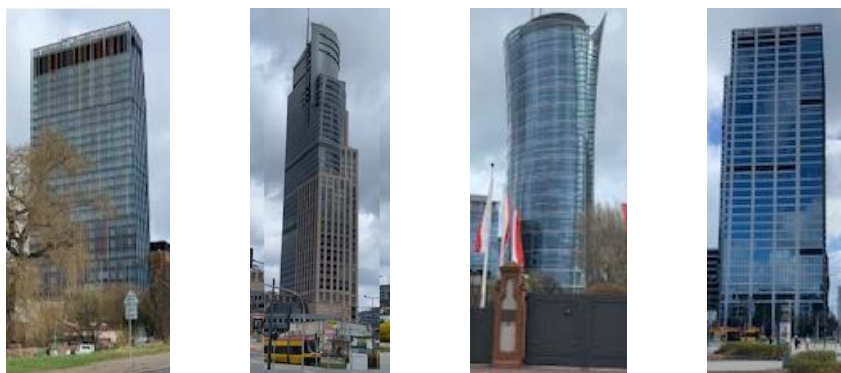


Zagrożenie piorunowe urządzeń elektroinstalacyjnych w wieżowcach

Zdobysław Flisowski, Krzysztof Lenarczyk
Politechnika Warszawska

1. Wprowadzenie

Obecnie, niemal w każdym większym mieście, pojawia się coraz więcej obiektów wysokich i daje się zauważyć, że rozwój technologii w budownictwie, pozwala niektórym z tych obiektów sięgnąć na wysokość kilkuset metrów, czyli przekształcić się w wieżowce, których przykłady uwidoczniło na Rys. 1. Ich cechą charakterystyczną jest bogate wyposażenie w sieć informatyczną, a także w systemy przetwarzania danych i sterowania oraz w inne urządzenia elektroinstalacyjne, wrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne.

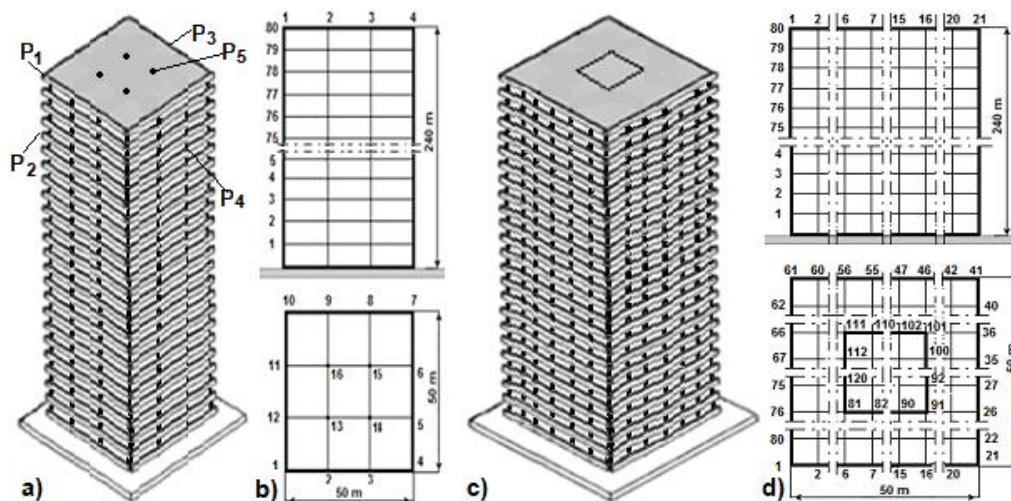


Rys. 1. Przykładowe budynki wysokie Warszawy

Duża wysokość obiektu wymaga zastosowania w nim silnej konstrukcji szkieletowej, która wskutek swoich właściwości przewodzących powoduje większe narażenie obiektu na bezpośrednie wyładowania piorunowe. Oznacza to, że taka konstrukcja staje się naturalnym urządzeniem piorunochronnym (naturalnym LPS), a przez to wyklucza potrzebę instalowania w nim dodatkowo sztucznych elementów LPS, zwłaszcza przewodów odprowadzających. Nie odbywa się to bez konsekwencji, jaką staje się wprowadzenie prądu piorunowego do wnętrza obiektu, a przez to zwiększenie zagrożenia znajdujących się tam wrażliwych urządzeń. Stopień tego zagrożenia zależy od usytuowania urządzeń w stosunku do przewodzących elementów konstrukcyjnych i od rozptyłu w nich prądu piorunowego. Pojawiające się w tych elementach prądy powodują, w otaczającej je przestrzeni, zmiany natężenia pola elektromagnetycznego i opóźnionego potencjału wektorowego [3, 4, 5, 11], a te z kolei wywołują - w pętach oprzewodowania instalacyjnego - napięcia indukowane, groźne dla znajdujących się tam wrażliwych urządzeń. Chodzi tu głównie o pętle znajdujące się na zewnątrz, a nie wewnątrz, zagrożonych urządzeń, gdyż zwykle pętle wewnętrzne mają niewielkie rozmiary i indukowane w nich małe napięcia nie są dla nich groźne, a jedynie mogą bardzo nieznacznie i na chwilę zakłócić ich pracę.

Aby uniknąć niebezpiecznych napięć indukowanych w pętach instalacyjnych, należy je umieszczać poza strefami, w których takie napięcia mogą wystąpić. Do ustalenia lokalizacji takich stref, w przestrzeniach między elementami przewodzącymi prąd piorunowy, niezbędne jest analityczne wyznaczenie tam rozkładu wartości opóźnionego potencjału wektorowego i natężenia pola magnetycznego, co z kolei wymaga znajomości rozptyłu prądu piorunowego na poszczególne elementy szkieletu naturalnych struktur LPS w rozpatrywanym obiekcie, od miejsca jego trafienia przez piorun do ziemi. Na Rys. 2 przedstawiono dwa typowe szkielety - bez-trzonowy i trzonowy - takich struktur.

Jest rzeczą oczywistą, że każdy zewnętrzny element szkieletu, znajdujący się na wysokości większej niż $h \approx 60$ może być - z różnym prawdopodobieństwem - trafiony przez piorun. Najbardziej prawdopodobnym miejscem trafienia jest jego górny narożnik (P_1).



Rys. 2. Typowe struktury: a) obiektu bez-trzonowego, b) jego szkieletu, c) obiektu trzonowego d) jego szkieletu

Prawdopodobieństwo to maleje przy przechodzeniu do trafień w boczne (P_2) i górne (P_3) krawędzie, a jeszcze bardziej w przypadku trafień w elementy zewnętrzne występujące w fasadzie bocznej obiektu (P_4) lub w elementy wewnętrzne (P_5) na powierzchni dachu. Warto nadmienić, że te ostatnie elementy mogą tworzyć (wspomniane już i uwidocznione na Rys. 2d) trzony komunikacyjne, charakteryzujące się dużym sąsiedztwem wrażliwego wyposażenia obiektu. Jednak miejscem największego zagrożenia tego wyposażenia są strefy o ograniczonym zasięgu, ale przyległe do punktów, w które może trafić piorun. Zagrożenie to zdecydowanie maleje w miarę oddalania się takiej strefy od punktu trafionego przez piorun, a następuje to nie tylko na trafionej kondygnacji, lecz również (i to w coraz większym stopniu), przy przechodzeniu do coraz bardziej odległych kondygnacji. Oznacza to, że najbardziej istotne jest dysponowanie znajomością rozptyłu prądu piorunu trafiającego w górny narożnik rozpatrywanego szkieletu, a wykorzystanie tego rozptyłu do oceny zagrożenia w pobliżu innych punktów rażenia piorunowego zwiększa margines bezpieczeństwa.

Reguły określające rozptył prądu piorunowego na poszczególne przewody odprowadzające zewnętrznego LPS, zostały zawarte w normie PN-EN 62305-3 [10], ale - ze względu na występowanie w strukturze naturalnego LPS elementów wewnętrznych i elektromagnetycznych sprzężeń między nimi - niezbędna jest pewna modyfikacja tych reguł. Ponadto wprowadzenie opóźnionego potencjału wektorowego, do analizy rozkładu natężenia pola magnetycznego, wymaga uzupełnienia tych reguł elementami antenowej teorii fal [7]. Wszystko to skłania do etapowego dochodzenia do identyfikacji stref, w których mogą być zagrożone urządzenia wrażliwe na oddziaływanie bezpośrednich wyładowań w obiekt wysoki. Etapowość ta znajduje odzwierciedlenie w kolejnych punktach poniższych rozważań, które koncentrują się swym zakresem na:

- selekcji przykładowej struktury szkieletowej wysokiego obiektu, niezbędnej do przeprowadzenia przedmiotowych analiz;
- analizie rozptyłu prądu piorunowego między pionowe elementy przewodzące wyselekcjonowanej struktury szkieletowej wysokiego obiektu;
- analizie rozkładu wartości opóźnionych potencjałów wektorowych i natężenia pola magnetycznego w przestrzeniach otaczających pionowe elementy przewodzące rozpatrywanej struktury szkieletowej;
- wskazaniu stref, w których nie powinny być umieszczane pętle oprzewodowania instalacyjnego wrażliwych urządzeń.

Rezultaty przeprowadzonych analiz zostały oczywiście skomentowane w podsumowaniu i wnioskach.

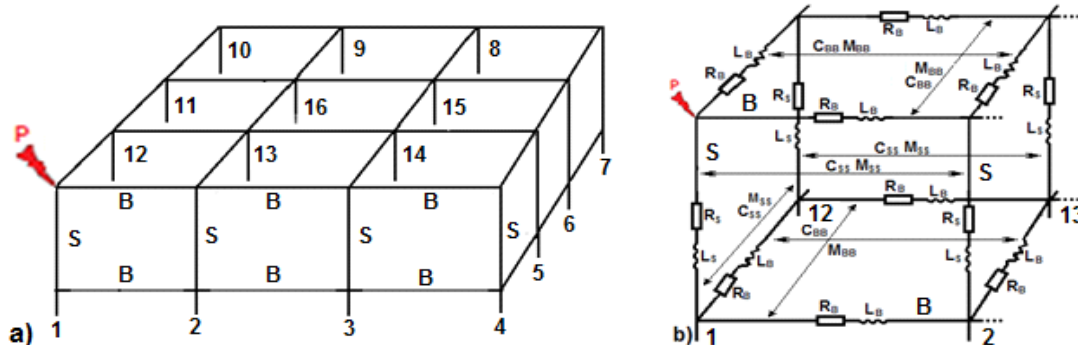
2. Rozpatrywana struktura obiektu

Konstrukcje szkieletowe obiektów wysokich charakteryzują się dużym zróżnicowaniem, a znaczną ich część stanowią - uwidocznione na Rys. 2 - struktury trzonowe i bez-trzonowe. Do podjętych tu rozważań wybrana została struktura bez-trzonowa z Rys. 2b. Składa się ona z pionowych słupów nośnych i z poziomych belek wspieranych przez te słupy i tworzących stropowe kratownice [1, 2, 8]. Słupy nośne, wykonane ze zwykłych dwuteowników INP200, a więc o wymiarach poprzecznych 20×9 cm, są rozstawione równomiernie w odstępach wynikających z podziału 50-metrowych boków przekroju poprzecznego obiektu na trzy części, tj. w odstępach równych ok. 16,5 m. Belki stropowe mają wymiary poprzeczne dwukrotnie mniejsze. Zakłada się, że wszystkie połączenia słupów i łączących je belek mają zapewnioną ciągłość galwaniczną i że każdy spośród 12 słupów zewnętrznych i 4 słupów wewnętrznych jest dobrze uziemiony. Utworzony przez słupy i belki szkielet składa się z 80 kondygnacji i sięga na wysokość 240 m.

3. Analiza rozptyłu prądu w badanej strukturze

Badanie rozptyłu prądu piorunowego w rozpatrywanej strukturze obiektu wymaga odwzorowania jej za pomocą obliczeniowego modelu elektrycznego. W modelu tym każdy element przewodzący rozpatrywanej struktury jest odwzorowywany za pomocą jego rezystancji R i indukcyjności L oraz indukcji wzajemnej M sprzężonych ze sobą elektromagnetycznie elementów i pojemności wzajemnej C między tymi elementami. Oczywiście sprzężenie to może dotyczyć również dalszych elementów, ale dla uproszczenia analizy brane są pod uwagę tylko sprzężenia między elementami najbliższymi.

W analizie rozptyłu prądu piorunowego na poszczególne elementy rozpatrywanej struktury główną uwagę zwracają na siebie te elementy, które znajdują się najbliżej miejsca wyładowania piorunowego. Najbardziej prawdopodobnym miejscem wyładowania piorunowego jest – jak już wspomniano - narożnik górnej kondygnacji, chociaż niewykluczone są też trafienia w krawędź górną, a także w krawędź boczną. Jednak największej wartości prądu piorunowego, po jego podziale na poszczególne elementy, należy się spodziewać w pionowym elemencie (słupie) pod górnym narożnikiem, gdy piorun trafia w ten narożnik. Przestrzeń wokół tego elementu staje się miejscem zagrożenia dla znajdujących się w niej wrażliwych urządzeń i ma największy zasięg. Oszacowany w tym miejscu zasięg powinien stanowić kryterium oceny zagrożenia w pobliżu wszystkich miejsc, na górnej i bocznej powierzchni obiektu, będących potencjalnym miejscem trafienia piorunowego. Wskazuje to na potrzebę dokonywania analiz rozptyłu prądu piorunowego, przy założeniu, że piorun trafia w narożnik górnej kondygnacji obiektu, jak na Rys. 3a. W analizie tej każdy element (S – słupek, B – belka) - uwidoczniony i niewidoczniony na tym rysunku, a należący do tak trafionej przez piorun struktury - wymaga elektrycznego odwzorowania modelowego, jakie - w odniesieniu do części najbliższej miejscu trafienia - zostało pokazane na Rys. 3b.



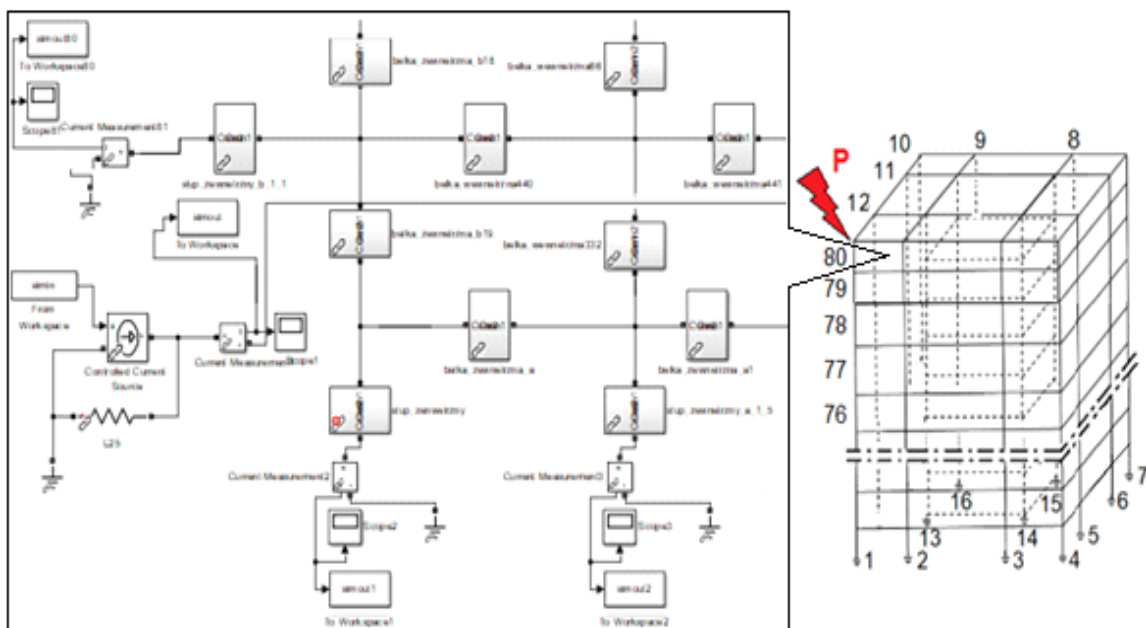
Rys. 3. Ilustracja trafienia piorunu w narożnik górnej kondygnacji: a) szkieletu przewodzącego, b) elektrycznego modelu obliczeniowego

W części modelu elektrycznego, uwidocznionej na powyższym rysunku, wyróżniono następujące parametry: rezystancje słupów R_S , rezystancje belek R_B , indukcyjności słupów L_S i indukcyjności belek L_B oraz indukcyjności wzajemne M_{SS} między sąsiednimi słupami i M_{BB} między sąsiednimi belkami, a także pojemności wzajemne C_{SS} między sąsiednimi słupami i C_{BB} między sąsiednimi belkami. Obliczone wartości wyszczególnionych parametrów, odnoszące się do omówionej już struktury dwuteownikowej, zostały przedstawione w Tabelicy 1.

Tabelica 1. Obliczeniowe wartości parametrów

$R_S = 3,68 \cdot 10^{-4} [\Omega]$	$M_{SS} = 1,36 \cdot 10^{-6} [H]$
$R_B = 8,18 \cdot 10^{-5} [\Omega]$	$M_{BB} = 1,43 \cdot 10^{-6} [H]$
$L_S = 4,12 \cdot 10^{-8} [H]$	$C_{SS} = 3,29 \cdot 10^{-11} [C]$
$L_B = 2,09 \cdot 10^{-8} [H]$	$C_{BB} = 1,82 \cdot 10^{-10} [C]$

Ideą modelu obliczeniowego było odwzorowanie połączonych szeregowo i równoległe elementów struktury przewodzącej, za pomocą zastępczych parametrów elektrycznych, tworzących impedancje, przy założeniu, że zastępowane elementy przewodzące są odwzorowane cylindrycznie o pomijalnie małej średnicy w porównaniu z ich długością. Istniejące między nimi sprzężenia elektromagnetyczne, decydujące o wartości wzajemnych indukcyjności o pojemności, ograniczono – jak już wspomniano - do sąsiadujących ze sobą elementów. Uproszczony w ten sposób model elektryczny z Rys. 3b) został rozciągnięty na całą strukturę obiektu (80-sięcio kondygnacyjną o wysokości 240 m) i wprowadzony do programu komputerowego MATLAB/SIMULINK. Fragment tego programu, jako model blokowy struktury w elektrycznym modelu obliczeniowym najwyższej (80-tej) kondygnacji rozpatrywanego obiektu został przedstawiony na Rys. 4.



Rys. 4. Model obliczeniowy struktury 80-tej kondygnacji obiektu w programie Matlab Simulink

Wprowadzając dane parametryczne elementów przewodzących rozpatrywanej struktury (Rys. 2b i 3) do adaptowanego i zmodyfikowanego programu komputerowego, a następnie dokonując na ich podstawie – dla 5 najwyższych kondygnacji tej struktury - analizy rozplywu prądu piorunowego o wartości szczytowej równej 150 kA, uzyskuje się jego wartości częściowe takie, jak zestawione w Tabelicy 2.

Tablica 2. Zestawienie wartości prądów wyznaczonych w poszczególnych słupach pięciu najwyższych kondygnacji

Nr słupa	Wartości prądu									
	I [kA]	%	I [kA]	%	I [kA]	%	I [kA]	%	I [kA]	%
	Kondygnacja									
	80		79		78		77		76	
1	68,6	47,5	37,1	25,7	23,1	16,0	16,5	11,4	13,5	9,4
2 i 12	15,3	10,6	16,1	11,2	14,2	9,8	12,3	8,5	10,7	7,4
3 i 11	5,3	3,7	5,5	5,5	9,1	6,3	9,5	6,6	10,0	6,9
4 i 10	3,1	2,1	8,0	3,8	7,2	4,9	8,3	5,8	9,3	6,5
5 i 9	2,6	1,8	4,8	3,3	6,4	4,4	7,5	5,2	8,7	6,0
6 i 8	2,1	1,5	4,0	2,8	5,4	3,7	6,2	4,3	6,1	4,2
7	1,9	1,3	3,6	2,5	5,0	3,5	6,1	4,2	7,1	4,9
13	7,0	4,8	9,8	6,8	10,4	7,2	10,3	7,1	10,4	7,2
14 i 16	3,7	2,5	6,1	4,3	7,5	5,2	8,0	5,5	7,5	5,2
15	2,6	1,8	4,7	3,3	6,2	4,3	7,1	4,9	8,1	5,6

Dane z Tablicy 2 utwierdzają w przekonaniu, że największa wartość prądu, rozprzyskającego się w przewodzącej strukturze obiektu, przypada na słup nr 1, znajdujący się bezpośrednio pod punktem trafionym przez piorun. Jest to wartość sięgająca niemal 50 % całkowitego prądu. Na sąsiednie słupy przypada już zaledwie ok. 10 % całkowitego prądu. Wyraźnie też widać, że - w miarę oddalania się w dół od najwyższej kondygnacji - rozprzysk prądu na poszczególne słupy wyrównuje się. Wartość prądu w pierwszym słupie szybko maleje i już na poziomie 76 kondygnacji ma wartość mniejszą niż 10 % całkowitego prądu. Dzieje się to dzięki wzrostowi i wyrównywaniu się wartości prądu w pozostałych słupach. Różnica między największym i najmniejszym prądem w słupach tej kondygnacji spadła do wartości równej zaledwie ok. 5 % prądu całkowitego. Przechodzenie do kondygnacji o większej równomierności w rozprzysku prądu oznacza przechodzenie do miejsc o mniejszym zagrożeniu - zlokalizowanych w nich, a wrażliwych na zagrożenia piorunowe - urządzeń. Dlatego też w rozpatrywanej strukturze należy zwrócić szczególną uwagę na miejsca, w których mogą wystąpić największe nierównomierności w rozprzysku prądu, a więc na miejsca zlokalizowane najbliżej przewidywanych trafień piorunowych w obiekt. Aby w miejscach tych określić zasięg obszaru niebezpiecznego dla urządzeń wrażliwych na oddziaływanie piorunowe, należy dysponować nie tylko rozkładem występującego tam potencjału wektorowego i towarzyszącego mu natężenia pola magnetycznego, lecz również lokalizacją i rozmiarami pętli w oprzewodowaniu występujących tam urządzeń i poziomu indukowanych w nich napięć.

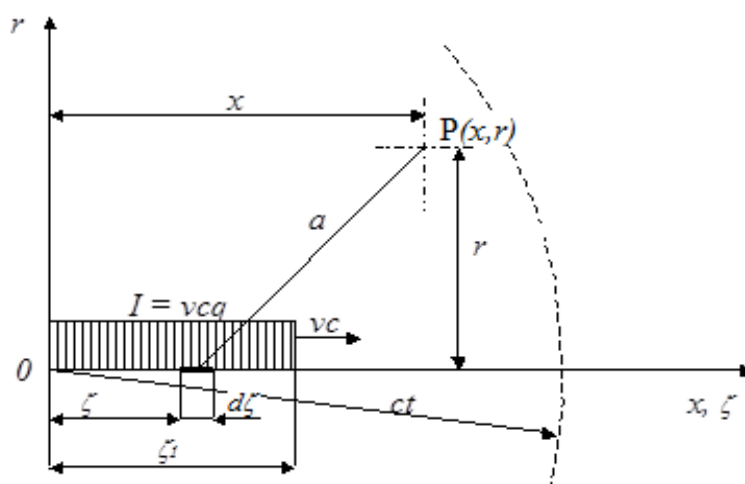
4. Rozkłady opóźnionego potencjału wektorowego i natężenia pola magnetycznego

Prąd piorunowy rozprzyskający się w przewodzących elementach złożonej struktury konstrukcyjnej budynku jest naturalnym źródłem opóźnionego potencjału wektorowego i natężenia pola elektromagnetycznego, zjawiającego się w otaczającej te elementy przestrzeni. Zmiany w rozkładzie natężenia tego pola, towarzyszące zmianom w rozkładzie opóźnionego potencjału wektorowego, mogą być groźne dla znajdujących się tam, wrażliwych na nie, elektrycznych i elektronicznych urządzeń, gdyż w ich obwodach, tworzących pętle zasilające i połączeniowe, mogą indukować się niebezpieczne napięcia.

Do oceny napięć indukowanych w pętlach, łączących zagrożone urządzenia w pobliżu elementów wiodących prądy piorunowe, niezbędna jest znajomość wartości występujących tam opóźnionych potencjałów wektorowych, które w każdej chwili pozwalają wyznaczyć rozkład pola magnetycznego. Przydatne są do tego elementy antenowej teorii fal, którą w połowie XX wieku, wprowadził C. F. Wagner [7a], we współpracy z R. Lundholmem [7b], do

wyznaczania fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych, a którą w kilka lat później - by pokonać trudności związane ze stosowaniem teorii obwodów do analizy szybkich fal prądowych i przepięciowych - adaptował w naszym kraju J.L. Jakubowski [7]. Do prowadzonej poniżej analizy przyjęte zostały tylko podstawowe zależności z tego zakresu, bez skomplikowanych uzasadnień, które są dostępne w przywołanej powyżej publikacji krajowej.

Za podstawową falę, będącą źródłem opóźnionego potencjału wektorowego w otaczającej ją przestrzeni, uznano falę o kształcie prostokątnym, która biegnie z prędkością zredukowaną vc i ma wartość $I = vcq$, przy czym v jest współczynnikiem redukującym prędkość $c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$, z jaką fala elektromagnetyczna przebiega w próżni, a q jest liniową gęstością ładunku, przenoszonego przez tę falę, jak to uwidoczniło we współrzędnych x, r na Rys. 5.



Rys. 5. Fala ładunku q i prądu $I = cq$, zjawiająca się w chwili $t = 0$ i wymuszająca z opóźnieniem $t = a/c$, w punkcie $P(x, r)$, potencjał skalarny i wektorowy A [6, 7]

Przy wystąpieniu udaru prądowego $I = cq$ w elemencie przewodzącym x zjawiają się w dowolnym punkcie $P(x, r)$ jego otoczenia (o przenikalności elektrycznej ϵ_0 i magnetycznej μ_0) z opóźnieniem $t = a/c$, potencjały:

- skalarny wyrażony zależnością:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_x \frac{q \left[x; \left(t - \frac{a}{c} \right) \right]}{a} dx \quad (1)$$

- wektorowy A wyrażony zależnością:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_x \frac{I \left[x; \left(t - \frac{a}{c} \right) \right]}{a} dx \quad (2)$$

Zależności te po scałkowaniu przyjmują następującą postać:

$$\varphi = \frac{30I}{v} \left(ar \operatorname{sh} \frac{x}{r} + ar \operatorname{sh} \frac{vct - x}{r\sqrt{1-v^2}} + \ln \sqrt{\frac{1+v}{1-v}} \right) \quad (3)$$

$$A = \frac{30I}{c} \left(\operatorname{ar\,sh} \frac{x}{r} + \operatorname{ar\,sh} \frac{vct - x}{r\sqrt{1-v^2}} + \ln \sqrt{\frac{1+v}{1-v}} \right) \quad (4)$$

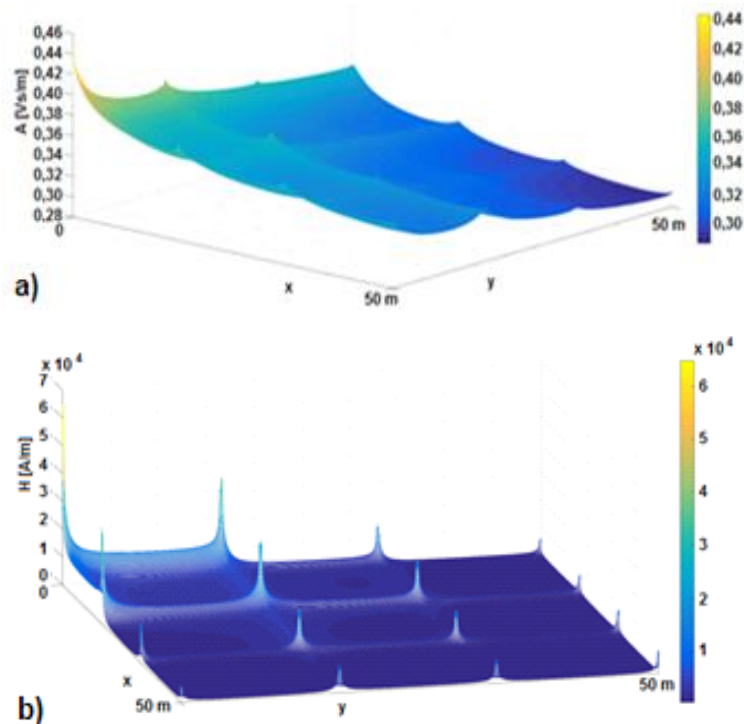
Jak łatwo zauważyć, potencjał wektorowy A pozostaje w prostej relacji z potencjałem skalarnym, która ma następującą postać:

$$A = \varphi \frac{v}{c} \quad (5)$$

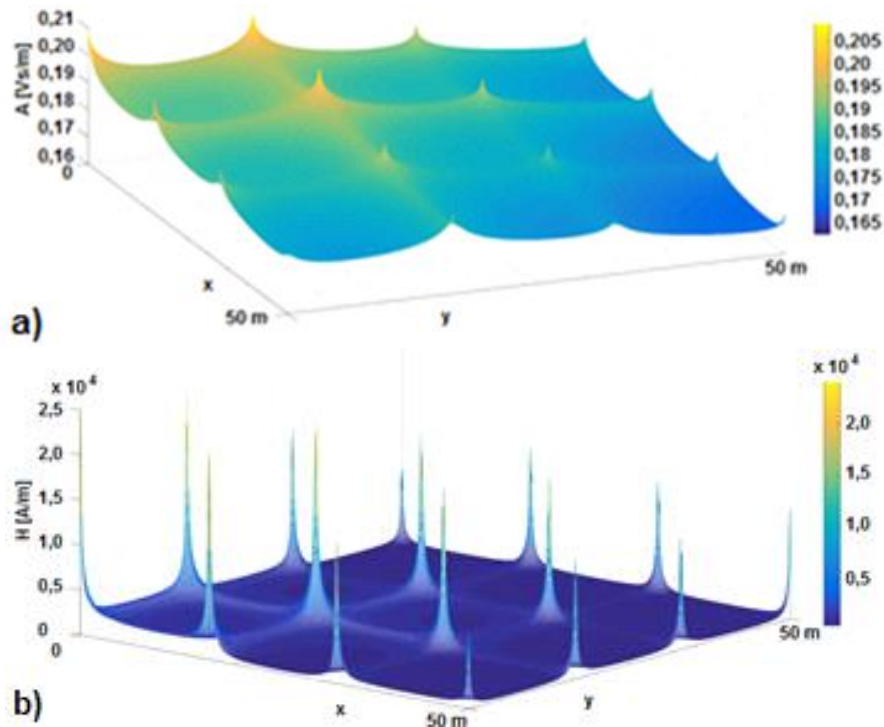
Znajomość rozkładu opóźnionego potencjału wektorowego A w określonej przestrzeni umożliwi również uzyskać w niej rozkład natężenia pola magnetycznego H , korzystając w tym celu z następującej zależności:

$$H = \frac{\operatorname{rot}A}{\mu_0} = 30I \frac{v}{\sqrt{(vct - x)^2 + r^2(1-v^2)}} \quad (6)$$

Przeprowadzone - w oparciu o zależności (4) i (6) - analizy przestrzennych rozkładów opóźnionego potencjału wektorowego A i natężenia pola magnetycznego H w przestrzeniach między-słupowych wyróżnionych struktur, przewodzących częściowe prądy piorunowe I o wartościach zestawionych w Tabelicy 2, pozwoliły na trójwymiarową wizualizację uzyskanych wyników, w postaci takich rozkładów, jak przedstawiony na Rys. 6 w przestrzeni najwyższej (80-tej) kondygnacji i na Rys. 7 w przestrzeni o jedną kondygnację niższej.



Rys. 6. Rozkład: a) potencjału wektorowego, b) natężenia pola magnetycznego na najwyższej kondygnacji obiektu



Rys. 7. Rozkład: a) potencjału wektorowego, b) natężenia pola magnetycznego na drugiej od góry kondygnacji obiektu

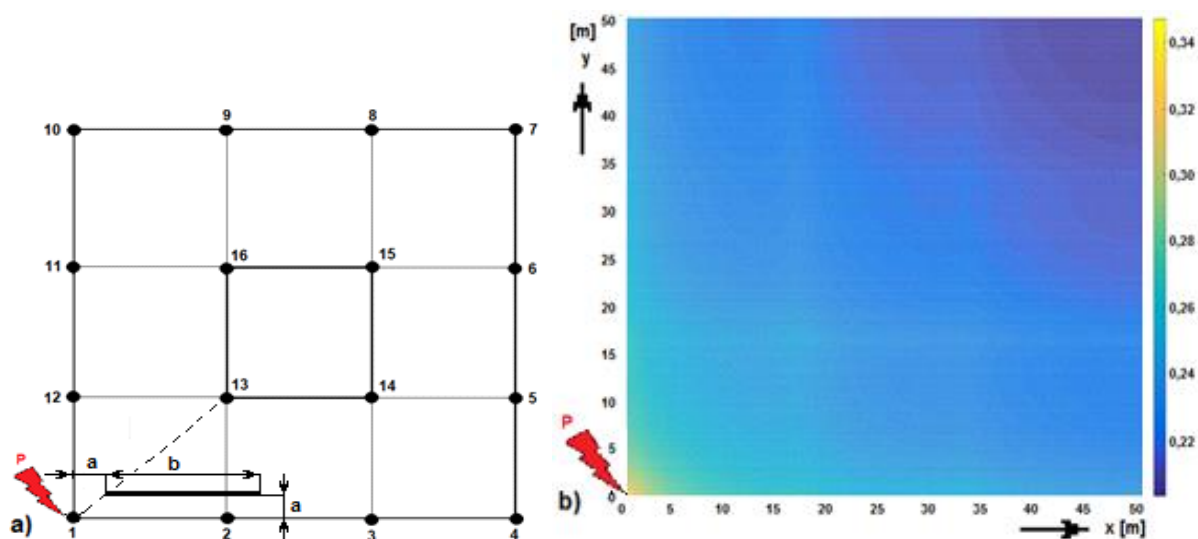
Przedstawione powyżej rozkłady opóźnionego potencjału wektorowego A i natężenia pola magnetycznego H pozwalają potwierdzić, że największe ich wartości występują przy słupie pionowym, tuż pod miejscem trafienia obiektu przez piorun, a już przy dwóch najbliższych słupach tej samej kondygnacji w rozpatrywanym układzie, wartości A i H maleją niemal do połowy. Przy przeciwległych słupach zbliżają się one niemal do zera. Przechodząc do kondygnacji niższej można już zauważyć wyraźną tendencję do wyrównywania się rozpatrywanych wartości. Przy słupie pod miejscem trafienia piorunu są one niemal o połowę mniejsze niż w kondygnacji wyższej, przy pozostałych słupach następuje wyraźny ich wzrost. Nawet przy najdalszym słupie (przeciwległym) wzrost ten można ocenić, na co najmniej trzykrotnie.

Uwagę przyciąga też sam profil rozkładu rozpatrywanych wartości, a zwłaszcza wartości H , które - w przestrzeni przyległej do słupów z przepływającym w nich prądem - maleją hiperbolicznie i w pewnej odległości od słupa, niemal skokowo, zbliżają się do zera. Daje to podstawę do określania zasięgu stref niebezpiecznych w pobliżu słupów. Jednak znajomość samych wartości A i H nie jest wystarczająca, gdyż do oceny zagrożenia niezbędne jest ich powiązanie z napięciami indukowanymi w pętlach oprzewodowania zagrożonych urządzeń i z ich kategoriami przepięć.

5. Zasięgi stref z niebezpiecznym oprzewodowaniem dla wrażliwych urządzeń

Miejszem analizowanego zagrożenia wrażliwych urządzeń – jak pokazano na Rys. 4 - jest przestrzeń, znajdująca się w najwyższych kondygnacjach rozpatrywanego obiektu. Przy trafieniu piorunu (P) w narożny słup (nr 1 na Rys. 8a) najwyższej (80-tej) kondygnacji obiektu, zjawia się w jego bezpośrednim sąsiedztwie natężenie H dynamicznego pola magnetycznego i jego wartość staje się groźna dla znajdujących się tam wrażliwych urządzeń, ale wraz ze wzrostem odległości od słupa, jak pokazano na Rys. 6b) - szybko maleje. Dotyczy to również słupów sąsiednich, ale tam zagrożenie jest znacznie mniejsze i przy bardziej odległych słupach praktycznie zanika. Nie jest to jednak powód do lekceważenia takich przypadków, gdyż - mając na uwadze losowość trafień piorunowych, nie

można wykluczyć trafienia w dowolny z istniejących słupów i tam też należy zapewnić te same środki bezpieczeństwa.



Rys. 8. Obraz: a) pętli ułożonych w pobliżu miejsca trafienia piorunu P; b) dwuwymiarowy rozkładu potencjału wektorowego A w rozpatrywanej kondygnacji (na wysokości 0,1 m w 80- tej kondygnacji)

Rozległość pętli indukcyjnych w przewodowaniu urządzeń przyczynia się do zwiększenia zasięgu strefy ich zagrożenia. Jednak można ten zasięg ograniczyć oddalając pętle oprzewodowania od źródła zagrożenia, jakim w danym przypadku staje się każdy z pobliskich słupów. Oznacza to konieczność zapewnienia każdej pętli indukcyjnej minimalnego odstępu od słupa, co wymaga oszacowania w niej indukowanego napięcia U_i i skonfrontowania go z kategorią przepięć narażonego urządzenia. Niezbędna jest do tego znajomość rozkładu wartości opóźnionego potencjału wektorowego A i szczegółowych danych, dotyczących lokalizacji i rozmiarów pętli oprzewodowania wrażliwych urządzeń. Dysponując takimi danymi można oszacować wartość indukowanego napięcia na podstawie zachodzących relacji między potencjałem wektorowym A w obrębie pętli oprzewodowania o powierzchni S i długości l a przenikającym ją strumieniem natężenia pola magnetycznego H . Relacje te mogą być odzwierciedlone za pomocą następującej zależności:

$$\phi = \int_S \mu_0 H \cdot dS = \int_S \text{rot } A \cdot dS = \oint_l A_t dl \quad (7)$$

Wzór na napięcie U_i , indukowane w pedli o długości l , będące pochodną strumienia, przyjmuje następującą postać:

$$U_i = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_l A_t dl \quad (8)$$

W przypadku oddziaływania prądów, podanych w Tabelicy 2, na pętlę prostokątną o boku poziomym $b = 16$ m i o wysokości $h = 2,8$ m, umieszczonej w płaszczyźnie pionowej, równoległej do płaszczyzny, zawierającej słupy 1, 2 i 3 najwyższej (80-tej) kondygnacji, jak na Rys. 8a), otrzymuje się w tej pętli, przy zmienianej odległości $a = 0$ m; 0,5 m; 1 m; 2 m; 3 m; 4 m i 5 m od słupa 1, napięcia indukowane U_i o wartościach zestawionych w Tabelicy 3. W tabelicy tej – dla porównania - podano również wartości napięć indukowanych w identycznie

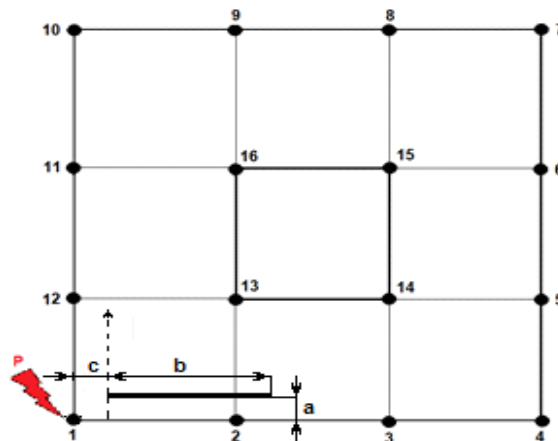
usytuowanych pętach, ale położonych o jedną i o pięć kondygnacji niżej, a więc w kondygnacji 79-tej i 76-tej.

Niezbędna jest tu też informacja, że wartości napięć indukowanych U_i zostały nieco przeszacowane, gdyż w ich analizie – dla jej uproszczenia i zwiększenia marginesu bezpieczeństwa - nie uwzględniono prądów płynących w słupach wewnętrznych (tj. w słupach 13, 14, 15, 16),

Tablica 3. Wartości napięć indukowanych w pętli z Rys. 8a), umieszczonej w najwyższej (80) kondygnacji i w kondygnacjach 79 i 76, w zależności od jej odstepu a od słupa nr 1

Odstęp a pętli od słupa nr 1 [m]		0	0,5	1	2	3	4	5
Wartości napięć U_i [kV] w kondygnacji	80	73,21	39,04	32,62	27,11	24,54	23,11	22,25
	79	43,51	16,06	14,38	13,34	13,00	12,93	12,97
	76	17,65	1,44	1,86	2,19	2,32	2,36	2,41

Dla porównania przeanalizowano również napięcia indukowane U_i w takiej samej pętli jak na Rys 8a, ale przemieszczanej równolegle do płaszczyzny zawierającej słupy 1 i 12, jak na Rys. 9, a więc przy zachowaniu stałej wartości odstepu $c = 0,1$ m od tej płaszczyzny. Wyniki analizy tych napięć w pętach, usytuowanych na 80-tej, 79-tej i 76-tej kondygnacji, zestawiono w Tablicy 4.



Rys. 9. Obraz usytuowania pętli w kondygnacji 80-tej, 79-tej i 76-tej, przy słupie trafionym przez piorun P i przemieszczanej w odstępach a , równolegle do płaszczyzny zawierającej słupy nr 1 i 12.

Tablica 4. Wartości napięć indukowanych U_i w pętli przemieszczanej zgodnie z danymi Rys. 9

Odstęp a pętli od słupa nr 1 [m]		0	0,5	1	2	3	4	5
Wartości napięć U_i [kV] w kondygnacji	80	66,74	45,99	38,97	33,05	30,26	28,64	27,62
	79	30,97	19,80	14,24	14,20	13,92	13,56	13,41
	76	6,81	2,8	2,02	1,63	2,03	2,27	2,41

Zestawione w Tablicy 3 i 4 wartości (U_i) napięć indukowanych w pętach, usytuowanych w pobliżu słupa trafionego przez piorun, upoważniają do sformułowania szeregu uogólnień dotyczących wpływu odległości pętli od słupa nr 1 na stopień redukcji indukowanych w niej napięć. Przede wszystkim należy zauważyć, że bardziej skuteczne jest oddalanie pętli wg

koncepcji przedstawionej na Rys. 8 niż na Rys. 9. Największą redukcję uzyskuje się w niewielkim zasięgu od słupa, np. do odległości nie większej niż 1 m. Już przy odległości 10 cm (wg koncepcji z Rys. 9) redukcja ta sięga 10 %. Natomiast przy odległości 0,5 m (wg koncepcji przedstawionej na Rys. 8) zwiększa się ona już niemal do 50 %, a przy odległości aż 5 m osiąga zaledwie 70 %. Oznacza to, że osiągnięcie redukcji indukowanego w pętli napięcia do poziomu bezpiecznego dla przyłączonego do niej urządzenia, bez zastosowania dodatkowych środków ochrony staje się niemożliwe.

Do stwierdzenia, czy wartość napięcia U_i - zaindukowanego w rozpatrywanej pętli - nie zagraża przyłączonemu do niej urządzeniu, niezbędna jest znajomość kategorii przepięć tego urządzenia, a więc wytrzymywanego przezeń napięcia U_w . Zwykle chodzi tu o urządzenia instalacyjne o napięciu wytrzymywanym $U_w \leq 2,5$ kV, a więc nieprzekraczającym poziomu Kategorii II przepięć. Na podstawie danych z Tablicy 3 i 4 można stwierdzić, że w przypadku rozpatrywanej struktury obiektu i występujących w nim pętli o rozmiarach i układach zgodnych z Rys. 8 i 9, na najwyższej (80-tej) kondygnacji nie da się uniknąć zagrożenia urządzeń przepięciami indukowanymi w przemieszczanej pętli bez zmniejszenia jej wymiarów lub wyposażenia jej w ekran, czy też bez wyposażenia zagrożonych urządzeń w ograniczniki przepięć. W przypadku niższej (79 - tej) kondygnacji, dzięki zachodzącym zmianom w rozplywie prądu, następuje redukcja zagrożenia o ok. 50 % w stosunku do wyższej kondygnacji, ale o eliminacji zagrożenia bez dodatkowych środków ochrony też nie może być mowy. Natomiast, przy przejściu do kondygnacji 76-tej, w której rozplyw prądu pomiędzy słupy staje się już prawie równomierny, następuje obniżenie napięcia, indukowanego w umieszczonej tam pętli oprzewodowania urządzeń, do wartości dla nich bezpiecznej wówczas, gdy pętla jest odsunięta od słupa nr 1 już zaledwie na odległość ok. 0,5 m. Odległość tę można uznać za krytyczną przy szacowaniu - wokół słupa trafionego przez piorun - zasięgu strefy niebezpiecznej dla przyłączonych do pętli urządzeń. Oczywiście, przy innym ukształtowaniu, usytuowaniu i rozmiarach pętli, zasięg ten będzie ulegał zmianie i jego wyznaczenie, bez zindywidualizowania analizy indukowanych w niej napięć, nie będzie możliwe.

6. Podsumowanie i wnioski

Konstrukcja szkieletowa obiektów wysokich, wyposażonych zwykle w czułe urządzenia teleinformatyczne i kontrolno-pomiarowe, sprzyja zwiększeniu zagrożenia piorunowego tych urządzeń, gdyż w ich oprzewodowaniu powstają groźne przepięcia przewodzone i indukowane przez prądy piorunowe wnikające do elementów przewodzących struktury szkieletowej obiektu. Uniknięcie zagrożenia przepięciowego jest możliwe, ale wymaga dokonania analizy rozplywu prądu piorunowego, wyznaczenia rozkładu potencjału wektorowego i zawiązanego z nim rozkładu natężenia pola magnetycznego, wymuszonego przez rozplywający się prąd piorunowy. Dysponując tymi rozkładami i parametrami oprzewodowania zagrożonych urządzeń można oszacować wartości przepięć indukowanych, na jakie narażone są te urządzenia i w razie potrzeby zmodyfikować odpowiednio oprzewodowanie. Z przeprowadzonych powyżej rozważań wynika, że:

- największe zagrożenie wrażliwych na przepięcia atmosferyczne urządzeń instalacyjnych w rozpatrywanym obiekcie ma miejsce w przestrzeni położonej najbliższej miejsca trafienia piorunu;
- w miarę oddalania się od tego miejsca w dół zmienia się rozplyw prądu na poszczególne słupy (staje się on coraz bardziej równomierny) i na poziomie piątej kondygnacji od góry może być już praktycznie uznany za w pełni równomierny;
- im rozplyw prądu jest bardziej równomierny tym mniejsze jest zagrożenie urządzeń, ale nie oznacza to jego zaniku, gdyż zależy ono też w dużym stopniu od parametrów oprzewodowania urządzeń, czyli od wymiarów i lokalizacji występujących w nim pętli;

- przy zwiększaniu odległości pętli od słupa, z oddziałującym na nią prądem, indukowane w niej napięcie maleje hiperbolicznie, a zatem decydujące znaczenie mają tylko niewielkie odległości, a jeżeli efekty takiego oddalania są niewystarczające, to nieuniknione staje się dokonanie modyfikacji przewodowania i/lub zastosowanie ograniczników przepięć.

Przy eliminacji zdarzeń o charakterze losowym, jakim jest zagrożenie piorunowe, ważnym zabiegiem jest zapewnienie marginesu bezpieczeństwa. W tym celu rozpatrzono najbardziej groźny przypadek trafienia piorunu w górny narożnik obiektu, po to by rezultaty przeprowadzonych rozważań rozciągnąć na przypadki trafień piorunowych w różne punkty krawędzi dachu.

Literatura

- [1] Bródka J.: Stalowe konstrukcje hali budynków wysokich. Tom 1. Łódź
- [2] Cała I., Pawłowski A.Z., Budynki Wysokie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [3] Flisowski Z., Kuca B., Mazzetti C., Yarmarkin M.: Safety areas for electronic equipment inside the LPS at nearby lightning strikes. 26th ICLP, 2nd-6th September 2002, Cracow, Poland.
- [4] Flisowski Z., Mazzetti C., Orlandi A., Yarmarkin M.: Systematic approach for the analysis of the electromagnetic environment inside a building during lightning strike. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 40, No. 4, November 1998
- [5] Flisowski Z.: Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli, Część I. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986.
- [6] Flisowski Z.: Wykład z przepięć i ochrony przepięciowej, prezentacja 3. P. Antenowa teoria fal. ZWNiKE, Warszawa 2017.
- [7] Jakubowski, J. (1968 r.). Podstawy teorii przepięć w układach energoelektrycznych. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- [7a] Wagner C.F.: A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines. Trans. AIEE (III), 1956, 75, str.1233
- [7.b] Lundholm R. i inni: Calculation of transmission line lightning voltages by field concepts. Trans. AIEE (III), 1957, 76, str. 1271.
- [8] Kucharczuk W., Stalowe hale i budynki wielokondygnacyjne., Politechnika Częstochowska. Częstochowa 2004 r.
- [9] PN-EN 62305-1, Ochrona odgromowa - Część 1: Zasady ogólne (Protection against lightning – Part 1: General principles), 2011.
- [10] PN-EN 62305-3, Ochrona odgromowa - Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia (Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard), 2011.
- [11] Sowa A.: Ochrona urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniem piorunowym. Białystok. Oficyna Wydawnicza Politechniki, 2011.