimalnego odstępów separacyjnych za pomocą wzoru przedstawionego w normie IEC 62305 może prowadzić do błędnych wyników, takich jak niedoszacowanie wymaganej odległości pomiędzy LPS, a instalacją przewodzącą w obiekcie

budowlanym. Przeprowadzone symulacje oraz uzyskane rezultaty pokazują liniową zależność pomiędzy rezystywnością gruntu, a wymaganym odstępem iskrobezpiecznym. Zalecanym typem uziomu do celów ochrony odgromowej jest uziom o konfiguracji kratowej, dla którego stwierdzono najmniejszy wymagany odstęp separacyjny oraz jego najmniejszą korelację z rezystywnością gruntu. W przypadku uderzenia pierwszego udaru ujemnego w instalację LPS nawet zastosowanie rozbudowanego uziomu czy obecność gruntu o niskiej rezystywności nie pozwala uzyskać wartości odstępów separacyjnych takiego jak wyliczony na podstawie wzoru z normy. Mniejszy udział prądu piorunowego w rozpatrywanym miejscu zbliżenia, wcale nie oznacza mniejszej wartości odstępów separacyjnych, który zależy również w dużej mierze od potencjału gruntu podczas przepływu prądu piorunowego. Uzyskane wyniki dotyczą wyłącznie konkretnego obiektu i nie można ich uogólniać na pozostałe obiekty o innych wymiarach oraz kształtach, natomiast potwierdzają one dotychczas przeprowadzone badania, zawarte w przeglądzie literaturowym, z których wynika, że podczas wyliczania odstępów separacyjnych dochodzi do częstego ich niedoszacowania. Przeprowadzone badanie wskazuje na potrzebę uwzględnienia parametrów elektrycznych gruntu oraz typu zastosowanego uziomu podczas obliczania odstępów separacyjnych.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WI/WE-IA/4/2022 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez ministra właściwego do spraw nauki.

Autor: mgr inż. Marcin Martyniuk, Szkoła Doktorska Politechniki Białostockiej, Dyscyplina Naukowa Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, ul. Wiejska 45A 15-351 Białystok, E-mail: marcin.martyniuk@doktoranci.pb.edu.pl

LITERATURA

- [1] IEC 62305-1, *Protection against lightning - Part 1: General principles*
- [2] IEC 62305-3, *Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard*
- [3] Markowska R., Sowa A., Wiater J., *The influence of earthing systems on lightning current distribution in conductive elements of large halls*, 30th International Conference on Lightning Protection - I CLP 2010, Cagliari, Italy, September 13th -17th, 2010
- [4] Markowska R., *Influence of Lightning Current Waveshape on the Separation Distance Required between Electrical Equipment and Lightning Protection System*, Elektronika i Elektrotechnika, ISSN 1392-1215, 19 (2013), No. 4, 15-18
- [5] Markowska R., *Induced and ground potential voltage components in analysis of separation distance for lightning protection in buildings*, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), No. 12, 265-270
- [6] Heidler F., Zischank W., *Necessary separation distances for lightning protection systems - IEC62305 - revisited*, X International Symposium On Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, Brazil, 9-13 November, 2009
- [7] Fallah S. N., Gomes C., Izadi M., Ab Kadir M., Ahmed R., Jasni J., *Minimum Separation Between Lightning Protection System and Non-Integrated Metallic Structures*, ICLP 2018: 34th International Conference on Lightning Protection: Rzeszów, Poland, 02-07 September 2018
- [8] Panicali A. R., Silva J. C., Barbosa C. F., Alves N. V. B., *Preventing sparks between external LPS and structure conductive parts*, Electric Power Systems Research (153) 2017, 144-151
- [9] FFTSES User's Manual, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada, (2000)
- [10] HIFREQ User's Manual, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada, 2000