

**Zeszyty Naukowe
Wydziału Elektrotechniki i Automatyki
Politechniki Gdańskiej**

39



**Stowarzyszenie Elektryków Polskich
Oddział Gdańsk**

Polski Komitet Ochrony Odgromowej



**GDAŃSKIE DNI ELEKTRYKI' 2014
XXXIX Konferencja Naukowo-Techniczna**



Gdańsk 2014

**Zeszyty Naukowe
Wydziału Elektrotechniki i Automatyki
Politechniki Gdańskiej**

39

GDAŃSKIE DNI ELEKTRYKI' 2014

XXXIX Konferencja Naukowo Techniczna
Ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa

Organizatorzy:

Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Gdańsk

Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

Polski Komitet Ochrony Odgromowej SEP



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI



Wydawnictwo Wydziału Elektrotechniki i Automatyki
Politechniki Gdańskiej

Gdańsk 2014

KOMITET ORGANIZACYJNY

Grzegorz Kuczkowski – przewodniczący

Stanisław Wojtas – redakcja

Anna Andrzejewska

Paweł Bodnar

Mateusz Bulwan

Piotr Bzowski

Adam Długołęcki

Sebastian Edel

Marta Kossowska

Andrzej Kuczyński

Marek Rusin

Marta Święcińska

Anna Zaporowska

Kamil Żeromski

RECENZENCI

Henryk Boryń, *Politechnika Gdańska*

Stanisław Czapp, *Politechnika Gdańska*

Jakub Furgał, *AGH Kraków*

Zdobysław Flisowski, *Politechnika Warszawska*

Lesław Karpiński, *Politechnika Rzeszowska*

Roman Kostyszyn, *Akademia Morska Gdynia*

Leszek Ładniak, *Politechnika Wrocławska*

Renata Markowska, *Politechnika Białostocka*

Marek Olesz, *Politechnika Gdańska*

Roman Partyka, *Politechnika Gdańska*

Konrad Sobolewski, *Politechnika Warszawska*

Dariusz Świsulski, *Plitechnika Gdańska*

Jarosław Wiater, *Politechnika Białostocka*

Stanisław Wojtas, *Politechnika Gdańska*

Marek Wołoszyk, *Politechnika Gdańska*

Robert Ziemia, *Politechnika Rzeszowska*

**The Scientific Papers of
Faculty of Electrical and Control Engineering
Gdańsk University of Technology**

39

**ELECTRICAL ENGINEERING MEETING'2014
IN GDAŃSK**

**XXXIX Scientific – Technology Conference
Lightning and overvoltage protection**

Organized by

Association of Polish Electrical Engineers [SEP]
Gdańsk Branch

Faculty of Electrical and Control Engineering
Gdańsk University of Technology

Polish Committee on Lightning Protection



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI



Published by Faculty of Electrical and Control Engineering
Gdańsk University of Technology

Gdańsk 2014

ISSN 2353-1290

Copyright © by Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Copyright © by Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Oddział Gdańsk

Copyright © by Polski Komitet Ochrony Odgromowej

Adres redakcji:

Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
Redaktor: dr hab. inż. Dariusz Świsulski, prof. PG
www.ely.pg.gda.pl/zn/

Wydano za zgodą
Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki
Politechniki Gdańskiej
na podstawie materiałów dostarczonych przez autorów

Wydanie 1
Nakład 200 egzemplarzy

Drukarnia: b3project
ul. Jana Sobieskiego 14, 80-216 Gdańsk
e-mail: marcin.sawicki@b3project.com

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	5
WSTĘP	7
INDEKS AUTORÓW	9
1. Henryk Boryń Ochrona odgromowa jednostek pływających wykonanych z tworzyw sztucznych <i>Application of lightning protection system with insulated down conductors for plastic vessels.....</i>	11
2. Marcin Domaradzki Parametry uziemień przy przebiegach udarowych i wysokoczęstotliwościowych <i>Parameters of earthings measured using impulse and high frequency methods.....</i>	17
3. Marek Łoboda, Krzysztof Lenarczyk Narażenia piorunowe oraz wyłączenia napowietrznych linii przesyłowych wysokiego napięcia spowodowane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi <i>Lightning hazard and shut-downs of overhead hv electric power transmission lines caused by direct lightning strike.....</i>	22
4. Tomasz Maksimowicz, Mirosław Zielenkiewicz Wpływ zmian zasad oceny zagrożenia piorunowego na potrzebę stosowania ochrony odgromowej i jej kategorię <i>Influence of changes of lightning threat assessment principles on the need of lightning protection and its category</i>	29
5. Renata Markowska Wyznaczanie ryzyka strat piorunowych w obiektach radiokomunikacyjnych zgodnie z PN-EN 62305-2 <i>Calculation of risk of lightning losses in radiocommunication object according to PN-EN 62305-2.....</i>	37
6. Grzegorz Masłowski, Stanisław Wyderka, Lesław Karpiński, Robert Ziemba, Grzegorz Karnas, Kamil Filik, Paweł Szczupak Analiza rozpręgu prądu udarowego w urządzeniu piorunochronnym i dołączonych instalacjach <i>Analysis of impulse current distribution in lightning protection system and connected installations</i>	41
7. Tadeusz Masłowski Program wspomagający projektowanie instalacji odgromowych <i>Application supporting design process of lightning protection systems</i>	47
8. Marek Olesz Wpływ temperatury warystorowych ograniczników przepięć ZnO na prąd upływowy <i>Effect of temperature of metal oxide surge arresters on the leakage current</i>	51
9. Konrad Sobolewski, Grzegorz Karnas, Piotr Barański, Grzegorz Masłowski Analiza sygnału pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych w rejonie Bieszczad na podstawie kompleksowych pomiarów fali elektromagnetycznej <i>Analysis of lightning discharge electric field signatures obtained from the comprehensive measurements of associated electromagnetic pulse radiation</i>	55
10. Jarosław Wiater Uszkodzenia elektronicznych liczników energii elektrycznej w wyniku niewłaściwego doboru ograniczników przepięć <i>Energy meters damages as a result of improper surge protection devices selection</i>	61
11. Stanisław Wojtas Ocena ciągłości połączeń urządzenia piorunochronnego na podstawie pomiarów udarowych <i>Connection continuity assessment of lightning protection system on the ground of impulse tests.....</i>	65
12. Zofia Wróbel Ocena ryzyka uszkodzeń wybranych układów zasilających urządzenia sterowania ruchem kolejowym w analizie zagrożeń udarowych <i>The modelling of surges induced due to lightning strokes in the power supply systems of the railway traffic controlling devices</i>	71
SPONSORZY	75

WSTĘP

Kolejny Zeszyt Naukowy Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG zawiera referaty konferencji naukowo – technicznej „GDANSKIE DNI ELEKTRYKI’ 2014” (*GDE’14*), zorganizowanej przez Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Gdańsk i Polski Komitet Ochrony Odgromowej SEP we współpracy z Wydziałem Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w dniach 13 - 14 listopada 2014 roku w Gdańsku. Tegoroczne *GDE’14* odbywają się na terenie Politechniki Gdańskiej, która obchodzi 110 rocznice powstania uczelni.

Jest to już XXXIX konferencja, organizowana nieprzerwanie od 1975 roku, przez SEP Oddział Gdańsk w ramach Gdańskich Dni Elektryki. Referaty i wystawy techniczne składające się na coroczne *GDE* adresowane są do środowiska elektryków, którzy mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i niezawodność pracy urządzeń oraz instalacji elektrycznych i elektroenergetycznych. Konferencja ma na celu przekazanie dla środowiska elektryków aktualnej wiedzy z zakresu elektryki, zarówno w sensie ogólnym, jak również wiedzy z poszczególnych jej specjalności.

Ranga imprezy, jedynej tego typu w województwie pomorskim powoduje, że w konferencji zazwyczaj uczestniczą przedstawiciele wyższych uczelni, firm elektroenergetyki zawodowej i przemysłowej, biur projektowych, firm wykonawczych, jak również służby eksploatacyjne. Na towarzyszącej konferencji wystawie technicznej są prezentowane nowoczesne rozwiązania znanych producentów z zakresu instalacji i urządzeń elektrycznych, stosowanych w instalacjach przemysłowych i komunalnych z zakresu instalacji elektroenergetycznych, instalacji monitorowania, automatyki i sterowania, zarządzania mediami inteligentnych obiektów itp.

Tegoroczna konferencja *GDE’14* odbywa się pod ogólnym hasłem „*Ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa*”. Referaty zgłoszone na konferencję zostały przygotowane przez członków Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej, który działa od marca 1958 r. w ramach Stowarzyszenia Elektryków Polskich i konsekwentnie propaguje konieczność projektowania oraz wykonywania ochrony odgromowej obiektów budowlanych zgodnie z wymaganiami aktualnych Polskich Norm. Obowiązujące od kilku lat w Polsce przepisy dotyczące problematyki ochrony odgromowej są identyczne z normami europejskimi (EN) oraz międzynarodowymi (IEC) i są ciągle przedmiotem dyskusji zwłaszcza w gronie projektantów i wykonawców instalacji odgromowych.

Nie do przecenienia jest wkład wielu studentów PG zrzeszonych w Studenckim Kole SEP Politechniki Gdańskiej wniesiony w organizację *GDE’14*. W dniu 13 listopada odbędą się warsztaty mające na celu zapoznanie studentów z dostępnym na rynku oprogramowaniem branżowym. Na uznanie zasługuje ich poświęcenie i kreatywność, które przyczyniły się do odświeżenia tradycyjnej formy konferencji tak, aby wydarzenie było nadal atrakcyjne zarówno dla uczestników jak i wystawców.

Ważną częścią *GDE’14* są prezentacje firm związanych z branżą elektryczną, przede wszystkim w formie stanowisk wystawowych w czasie na konferencji w pomieszczeniach Politechniki Gdańskiej, jak również w formie referatów promocyjnych dostępnych w formie cyfrowej na stronie internetowej Oddziału.

Celem konferencji naukowo – technicznej *GDE’14* jest wymiana doświadczeń z zakresu branży elektrycznej, prezentacja nowych wyrobów elektrotechnicznych i sposobów ich wykorzystania. Taka wymiana doświadczeń zawodowych w formie referatów, dyskusji i spotkań osób zajmujących się elektryką przyczynia się do podwyższenia kwalifikacji zawodowych elektryków, co jest spełnieniem ważnego statutowego zadania Stowarzyszenia Elektryków Polskich.

Organizatorzy *GDE’14* wyrażają podziękowanie:

- Recenzentom za trud włożony w ocenę referatów, a nadesłane uwagi i sugestie przyczyniły się do polepszenia poziomu merytorycznego i komunikatywności referatów,
- Władzom Politechniki Gdańskiej za życzliwą pomoc i udostępnienie pomieszczeń na *GDE’14*,
- Przedsiębiorstwom - sponsorom konferencji, dzięki którym udało się zamknąć budżet imprezy i zorganizować całość.

Organizatorzy uważają, że postawiony cel konferencji zostanie osiągnięty i w przyszłości zamierzają kontynuować organizację „GDANSKICH DNI ELEKTRYKI” dla dobra pomorskiego środowiska elektryków.

Organizatorzy *GDE’14*

INDEKS AUTORÓW

1. Henryk BORYŃ	11
2. Piotr BARAŃSKI	55
3. Marcin DOMARADZKI	17
4. Kamil FILIK.....	41
5. Grzegorz KARNAS	41
6. Lesław KARPIŃSKI	41
7. Krzysztof LENARCZYK	23
8. Marek ŁOBODA	23
9. Tomasz MAKSIMOWICZ	29
10. Renata MARKOWSKA	37
11. Grzegorz MASŁOWSKI	41
12. Tadeusz MASŁOWSKI	47
13. Marek OLESZ	51
14. Paweł SZCZUPAK	41
15. Jarosław WIATER	61
16. Stanisław WOJTAS	65
17. Zofia WRÓBEL	71
18. Stanisław WYDERKA	41
19. Mirosław ZIELENKIEWICZ	29
20. Robert ZIEMBA	41

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA IZOLOWANYCH PRZEWODÓW ODPROWADZAJĄCYCH W OCHRONIE ODGROMOWEJ STATKÓW Z TWORZYWA SZTUCZNEGO

Henryk BORYŃ

Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12,
80-952 Gdańsk, e-mail: h.boryn@wp.pl

Streszczenie: Omówiono specyfikę ochrony odgromowej statków wykonanych z tworzywa sztucznego wskazując możliwość zastosowania urządzenia ochronnego z elementami piorunochronu izolowanego – izolowanymi przewodami odprowadzającymi oraz nieprzewodzącymi masztami chronionego statku. Taki układ gwarantuje istotne ograniczenie wartości prądu pioruna przepływającego przez elementy wewnętrzne statku, radykalne zmniejszenie przepięć indukcyjnych w układach wewnętrznych statku przy odpowiedniej modyfikacji obwodów wewnętrznych, jak również możliwość pracy systemu z oddzielnymi uziemieniami odgromowym i ochronno-roboczym.

Słowa kluczowe: izolowane przewody odprowadzające, urządzenie piorunochronne, statki z tworzyw sztucznych.

1. WPROWADZENIE

Statki pływające po otwartych akwenach morskich są narażone na działanie wyładowań atmosferycznych, jako najwyższe obiekty na rozległym płaskim obszarze. Zagrożenie piorunowe każdego obiektu jest jednoznacznie związane z gęstością powierzchniową wyładowań atmosferycznych, która jak wiadomo zależy od współrzędnych geograficznych lokalizacji obiektu. W przypadku projektowania ochrony odgromowej statków musimy znać przewidywany rejon ich pływania. Dla statków o nieograniczonym rejonie pływania przyjmuje się, na przykład według zaleceń Polskiego Rejestru Statków (PRS) [8], gęstość powierzchniowych wyładowań równą $25/\text{km}^2$ rok, a więc znacznie większą niż zalecana przez normę [1] wartość tego parametru dla obiektów położonych w naszych szerokościach geograficznych.

W przypadku statków stalowych praktycznie nie ma istotnych problemów konstrukcyjnych z ich ochroną odgromową – wykorzystuje się szczegółowe zalecenia norm [2, 7] czy przepisów PRS [6, 8, 9]. Natomiast istotne problemy techniczne są w przypadku statków wykonanych z tworzyw sztucznych, które nie mają naturalnego systemu ochronnego – stalowego kadłuba. Najczęściej są to małe jednostki o charakterze rekreacyjnym – jachty, ale tworzywa sztuczne stosuje się również w przypadku konstruowania statków dużych, o bardzo specjalistycznym przeznaczeniu, na przykład wojskowym. Cechą charakterystyczną takich statków wykonanych z tworzyw sztucznych jest konieczność

wyeliminowania w ich wewnętrznych pomieszczeniach negatywnych efektów elektryzacji statycznej, co osiąga się przez zastosowanie na powierzchniach ścian czy podłóg materiałów antyelektrostatycznych (półprzewodzących). W warunkach udarowych, materiały takie mogą charakteryzować się niestety, dużą skłonnością do rozwoju iskier ślizgowych, co musimy uwzględnić projektując urządzenie piorunochronne (LPS) statku.

Kolejny problem związany z projektem LPS to fakt zainstalowania na statku, podobnie jak w większości współczesnych obiektów, licznych urządzeń elektronicznych o niewielkiej wytrzymałości udarowej i odporności na zakłócenia. Wymienione cechy prowadzą do postawienia szczególnych wymagań systemowi ochrony odgromowej zastosowanemu na statku: konieczności ograniczenia wartości częściowych prądów piorunowych wnikaających do jego wnętrza oraz przepięć indukowanych w obwodach wewnętrznych. Niekiedy, w przypadku zainstalowania na statku specjalistycznej aparatury wymaga się konieczności rozdzielenia uziemień odgromowego i ochronno-roboczego.

Należy rozważyć czy wymienione wyżej wymagania stawiane urządzeniu piorunochronnemu do ochrony statku z tworzywa sztucznego zostaną spełnione w specjalnej konstrukcji LPS. Można na przykład, zastosować w projektowanym urządzeniu wybrane elementy izolowanego LPS, zaprojektowanego zgodnie z zaleceniami aktualnej normy [1] – izolowane przewody odprowadzające współpracujące ze zwodami umieszczonymi na nieprzewodzących masztach statku.

Według normy [1] izolowany LPS stosuje się do ochrony obiektów o szczególnym zagrożeniu przez wyładowania atmosferyczne, czyli np. w obiektach zagrożonych wybuchem lub w innych wyjątkowo wrażliwych na skutki przepływu prądu pioruna przez elementy obiektu. Izolowany LPS skutecznie przejmuje uderzenie pioruna i odprowadza jego prąd do ziemi z całkowitym pominięciem obiektu chronionego. Taki sposób ochrony odgromowej bardzo skutecznie zmniejsza ryzyko szkód piorunowych, wynikających przede wszystkim z bezpośredniego przepływu prądu piorunowego, czyli nagrzewania elementów, czy iskier wtórnych lub występujących na stykach o dużej rezystancji. W istotny sposób można również ograniczyć przepięcia indukowane wewnątrz obiektu chronionego, jeżeli

zastosujemy jednocześnie odpowiednie modyfikacje instalacji przewodzących.

2. WARUNKI SKUTECZNOŚCI LPS NA STATKU

Zbudowanie na statku LPS o określonej skuteczności działania wymaga spełnienia dwu podstawowych warunków:

- każde uderzenie pioruna musi być przejęte przez zwody urządzenia,
- odprowadzanie prądu pioruna do uziemienia obiektu musi zapewniać brak iskier wtórnych w układzie wewnętrznym statku.

Spełnienie pierwszego warunku jest stosunkowo proste. Po wyznaczeniu wymaganego poziomu ochrony dla statku, zależnego od przyjętego w projekcie ochrony zagrożenia piorunowego, należy zastosować znane zasady wyznaczania stref ochronnych, np. metody wskazane przez normę [1] – kąta ochronnego lub toczonej się kuli. Kierując się dodatkowo zaleceniami normy [2] można przyjąć, że dla obiektów mniejszych, o wysokości do 15 m (ponad najwyższą z wyznaczonych dla statku linii ładunkowych) wystarczy mniej precyzyjna metoda kąta ochronnego. Dla obiektów wyższych/większych, właściwsze będzie zastosowanie metody toczonej się kuli, bardziej rygorystycznej i dającej dokładniejsze wyniki w wyznaczaniu granic strefy ochronnej. Uzyskanie ochrony dla całego statku o większych rozmiarach będzie wymagało zaprojektowania bardziej skomplikowanego układu zwodów – na przykład zastosowania minimum dwu masztów wykonanych z nieprzewodzących materiałów oraz zawieszenia zwodów poziomych między masztami oraz od nich do dziobu i do rufy statku. Przy większej jego szerokości ewentualnie może być wymagany podwójny układ zwodów zawieszonych między masztami.

Spełnienie drugiego warunku jest związane z koniecznością zastosowania w projektowanym LPS wymaganych bezpiecznych odstępów izolacyjnych [1]. Uzyskanie takich odstępów w wyniku odsunięcia elementów LPS od części statku jest praktycznie niemożliwe z uwagi na występującą zwykle bardzo ograniczoną objętość obiektu oraz występujące w układzie znaczne wartości napięć. Realnym rozwiązaniem pozostaje więc, tylko zastosowanie izolowanych przewodów odprowadzających o odpowiednio dużej wytrzymałości udarowej izolacji. Wytrzymałość udarowa izolacji, rzędu kilkudziesięciu kilowoltów na milimetr, produkowanych aktualnie [5] takich przewodów wydaje się wystarczająca.

Słabymi punktami takiej instalacji będą zakończenia przewodów izolowanych, zarówno połączone u góry ze zwodami, jak i na dole z uziemieniem odgromowym, z uwagi na występujące w tych rejonach znaczne wartości natężenia pola elektrycznego i skłonność do rozwoju wyładowań powierzchniowych. Ważnym problemem jest również rola zanieczyszczeń, osiadających z czasem na zewnętrznej powierzchni izolacji przewodów, które mogą umożliwić przepływ prądu wzdłuż tej zanieczyszczonej powierzchni. Wymienione czynniki stanowią realne zagrożenie przebicciem izolacji zastosowanych przewodów. Niezbędne w tych miejscach będą odpowiednie wysokonapięciowe głowice o specjalnej konstrukcji, podobnej do głowic kablowych [3], likwidujące wspomniane niebezpieczeństwa.

Zastosowanie LPS z izolowanymi przewodami odprowadzającymi wyraźnie ogranicza, ale nie likwiduje całkowicie powstawania przepięć w chronionym obiekcie. Zagrożenia związane z przepięciami wynikają bowiem z

istnienia zbliżeń między uziemieniem odgromowym i ochronno-roboczym (jeżeli zastosuje się układ uziomów niezależnych) – czyli spadki uziemieniowe, jak również z nieuniknionych sprzężeń indukcyjnych między przewodami instalacji LPS i elementami przewodzącymi obiektu chronionego – przepięcia indukowane.

3. UZIEMIENIOWE SPADKI NAPIĘCIA

Do analizy roli uziemieniowych spadków napięcia w analizowanym LPS na statku można wykorzystać uproszczony schemat zastępczy pokazany na rysunku 1., dotyczący przypadku niezależnych uziemień odgromowego Z_1 i ochronno-roboczego Z_2 . Prąd piorunowy i_p przepływając przez uziemienie Z_1 o oporności R_1 daje spadek uziemieniowy o wartości:

$$U_R = R_1 i_p \quad (1)$$

Ze względu na sprzężenie rezystancyjne obu uziemień Z_1 i Z_2 o współczynniku k_z , na uziemieniu Z_2 występuje część potencjału uziemienia Z_1 o wartości:

$$U_Z = k_z U_R \quad (2)$$

czyli na odstępie B (rys. 1.) po wewnętrznej powierzchni burty wystąpi napięcie:

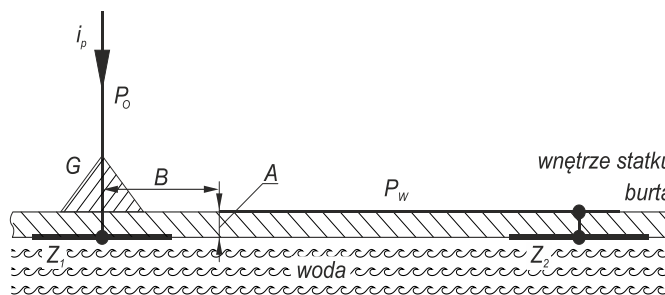
$$\Delta U_B = U_R - U_Z = U_R(1 - k_z) \quad (3)$$

W analogiczny sposób można wyznaczyć wartość napięcia działającego na burtę obiektu w miejscu A . Woda na zewnątrz burty statku w tym rejonie ma część potencjału uziemienia Z_1 o wartości wynikającej ze współczynnika sprzężenia k_A , czyli:

$$U_A = k_A U_R \quad (4)$$

a więc na burtę statku wykonanego z materiału izolacyjnego działa napięcie równe:

$$\Delta U_A = U_A - U_Z = U_R(k_A - k_z) \quad (5)$$



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy fragmentu LPS na statku do analizy roli spadków uziemieniowych przy niezależnych uziemieniach odgromowym Z_1 i ochronno-roboczym Z_2 , P_o – izolowany przewód odprowadzający, P_w – przewód wewnętrzny obiektu prowadzony po wewnętrznej powierzchni burty, G – wysokonapięciowa głowica, pozostałe oznaczenia w tekście

Przykładowe obliczenia napięcia U_R pozwalające ocenić występujące zagrożenie dla różnych wartości rezystancji uziemienia R_1 oraz typowych wartości prądu piorunowego i_p (wynikających z zalecanych przez normę [1] klas LPS) zestawiono w tablicy 1.

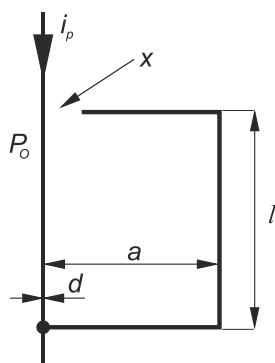
Wyznaczenie rzeczywistych wartości napięć wynikających ze sprzężeń rezystancyjnych działających na części obiektu chronionego wymaga znajomości wprowadzonych wyżej współczynników k_Z i k_A , które mogą się zmieniać w szerokich granicach w zależności od rozmieszczenia i wymiarów uziomów oraz rodzaju zastosowanych na statku materiałów.

Tablica 1. Zestawienie szacunkowych wartości napięcia U_R w kV przy różnych wartościach rezystancji R_1 oraz prądu i_p

R_1, Ω		0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
$i_p,$ kA	100	10	20	50	100	200	500
	150	15	30	75	150	300	750
	200	20	40	100	200	400	1000

Jak wynika z zależności (3) dla zbliżenia typu B, czyli wewnętrznego odstępów powierzchniowego między przewodem odprowadzającym a uziemionym przewodem instalacji wewnętrznej statku (rys. 1.), najbardziej niekorzystny jest przypadek małej wartości współczynnika k_Z , ponieważ wtedy między osobnymi uziemieniami wystąpi maksymalna wartość spadku uziemieniowego, co grozi wystąpieniem przeskoku iskry w miejscu najmniej korzystnym.

Najslabszym miejscem w tym układzie jest jednak przejście izolowanego przewodu odprowadzającego przez burtę jednostki do uziomu Z_1 – musi być tutaj zainstalowana wysokonapięciowa głowica kablowa o wytrzymałości udarowej rzędu kilkudziesięciu kilowoltów przy rezystancji uziemienia nie przekraczającej 1Ω , co wydaje się stosunkowo łatwym wymaganiem do osiągnięcia.



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy do analizy roli spadku indukcyjnego [4] w instalacji LPS w przypadku pętli o wymiarach $a \times l$ połączonej z przewodem odprowadzającym P_o , pozostałe oznaczenia w tekście

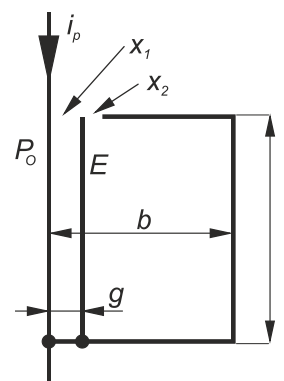
Bardziej krytyczne warunki występują na zbliżeniu typu A (rys. 1.), czyli odstępem prostym do burty jednostki w rejonie między uziemieniem odgromowym a przewodem instalacji wewnętrznej. Jak wynika z zależności (5) przy dużej wartości współczynnika sprzężenia k_A na burcie jednostki w pobliżu uziemienia odgromowego Z_1 może wystąpić znaczna wartość spadku uziemieniowego. Inaczej mówiąc taki układ nie zapewnia wymaganego ograniczenia napięcia między wodą a wnętrzem jednostki. Może nawet wystąpić sytuacja, że napięcia te są większe niż otrzymane w przypadku uziemień połączonych – gwarantujących zmniejszenie ich wypadkowej rezystancji.

Podsumowując można zauważyć, że wyraźne korzyści z zastosowania układu separowanych uziemień odgromowego i ochronno-roboczego uzyskuje się tylko wtedy, gdy uziemienie odgromowe zostanie zainstalowane w tej części jednostki, w

której nie ma przewodzących instalacji wewnętrznych. Jeżeli nie ma takiej możliwości, np. ze względu na ograniczone wymiary obiektu, a uziemienia muszą być separowane, to należy je połączyć przez iskiernik by wykluczyć możliwość wystąpienia niekontrolowanego łączenia iskrowego. W przeciwnym wypadku należy zastosować uziemienie wspólne zapewniające mniejszą rezystancję wypadkową.

4. PRZEPIĘCIA INDUKOWANE

Wykorzystując rozważania Szpora w monografii [4] dotyczące isker wtórnych w instalacjach piorunochronnych można analizować rolę przepięć indukowanych w LPS proponowanym dla statków z tworzyw sztucznych. Do analizy wykorzystano uproszczone schematy zastępcze pokazane na rysunkach 2. i 3.



Rys. 3. Uproszczony schemat zastępczy do analizy roli spadku indukcyjnego [4] w instalacji LPS, w przypadku pętli o wymiarach $b \times l$ w odległości g od przewodu odprowadzającego P_o , pozostałe oznaczenia w tekście

W LPS z izolowanymi przewodami odprowadzającymi można wskazać dwa zasadnicze rodzaje spadków indukcyjnych:

- na indukcyjności przewodu odprowadzającego (rys. 2.) określone zależnością:

$$U_L = L \frac{di_p}{dt} \quad (6)$$

w której indukcyjność własną L przewodu odprowadzającego P_o można obliczyć jako:

$$L = L' l \quad L' = 0,2 \ln \frac{2a}{d} \quad (7)$$

- w pętlach utworzonych przez przewodzące elementy obiektu chronionego, przez które nie przepływa prąd piorunowy, znajdujące się w pobliżu przewodu odprowadzającego (rys. 3.) określone zależnością:

$$U_M = M \frac{di_p}{dt} \quad (8)$$

w której indukcyjność wzajemną M można obliczyć jako:

$$M = M' l \quad M' = 0,2 \ln \frac{b}{g} \quad (9)$$

Zasadnicze znaczenie dla wartości indukcyjnych spadków napięcia ma konstrukcja izolowanego przewodu odprowadzającego. Może to być przewód bez ekranu, z ekranem przewodzącym lub z ekranem półprzewodzącym.

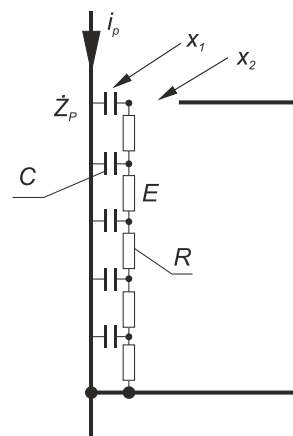
Pętłe tworzone w obiekcie chronionym przez LPS z **izolowanym przewodem odprowadzającym bez ekranu**, czyli o konstrukcji typowego kabla elektroenergetycznego bez zewnętrznych elementów przewodzących, odpowiadają schematowi pokazanemu na rysunku 2. Żyłą przewodu P_o płynie prąd piorunowy i_p do wspólnego uziemienia odgromowego i ochronno-roboczego statku. Zbliżenie, narażone na iskrę wtórną, występuje w miejscu X . Jeżeli dla oszacowania wartości spadku napięcia przyjmiemy przykładowe wymiary elementów: $d = 8$ mm (przekrój 50 mm²) i $a = 1$ m, to możemy obliczyć, że indukcyjność jednostkowa $L' = 1,1$ µH/m, co przy długości pętli np. $l = 3$ m i stromości prądu piorunowego $di_p/dt = 150$ kA/µs prowadzi do przepięcia o wartości $U_L = 495$ kV.

W analizowanym przykładzie miejsce zbliżenia X (rys. 2.) jest uwarstwionym szeregowo układem izolacji przewodu i powietrza, a więc praktycznie cała wartość napięcia będzie przypadać na warstwę powietrza – co na pewno doprowadzi do przeskoku w powietrzu i następnie do rozwoju wyładowań ślizgowych po powierzchni izolacji wzdłuż przewodu. Oczywiście można liczyć na wyraźne obniżenie rzeczywistej wartości przepięcia w stosunku do obliczonej powyżej, co wystąpi na większym statku, o np. dwu masztach i przy zastosowaniu kilku równoległych przewodów odprowadzających – ale wykluczenie wskazanego zagrożenia jest praktycznie niemożliwe.

Z kolei pętłe tworzone w obiekcie chronionym przez LPS z **izolowanym przewodem odprowadzającym z ekranem przewodzącym**, czyli o konstrukcji typowego kabla z metalową żyłą powrotną, odpowiadają schematowi z rysunku 3. Metalowy ekran E i żyła robocza przewodu odprowadzającego P_o są przyłączone do wspólnego uziemienia odgromowego i ochronno-roboczego jednostki. Można założyć, że prąd piorunowy i_p będzie płynął wyłącznie żyłą przewodu odprowadzającego, jeżeli w jego górnym końcu połączonym ze zwodem, zastosuje się odpowiednią głowicę zabezpieczającą układ przed przeskokiem wyładowania powierzchniowego od zwodu do ekranu przewodu. Wystąpienie takiego przeskoku przy braku głowicy jest praktycznie pewne, z uwagi na bardzo niekorzystny rozkład pola elektrycznego (typu przepustowego) występującego w tym rejonie, jak również możliwość zanieczyszczenia/zawilgocenia powierzchni izolacji przewodu odprowadzającego P_o . Analizowane niebezpieczne zbliżenie narażone na iskry wtórne (rys. 3.), występuje w miejscu X_2 . Odstęp X_1 odpowiada grubości g izolacji przewodu. Jeżeli dla oszacowania wartości spadku napięcia przyjmiemy wymiary układu jak w obliczeniach poprzednich (czyli $b = a$, natomiast $g = 6$ mm np. według [5]), to otrzymamy, że indukcyjności jednostkowe są równe $L' = 0,18$ µH/m oraz $M' = 0,92$ µH/m, co prowadzi do przepięć o wartościach $U_L = 81$ kV i $U_M = 414$ kV.

W analizowanym układzie izolacja przewodu (miejsce X_1) na pewno nie jest zagrożona przebicciem, ale odstęp powietrzny X_2 jest narażony na działanie napięcia o znacznej wartości, podobnie jak w przykładzie poprzednim. Eliminuje to korzyści z zastosowania izolowanego przewodu odprowadzającego. Można oczywiście zwierać odstępy X_2 wewnątrz chronionego statku, łącząc instalacje wewnętrzne z ekranem kabla – nie będzie wyładowania odwrotnego, ale znaczna część całkowitego prądu piorunowego i_p odgałęzi się do instalacji wewnętrznych – praktycznie taka sama jak w przypadku zastosowania nieizolowanego przewodu odprowadzającego.

Przepięcia indukowane powstające w pętlach utworzonych w obiekcie chronionym przez LPS z **izolowanym przewodem odprowadzającym z ekranem półprzewodzącym** można analizować za pomocą schematu pokazanego na rysunku 4. uwzględniającego zmiany w układzie wynikające z zastosowania ekranu półprzewodzącego, wprowadzone do schematu z rysunku 3.



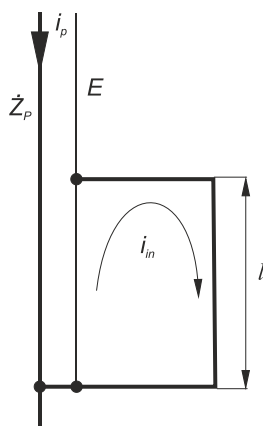
Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy do analizy przepięć indukowanych w instalacji LPS z izolowanym przewodem odprowadzającym o pojemności jednostkowej C , z żyłą $\dot{Z}_p$ i ekranem półprzewodzącym E o rezystancji jednostkowej R , pozostałe oznaczenia w tekście

Jeżeli w obliczeniach przepięć indukowanych dla tego przypadku przyjmiemy te same wymiary układu jak w przykładach poprzednich, to otrzymamy dla analizowanej pętli te same wartości jednostkowych indukcyjności własnej i wzajemnej. Jednak napięcie na izolacji przewodu (odstęp X_1) wypada znacznie niższe na skutek występowania spadku napięcia na rezystancji R ekranu, wynikającego z prądu ładującego pojemności jednostkowe C kabla. Jeżeli przyjmiemy do obliczeń parametry jednostkowe przewodu izolowanego o wartości $C' = 100$ pF/m i $R' = 10$ kΩ/m, to stała czasowa ładowania pojemności przewodu o długości kilku metrów wypada rzędu kilku mikrosekund, czyli jest porównywalna z czasem czoła prądu piorunowego 10/350 µs. Tak więc, w czasie czoła udaru prądowego praktycznie całe napięcie wystąpi na rezystancji ekranu wzdłuż przewodu dodając się do napięcia występującego na odstępie X_1 , czyli w efekcie napięcie występujące na odstępie X_2 będzie takie jak w przypadku LPS z przewodem odprowadzającym z ekranem przewodzącym.

Eliminacja iskier wtórnych w takim układzie wymaga zwarcia odstępu X_2 , całe przepięcie indukcyjne wystąpi wtedy na izolacji przewodu tak jak w przypadku przewodu z ekranem przewodzącym, ale wartości prądów i_{in} wpływających do wnętrza obiektu w obu przypadkach będą wyraźnie różne. W układzie z ekranem półprzewodzącym (rys. 5.) prąd i_{in} będzie ograniczony przez rezystancję R ekranu (występującą na odcinku ekranu włączonym w analizowaną pętlę), a stopień ograniczenia będzie tym większy im większą rezystancję jednostkową będzie miał zastosowany w przewodzie ekran. Przy rezystancji ekranu co najmniej 1 kΩ/m i przyjętych w poprzednich obliczeniach danych obliczeniowych można liczyć na ograniczenie prądu udarowego i_{in} do poziomu zaledwie kilkudziesięciu amperów, czyli poziomu o wartości niegroźnej dla większości eksploatowanych urządzeń elektronicznych.

Zastosowanie półprzewodzącego ekranu daje również istotne ograniczenie skłonności do rozwoju iskier ślizgowych

na powierzchni przewodu, ponieważ działanie rezystancji ekranu powoduje wyrównanie osiowego rozkładu napięcia w miejscach uziemienia ekranu.



Rys. 5. Uproszczony schemat zastępczy do analizy prądu indukowanego i_{in} w instalacji LPS z izolowanym przewodem odprowadzającym o pojemności jednostkowej C , z żyłą Z_p i ekranem półprzewodzącym E o rezystancji jednostkowej R , pozostałe oznaczenia w tekście

W analizowanym LPS na statku z tworzywa sztucznego i z masztami nieprzewodzącymi należy zastosować kilka równoległych izolowanych przewodów odprowadzających z ekranem półprzewodzącym, tak aby w wyniku podziału całkowitego prądu wyładowania atmosferycznego między poszczególne przewody zmniejszyć wartość występujących w układzie napięć indukcyjnych.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza możliwości zastosowania do ochrony odgromowej statków z tworzywa sztucznego LPS z izolowanymi przewodami odprowadzającymi pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zbudowanie układu LPS na statku z uziemieniem odgromowym separowanym od innych jego uziemień jest możliwe pod warunkiem zapewnienia wewnątrz jednostki stref wolnych od metalowych instalacji, odległych o kilka metrów od uziemień odgromowych. Podobną odległość należy zachować między separowanymi uziemieniami. W przeciwnym przypadku między wodą a wnętrzem statku

wystąpią znaczne napięcia udarowe. Lepszym rozwiązaniem jest jednak równoległe łączenie uziemień dające znaczne zmniejszenie wartości ich wypadkowej rezystancji.

2. Okrętowy LPS z izolowanymi przewodami odprowadzającymi z ekranem półprzewodzącym w porównaniu z LPS z przewodami nieizolowanymi daje znaczne ograniczenie napięć indukcyjnych na przewodzących instalacjach wewnątrz statku. Izolacja przewodów powinna mieć odpowiednio dobraną wytrzymałość udarową, a ekran rezystancję jednostkową co najmniej kilka kiloomometrów na metr. Miejsca zbliżeń do przewodzących instalacji wewnętrznych należy połączyć z ekranem przewodów.

3. Na górnych zakończeniach izolowanych przewodów odprowadzających należy zainstalować odpowiednie wysokonapięciowe głowice kablowe o wytrzymałości udarowej dobranej do wytrzymałości izolacji przewodów.

4. Ograniczenie występujących w układzie LPS napięć zapewnia równoległa współpraca kilku izolowanych przewodów odprowadzających, przy czym ich liczba zależy od ich długości.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 62305-3:2009P *Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia*. ISBN 978-83-251-7564-1.
2. ISO 10134:2003 *Small craft. Electrical devices. Lighting protection systems*.
3. Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*. WNT, Warszawa, 2005. ISBN 83-204-3077-1.
4. Szpor S.: *Ochrona odgromowa*. Tom 3. WNT, Warszawa, 1978.
5. DEHN. *Lightning protection guide*. 2007. ISBN 3-00-015975-4.
6. PRS. *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Część VIII. Urządzenia elektryczne i automatyka*. Gdańsk, 2014.
7. PN-IEC 92-401:1994/A2:200P *Instalacje elektryczne na statkach. Wykonanie i badanie instalacji*.
8. PRS. Publikacja nr 8/I. *Ochrona statków od wyładowań atmosferycznych*. Gdańsk, 1984.
9. PRS. *Przepisy klasyfikacji i budowy jachtów morskich. Część V. Urządzenia elektryczne*. Gdańsk, 2013.

APPLICATION OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEM WITH INSULATED DOWN CONDUCTORS FOR PLASTIC VESSELS

The paper discusses specifics of the lightning protection system on the plastic vessels. It is indicated the using possibility of the LPS with the insulated down conductors and non-conducting masts of the protected vessel. Such a system ensures significant reduction of the lightning current value flowing through the object elements, drastic reduction of the surge induced at the vessel internal systems, as well as the ability to work of the LPS with the separated lightning and protective grounding systems.

Keywords: insulated down conductor, lightning protection system, plastic vessel.

PARAMETRY UZIEMIENŃ PRZY PRZEBIEGACH UDAROWYCH I WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH

Marcin DOMARADZKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: mardomar@student.pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule skupiono się na porównaniu dwóch metod badania impedancji uziemienia odgromowego: udarowej z wysoką częstotliwościową. Zestawiono wyniki pomiarów istniejących uziemień z wynikami komputerowych obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych w środowisku programu PSIM. Uzyskane wyniki wskazują na poprawność przyjętego toku modelowania, a uzyskane w ten sposób dane mogą być przydatne w fazie projektowania do szacowania spodziewanych wartości impedancji uziemień. Duże znaczenie ma konfiguracja i rozmieszczenie poszczególnych elementów systemu uziemień z uwzględnieniem pojęcia długości efektywnej uziomu. Zaprezentowane w pracy wyniki z obliczeń symulacyjnych oraz pomiarów na rzeczywistych uziomach wskazują, że impedancja udarowa uziomu wyznaczana w dziedzinie czasu jest jednoznacznie związana z charakterystyką uziomu rejestrowaną w dziedzinie częstotliwości.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, uziemienie, uziomy, rezystywność.

1. WSTĘP

Uziemienia należą do najważniejszych elementów zapewniających bezpieczeństwo użytkowania systemu elektroenergetycznego. Miarą tego bezpieczeństwa jest przede wszystkim minimalizacja spadku napięcia w systemie uziemień poddanych oddziaływaniu prądów o znacznych amplitudach i krótkich czasach narastania. Zjawiska zakłócające pracę systemu energetycznego, które wymagają sprawnego uziemienia mogą być podzielone ogólnie na dwie grupy: stany nieustalone i zwarcia w sieci elektroenergetycznej oraz oddziaływanie wyładowań atmosferycznych. Charakterystyki czasowe przebiegów prądowych w obu typach zjawisk różnią się znacznie. Zakłócenia wywołane stanami nieustalonymi w systemie elektroenergetycznym są na poziomie rzędu milisekund, a czasy przepięć powodowanych przez wyładowania atmosferyczne są rejestrowane na poziomie mikrosekund. Z powodu tak zasadniczo różnej dynamiki obu zjawisk, procedury oceny uziemień powinny być adekwatne do ich roli w systemie.

Układ uziemień, który jest częścią systemu ochrony odgromowej powinien zapewniać przede wszystkim możliwie mały z punktu widzenia bezpieczeństwa spadek napięcia w czasie odprowadzania i rozpraszania prądu piorunowego w ziemi. Przepięcia powstające w tym procesie

nie tylko zakłócają pracę systemu energetycznego, lecz także mogą być niebezpieczne dla ludzi oraz stanowią zagrożenie dla urządzeń podłączonych do instalacji. Urządzeniami szczególnie wrażliwymi nawet na krótkotrwałe przepięcia są sprzęty elektroniczne. Ze względu na duże stromości prądów piorunowych sięgające poziomu 100 kA/μs, decydujący wpływ na wartości maksymalne przepięć mają najczęściej indukcyjne spadki napięć na uziomach [1, 2, 3].

Wpływ indukcyjności na spadek napięcia podczas odprowadzania prądu piorunowego jest szczególnie widoczny w przypadku rozległego systemu uziemień. Należy brać pod uwagę fakt, że poprawa jego parametrów do celów ochrony odgromowej nie może być osiągnięta poprzez wzrost jego długości, jak to zwykle praktykuje się w przypadku uziemień rozpraszających prądy o częstotliwości sieciowej [4, 5].

Praktyka pomiarów eksploatacyjnych wskazuje, że do badań uziemień używane są metody techniczne z wykorzystaniem przebiegów niskiej i wysokiej częstotliwości oraz udarowych. Metoda z użyciem przebiegów niskiej częstotliwości powinna być stosowana przede wszystkim do oceny właściwości uziemień roboczych, ponieważ dobrze odzwierciedla ich zachowanie przy przepływie prądów o częstotliwości sieciowej. Uziemienia odgromowe powinny być oceniane przy wymuszeniach wysokiej częstotliwości lub przy udarach o parametrach czasowych naśladujących rzeczywiste wyładowania atmosferyczne [6, 7, 8].

Celem niniejszego artykułu jest analiza porównawcza 2 metod pomiarów uziemień odgromowych, metody wysokoczęstotliwościowej z udarową. Pierwsza z metod wyznaczania impedancji uziemienia realizowana jest w dziedzinie częstotliwości, natomiast druga w dziedzinie czasu. Przeprowadzono pomiary na istniejącym obiekcie, a następnie symulacje komputerowe metody udarowej oraz wysokoczęstotliwościowej, w celu wyznaczenia rezystancji uziemiania, oraz określenia zakresu częstotliwości, jakim odpowiadają udary o zadanych czasach trwania czoła udaru.

2. PRZEPISY NORMALIZACYJNE

Przyjęta w ostatnich latach norma PN-EN 62305 do stosowania w systemach ochrony odgromowej obiektów budowlanych wprowadza pojęcie „umownej impedancji

uziemienia” określonej, jako „*stosunek wartości szczytowej napięcia na uziemiu do wartości przepływającego w nim prądu, które na ogół nie występują jednocześnie*” [9]. Wspomniana norma nie zawiera jednak procedur i kryteriów oceny uziemień na podstawie tego typu pomiarów.

W polskich przepisach normalizacyjnych dotyczących obiektów podlegających ochronie obostrzonej ze względu na niebezpieczeństwo wybuchu [10] już w roku 1989 wprowadzono termin rezystancji udarowej uziemienia definiowanej, jako „*rezystancja między uziemem a ziemią odniesienia mierzona przy prądzie udarowym o kształcie odwzorowującym prąd pioruna*”. Pomiar rezystancji udarowej wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych, ponieważ celem tego pomiaru jest określenie rezystancji wypadkowej uziemienia, czyli tej, która zgodnie z definicją odprowadza prąd piorunowy do gruntu.

Przepisy dotyczące instalacji elektroenergetycznych powyżej 1 kV w przypadku bardziej rozległych systemów uziemień sugerują zastosowanie w pomiarach testera uziemień wysokiej częstotliwości. Częstotliwość pomiarowa powinna być tak wysoka, aby impedancja długich przewodów łączących była na tyle duża, aby tę drogę przepływu prądu pomiarowego można było pominąć. Podobne stwierdzenie znajduje się w normie PN-EN 50522 [12], którą Polski Komitet Normalizacyjny wprowadził w wersji językowej oryginalnej na miejsce wycofanej normy PN-E/05115 [11].

3. PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O UZIOMACH

Uziemieniem nazywamy celowo wykonane elektryczne połączenie części urządzenia lub instalacji elektrycznej z przedmiotem znajdującym się w ziemi zwanym uziemem, którym jest przedmiot metalowy lub zespół przedmiotów metalowych umieszczonych w gruncie zapewniający z nim jak najlepsze połączenie elektryczne. Uziomy mogą być naturalne lub sztuczne.

Uziomami naturalnymi są najczęściej przedmioty metalowe znajdujące się w ziemi, których podstawowe przeznaczenie jest inne niż dla celów uziemienia. Mogą tu być stosowane: metalowe rury wodociągowe, ołowiane płaszcze i pancerze kabli elektroenergetycznych, elementy metalowe osadzone w fundamentach, zbrojenia betonu znajdującego się w ziemi oraz inne elementy metalowe mające dobrą styczność z ziemią.

Jako uziomy sztuczne stosowane są kształtowniki, pręty, druty, linki, płyty lub taśmy najczęściej stalowe, pokryte przewodzącymi powłokami ochronnymi (antykorozyjnymi) pograżone w gruncie poziomo (uziomy poziome) lub pionowo (uziomy pionowe) [16].

Uziomy sztuczne należy wykonywać, jako uziomy poziome, otokowe, promieniowe, kratowe lub coraz częściej stosowane pionowe. Zaleca się przede wszystkim stosowanie uziomów otokowych. Uziomy można układać na dnie wykopów fundamentowych, bezpośrednio pod fundamentem lub obok fundamentu budynku. Uziomy poziome należy układać na głębokości nie mniejszej niż 0,8 m i w odległości nie mniejszej niż 1m od zewnętrznej krawędzi obiektu budowlanego, ograniczając do minimum przebieganie trasy uziomu pod warstwami nieprzepuszczającymi wody opadowej i w pobliżu urządzeń wysuszających grunt. Uziomy poziome i pionowe powinny być pograżone w gruncie w odległości nie mniejszej niż 1,5 m od wejść do budynków, przejść dla pieszych oraz metalowych ogrodzeń usytuowanych przy drogach publicznych. Zalecenie to nie

dotyczy uziomów otokowych. Dopuszcza się odstępstwo od wymaganej minimalnej odległości 1,5 m w przypadku wejść używanych sporadycznie (np. wjazd do indywidualnego garażu). Uziomy pionowe należy pograżać w taki sposób, aby nich najniższa część była umieszczona na głębokości nie mniejszej niż 3 m, a najwyższa - nie mniej niż 0,5 m pod powierzchnią gruntu.

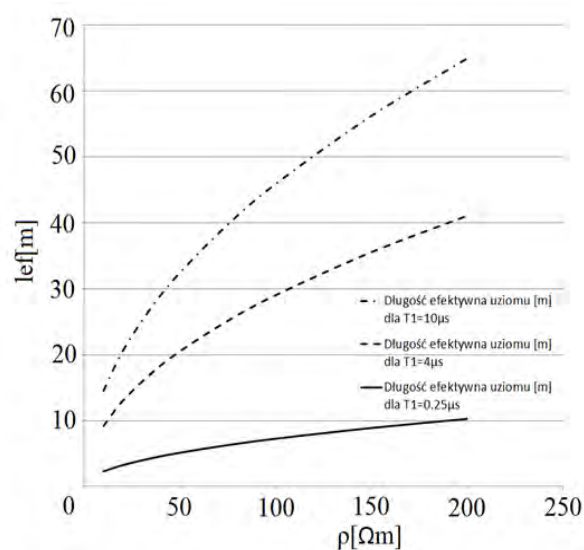
Dopuszcza się wykonywanie uziomów sztucznych i przewodów uziemiających z miedzi oraz ze stali pokrytej miedzią lub ołowianą powłoką ochronną w przypadku ochrony odgromowej obiektów o szczególnej wartości historycznej, zabytkowej lub kulturowej. Uziomów sztucznych nie wolno zabezpieczać przed korozją powłokami nieprzewodzącymi [16].

Uziomy sztuczne należy wykonywać, jeżeli: uziomy naturalne znajdują się w odległości większej niż 10 m od chronionego obiektu. Warunek ten wynika ze skuteczności uziemienia charakteryzowanej długością efektywną zastosowanych uziomów. Rozważania na temat stałej czasowej linii modelującej uziom długi pokazują, że zwiększanie długości uziomu poziomego jest skuteczne tylko do pewnej wartości l_{ef} , którą można obliczyć, jako [13]:

$$l_{ef} \leq \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T}{G \cdot L}} \quad (1)$$

gdzie: T – czas trwania czoła udaru prądowego; L – indukcyjność jednostkowa; G – konduktancja jednostkowa uziomu.

Długość uziomu obliczona z wyrażenia (1) jest często nazywana długością efektywną uziomu, a jej wartość zależy przede wszystkim od rezystywności gruntu otaczającego analizowany uziom oraz stromości czoła odprowadzanego do ziemi udaru. Wartości długości efektywnej uziomu obliczone na podstawie zależności (1) przedstawiono na rysunku 1. Otrzymane zależności mogą być przydatne w projektowaniu systemów uziemień i ocenie wpływu elementów położonych w różnych odległościach od punktu analizy na wartość wypadkowej impedancji.



Rys. 1. Zależność długości efektywnej uziemienia w funkcji rezystywności gruntu dla czasów czoł udarów $T_I=0.25, 4, 10 \mu s$.

4. WYNIKI BADAŃ

Program badań składał się z pomiarów oraz obliczeń symulacyjnych impedancji uziomu w funkcji częstotliwości oraz impedancji udarowej przeprowadzonych na uziomach skupionych i rozległych. Pomiarom na obiektach rzeczywistych został poddany uziom skupiony pionowy, pograżony do głębokości 7 m w gruncie o rezystywności 25 Ωm oraz jako uziom rozległy – uziom poziomy o długości 70 m umieszczony na głębokości 0,7 m. Impedancja obu uziomów została pomierzona miernikiem operującym w przedziale częstotliwości od 100 Hz do 1 MHz dla następujących wartości: 100, 250, 1k, 5k, 10k, 25k, 40k, 63k, 80k, 100k, 125k, 156k, 199k, 250k, 316k, 398k, 500k, 633k, 797k oraz 1M. Pomiary udarowe uziomów zostały wykonane miernikiem generującym impulsy prądowe o czasie czoła równym 4 μs [17].

Symulacje komputerowe odzwierciedlające warunki pomiarów rzeczywistych zostały przeprowadzone w programie PSIM. Parametry jednostkowe modelu uziomu poziomego zostały obliczone w oparciu o zależności zaczerpnięte z pracy Vermy i Mukhedara według następujących wyrażen [15]:

$$G'' = \frac{2 \cdot \Pi}{\rho \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}} - 1 \right)} [\Omega \cdot m]^{-1} \quad (2)$$

$$L'' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \Pi} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}} - 1 \right) [H / m] \quad (3)$$

$$C'' = \frac{2 \cdot \Pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}} - 1 \right)} [F / m] \quad (4)$$

gdzie ϵ_r – względna przenikalność dielektryczna gruntu; ϵ_0 – przenikalność dielektryczna powietrza; r – promień zastępczy elementu tworzącego uziom; l – długość uziomu; ρ – rezystywność gruntu; h – głębokość pograżenia uziomu.

Model uziomu pionowego przyjęto w oparciu o schemat zaproponowany w pracy Gonosa i innych, a przedstawiony na rysunku 2. Parametry schematu zastępczego zostały obliczone w oparciu o następujące wyrażenia [14]:

$$G' = \frac{2 \cdot \Pi \cdot l}{\rho} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot l}{r} \right) - 1 \right]^{-1} [\Omega \cdot m]^{-1} \quad (5)$$

$$L' = 2 \cdot l \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l}{r} \right) \cdot 10^{-7} [H] \quad (6)$$

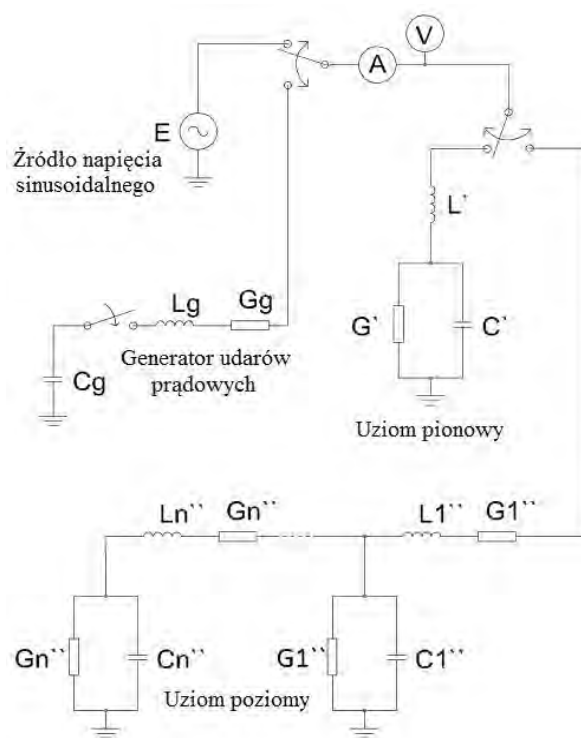
$$C' = \frac{\epsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l}{r} \right)} \cdot 10^{-9} [F] \quad (7)$$

gdzie oznaczenia są analogiczne do opisanych dla wyrażen (2)-(4).

Parametry elementów zastępczych (G , L , C) obu typów uziomów wyznaczone na podstawie wyrażen (2) do (7) zostały przedstawione na rysunku 2.

Rezystywności gruntów zależą przede wszystkim od ich wilgotności i zawartości rozpuszczonych w wodzie, a ulegających dysocjacji, związków chemicznych. Znaczne zmiany wilgotności gruntów w warunkach rzeczywistych są przyczyną rozbieżności wartości rezystywności podanych przez różnych autorów. Rozbieżności te są spowodowane

również różnorodnością budowy gruntów o tej samej nazwie oraz tym, że podawane wartości uzyskiwano z pomiarów przeprowadzanych różnymi metodami [16].



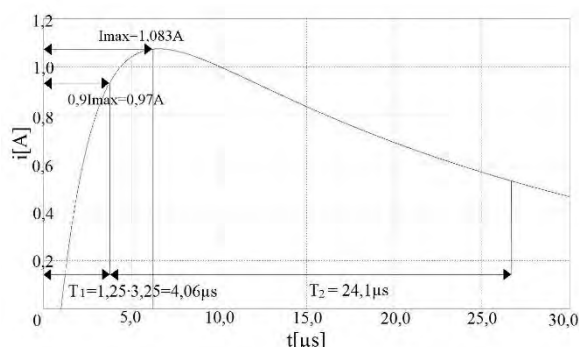
Rys. 2. Schemat zastępczy stworzony w programie PSIM do obliczeń impedancji udarowej oraz impedancji w funkcji częstotliwości uziomów: poziomego i pionowego.

Do obliczeń parametrów uziemień założono średnicę pręta uziemiającego 14 mm, jaka jest powszechnie stosowana w praktyce eksploatacyjnej. Ze względu na niewielką rezystywność gruntu, w którym były pograżone badane uziomy (25 i 40 Ωm), przyjęto do obliczeń stałą dielektryczną gruntu równą $\epsilon_r = 80$. Parametry schematów zastępczych obu uziomów wyznaczone na podstawie wyrażen (2) do (7) zostały przedstawione na rysunku 2.

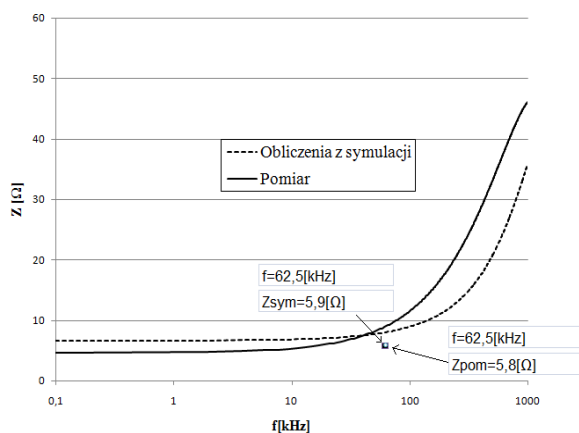
Charakterystyki częstotliwościowe uziomów otrzymano posługując się w programie standardowym źródłem o regulowanej częstotliwości. Symulacje pomiarów udarowych zostały przeprowadzone z wykorzystaniem generatora udarów z elementami C_g , L_g oraz G_g w układzie przedstawionym na rysunku 2. Parametry wyjściowe generatora są zbliżone do generatora umieszczonego w zastosowanym udarowym mierniku uziemień: pojemność kondensatora 34 nF, napięcie ładowania 1 kV. Kryterium doboru pozostałych elementów generatora był założony czas czoła udaru prądowego równy 4 μs jak to zostało pokazane na rysunku 3. W tak zaprojektowanym układzie otrzymywano udary prądowe o amplitudzie na poziomie 1 A.

Wyniki pomiarów na obiektach rzeczywistych oraz komputerowych obliczeń symulacyjnych obu analizowanych uziomów zamieszczono na rysunkach 4 i 5. Uzyskane charakterystyki częstotliwościowe impedancji wskazują na decydującą rolę spadków indukcyjnych na otrzymane wyniki. W zakresie częstotliwości do około 100 kHz wartości impedancji z pomiarów oraz z obliczeń symulacyjnych są zbliżone, natomiast w górnym zakresie częstotliwości można zaobserwować szybszy wzrost wartości impedancji otrzymanej z pomiarów na obiektach rzeczywistych. Rozbieżności wyników otrzymanych z symulacji

komputerowych i zmierzonych spowodowane są niejednorodnością gruntu. Podczas symulacji była ona reprezentowana przez stałą wartość $\rho = 40 \Omega\text{m}$, w rzeczywistości wiemy że nie jest ona stała. Istotne są tu również inne różnice które występują w naturze, a są trudne do odwzorowania przy modelu komputerowym, to wilgotność, temperatura, porowatość oraz poziom pH gleby.



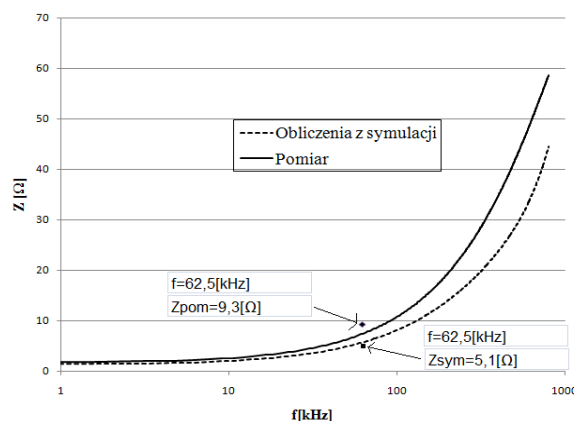
Rys. 3. Kształt uderu prądowego o czasie narastania i opadania uderu prądowego 4/25 μs stworzony w programie PSIM



Rys. 4. Charakterystyki impedancji uziomu pionowego o długości 7 m w funkcji częstotliwości pomiarowej uzyskane z pomiarów na obiekcie rzeczywistym – linia ciągła oraz z obliczeń symulacyjnych – linia przerywana, na wykresie zaznaczono wartości impedancji uderowej pomierzonej i obliczonej

Zaznaczone na rysunkach 4 i 5, zmierzone i obliczone wartości impedancji uderowej wskazują na dość dobrą zbieżność z charakterystykami częstotliwościowymi impedancji. Częstotliwość 62,5 kHz, dla której zaznaczono wartości impedancji uderowej wynika z 4 krotnej wartości 4 μs (czas narastanie czoła uderu prądowego T_1) który był generowany podczas pomiarów uderowych, i odpowiada on częstotliwości $f = 1/4T_1 = 62,5 \text{ kHz}$.

W przepisach normalizacyjnych opisujących procedury prób odbiorczych instalacji o napięciu powyżej 1 kV można znaleźć wskazówki, że dla oceny rozległych systemów uziemień można stosować mierniki pracujące przy wysokiej częstotliwości [11, 12]. Zaprezentowane w pracy wyniki badań wskazują, że alternatywnie do mierników wysokoczęstotliwościowych można stosować uderowe mierniki uziemień.



Rys. 5. Charakterystyki impedancji uziomu poziomego o długości 70 m w funkcji częstotliwości pomiarowej uzyskane z pomiarów na obiekcie rzeczywistym – linia ciągła oraz z obliczeń symulacyjnych – linia przerywana, (na wykresie zaznaczono wartości impedancji uderowej z pomiarów i obliczeń symulacyjnych).

5. WNIOSKI

Zaprezentowane wyniki pomiarów rzeczywistych i symulacji komputerowych wskazują, że rezystancja uderowa uziemień mierzona w dziedzinie czasu za pomocą mierników uderowych jest porównywalna z impedancją mierzoną w dziedzinie częstotliwości przez miernik wysokoczęstotliwościowy. W obu przypadkach występują podobne tendencje wzrostu impedancji w funkcji narastającej częstotliwości lub obniżania czasu czoła uderu.

Metody impulsowa lub wysokoczęstotliwościowa pomiaru impedancji uziemienia pozwalają na dobrą ocenę przydatności uziemień do celów ochrony odgromowej z uwzględnieniem spadków indukcyjnych napięcia oraz długości efektywnej uziomów.

Porównanie wyników otrzymanych przy pomocy obu metod pomiarowych upoważnia do stwierdzenia, że sugerowane w przepisach normalizacyjnych pomiary uziemień z wykorzystaniem mierników generujących wysoką częstotliwość mogą być z powodzeniem zastąpione miernikami uderowymi.

BIBLIOGRAFIA

1. Szpor S. „Ochrona odgromowa tom 1-3; Wydawnictwo Naukowo – Techniczne; Warszawa 1973”
2. Gupta B. R., Thapar B., "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No 6, 1980
3. Mazzetti C., Veca G. M., "Impulse behaviour of ground electrodes", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 9, 1983
4. Lorenzou M. I., Hatziargyriou N. D. „Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection”, Proceedings of 25-th LCLP, Rhodes, Greece, 18-22 Sept. 2000
5. Ziemia R. "Propagation of high frequency disturbances in underground conductors", Proceedings of International Carpathian Conference on EMC (ICC'02): Protection of Computer Systems against Electromagnetic Disturbances, 19-20 Sept. 2002, Łańcut – Rzeszów, Poland

6. Wojtas S. "Efficiency evaluation methods of earthing systems for lightning protection purposes", Proceedings of 26-th ICLP, Krakow, Poland, 2-6 Sept. 2002
7. Galewski M., Wojtas S., Wołoszyk M., „Impulse earthing measurement”, IMEKO XIV International Congress, Tampere (Finlandia) 1997
8. Wojtas S., Rousseau A. "Impulse and high frequency tests of lightning earthing", Proceedings of 27-th ICLP, Avignon, France, 13-16 Sept. 2004
9. PN-EN 62305-1: 2008 - Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne
10. PN-89/E-05003/03 „Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona obostrzona"
11. PN-E-05115 – Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1kV
12. PN-EN 50522 - Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
13. Wojtas S. "Lightning impulse efficiency of horizontal earthings", Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10b, 2012
14. Gonos I.F, Topalis, F.V.; Stathopoulos, I.A. „Transient impedance of grounding rods” Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering Ish 99, (Conf. Publ. No. 467) (Volume:2), London, 23 August 1999-27 Aug 1999
15. Verma R. Mukhedar D. „Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids”, IEEE Transaction on Power apparatus and Systems, vol. PAS-100,
16. Wołkowiński K. „Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, volume 4, 1972”
17. Domaradzki M. „Parametry uziemień przy przebiegach statycznych, udarowych oraz wysokoczęstotliwościowych” – Politechnika Gdańska, Wyd. EiA, praca magisterska 2009

PARAMETERS OF EARTHINGS MEASURED USING IMPULSE AND HIGH FREQUENCY METHODS

The article focuses on a comparison of two methods for testing impedance earthing lightning: impulse impedance earthing and high frequency. Summarizes the results of measurements of the real earthing with the results of computer simulation calculations carried out in the environment PSIM program. The results indicate the correctness of the adopted course of modeling, and obtained in this way data can be useful in the design phase to estimate

Keywords: lighting protection, earthground, earth, resistivity.

NARAŻENIA PIORUNOWE ORAZ WYŁĄCZENIA NAPOWIETRZNYCH LINII PRZESYŁOWYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA SPOWODOWANE BEZPOŚREDNIMI WYŁADOWANIAM ATMOSFERYCZNYMI

Marek ŁOBODA¹, Krzysztof LENARCZYK²

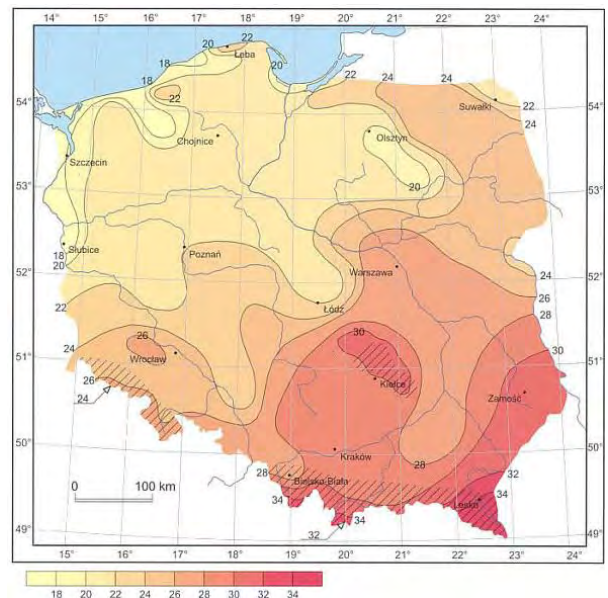
1. Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej
tel.: 608484736 , e-mail: marek.loboda@ee.pw.edu.pl
2. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Departament Eksploatacji
tel.: 0-22 242 15 19, e-mail: krzysztof.lenarczyk@pse.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy korelacji między doziemnymi wyładowaniami piorunowymi a wyłączeniami napowietrznych linii przesyłowych NN w Polsce. W opracowaniu przedstawiono analizę spodziewanych częstości bezpośrednich trażeń wyładowań atmosferycznych w linii przesyłowe 220 kV i 400 kV, w zależności od aktywności burzowej w różnych rejonach kraju i dla różnych konstrukcji linii. Na podstawie danych Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE) opracowano statystyki wyłączeń linii przesyłowych zarejestrowane w latach 2008–2013. Dla wybranych linii 220 kV i 400 kV wykonano szczegółowe analizy określonych wyłączeń linii, porównano ich skutki z parametrami wyładowań piorunowych, a także ich lokalizacją w różnych regionach Polski. Dane o miejscu i parametrach doziemnych wyładowań atmosferycznych pochodzą z systemu rejestracji wyładowań piorunowych LINET obejmującego swym zasięgiem cały obszar Polski. Oszacowano także prawdopodobieństwo spowodowania wyłączenia linii przez bezpośrednie wyładowania piorunowe oraz wartości przepięć atmosferycznych dla wybranych przypadków wyłączeń linii 220 kV i 400 kV.

Słowa kluczowe: doziemne wyładowanie piorunowe, wyłączenia piorunowe linii elektroenergetycznych NN, rejestracja parametrów prądu piorunowego, system rejestracji wyładowań piorunowych LINET.

1. WPROWADZENIE

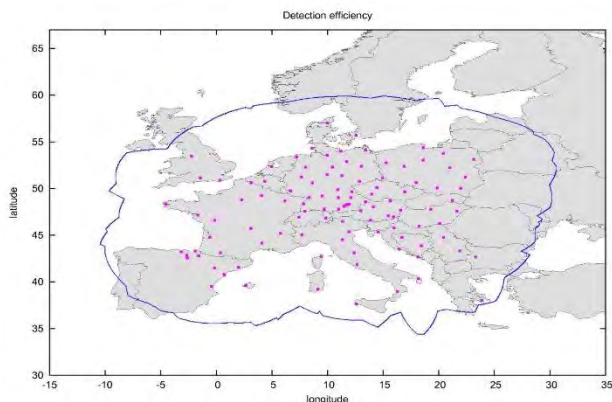
Na obszarze Polski główny „sezon burzowy” trwa od kwietnia do końca października. Niemniej jednak wyładowania atmosferyczne są obserwowane i rejestrowane w ciągu całego roku kalendarzowego. Informacje o liczbie dni burzowych w roku na terenie Polski podaje do publicznej informacji IMiGW [1]. Na rysunku nr. 1 przedstawiono mapę dni burzowych (mapę izokerauniczną) w Polsce. Została ona określona na podstawie danych metrologicznych z okresu 20 lat.



Rys. 1. Mapa dni z burzą w Polsce [1]

Poza danymi o liczbie dni burzowych w roku rejestrowanymi przez IMiGW, informacje o częstości wyładowań atmosferycznych w Polsce można uzyskać z danych zarejestrowanych przez systemy zdalnej rejestracji wyładowań piorunowych m.in. przez system LINET i PERUN [3].

System LINET rejestruje wyładowania doziemne (CG) oraz wewnątrz chmur (IG). Poza obszarem Polski obejmuje on swoim zasięgiem również większość obszaru Europy (rys. 2). Charakteryzuje się on wysoką efektywnością detekcji wyładowań oraz dokładnością ich lokalizacji.



Rys. 2. Lokalizacja anten systemu LINET na terenie Europy [2]

Wyładowania piorunowe powodują znaczące straty oraz stanowią realne zagrożenie nie tylko dla obiektów budowlanych, lecz również dla linii elektroenergetycznych nn, SN, WN i NN. W wyniku doziemnego wyładowania piorunowego może dojść do zakłóceń w pracy sieci elektroenergetycznej, wyłączenia linii (przejściowego lub trwałego) lub uszkodzenia jej elementów. Dotyczy to zarówno przypadku bezpośredniego wyładowania w linię, jak również wyładowań w jej pobliżu. Zidentyfikowanie, czy przyczyną było wyładowanie bezpośrednie czy pośrednie, jest bardzo trudne i wymagałoby dokonywania inspekcji linii (przy wyłączonej linii lub np. z pokładu śmigłowca).

W latach 2008–2013 w PSE zarejestrowano ponad 180 wyłączeń linii przesyłowych 220 kV i 400 kV [3], które były spowodowane wyładowaniami piorunowymi. Łączna długość linii przesyłowych 220 kV oraz 400 kV w Polsce wynosi 13 405 km (rys. 3). Przeważającą liczbę wyłączeń stanowiły wyłączenia przemijające (SPZ WZ).

Liczbę wyładowań piorunowych N_L w napowietrzną linię elektroenergetyczną w ciągu roku można określić według wzoru:

$$N_L = N_G \cdot A_L \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

gdzie: N_G – roczna liczba wyładowań piorunowych przypadających na 1 km² powierzchni na danym obszarze; A_L – powierzchnia zbierania wyładowań przez linię (m²), wyrażona jako:

$$N_G = a \cdot T_D^b \quad (2)$$

gdzie: $a = 0,036$ i $b = 1,3$ – współczynniki liczbowe oszacowane dla obszaru Polski [4].

Dla napowietrznej linii elektroenergetycznej zlokalizowanej na płaskim terenie, powierzchnię zbierania wyładowań A_L przez linię można określić jako przecięcie między powierzchnią ziemi i linią prostą nachyloną do niej pod kątem 33°, łączącą przewód odgromowy wzdłuż całej długości linii L . Wartość A_L można wyznaczyć w sposób graficzny lub matematycznie, w zależności od geometrii słupa linii i liczby przewodów odgromowych.

Dla typowych konstrukcji słupów oraz sposobu zawieszenia przewodów (patrz rys. 3 i rys. 4), powierzchnia zbierania wyładowań przez linię A_L może być obliczona z zależności:

$$A_L = (6H + W) \cdot L \quad (3)$$

gdzie: H – wysokość zawieszenia przewodów odgromowych nad powierzchnią ziemi, W – szerokość słupa, L – długość linii.

2. CHARAKTERYSTYKA LINII 220 kV I 400 kV ORAZ OCENA STOPNIA ICH NARAŻENIA NA WYŁADOWANIE PIORUNOWE

Na rys. 3 przedstawiono plan przesyłowych sieci elektroenergetycznych najwyższych napięć w Polsce. Kolorem zielonym zaznaczono napowietrzne linie elektroenergetyczne o napięciu 220 kV, zaś czerwonym o napięciu 400 kV. Zgodnie ze standardami technicznymi PSE oraz z wymaganiami międzynarodowymi linie NN powinny być wyposażone w przewody odgromowe w celu ochrony przed bezpośrednimi wyładowaniami piorunowymi. Wymagane jest, aby zewnętrzny kąt ochronny tworzony przez przewody odgromowe dla zewnętrznych przewodów fazowych był $\leq 20^\circ$, zaś wewnętrzny kąt ochronny $\leq 45^\circ$.

W celu zapewnienia skuteczności ochrony odgromowej napowietrznych linii elektroenergetycznych NN jest niezbędne uziemienie słupa linii oraz dotrzymanie właściwej wartości rezystancji uziemienia. Wymagane jest, aby wartość rezystancji uziemiania słupa linii dla gruntów o rezystywności $\rho < 1000 \Omega\text{m}$ wynosiła nie więcej niż 15 Ω , zaś dla gruntów o rezystywności $\rho > 1000 \Omega\text{m}$ wynosiła nie więcej niż 20 Ω .

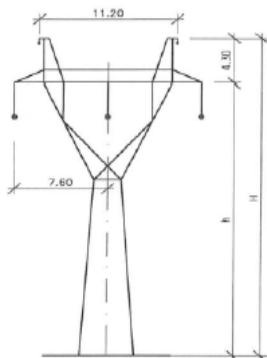
Na rys. 4 i rys 5 zostały przedstawione typowe kształty słupów linii stosowanych w Polsce, odpowiednio w liniach 220 kV oraz 400 kV.

W celu oszacowania liczby bezpośrednich wyładowań piorunowych N_L w napowietrzne linie 220 kV i 400 kV na 100 km ich długości zastosowano wzory (1-3) oraz wykorzystano dane przedstawione na rys. 1, rys. 4 i rys 5 oraz w tablicy 1.

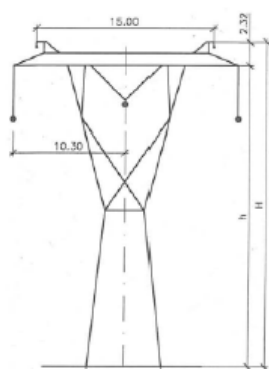
Biorąc pod uwagę średni zwis przewodów odgromowych może okazać się, że średnia wysokość słupów będzie o około 10% niższa. Uwzględnienie tego faktu może prowadzić do zmniejszenia liczby wyładowań N_L w podobnej skali, w zależności od poziomu napięcia oraz profilu linii.



Rys. 3. Plan sieci elektroenergetycznej NN [5] - kolorem zielonym zaznaczono linie 220 kV, zaś czerwonym 400 kV



Rys. 4. Typowy kształt słupa stosowany w liniach jednotorowych 220 kV - wymiary: h=26,5m, H=30,8 m, W=15,2 m



Rys. 5. Typowy kształt słupa stosowany w liniach jednotorowych 400 kV - wymiary: h=26,5m, H=30,8 m, W=15,2 m

Tablica 1. Obliczona liczba wyładowań piorunowych w linii elektroenergetycznej NN

Obszar Polski	Gęstość wyładowań N _G	Roczna liczba wyładowań w linii N _L	
	1/km ² ×rok	Na 100 km długości linii	
Północny	1,5 ÷2,1	200 kV	29 ÷41
		400 kV	30 ÷43
Centralny	1,8 ÷2,5	200 kV	35 ÷49
		400 kV	37 ÷51
Połu- dniowy	2,3 ÷3,4	200 kV	45 ÷67
		400 kV	47 ÷69
Średnia dla Polski		200 kV	36 ÷52
		400 kV	38 ÷54

3. ANALIZA WYŁĄCZEŃ LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH 220 kV I 400 kV SPOWODOWANYCH WYŁADOWANIAMI PIORUNOWYMI

3.1. Statystyka wyłączeń linii

Całkowita długość linii elektroenergetycznych w Polsce [5] wynosi:

- 6 759 km linii 220 kV,
- 4194 km linii 400 kV.

Liczba wyłączeń linii elektroenergetycznych 220 kV i 400 kV, które zostały zarejestrowane przez PSE S.A.

w latach 2008-2013 przedstawiono w tablicy 2. Z analizowanych danych wynika również, że w okresie tych 6 lat znaczna większość wyłączeń były to przypadki wyłączeń pojedynczych linii. Niemniej jednak, zarejestrowano także, że wybrane linie w wyniku wyładowania piorunowego wyłączane były nawet pięciokrotnie, linie 220 kV oraz ośmiokrotnie, linie 400 kV.

Wyłączenie trwałe linii zdefiniowane zostało jako wyłączenie, które trwa dłużej niż 1 minuta (w którym automatyka zabezpieczeniowa nie dokonała pozytywnego załączenia linii - SPZ WZ). Zdarzały się również przypadki, w których linia pozostawała wyłączona przez kilka godzin.

W znacznej większości wyłączenia linii były usuwane w ramach pozytywnego zadziałania automatyki SPZ – zakwalifikowane jako wyłączenia przemijające.

Mając na uwadze dane ujęte w tablicy 1 dotyczące oszacowanej liczby wyładowań piorunowych N_L w linii NN możemy dokonać obliczenia prawdopodobieństwa bezpośredniego wyładowania piorunowego w linię NN, które powodować może wyłączenia przemijające oraz wyłączenia trwałe linii.

Tablica 2. Zarejestrowana liczba wyłączeń linii elektroenergetycznych 220 kV i 400 kV spowodowanych wyładowaniami piorunowymi

Rok	Liczba zarejestrowanych wyłączeń (trwałych i przemijających) N_{RLF}			
	Linie 200 kV		Linie 400 kV	
	Trwałe	Przemijające	Trwałe	Przemijające
2008	2	12	1	6
2009	6	12	2	12
2010	4	15	5	8
2011	6	21	2	16
2012	7	12	5	12
2013	1	9	0	7
Razem	26	81	13	63
Średnio rocznie	4,3	13,5	2,2	10,5
Razem	97		78	
Wszystkie wyłączenia na 100 km długości linii/ rok	0,26		0,30	

Wykorzystując dane dotyczące zarejestrowanych wyłączeń linii, w wyniku wyładowań piorunowych, prawdopodobieństwo P może być oszacowane z zależności:

$$P = N_{RLF} / N_L \quad (4)$$

Dla linii elektroenergetycznych NN średnia wartość prawdopodobieństwa wyładowania piorunowego powodującego wyłączenie linii oszacowano na podstawie danych z PSE S.A. obejmujących lata 2008-2013 na poziomie:

- $P = 5 \cdot 10^{-3} \rightarrow 7 \cdot 10^{-3}$ dla linii 220 kV,
- $P = 5,5 \cdot 10^{-3} \rightarrow 7 \cdot 10^{-3}$ dla linii 400 kV

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że skuteczność ochrony ogromowej linii przesyłowych NN jest duża i ryzyko uszkodzenia linii przesyłowych dla warunków klimatycznych występujących w Polsce można określić jako umiarkowane.

3.2. Analiza wyłączeń spowodowanych wyładowaniami piorunowymi dla wybranych linii NN

Bardziej szczegółowe analizy wyłączeń linii przesyłowych wskutek wyładowań piorunowych przedstawiono dla wybranych linii NN zlokalizowanych w różnych regionach Polski. Parametry wyładowań piorunowych uzyskane zostały z bazy danych systemu rejestracji wyładowań LINET [2].

Do analiz wybrano dwie linie 220 kV i dwie linie 400 kV, które były wyłączone w wyniku wyładowań piorunowych w roku 2013. Na rys. 6–9, kolorem czerwonym przedstawione zostały fragmenty trasy linii wraz z pasem powierzchni o szerokości 1 km (kolor biały), w którym przedstawiono (kropkami czerwonymi) zarejestrowane przez LINET pojedyncze doziemne wyładowania piorunowe. Wyładowania, o których mowa, są wyładowaniami piorunowymi zarejestrowanymi w ciągu 24 godzin w dniu, kiedy nastąpiło wyłączenie linii spowodowane wyładowaniem piorunowym. Na powiększonych fragmentach rysunków przedstawiono kolorem czerwonym ze wskaźnikiem poszczególne wyładowania, będące prawdopodobnie przyczyną zarejestrowanego przez PSE wyłączenia linii.

Porównując czasy wyłączenia analizowanych linii oraz czasy wystąpienia wyładowania piorunowego można było zidentyfikować wyładowanie, które było przyczyną wyłączenia oraz określić jego parametry (wartość prądu piorunowego, biegunowość). Dla każdego z przypadków policzono liczby wyładowań, jakie zarejestrowano w danym dniu w pasie o szerokości 1 km wzdłuż całej długości linii. Należy wziąć tu pod uwagę fakt, że dokładność lokalizacji wyładowań doziemnych, określona przez operatora systemu LINET dla centralnej i południowej części Polski wynosi na poziomie 15–200 m.

Podstawowe dane o wyładowaniach piorunowych dla wybranych przypadków zamieszczono w tablicy 3.

Dla wszystkich szczegółowo analizowanych przypadków dokonano obliczenia wartości przepięć, zgodnie z metodyką opisywaną przez Viscaro i in. [6], przy założeniu bezpośredniego wyładowania w słup linii. Tym samym wartości przepięć U_T można obliczyć zgodnie z następującą formułą:

$$U_T = Z_T \cdot I_m \left[\frac{2}{v \cdot T_F} \cdot H + \frac{2}{\left(\frac{Z_T}{Z_G} \right) + 1} \right] \quad (5)$$

gdzie: Z_T - impedancja słupa, Z_G - impedancja uziemienia słupa, I_m - maksymalna wartość prądu piorunowego, H - wysokość słupa, v - prędkość rozchodzenia się prądu piorunowego (odpowiadająca prędkości światła), T_F - czas trwania czoła uderu prądowego.

W tablicy 3 przedstawiono wyniki obliczeń wartości przepięć atmosferycznych w linii, spowodowanych wyładowaniem piorunowym. Do obliczeń przyjęto następujące wartości: $Z_T = 200 \Omega$, $Z_G = 20 \Omega$, $T_F = 10 \mu s$, $v = 300 \text{ m}/\mu s$, H - dla różnych konstrukcji słupów wg rys. 2 i rys. 3, oraz wartości prądów piorunu oznaczone pogrubioną czcionką na rys. 6–9.

Tablica 3. Dane wyładowań piorunowych powodujące wyłączenia wybranych linii

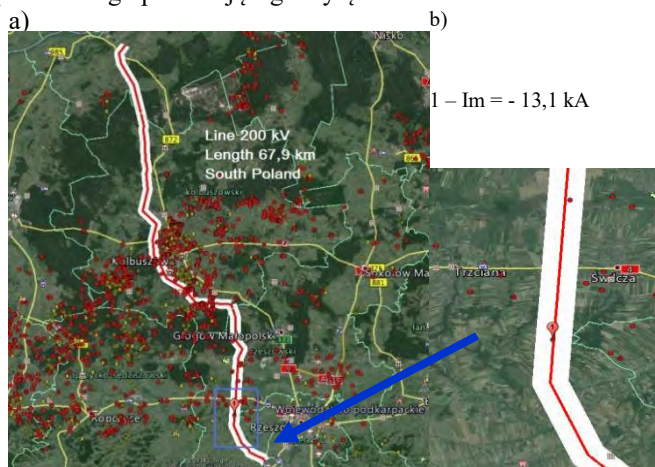
Przypadek	Napięcie znamionowe linii, symbol, długość i usytuowanie linii	Parametry wyładowania			
		Liczba uderów w obszarze pasa o szer. 1 km	Liczba uderów/km ² /dzień	Wartość szczytowa prądu i biegunowość [kA]	Obliczona wartość przepięcia U_T [kV]
A	220 kV, BGC – CHM, L = 67,9 km, pld. cz. Polski	40	0,6	-13,1	- 525
B	220 kV, KON – ADA L = 37,5 km cent.cz. Polski	45	1,2	-59,1	- 2370
C	400 kV, JOA-ROG, L= 78,0 km, cent.cz. Polski	10	0,1	+16,0	+ 643
D	400 kV, RZE-TAW L= 86,0 km pld. cz. Polski	33	0,4	-10,9	- 438

Zgodnie ze standardem technicznym PSE S.A., izolacja doziemna linii powinna być zaprojektowana na wytrzymywane napięcie uderowe piorunowe wynoszące:

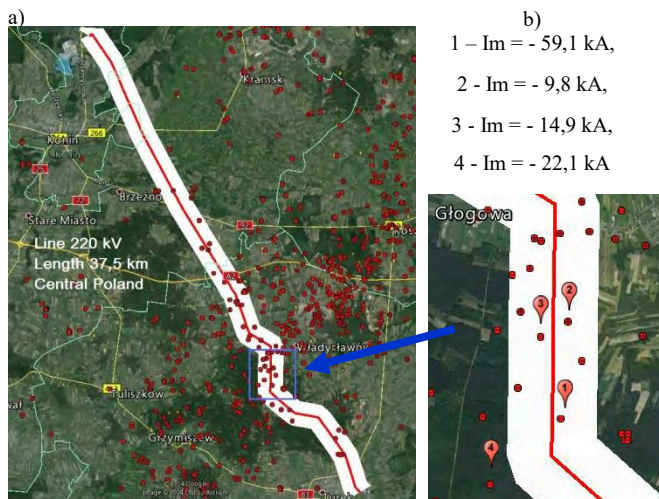
- 1050 kV dla linii 220 kV,
- 1425 kV dla linii 400 kV.

W wyniku wykonanej analizy stwierdzono, że tylko dla przypadku B (linia 220 kV położona w centralnej Polsce), oszacowane wartości przepięć piorunowych były wyższe od znamionowego poziomu napięcia uderowego piorunowego. W pozostałych przypadkach wartości przepięć piorunowych były stosunkowo niskie i mniejsze od przyjmowanych poziomów napięcia wytrzymywanego.

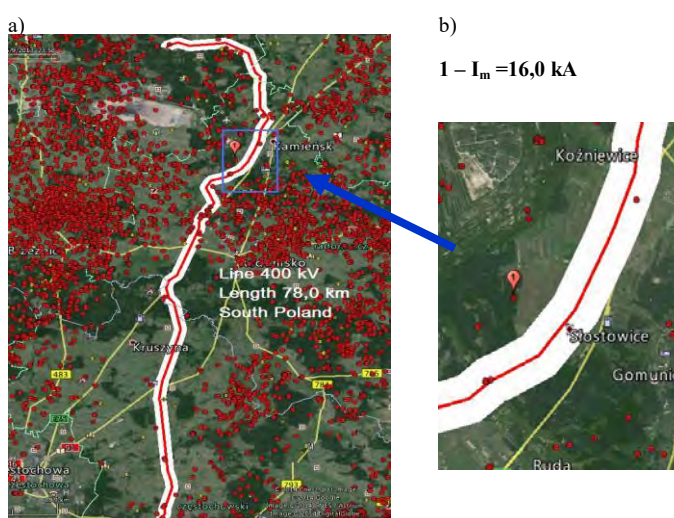
Dokonując oszacowania przepięć piorunowych oraz na podstawie danych szczegółowych dotyczących wyłączenia linii, stwierdzono, że w przypadku B zarejestrowano zwarcie międzyfazowe oraz wyłączenie linii na czas ok. jednej godziny. W pozostałych przypadkach (A, C i D) nie obserwowano zwarć międzyfazowych, a ponowne załączenie linii następowało w kilka sekund po przepływie prądu piorunowego powodującego wyłączenie linii.



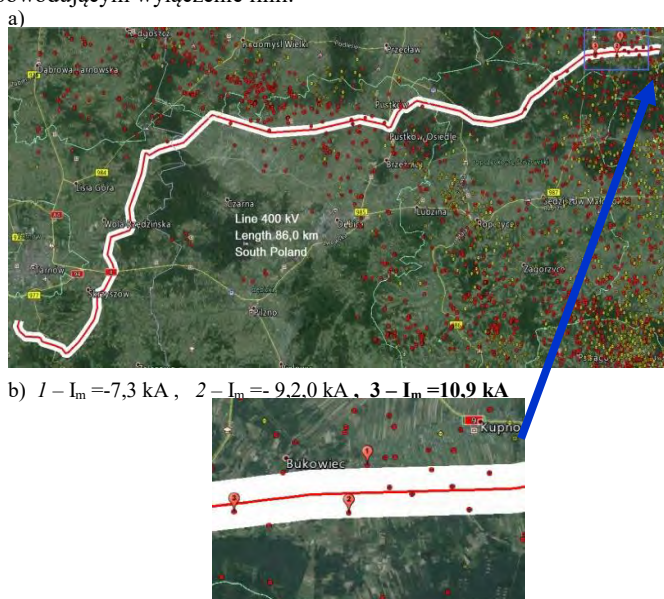
Rys. 6. Trasa linii a) oraz powiększenie jej fragmentu b) dla linii 220 kV BGC-CHM z zaznaczonym jako nr 1 wyładowaniem powodującym wyłączenie linii.



Rys. 7. Trasa linii a) oraz powiększenie jej fragmentu b) dla linii 220 kV ADA-KON z zaznaczonym jako nr 1 wyładowaniem powodującym wyłączenie linii.



Rys. 8. Trasa linii a) oraz powiększenie jej fragmentu b)- dla linii 400 kV JOA-ROG z zaznaczonym jako nr 1 wyładowaniem powodującym wyłączenie linii.



Rys. 9. Trasa linii a) oraz powiększenie jej fragmentu b) dla linii 400 kV RZE-TCN z zaznaczonym, jako nr 3 wyładowaniem powodującym wyłączenie linii.

4. WNIOSKI

Analizy dotyczące korelacji oddziaływań wyładowań piorunowych oraz wyłączeń linii NN, prezentowane w niniejszym artykule, są pierwszymi tego typu w kraju. Okres analizy obejmował lata 2008–2013, a dane wyładowań piorunowych uzyskane zostały z systemu automatycznej rejestracji wyładowań LINET.

Można ocenić, że dla wybranych przypadków linii 220 kV i 400 kV prawdopodobieństwo wyłączenia linii spowodowane wyładowaniami piorunowymi jest umiarkowane i zawarte w przedziale $5 \cdot 10^{-3} \rightarrow 7 \cdot 10^{-3}$. Jednakże należy zaznaczyć, że w analizie nie uwzględniono strat ekonomicznych wywołanych wyładowaniami piorunowymi oraz wyłączeniami linii.

Należy podkreślić, że stosowane na liniach przesyłowych NN w Polsce środki ochrony odgromowej linii spełniają swoją rolę, a uszkodzenia izolacji linii nie są częste w odniesieniu do całkowitej długości linii elektroenergetycznych 220 kV i 400 kV. Może wynikać to w głównej mierze z tego, że linie przesyłowe przebiegają na terenie Polski głównie przez tereny płaskie, charakteryzujące się stosunkowo niską gęstością wyładowań doziemnych (1,5-3,4 wyładowania/km²/rok).

Wykorzystywanie danych o wyładowaniach piorunowych z systemów automatycznej ich rejestracji, w tym gromadzonych danych historycznych może być przydatne do analizy skuteczności koordynacji izolacji linii NN. Jest to obecnie stosunkowo proste dzięki możliwości zastosowania ogólnodostępnych narzędzi takich jak np. Google maps oraz Internetu.

Dzięki temu jest możliwa szczegółowa analiza wpływu wyładowań piorunowych oraz ich parametrów na wyłączenia linii oraz ulepszanie środków ochrony odgromowej dla dowolnie wybranych linii elektroenergetycznych.

Podziękowanie

Autorzy dziękują firmie Nowcast (Niemcy), operatorowi systemu LINET, za udostępnienie danych o wyładowaniach piorunowych na potrzeby niniejszego artykułu i Panu Jarosławowi Łobodzie za przygotowanie map z trasami linii NN z naniesionymi wyładowaniami piorunowymi.

5. BIBLIOGRAFIA

1. IMGW: Atlas Klimatu Polski Warszawa 2005.
2. M. Łoboda, H. D. Betz, Z. Dziewit, P. Barański: „New lightning detection networks in Poland – LINET and LLDN”, 29th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2008, Uppsala, Sweden 2008.
3. M. Łoboda, Z. Dziewit, J. Konarski, A. Maciszewska, and H. D. Betz: „Lightning location with the two networks Perun and Linet in Poland”, 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, pp.1127-1- 1127-4, Cagliari, Italy 2010.
4. W. Skomudek: „Analiza i ocena skutków przepięć w elektroenergetycznych sieciach średniego i wysokiego napięcia”, Politechnika Opolska, Studia i monografie, z. 225, Opole 2008.
5. Dane PSE SA 2008-2013.
6. S. Visacro, R. Nietzsche Dias, C. Rejane de Mesquita: “Novel Approach for Determining Spots of Critical

- Lightning Performance Along Transmission Lines”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.20, No.2, April 2005, pp.1459-1464..
7. A. Borghetti, F. Napolitano, C.A. Nucci, M. Paolone, M. Bernardi, F. Rachidi, K. Yamabuki: “Correlation of Lightning Events and Faults in Distribution Power Networks: A Joint Research Project, CIGRE Session, Paris 2008, C-4-117
 8. D. Correia, D. Brasil, L. Montezuma, C. Campinho, A. Carvalho; ”A Review on EHVAC Transmission Line Lightning Performance” CIGRE Session, Paris 2012, C4-305.
 9. J. L. He, R. Zeng: ”Lightning Shielding Failure Analysis Of 1000-kV Ultra-High Voltage AC Transmission Line”, CIGRE Session, Paris 2010, C4-201-2010.
 10. S. Okabe, S. Taniguchi, T. Tsuboi, H. Ohta, E. Zaima: ”Observation results of Lightning Shielding and Improvement in the Reduction Method for the Lightning Failure Rate with Large-sized Transmission lines”, CIGRE Session, Paris 2010, C4-207-2010.
 11. K. L. Cummins, E. P. Krider, M. D. Malone: ”The U.S. National Lightning Detection Network TM and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities”, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, No.4, November 1998, pp. 465-480.

LIGHTNING HAZARD AND SHUT-DOWNS OF OVERHEAD HV ELECTRIC POWER TRANSMISSION LINES CAUSED BY DIRECT LIGHTNING STRIKES

The paper is addressed to analysis of shut-downs and reclosures occurred in high voltage transmission lines caused by cloud to ground lightning discharges in Poland. The problem is focused on 220 kV and 400 kV overhead lines and lightning outages in years 2008-2013. The lightning data were recorded by lightning location system LINET while faults data of transmission lines were collected by the Polish Transmission System operator. The analysis correlates the individual lightning discharge parameters and technical characteristics of selected 220 kV and 400 kV transmission lines located in different regions of Poland, which are characterised by different intensity of cloud to ground lightning discharges. Some detailed analysis includes the probability of line shut-downs and estimation of overvoltage values for typical cases of 220 kV and 400 kV lines outages in Poland. Presented analysis are quite new in Poland methodology of lightning data application useful for improvement oh HV transmission lines lightning performance.

Keywords: CG lightning intensity, HV overhead power transmission lines, faults and shut-downs of line, lightning current parameters.

WPLYW ZMIAN ZASAD OCENY ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO NA POTRZEBĘ STOSOWANIA OCHRONY ODGROMOWEJ I JEJ KATEGORIĘ

Tomasz MAKSIMOWICZ, Mirosław ZIELENKIEWICZ

Centrum Ochrony przed Przepięciami i Zakłóceniami Elektromagnetycznymi w Białymstoku,
ul. Myśliwska 2, 15-569 Białystok
tel.: 501 388 922 e-mail: t.maksimowicz@rst.pl
tel.: 609 644 828 e-mail: m.zielenkiewicz@rst.pl

Streszczenie: Na przestrzeni ostatnich dekad wraz ze zmianami aktów normalizacyjnych w zakresie ochrony odgromowej transformacji ulegały także procedury, według których podejmowana jest decyzja o potrzebie stosowania instalacji odgromowej obiektów budowlanych. W artykule przedstawiono przegląd praktyk oceny zagrożenia piorunowego w normach dotyczących ochrony odgromowej poczynając od normy PN-E-05003:1986 i kończąc na aktualnej drugiej edycji norm PN-EN 62305-2:2012, dokonano porównania poszczególnych toków postępowania ze wskazaniem ich wad i zalet, a także zamieszczono przykłady wyników oceny potrzeby stosowania i doboru kategorii instalacji odgromowej według różnych norm dla typowych obiektów budowlanych. Przedstawiona analiza obliczeń zagrożenia piorunowego pokazuje, iż różne procedury oceny ryzyka kolejnych wersji omawianych norm dają odmienne wyniki.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, zagrożenie piorunowe, analiza ryzyka.

1. WSTĘP

Akty normalizacyjne w zakresie oceny zagrożenia piorunowego obiektów budowlanych i potrzeby stosowania instalacji odgromowej (LPS – ang. *lightning protection system*) w ciągu ostatnich dekad kilkakrotnie ulegały istotnym zmianom. Ich historia została ostatnio opisana w publikacji H. Borynia [1], gdzie można znaleźć informacje sięgające początków ochrony odgromowej na terenie Rzeczypospolitej Polskiej w roku 1784. Pierwsze zalecenia normalizacyjne zawarte w normie PNE/22 z 1931 r. [2] ograniczały się jedynie do wskazania obiektów, które taką ochroną powinny być objęte. Dopiero w okresie powojennym w normie PN-E 05003:1955 [3] wprowadzono pierwszy algorytm oceny zagrożenia piorunowego polegający na obliczeniu wskaźnika W_Z , którego wartość określała, czy instalacja LPS jest konieczna, wskazana lub nie jest wymagana. Wartość wskaźnika W_Z obliczana była na podstawie wartości umownych współczynników zależnych między innymi od przeznaczenia budowli, jej zawartości, stosowanych materiałów konstrukcyjnych, wymiarów, otoczenia, położenia i średniego rocznego czasu trwania burz na danym terenie. Algorytm ten zmodyfikowano dopiero w 1986 r. w kolejnej edycji normy PN-E 05003 [4]. Idea polegająca na obliczeniu wskaźnika W pozostała zbliżona do wersji pierwotnej, znaczącym zmianom uległ jednak sposób

obliczenia jego wartości. Istotne zmiany pojawiły się w 2001 roku, wraz z opublikowaniem przez Polski Komitet Normalizacyjny międzynarodowej normy PN-IEC 61024 [5], polegające przede wszystkim na wprowadzeniu pojęcia poziomu ochrony odgromowej LPL (ang. *lightning protection level*). Radykalne zmiany w podejściu do oceny zagrożenia piorunowego wprowadziła jednak dopiero seria norm PN-EN 62305. W jej drugim arkuszu [6] przedstawiono złożoną procedurę zarządzania ryzykiem, której celem jest nie tylko określenie potrzeby stosowania ochrony odgromowej i jej ewentualnego wymaganego poziomu, ale także dobór środków ochrony niezbędnych do ograniczenia ryzyka oddziaływania wyładowania piorunowego na obiekt budowlany do określonego tolerowanego poziomu.

2. PRZEGLĄD ZMIAN ALGORYTMÓW OCENY ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO

2.1. Norma PN-E-05003-1:1986 [4]

Idea oceny zagrożenia piorunowego według tej edycji norm polegała na obliczeniu wskaźnika zagrożenia piorunowego W według następującej zależności:

$$W = n \cdot m \cdot N \cdot A \cdot p \quad (1)$$

gdzie:

- n – współczynnik uwzględniający liczbę ludzi w obiekcie:
 - $n = 1$ do 1 osoby na 10 m² powierzchni,
 - $n = 2$ przy większej liczbie osób;
- m – współczynnik uwzględniający położenie obiektu:
 - $m = 0,5$ dla obiektów w zwartej zabudowie,
 - $m = 1$ dla pozostałych obiektów;
- N – roczna gęstość powierzchniowa wyładowań doziemnych zależna od położenia geograficznego obiektu (szerokości geograficznej):
 - $N = 1,8 \cdot 10^{-6}$ m⁻² dla obszarów powyżej 51°30'
 - $N = 2,5 \cdot 10^{-6}$ m⁻² dla obszarów poniżej 51°30'
- A – równoważna powierzchnia zbierania wyładowań przez obiekt obliczana na podstawie powierzchni zajmowanej przez obiekt (S), długości jego obrysu (l) i wysokości (h):

$$A = S + 4 \cdot l \cdot h + 50h^2; \quad (2)$$

p – prawdopodobieństwo wywołania szkody wyznaczone na podstawie współczynników (określanych na podstawie tablic) uwzględniających rodzaj obiektu (R), jego zawartość (Z) i konstrukcję (K):

$$p = R \cdot (Z+K). \quad (3)$$

W zależności od obliczonej wartości W określano trzy stopnie zagrożenia piorunowego, według których podejmowana była decyzja o stosowaniu instalacji piorunochronnej (tablica 1).

Tablica 1. Stopnie zagrożenia piorunowego wg [4]

Wartość W	Stopień zagrożenia	Ochrona odgromowa
$W \leq 5 \cdot 10^{-5}$	Małe	zbędna
$5 \cdot 10^{-5} < W \leq 10^{-4}$	Średnie	zalecana
$W > 10^{-4}$	Duże	wymagana

Powyższa procedura określała co prawda, czy ochrona odgromowa jest wymagana, lecz nie definiowała środków, jakie należy w tym celu stosować. Zasady projektowania ochrony zależne były od typu obiektu i występującego w nim zagrożenia i opisane były w kolejnych arkuszach normy dotyczących według przyjętego nazewnictwa trzech rodzajów ochrony: podstawowej, obostrzonej i specjalnej.

Według Polskiego Komitetu Normalizacyjnego norma PN-E-05003-01:1986 [4] wycofana została bez zastąpienia dopiero w 2009 r., czyli w momencie opublikowania serii norm PN-EN 62305.

2.2. Norma PN-IEC-61024-1-1:2001 [5, 6]

Przez pewien okres równolegle z normą PN-E-05003-01:1986 [4] stosowana była seria norm międzynarodowych PN-IEC 61024-1 o takiej samej nazwie: „Ochrona odgromowa obiektów budowlanych”, co było powodem poważnych frustracji projektantów i inspektorów nadzoru budowlanego w tym okresie ze względu na prawne problemy z wyborem odpowiedniej do stosowania normy. Ta edycja norm odgromowych wprowadziła obowiązującą do dziś klasyfikację poziomów ochrony odgromowej i klasy instalacji odgromowych, definiując wymagania dotyczące zasad projektowania LPS.

Zgodnie z wymaganiami zawartymi w pierwszym arkuszu normy PN-IEC 61024-1-1 [5] kryterium dla potrzeby stosowania ochrony odgromowej stanowiła akceptowalna średnia roczna gęstość wyładowań N_c , które mogą oddziaływać na obiekt. W wersji pierwotnej [5] dla obiektów zwykłych należało przyjmować wartość $N_c = 10^{-2}$, co oznaczało, że akceptowana jest częstość wyładowań w obiekt wynosi jeden raz na sto lat. Po wprowadzeniu w roku 2002 przez Komitet Techniczny nr 55 do spraw Instalacji Elektrycznych i Ochrony Odgromowej Obiektów Budowlanych przy Polskim Komitecie Ochrony Odgromowej poprawki do polskiej wersji normy (PN-IEC 61024-1-1:2001/Ap1:2002 [6]) wartość tę, bez merytorycznego uzasadnienia zmniejszono do $N_c = 10^{-3}$, co oznaczało, że akceptowalna częstość wyładowań w obiekt wynosiła tylko jeden raz na tysiąc lat! Zaostrzyło to w znacznym stopniu potrzebę stosowania ochrony odgromowej i doprowadziło do znacznego przeszacowania zagrożenia piorunowego typowych obiektów w Rzeczypospolitej Polskiej i – w rezultacie – do nadmiernego wzrostu kosztów ochrony odgromowej. Bardziej szczegółowo problem ten został opisany w publikacji [9].

Zgodnie z algorytmem oceny zagrożenia piorunowego przedstawionym w normie PN-IEC 61024-1-1 wartość akceptowalną N_c należało porównać ze statystyczną częstością N_d wyładowań w ten obiekt będącą iloczynem lokalnej rocznej gęstości wyładowań w rozpatrywanym terenie N_g i równoważnej powierzchni zbierania wyładowań przez rozpatrywany obiekt A_e :

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6}. \quad (4)$$

Jeżeli lokalna gęstość wyładowań N_g nie była znana, to można było przyjąć wartość N analogicznie jak w [4] lub wyznaczyć ją na podstawie średniej rocznej liczby dni burzowych T_d na danym obszarze (uzyskiwanej z map izokeraunicznych) z zależności:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25}. \quad (5)$$

Powierzchnię zbierania wyładowań A_e dla obiektów odosobnionych wyznacza się do dnia dzisiejszego jako obszar ograniczony linią utworzoną przez punkty przecięcia powierzchni ziemi przez linię prostą o nachyleniu 1:3 wiodącą wokół obiektu, przebiegającą stycznie do górnych części obiektu. Dodatkowo przy wyznaczaniu powierzchni A_e należało uwzględnić ukształtowanie terenu (zagłębienia, pagórki) oraz obecność sąsiednich obiektów. Metoda ta jest bardziej dokładna od formuły zaproponowanej w PN-E-05003, ale wymaga dokładniejszej analizy graficznej.

Podstawowym założeniem do stosowania instalacji odgromowej według PN-IEC 61024 było spełnienie warunku, gdy $N_d > N_c$. Należało wtedy zastosować LPS o skuteczności:

$$E \geq 1 - N_c/N_d \quad (6)$$

Poszczególnym poziomom ochrony przypisane zostały klasy LPS o określonej skuteczności E zgodnie z tablicą 2 zamieszczoną w arkuszu normy.

Tablica 2. Skuteczność LPS i odpowiadające im poziomy ochrony według zaleceń normy PN-IEC-61024-1-1:2001 [5]

Poziom ochrony LPL	Skuteczność LPS E
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Jak napisano we wcześniejszej publikacji [9] taki sposób prezentacji doboru ochrony odgromowej oznaczał, iż w powszechnej praktyce projektanci, stosując tablicę skuteczności z normy PN-IEC 61024-1-1 [5], mylnie zakładali, iż dla obliczonej wartości skuteczności $E < 0,8$ ochrona odgromowa nie była wymagana, zaś IV poziom ochrony dotyczy obliczonych skuteczności z przedziału $0,8 \leq E < 0,9$. W rzeczywistości, w myśl zaleceń tej normy, czwartemu poziomowi ochrony odpowiadała obliczona skuteczność z przedziału $0 < E \leq 0,80$, a gdy wyliczona skuteczność przekraczała wartość 0,98 należało zastosować dodatkowe środki ochrony odgromowej oprócz tych, które były zalecane dla poziomu pierwszego [9].

Przedstawione powyżej zasady uzależniały potrzebę stosowania LPS jedynie od wymiarów geometrycznych obiektu i jego położenia geograficznego. Nie uwzględniało się żadnych właściwości obiektu tak jak to miało miejsce w PN-E-05003. Należy także zwrócić uwagę, że po wprowadzeniu poprawki [6] dotyczącej wartości N_c wymagania dotyczące stosowania LPS uległy znacznemu, niezasadnemu obostrzeniu.

Norma to została wycofana i zastąpiona przez serię norm PN-EN 62305.

2.3. Norma PN-EN-62305-2:2008 (ed.1) [7]

Opublikowanie w latach 2008 – 2009 czteroarkuszowej serii norm PN-EN 62305 można uznać za rewolucję w odniesieniu do zmian, jakie wprowadzała ona do procedury oceny potrzeby stosowania ochrony odgromowej. Znamienny jest przy tym fakt, iż w poprzednich wersjach norm opis tych procedur zajmował jedynie niewielki fragment publikowanych dokumentów a same obliczenia nie były czasochłonne, zaś w serii norm PN-EN 62305 procedurze tej poświęcono cały osobny drugi arkusz normy [7] zatytułowany „Zarządzanie ryzykiem”, który wydrukowano na ponad 100 stronach.

Procedura oceny zagrożenia piorunowego opisana w PN-EN 62305-2 polega na obliczeniu ryzyka całkowitego R i doborze odpowiednich środków ochrony, takich by wartość R nie przekraczała uzgodnionego dopuszczalnego ryzyka tolerowanego R_T . Analizowane może być ryzyko w odniesieniu do różnych typów strat:

- R_1 – ryzyko utraty życia ludzkiego lub trwałego porażenia,
- R_2 – ryzyko utraty usług publicznych,
- R_3 – ryzyko utraty dziedzictwa kulturowego,
- R_4 – ryzyko poniesienia strat materialnych.

Dopuszczalne wartości ryzyka tolerowanego przedstawiono w Tabelcy 3.

Tabelca 3. Typowe wartości ryzyka tolerowanego R_T [7]

Typ straty		R_T (rok ⁻¹)
Utrata życia ludzkiego lub trwałe porażenie	R_1	10^{-5}
Utrata usług publicznych	R_2	10^{-3}
Utrata dziedzictwa kulturowego	R_3	10^{-3}

Ryzyko (R_1 , R_2 , R_3 lub R_4) jest sumą komponentów R_x zależnych od źródła zagrożenia:

- bezpośrednie wyładowanie w obiekt (S1),
 - wyładowanie w pobliżu obiektu (S2),
 - wyładowanie w urządzenie usługowe (S3),
 - wyładowanie w pobliżu urządzenia usługowego (S4)
- oraz od typu wywołanej szkody:
- porażenie istot żywych (D1),
 - uszkodzenie fizyczne (D2),
 - awaria układów elektrycznych i elektronicznych (D3).

Przez wymienione powyżej urządzenie usługowe należy rozumieć zewnętrzne systemy przewodzące dochodzące do obiektu, takie jak linie energetyczne linie telekomunikacyjne lub inne instalacje wyposażone w metalowe rury.

W porównaniu do poprzednich norm nie jest już zatem brane pod uwagę wyłącznie zagrożenie związane z wyładowaniem bezpośrednim w obiekt, ale także z wyładowaniami pośrednimi (w pobliżu obiektu i w przyłączone linie zewnętrzne oraz w ich pobliżu).

W serii norm PN-EN 62305 liczba wyładowań atmosferycznych, które mogą oddziaływać na obiekt zależy od nie tylko od średniej rocznej gęstości wyładowań w danym regionie N_g (1/km²/rok), i wymiarów geometrycznych obiektu, ale również od wymiarów geometrycznych przyłączonych do niego urządzeń usługowych (powierzchni zbierania wyładowań). Dodatkowo należy uwzględnić również od charakterystykę obiektu i przyłączonych do niego urządzeń usługowych oraz charakterystyki otaczającego środowiska. W związku z tym powierzchnie zbierania wyładowań wyznaczane są z uwzględnieniem wymiarów

geometrycznych obiektu oraz od długości linii usługowych i wysokości ich zawieszenia nad gruntem. W przypadku powierzchni zbierania wyładowań bezpośrednich trafiających w obiekt (A_{db}) i przyłączone linie napowietrzne (A_l) wykorzystuje się metodę „3H” analogicznie jak w poprzedniej wersji norm PN-IEC 61024. Powierzchnie zbierania wyładowań pobliskich wyznacza się w promieniu 250 m od granic obiektu (A_M) i w odległości 500 m od trasy linii napowietrznej (A_l). W przypadku zewnętrznych linii kablowych do wyznaczenia powierzchni zbierania (A_L , A_l) uwzględniana jest rezystywność gruntu ρ . Wpływ otoczenia na powierzchnie zbierania obiektu oraz linii zewnętrznych uwzględniany jest za pomocą współczynników korekcyjnych C_x .

Tabelca 4. Klasyfikacja komponentów ryzyka R_x

Źródło szkody Typ szkody	S1	S2	S3	S4
D1	R_A	-	R_U	-
D2	R_B	-	R_V	-
D3	R_C	R_M	R_W	R_Z

Każdy komponent ryzyka R_x jest iloczynem:

$$R_x = N_x \cdot P_X \cdot L_X \quad (7)$$

gdzie:

- N_x – średnia roczna liczba groźnych zdarzeń związanych z wyładowaniami piorunowymi,
- P_X – prawdopodobieństwo wywołania szkody,
- L_x – średnia wartość pośrednich strat.

Prawdopodobieństwo wystąpienia strat P_X zależne jest przede wszystkim od zastosowanych środków ochrony odgromowej i przed przepięciami oraz od charakterystyki układów wewnętrznych obiektu i linii zewnętrznych. Analiza ryzyka ma na celu ocenę potrzeby stosowania nie tylko samego LPS ale również innych środków ochrony takich jak układy ograniczników przepięć (SPD *ang. surge protection device*) czy ekrany przestrzenne. Wartości P_X ustalane są na podstawie tablic zawartych w normie.

Roczna średnia wartość strat L_X zależy od rozmiaru szkody, jaka może wystąpić w następstwie wyładowania piorunowego i pośrednich skutków, jakie może ona powodować. Wartości strat można wyznaczyć na podstawie przedstawionych w normie zależności lub na podstawie wartości podanych w tablicach dla typowych obiektów. W zależności od charakterystyki obiektu uwzględnia się dodatkowo współczynniki redukcyjne (r_a , r_u , r_p , r_f) lub zwiększające (h_z) straty.

Dokładniejszy dobór środków ochrony można przeprowadzić dzieląc dodatkowo analizowany obiekt na strefy o jednakowej charakterystyce, których nie należy jednak mylić ze strefami ochrony LPZ (*ang. lightning protection zone*). Komplikuje te jednak znacznie i tak złożoną procedurę obliczenia.

Należy dodać, iż po raz pierwszy w tej serii norm odgromowych pojawił się zapis zamieszczony już na wstępie PN-EN 62305-2, dający wolną rękę projektantowi, w myśl którego, może on podjąć decyzję o stosowaniu środków ochrony bez względu na wynik analizy wszędzie tam, gdzie uzna, że ryzyko jest nie do uniknięcia.

Ocena potrzeby stosowania instalacji odgromowej według PN-EN 62305-2 jest procedurą zdecydowanie bardziej złożoną i czasochłonną niż w przypadku wcześniej

obowiązujących norm. Świadczy o tym chociażby zamieszczenie w wykazie aż 152 symboli i skrótów wykorzystywanych w trakcie analizy. W powszechnej opinii projektantów procedura ta jest zbyt trudna, co w rezultacie prowadzi do pomijania jej przy doborze środków ochrony odgromowej w wielu współczesnych projektach. Oczywiście, projektanci mogą skorzystać z obecnej na rynku, niezbyt licznej oferty płatnych i bezpłatnych programów komputerowych opracowanych specjalnie w celu wspomoczenia ich pracy przy wyborze środków ochrony odgromowej. Jednak brak ich autoryzacji przez wiarygodną instytucję nie ułatwia sytuacji projektantów. W rezultacie wiarygodność współczesnych projektów w tym zakresie należy uznać za niedostateczną.

Pierwsza edycja norm odgromowych PN-EN 62305 opublikowana w latach 2008 – 2009 jest uznawana za aktualnie prawnie obowiązującą z uwagi na jej przywołanie w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [10]. Według Polskiego Komitetu Normalizacyjnego aktualna jest jednak druga edycja norm opublikowana w latach 2011 – 2012. Jednak - zgodnie z postanowieniami ustawy o normalizacji [11] - może być ona przywołana w tym rozporządzeniu dopiero po przetłumaczeniu na język polski. Dotyczy to obecnie wyłącznie pierwszego arkusza normy przetłumaczonego na język polski w roku 2012. Spór w tym zakresie należy uznać za niezasadny z uwagi na stosunkowo słabą znajomość języka angielskiego wśród projektantów, a opieszałość Polskiego Komitetu Normalizacyjnego w tłumaczeniu tak ważnych dla gospodarki narodowej norm odgromowych jest niezrozumiała.

2.4. Norma PN-EN-62305-2:2012 (ed.2) [8]

Kolejna edycja drugiego arkusza normy PN-EN 62305 opublikowana została w 2012 r. [8], lecz niestety tylko w języku oryginalnym (j. angielski). Zakres wprowadzonych w nim zmian jest jednak istotny i z uwagi na jego fundamentalne znaczenie dla projektów ochrony odgromowej arkusz ten powinien być wprowadzany w języku polskim niezwłocznie po ratyfikowaniu przez CENELEC (Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki.)

Ogólna zasada i algorytm analizy ryzyka w normie PN-EN 62305-2 [8] pozostały bez zmian. Wprowadzone zmiany dotyczą sposobu wyznaczania wybranych współczynników lub ich stabelaryzowanych wartości. Istotne zmiany dotyczą między innymi:

- uproszczenia zależności dla powierzchni zbierania urządzeń usługowych;
- zwiększenia powierzchni zbierania wyładowań w pobliżu zagrożonego obiektu w wyniku przesunięcia linii obrysu tej powierzchni od obrysu obiektu z 250 m aż na odległość 500 m;
- zwiększenia powierzchni zbierania w pobliżu linii zewnętrznych (aż 4-krotnie dla linii napowietrznych);
- modyfikacji sposobu wyznaczania wartości prawdopodobieństw wystąpienia szkody P_x , pozwalającej na jednoczesne uwzględnienie kilku środków ochrony;
- zaokrąglenia wartości ryzyka tolerowanego R_T dla utraty dziedzictwa kulturowego z $R_3 = 10^{-3}$ do 10^{-4} ;
- wprowadzenia konieczności uwzględnienia składowych wartości start dla poszczególnych stref obiektu.

Wprowadzone zmiany w niektórych przypadkach ułatwiają i upraszczają obliczenia. Bardziej złożone, w stosunku do pierwszej edycji, stało się jednak szacowanie strat w obiektach wielostrefowych, które wymaga głębszej analizy charakterystyk obiektu i ścisłej współpracy projektanta z inwestorem.

Wprowadzone zmiany są na tyle znaczące, że opracowane dotychczas pomocnicze programy komputerowe będą wymagały znacznej aktualizacji do nowej wersji normy.

3. PORÓWNANIE WYNIKÓW OCENY RYZYKA ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO WEDŁUG RÓŻNYCH WERSJI POLSKICH NORM OCHRONY ODGROMOWEJ

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną przykłady określania potrzeby stosowania LPS i jego klasy według norm [4-8] dla wybranych obiektów takich jak:

- dom jednorodzinny,
- hala przemysłowa,
- radiowo telewizyjne centrum nadawcze (RTCN).

We wszystkich przypadkach przyjęto następujące założenia ogólne:

- średnia liczba dni burzowych w roku $T_d = 30$ dni;
- obiekty położone w terenie odosobnionym (środownisko wiejskie);
- zasilanie obiektu: linia podziemna, nieekranowana, rezystywność gruntu $\rho = 500 \Omega m$, długość linii $L_c = 1000$ m, wytrzymałość udarowa przyłączonych urządzeń $U_w = 2,5$ kV, linia położona w terenie odosobnionym;
- linia telefoniczna: linia napowietrzna; nieekranowana, wysokość zawieszenia linii $H_c = 6$ m, długość linii $L_c = 1000$ m, wytrzymałość udarowa przyłączonych urządzeń $U_w = 1,5$ kV, linia położona w terenie odosobnionym;
- pomija się właściwości ekranujące obiektów, okablowanie wewnętrzne nieekranowane, brak trasowania linii;
- obiekty jednostrefowe, analizowana tylko strefa wewnętrzna;
- brak specjalnego zagrożenia.

Większość powyższych charakterystyk jest istotna jedynie przy ocenie dokonywanej według edycji norm najnowszej serii PN-EN 62305 [7, 8], które, jak już przedstawiono to wcześniej, wymagają przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy obiektu i jego otoczenia.

Dodatkowo przedstawiono także wyniki obliczeń wykonane według zaleceń normy PN-IEC 61024 dla przykładów obiektów przedstawionych w załącznikach obu edycji norm PN-EN 62305 w celu pokazania różnic w wymaganych poziomach LPL. Dla ograniczenia objętości artykułu zamieszczono jedynie wyniki końcowe bez prezentowania szczegółowych obliczeń.

Przy analizie zalecanych środków ochrony odgromowej należy pamiętać, że zawsze w przypadku określenia potrzeby stosowania instalacji odgromowej LPS obligatoryjne jest także stosowanie układów ochrony przed przepięciami (SPD).

3.1. Dom jednorodzinny

Jako pierwszy zostanie rozpatrzony przykład typowego wiejskiego domu jednorodzinnego o wymiarach $15 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ (szerokość $\times$ długość $\times$ wysokość). Powierzchnia zbierania wyładowań bezpośrednich dla takiego budynku

wynosi 2 578 m². Dla norm serii PN-EN 62305 analizowane jest ryzyko utraty życia ludzkiego R_1 . Do budynku doprowadzone są następujące przewodzące linie usługowe: kablowa linia zasilająca niskiego napięcia oraz napowietrzna linia telefoniczna. Zakłada się zwykle niebezpieczeństwo pożarowe. Rodzaj podłoża wewnątrz obiektu: drewno. Wartości strat przyjęto zgodnie z przykładem domu wiejskiego podanym w normach PN-EN 62305. Wyniki oceny ryzyka dla domu jednorodzinnego zostały przedstawione w tablicy 5.

Tablica 5. Ocena ryzyka zagrożenia piorunowego dla domu jednorodzinnego

Norma	Wymagane środki ochrony
PN-E-05003-1:1986	ochrona nie wymagana
PN-IEC 61024-1-1:2001	ochrona nie wymagana
PN-IEC 61024-1-1:2001/Ap1	LPS klasy III.
PN-EN 62305-2:2009	LPS klasy IV.
PN-EN 62305-2:2012	LPS klasy IV. + środki ochrony ppoż. lub LPS klasy III.

Już na prostym przykładzie typowego domu jednorodzinnego położonego w terenie wiejskim widać znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami oceny według poszczególnych norm. Według PN-E-05003 oraz wg normy PN-IEC 61024 przy założeniu wartości współczynnika $N_c = 10^{-2}$ ochrona odgromowa dla takiego obiektu nie jest wymagana. Po uwzględnieniu poprawki wprowadzonej przez KT 55 do PN-IEC 61024 ($N_c = 10^{-3}$) ten sam dom wymaga zastosowania już LPS klasy III. Dla tego przykładu ochrona odgromowa jest także wymagana po przeprowadzeniu analizy zagrożenia piorunowego według procedury obu edycji norm serii PN-EN 62305. Dla pierwszej edycji normy wymagana jest instalacja LPS klasy IV, a dla edycji drugiej - LPS klasy III, przy czym dopuszczalne jest zastosowanie LPS klasy IV pod warunkiem zastosowania także środków ochrony przeciwpożarowej, np.: w postaci gaśnic ręcznych lub systemu alarmu pożarowego wyposażonego w czujki pożarowe.

W przypadku analizy ryzyka według norm PN-EN 62305 istotny wpływ na końcowy wynik mają poszczególne założenia przyjmowane do obliczeń. Przykładowo: na podstawie analizy wykonanej według obu edycji norm PN-EN 62305, przy założeniu niskiego niebezpieczeństwa pożarowego, instalacja odgromowa nie jest wymagana, a do ochrony takiego obiektu wystarczające jest zastosowanie na wejściu zewnętrznych linii usługowych ograniczników przepięć SPD dostosowanych do poziomu ochrony LPL IV.

3.2. Hala przemysłowa

Kolejny przykład stanowi budynek hali przemysłowej o wymiarach 50 m × 200 m × 10 m (szerokość × długość × wysokość). Powierzchnia zbierania wyładowań bezpośrednich takiego obiektu wynosi 27 827 m² i jest ponad 10 razy większa niż dla rozpatrywanego wcześniej przykładu domu jednorodzinnego. Dla norm serii PN-EN 62305 analizowane ryzyko utraty życia ludzkiego R_1 . Obiekt zasilany jest linią kablową średniego napięcia doprowadzoną do stacji transformatorowej SN/nn. Zakłada się zwykle niebezpieczeństwo pożarowe. Rodzaj podłoża wewnątrz obiektu: beton. Przyjmuje się wartości strat dla ryzyka R_1 typowe dla obiektów skalsyfikowanych jako „przemysłowe”.

Wyniki oceny ryzyka dla przykładu hali przemysłowej przedstawione w tablicy 6 po raz kolejny wskazują na znaczne

rozbieżności między aktualnie obowiązującymi a wcześniej stosowanymi normami. Według normy PN-IEC 61024 przy założeniu, że $N_c = 10^{-2}$ wymagana jest III klasa LPS, natomiast po uwzględnieniu poprawki wprowadzonej przez KT 55 do PN-IEC 61024 ($N_c = 10^{-3}$) wymagana jest już klasa LPS I+ (z dodatkowymi środkami ochrony). Według obu edycji norm serii 62305 do ochrony obiektu wystarczająca jest instalacja LPS klasy IV., czyli taka jak dla domu jednorodzinnego. Porównując kubatury rozpatrywanego w niniejszym artykule domu jednorodzinnego i hali przemysłowej logiczną wydaje się potrzeba stosowania instalacji odgromowej o wyższej klasie dla hali przemysłowej. Jednak z uwagi na mniejsze wartości strat dla obiektów przemysłowych zalecane w normach [7, 8] w porównaniu strat dla budynków mieszkalnych, pomimo znacznej różnicy w wielkości powierzchni zbierania wyładowań piorunowych, klasy wymaganej ochrony odgromowej są dla obydwu przypadków podobne.

Tablica 6. Ocena ryzyka zagrożenia piorunowego dla hali przemysłowej

Norma	Wymagane środki ochrony
PN-E-05003-1:1986	ochrona wymagana
PN-IEC 61024-1-1:2001	LPS klasy III
PN-IEC 61024-1-1:2001/Ap1	LPS klasy I+
PN-EN 62305-2:2009	LPS klasy IV
PN-EN 62305-2:2012	LPS klasy IV

W przypadku obiektów przemysłowych występować może ponadto znaczna liczba obwodów zewnętrznych (np. linie zasilające główna i rezerwowa, oświetlenie zewnętrzne terenu, obwody systemów alarmowych i dozoru wizyjnego CCTV, obwody sterujące), które należy traktować także jako urządzenia usługowe. W zamieszczonym przykładzie, dla celów porównawczych uwzględniono jedynie zewnętrzną linię zasilającą i telefoniczną, więc prezentowane wyniki obliczeń należy uznać za zaniżone w stosunku do charakterystyk rzeczywistych. Z praktyki zawodowej autorów wynika, że uwzględnienie podczas oceny zagrożenia piorunowego, prowadzonej według PN-EN 62305, znacznej liczby zewnętrznych linii usługowych może prowadzić do sytuacji, w której dla redukcji ryzyka wystąpienia szkody poniżej poziomu tolerowanego często wymagane jest zastosowanie układów SPD o parametrach odpowiadających wyższemu poziomowi ochrony LPL niż wymagana klasa instalacji odgromowej LPS. Dobór SPD w zależności od poziomu ochrony odgromowej jest łatwy do zrealizowania dla obwodów zasilania niskiego napięcia, ale komplikuje się w przypadku licznych obwodów sygnałowych. Wymagania dotyczące parametrów ograniczników przepięć w zależności od poziomu LPL powinny, zdaniem autorów mniejszego artykułu, zostać bardziej szczegółowo opisane w przyszłych wersjach norm odgromowych, adekwatnie do realnie występujących zagrożeń.

3.3. Radiowo-Telewizyjne Centrum Nadawcze

Jako kolejny przykład do porównania wybrano dla odróżnienia obiekt Radiowo-Telewizyjnego Centrum Nadawczego (RTCN) z masztem antenowym o znacznej wysokości wynoszącej 300 m. Powierzchnia zbierania wyładowań bezpośrednich takiego obiektu wynosi aż 2 544 690 m² i jest określona wyłącznie przez powierzchnię zbierania wnoszoną przez konstrukcję masztu (powierzchnia zbierania budynków w takim przypadku jest znacznie mniejsza i zawsze zawiera się w powierzchni zbierania masztu). Dla norm serii PN-EN 62305 analizowane jest

ryzyko utraty życia ludzkiego R_1 oraz dodatkowo ryzyko utraty świadczenia usług publicznych R_2 , zazwyczaj najistotniejsze dla takich obiektów. Obiekt zasilono podziemną linią kablową średniego napięcia doprowadzoną do stacji transformatorowej SN/nn. Zakłada się zwykle niebezpieczeństwo pożarowe. Rodzaj podłoża wewnątrz obiektu: ceramika. Przyjmuje się następujące wartości strat: dla ryzyka R_1 - typowe dla obiektów sklasyfikowanych w normie jako „inne”, a dla ryzyka R_2 - typowe dla obiektów „TV”. Wyniki analizy przedstawiono w tablicy 7.

Z oceny prowadzonej według procedury zawartej w normach międzynarodowych PN-IEC 61024 oraz PN-EN 62305-2 [5-8] wynika, iż dla obiektów takich jak RTCN z masztem antenowym o wysokości 300 m, z uwagi na znaczne zagrożenie życia ludzkiego, wymagana jest instalacja odgromowa klasy LPS I+. Jest to, oczywiście, związane ze znaczną powierzchnią zbierania wyładowań bezpośrednich wysokiego masztu antenowego. Dodatkowo, według wyliczeń ryzyka prowadzonych na podstawie norm serii PN-EN 62305, w takim RTCN wymagane jest zastosowanie środków ochrony przeciwpożarowej.

Przy założeniu, że taki obiekt jest bezobsługowy (pominięcie obecności ludzi w wyliczeniach zagrożenia piorunowego) według norm PN-EN 62305 analizowane jest tylko ryzyko utraty świadczenia usług publicznych R_2 . W takim przypadku ochrona obiektu powinna być zapewniona przede wszystkim za pomocą układu ograniczników przepięć o parametrach odpowiadających drugiemu poziomowi ochrony odgromowej LPL II oraz instalacji odgromowej LPS IV lub środków ochrony poż. Wydaje się jednak, że dla obiektu takiego jak RTCN instalacja odgromowa klasy IV jest zbyt niska. Projektant może wtedy zawsze, bazując na swoim doświadczeniu, zastosować LPS wyższej klasy, jeżeli uzna to za stosowne.

Tablica 7. Ocena ryzyka zagrożenia piorunowego dla obiektu Radiowo-Telewizyjnego Centrum Nadawczego

Norma	Wymagane środki ochrony
PN-E-05003-1:1986	ochrona wymagana
PN-IEC 61024-1-1:2001	LPS I+
PN-IEC 61024-1-1:2001/Ap1	LPS I+
PN-EN 62305-2:2009	R_1 : LPS klasy I + środki ochrony poż. R_2 : SPD dla LPL II + LPS klasy IV lub środki ochrony poż.
PN-EN 62305-2:2012	R_1 : LPS klasy I + środki ochrony poż. R_2 : SPD dla LPL II + LPS klasy IV lub środki ochrony poż.

Należy zauważyć, że w analizie tak wysokich obiektów zgodnie z wymaganiami pierwszej edycji PN-EN 62305 [7] wyładowania w pobliżu obiektu nie są brane pod uwagę, co należy uznać za ewidentny błąd, gdyż powierzchnia zbierania wyładowań pobliskich w takim przypadku zawiera się całkowicie w powierzchni zbierania wyładowań bezpośrednich. W związku z tym, że powierzchnia zbierania wyładowań pobliskich w tej edycji norm jest liczona jako różnica powierzchni wyznaczonej w promieniu 250 m od obrysu obiektu i powierzchni zbierania wyładowań bezpośrednich, to dla obiektów odosobnionych o wysokości powyżej około 83 m różnica ta staje się ujemna. Problem ten został rozwiązany w drugiej edycji normy [8], w której uwzględnia się dla wyładowań w pobliżu obiektu

powierzchnię zbierania w promieniu 500 m od obrysu obiektu bez względu na wielkość powierzchni zbierania wyładowań bezpośrednich. Wydaje się jednak, iż konieczne jest prowadzenie dalszych prac nad modyfikacją sposobu wyznaczania powierzchni zbierania dla tak wysokich budowli.

Dla obiektu RTCN uzasadniona wydaje się także konieczność przeprowadzenia dodatkowej analizy ryzyka utraty wartości materialnych R_4 , które w tym przypadku związane są z potrzebą naprawy lub wymiany kosztownej aparatury, ale również ze stratami finansowymi związanymi z karami jakie operator obiektu zobowiązany jest płacić w związku z przerwą w transmisji sygnałów na przykład naziemnej telewizji cyfrowej. Przeprowadzenie takiej analizy nie jest jednak możliwe bez szczegółowych, dokładnych informacji dotyczących wysokości strat i czasów związanych z przywróceniem systemu do stanu normalnej pracy.

3.4. Przykłady z norm serii PN-EN 62305-2

Dla łatwiejszego zrozumienia złożonych algorytmów oceny ryzyka według norm PN-EN 62305-2 w załącznikach do norm przedstawiono przykładowe obliczenia dla obiektów takich jak:

- dom wiejski,
- budynek biurowy,
- szpital,
- blok mieszkalny.

Założenia dla powyższych obiektów opisane są w [7, 8]. W niniejszym artykule dla tych samych obiektów przeprowadzono ocenę ryzyka według PN-IEC 61024 przy obu wartościach N_c (10^{-2} i 10^{-3}) w celu ukazania różnic w poziomach ochrony odgromowej LPL wymaganych przez aktualne i poprzednie normy odgromowe.

Zestawienie otrzymanych rezultatów przedstawione w tablicy 8 doskonale pokazuje jak znaczące różnice występują w wynikach oceny ryzyka przy zastosowaniu poszczególnych norm. Wyniki przy stosowaniu obu edycji norm serii PN-EN 62305-2 są zbliżone jednak w istotny sposób różnią się od tych otrzymanych przy zastosowaniu algorytmów wg PN-IEC 61024. Różnice pomiędzy poszczególnymi normami najlepiej pokazuje przykład budynku biurowego, dla którego każda z norm zaleca inną klasę instalacji odgromowej. Szczególną uwagę zwracają wyniki otrzymane na podstawie PN-IEC 61024-1-1 [5] po uwzględnieniu poprawki Ap1 [6], gdzie wymagania odnośnie klasy LPS są najbardziej rygorystyczne. Warto także zauważyć, że normy serii 62305 pozwalają zastosować kilka wariantów ochrony danego obiektu.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone porównanie pokazuje jak znaczne różnice w zakresie oceny potrzeby stosowania ochrony odgromowej występują między aktualnymi i wcześniejszymi normami. Najbardziej rygorystyczne kryterium zawierała norma PN-IEC 61024 po nieuwzględnieniu merytorycznie wprowadzeniu zaniżonego współczynnika akceptowalnej średniej rocznej gęstości wyładowań N_c , jakie mogą oddziaływać na obiekt. W wyniku zastosowania tak drastycznego kryterium wymagane były najwyższe klasy LPS w historii ochrony odgromowej. W okresie stosowania tej normy ochrony odgromowej wymagał nawet obiekt o wymiarach $3 \times 3 \times 3$ m lub słup o wysokości 4 m (przy założeniu $T_d = 30$ dni), co jednoznacznie świadczy o tym, że

przyjęta wartości $N_c = 10^{-3}$ była zbyt rygorystyczna [9]. Klasy LPS określone według procedur oceny zawartych w normach serii PN-EN 62305 są zazwyczaj zdecydowanie niższe.

Dobór klasy LPS według PN-IEC 61024 opierał się jedynie na podstawie wymiarów geometrycznych obiektu, chociaż już w starszych normach serii PN-E-05003 [3, 4] podejmowane były próby uwzględniania również charakterystyki obiektu. Istotną zmianą wprowadzoną w PN-EN 62305-2 było uwzględnienie poza zagrożeniem wyładowania bezpośredniego także ryzyka związanego z oddziaływaniem wyładowań pobliskich oraz wyładowań oddziaływujących na przyłączone linie zewnętrzne. Uwzględnianie szczegółowej charakterystyki obiektu, przyłączonych linii zewnętrznych, podziału obiektu na strefy, zastosowanych środków ochrony ppoż., czy też szacowanie strat wymaga jednak przeprowadzenia znacznie głębszej analizy i, często, bezpośredniej współpracy z właścicielem obiektu.

Prostota algorytmów przyjętych w starszych normach niemal zawsze gwarantowała, że dla danego obiektu klasa LPS wyznaczona przez różnych projektantów była taka sama. W obecnie stosowanej procedurze wynik oceny ryzyka w

dużym stopniu może zależeć od ogólnego podejścia projektanta do zagadnienia ochrony odgromowej i przyjętych przez niego założeń.

Stosowanie norm nie jest obecnie obligatoryjne [11]. Odstępstwo od tej zasady stanowią jednak normy przywołane w stosownych rozporządzeniach stanowiących akty prawne. Taka sytuacja występuje w przypadku pierwszej edycji norm odgromowych serii PN-EN 62305 [7], które aktualnie są przywołane w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [10]. Niestety w dalszym ciągu można spotkać jeszcze projekty wykonywane według nieaktualnych już norm PN-IEC 61024, co świadczy albo o braku wiedzy o wykazie norm przywołanych we wspomnianym rozporządzeniu wśród projektantów albo o braku umiejętności zastosowania niezwykle skomplikowanej procedury oceny zagrożenia piorunowego zamieszczonej w aktualnej normie odgromowej serii PN-EN 62305.

Tablica 8. Porównanie wymaganej klasy LPS na podstawie oceny zagrożenia piorunowego przeprowadzonej na podstawie wybranych norm dla przykładów obiektów rozpatrzonych w normach serii PN-EN 62305-2

Obiekt (wymiar w m)	PN-IEC 61024-1-1		PN-EN 62305-2	
	$N_c = 0,01$ [5]	$N_c = 0,001$ [6]	Edycja 1 - 2008 [7]	Edycja 2 - 2012 [8]
Dom wiejski (15 × 20 × 6)	LPS klasy III.	LPS klasy II	a) SPD odpowiadający LPL IV b) LPS klasy IV	
Budynek biurowy (40 × 20 × 25)	LPS klasy II	LPS klasy I+	a) LPS klasy IV b) SPD dla LPL IV + automatyczny system ppoż.	a) LPS klasy III b) LPS klasy IV + ręczny sprzęt ppoż.
Szpital (50 × 150 × 10)	LPS klasy III	LPS klasy I+	a) LPS klasy I (SPD 1,5x) + automatyczny system ppoż. + ekran EM ażurowy o oku siatki $w = 0,5$ m b) LPS klasy I (SPD 3x) + automatyczny system ppoż. c) LPS klasy I + (SPD2x) + automatyczny system ppoż. + ekran EM ażurowy o oku siatki $w = 0,1$ m	
Blok mieszkalny (30 × 20 × 20)	LPS klasy III	LPS klasy I+	a) LPS klasy III b) LPS klasy IV + ręczny sprzęt ppoż.	
EM – elektromagnetyczny; SPD 1,5x, SPD 2x, SPD 3x – skoordynowany układ SPD zaprojektowany przy założeniu wyższych parametrów prądu pioruna dla danej klasy LPS				

5. BIBLIOGRAFIA

1. Boryń H.: Zmiany zasad oceny zagrożenia piorunowego budynków w normalizacji krajowej, INPE nr 146-147, s. 3-18, 2011.
2. PNE/22 – 1931 Wskazówki co do ochrony budowli od elektrycznych wyładowań atmosferycznych oraz instrukcja dla kontroli urządzeń piorunochronnych z pięcioma rysunkami.
3. PN-E 05003:1955: Ochrona budowli od wyładowań atmosferycznych. Przepisy ogólne.
4. PN-E-05003-1:1986: Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne.
5. PN-IEC 61024-1-1:2001: Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.
6. PN-IEC 61024-1-1:2001/Apl:2002: Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.
7. PN-EN 62305-2:2008: Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
8. PN-EN 62305-2:2012: Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
9. Anisierowicz K., Zielenkiewicz M.: Problemy związane z wyborem poziomu ochrony dla urządzeń piorunochronnych. Elektro-info, nr 4/2007.
10. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002, nr 75, poz. 690 z późn. zmianami)
11. Ustawa z dnia 12 września 2002 r. o normalizacji (Dz. U. 2002, nr 169, poz. 1386 z późn. zmianami)

INFLUENCE OF CHANGES OF LIGHTNING THREAT ASSESSMENT PRINCIPLES ON THE NEED OF LIGHTNING PROTECTION AND ITS CATEGORY

Principles of lightning threat assessment for buildings have changed seriously with revision of normative documents regarding lightning protection in Poland over the last few decades. This paper presents review of principles according to lightning protection standards from PN-E-05003:1986 to PN-EN 62305-2:2012. All the procedure has been compared with indication of advantages and disadvantages of each of them. Examples of results of lightning threat assessment for typical buildings like country house, office building, hospital, industrial hall and radio and television broadcasting centre are presented and compared. According to different standards different results can be obtained.

Keywords: lightning protection, lightning threat, risk assessment.

WYZNACZANIE RYZYKA STRAT PIORUNOWYCH W OBIEKCIE RADIOKOMUNIKACYJNYM ZGODNIE Z PN-EN 62305-2

Renata MARKOWSKA

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok
tel.: (85) 7469356 e-mail: remark@pb.edu.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia porównanie wyników analiz ryzyka strat piorunowych w obiekcie radiokomunikacyjnym prowadzonych zgodnie z zaleceniami różnych edycji normy PN-EN 62305-2: dotychczasowej edycji z 2008 roku oraz edycji wprowadzonej przez PKN w 2012 roku. Obliczenia wykonano za pomocą własnego arkusza kalkulacyjnego i programu DEHNsupport Toolbox. Wyniki analiz prowadzonych wg procedur zawartych w różnych edycjach normy PN-EN 62305-2 wskazały na praktyczne skutki istotnych różnic w podejściu do zagadnienia wyznaczania ryzyka strat piorunowych w tych edycjach. W szczególności pokazały, że metodyka analizy ryzyka zawarta w nowej edycji normy może prowadzić do wyboru mniej restrykcyjnych środków ochrony wymaganych do redukcji ryzyka utraty życia i zdrowia oraz ryzyka strat materialnych, oraz bardziej restrykcyjnych, w odniesieniu do ryzyka utraty usługi publicznej.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, ryzyko strat piorunowych, wyznaczanie poziomu ochrony, obiekt radiokomunikacyjny.

1. WSTĘP

Zgodnie z wymaganiami norm serii PN-EN 62305, dotyczących ochrony odgromowej obiektów budowlanych, kluczowym zagadnieniem przy podejmowaniu decyzji w sprawie zastosowania urządzenia piorunochronnego (LPS) i wyboru poziomu ochrony jest analiza ryzyka strat powodowanych przez wyładowania piorunowe. Metodykę analizy ryzyka zawarto w części 2 normy: PN-EN 62305-2.

Normy serii PN-EN 62305 zostały wprowadzone przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) w wersji polskojęzycznej w latach 2008-2009 [1-4]. Te datowane edycje norm zostały wymienione w *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 10 grudnia 2010 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [5], które posiada status obowiązującego aktu prawnego na mocy ustawy *Prawo budowlane* [6]. W latach 2011-2012, edycje z lat 2008-2009 zostały przez PKN wycofane i zastąpione nowymi wydaniem [7-10]. Jednak *Rozporządzenie z roku 2010* [5] nie zostało dotychczas w tej kwestii zmienione.

Tymczasem w zakresie metodyki analizy ryzyka strat piorunowych, w nowej edycji normy PN-EN 62305-2:2012 [8] wprowadzono szereg istotnych zmian w stosunku do edycji wcześniejszej PN-EN 62305-2:2008 [2]. Interesujące jest zatem, w jaki sposób wprowadzone zmiany mogą się przekładać na wyniki analizy i oceny ryzyka strat piorunowych

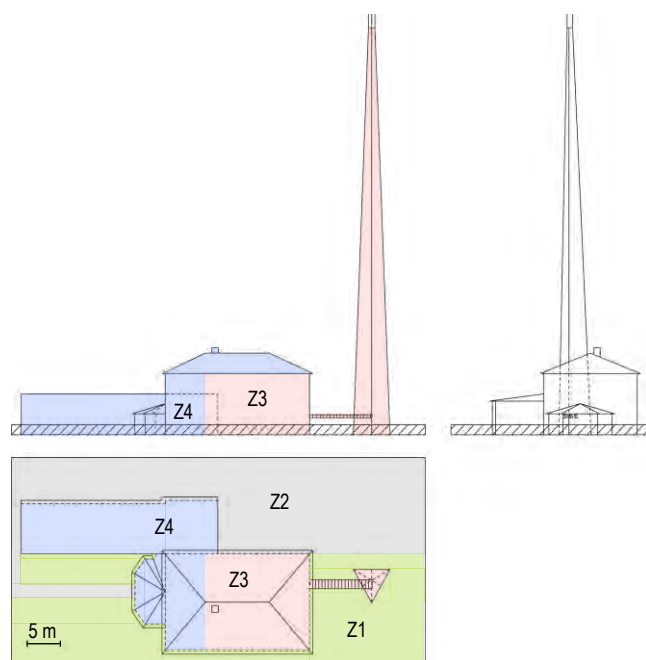
w konkretnych przypadkach obiektów budowlanych, a tym samym na wybór wymaganego poziomu i środków ochrony przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym (LEMP).

Celem pracy było porównanie wyników obliczeń i oceny ryzyka strat piorunowych, wykonanych zgodnie z zaleceniami nowej [8] i dotychczasowej [2] edycji normy PN-EN 62305-2. Do rozważań wybrano obiekt radiokomunikacyjny składający się z budynku i wieży antenowej. Obliczenia prowadzono zgodnie z zaleceniami wymienionych edycji normy za pomocą:

- edycja 2008 – własnego arkusza kalkulacyjnego [11] oraz programu DEHNsupport Toolbox [12];
- edycja 2012 – programu DEHNsupport Toolbox [12].

2. OPIS OBIEKTU RADIOKOMUNIKACYJNEGO

Rozważany obiekt telekomunikacyjny (rys. 1) składa się z dużego budynku i wieży o wysokości 60 m (62 m łącznie ze zwodami pionowymi na szczycie) posadowionej na fundamencie w odległości 6,6 m od budynku.



Rys. 1. Obiekt radiokomunikacyjny: wieża i budynek [11]

Pełną procedurę wyznaczania ryzyka strat piorunowych zgodną z PN-EN 62305-2:2008 oraz szczegółowe założenia wstępne, odpowiadające im dane pośrednie i wyniki obliczeń dotyczące rozważanego obiektu przedstawiono w [11]. Poniżej podano jedynie najważniejsze założenia. Pierwotnie [11] założono podział obiektu na cztery strefy zagrożenia od Z1 do Z4 (rys. 1). W niniejszej pracy przyjęto, że obliczenia będą prowadzone bez podziału na strefy.

W analizie uwzględniono trzy rodzaje ryzyka: ryzyko utraty życia i zdrowia R_1 , ryzyko utraty usługi publicznej R_2 oraz ryzyko strat materialnych R_4 .

Założono, że rozważany obiekt radiokomunikacyjny położony jest na terenie o średniej rocznej gęstości wyładowań piorunowych równej $2,2 / \text{km}^2$.

Analizując cząstkowe równoważne powierzchnie zbierania wyładowań trafiających w elementy składowe obiektu stwierdzono [11], że jego całkowita równoważna powierzchnia zbierania wyładowań jest równa równoważnej powierzchni zbierania wyładowań przyporządkowanej samej wieży (równoważna powierzchnia zbierania wyładowań przez budynek jest w całości zawarta wewnątrz powierzchni zbierania przyporządkowanej wieży).

W celu wyznaczenia równoważnej powierzchni zbierania wyładowań trafiających w pobliżu rozważanego obiektu radiokomunikacyjnego założono, że w płaszczyźnie podstawy obiektu granicę obszaru podlegającego analizie stanowi jego ogrodzenie. Pozostałe założenia wstępne do obliczeń [11] przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Założenia do obliczeń ryzyka strat piorunowych dla rozważanego obiektu radiokomunikacyjnego

Cecha obiektu lub środowiska	Opis
Rozważany obiekt radiokomunikacyjny wieża - budynek	
Budynek główny	Wymiary 23 x 15 x 12 m
Przybudówka	Wymiary 30 x 8,3 x 6 m
Wieża	Wysokość 62 m, odległość od budynku 6,6 m
Ogrodzenie	Wymiary 62,9 x 30,5 x 1,4 m
Otoczenie	Drzewa i obiekty o tej samej wysokości lub niższe
Ochrona przed porażeniem	Ekwipotencjalizacja gruntu
Urządzenie piorunochronne	Sztuczny LPS klasy III
Ekranowanie przestrzenne	Na granicy stref 0/1: LPS klasy III (rozpiętość zwodów 15 m, promień kuli 45 m) Wewnątrz: brak
Sieć połączeń wyrównawczych wg PN-EN 62305-4	Tak
Wewnętrzne oprzewodowanie	Nieekranowane – trasowanie w celu uniknięcia pętli ($0,5 \text{ m}^2$) Ekranowane – ekran ($1 < R_s \leq 5 \Omega/\text{km}$) połączony z szyną wyrównawczą
Najniższe udarowe napięcie wytrzymywane układów wewnętrznych	2,5 kV 1,5 kV
Skoordynowane SPD wg PN-EN 62305-4	Tak, poziom III (LPL III)
Powierzchnia gruntu	Rolnicza, beton
Powierzchnia podłogi	Linoleum
Środki ochrony przeciwpożarowej	Stałe, ręcznie obsługiwane instalacje gaszące, bezpieczne drogi ewakuacji
Niebezpieczeństwo pożarowe	Zwykłe
Zagrożenia specjalne	Niski poziom paniki
Utrata życia i zdrowia	Możliwość przebywania osób wewnątrz i na zewnątrz obiektu Obiekt przemysłowy, usługowy Nie występuje utrata życia wskutek awarii układów wewnętrznych
Utrata usługi publicznej	Rodzaj usługi: telekomunikacja
Straty materialne	Brak zwierząt hodowlanych Obiekt przemysłowy, usługowy
Linia zasilająca dołączona do rozważanego obiektu	
Linia zasilająca	Kablowa o długości 600 m, rezystywność gruntu $500 \Omega\text{m}$
Otoczenie linii	Obiekty lub drzewa wyższe
Środowisko	Podmiejskie
Transformator	Brak
Ekranowanie linii	Nieekranowana
Wytrzymałość udarowa wyposażenia wewnętrznego dołączonego do linii	2,5 kV
SPD zainstalowane w linii	Tak, skoordynowane wg PN-EN 62305-4, poziom III (LPL III)
Obiekt sąsiedni dołączony do drugiego krańca linii	Stacja transformatorowo-rozdziałowa SN/nN, wymiary 4 x 3 x 3 m
Otoczenie obiektu sąsiedniego	Obiekty lub drzewa wyższe
Linia telekomunikacyjna dołączona do rozważanego obiektu	
Linia telekomunikacyjna	Kablowa o długości 1000 m, rezystywność gruntu $500 \Omega\text{m}$
Otoczenie linii	Obiekty lub drzewa wyższe
Środowisko	Podmiejskie
Transformator	Brak
Ekranowanie linii	Ekranowana – ekran ($1 < R_s \leq 5 \Omega/\text{km}$) połączony do tej samej szyny wyrównawczej co układ wewnętrzny
Wytrzymałość udarowa wyposażenia wewnętrznego dołączonego do linii	1,5 kV
SPD zainstalowane w linii	Tak, skoordynowane wg PN-EN 62305-4, poziom III (LPL III)
Obiekt sąsiedni dołączony do drugiego krańca linii	Węzeł rozdzielczy (WR), wymiary 20 x 12 x 5 m
Otoczenie obiektu sąsiedniego	Obiekty lub drzewa wyższe

Zastosowane w obiekcie środki ochrony (ich rodzaj i właściwości) dobrano w taki sposób, aby otrzymane w wyniku analizy wartości ryzyk całkowitych odnoszących się do poszczególnych rodzajów strat piorunowych były nie większe niż odpowiadające im ryzyka tolerowane. Reprezentatywne wartości ryzyka tolerowanego, proponowane w normach PN-EN 62305-2 [2, 8] oraz ITU-T Recommendation K.39 [13] podano w tablicy 2. Do obliczeń ryzyka utraty usługi publicznej oraz ryzyka utraty wartości ekonomicznej przyjęto jako wiążące wartości ryzyka tolerowanego według zaleceń ITU-T Recommendation K.39.

Tablica 2. Reprezentatywne wartości ryzyka tolerowanego wg zaleceń norm PN-EN 62305-2 [2, 8] oraz ITU-T Rec. K.39 [13]

Rodzaj straty	PN-EN 62305-2 (rok ⁻¹)	ITU-T R. K.39 (rok ⁻¹)
Utrata życia lub zdrowia	10^{-5}	-
Utrata usługi publicznej	10^{-3}	10^{-4}
Utrata wartości ekonomicznej	-	10^{-3}

3. WYNIKI ANALIZY RYZYKA

Wyniki obliczeń odpowiednich ryzyk całkowitych i poszczególnych ich komponentów przedstawiono w tablicy 3.

Porównując wyniki obliczeń prowadzonych (wg PN-EN 62305-2:2008) za pomocą własnego arkusza kalkulacyjnego i programu DEHNSupport Toolbox można zauważyć, że otrzymane wartości, zarówno w zakresie ryzyk

całkowitych jak i poszczególnych ich komponentów, są generalnie bardzo zbliżone. Analizując bardziej szczegółowo, w przypadku obliczeń przy użyciu programu DEHNSupport Toolbox otrzymano generalnie wyższe wartości ryzyka w porównaniu do obliczeń prowadzonych za pomocą własnego arkusza kalkulacyjnego (wyjątkiem są komponenty R_M i R_Z). Największy przyrost wartości ryzyka (do ok. 29 %) odnotowano dla komponentów R_U , R_V i R_W . Obserwowane, relatywnie niewielkie rozbieżności są najprawdopodobniej wynikiem niedokładności i zaokrągleń matematycznych powstałych w związku ze sposobem uwzględnienia równoważnych powierzchni zbierania wyładowań trafiających w dołączone do obiektu urządzenia usługowe i w ich pobliżu oraz w obiekty sąsiednie znajdujące się na krańcach tych urządzeń usługowych.

Wyniki obliczeń prowadzonych za pomocą programu DEHNSupport Toolbox zgodnie z zaleceniami dwu rozważanych edycji normy PN-EN 62305-2 (dotychczasowej z 2008 roku i nowej z roku 2012) wskazują na praktyczne skutki istotnych różnic w podejściu do wyznaczania ryzyka strat piorunowych w tych edycjach.

Porównując otrzymane w tych przypadkach wartości ryzyka dla identycznych lub podobnych założeń wstępnych (LPS klasy III) należy zauważyć, że nastąpiło znaczne zmniejszenie się ryzyka utraty życia i zdrowia oraz ryzyka strat materialnych przy jednoczesnym znacznym wzroście ryzyka utraty usługi publicznej w przypadku obliczeń według nowej edycji normy (2012), w porównaniu do edycji wcześniejszej (2008).

Tablica 3. Wyniki obliczeń ryzyka strat piorunowych dla rozważanego obiektu radiokomunikacyjnego

Ryzyko lub jego komponent	Wg PN-EN 62305-2:2008, za pomocą własnego arkusza kalkulacyjnego	Wg PN-EN 62305-2:2008, za pomocą programu DEHNSupport Toolbox	Wg PN-EN 62305-2:2012, za pomocą programu DEHNSupport Toolbox	
			LPS klasy III	LPS klasy IV
Ryzyko utraty życia lub zdrowia R_1				
R_A	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$0,121 \cdot 10^{-7} *$	$0,241 \cdot 10^{-7} *$
R_B	$5,98 \cdot 10^{-6}$	$6,04 \cdot 10^{-6}$	$2,42 \cdot 10^{-6} *$	$4,84 \cdot 10^{-6} *$
R_C	0	0	0 *	0 *
R_M	0	0	0 *	0 *
R_U	$0,482 \cdot 10^{-12}$	$0,619 \cdot 10^{-12}$	$159,0 \cdot 10^{-12} *$	$159,0 \cdot 10^{-12} *$
R_V	$2,41 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$3,18 \cdot 10^{-7} *$	$3,18 \cdot 10^{-7} *$
R_W	0	0	0 *	0 *
R_Z	0	0	0 *	0 *
R_1	$6,34 \cdot 10^{-6}$	$6,48 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-6} *$	$5,18 \cdot 10^{-6} *$
Ryzyko utraty usługi publicznej R_2				
R_B	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$	$12,1 \cdot 10^{-7}$
R_C	$7,07 \cdot 10^{-6}$	$7,14 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-6}$
R_M	$8,39 \cdot 10^{-8}$	$8,35 \cdot 10^{-8}$	$0,155 \cdot 10^{-8}$	$0,155 \cdot 10^{-8}$
R_V	$2,41 \cdot 10^{-8}$	$3,10 \cdot 10^{-8}$	$7,96 \cdot 10^{-8}$	$7,96 \cdot 10^{-8}$
R_W	$4,82 \cdot 10^{-7}$	$6,19 \cdot 10^{-7}$	$15,9 \cdot 10^{-7}$	$15,9 \cdot 10^{-7}$
R_Z	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-5}$	$7,48 \cdot 10^{-5}$	$7,48 \cdot 10^{-5}$
R_2	$3,73 \cdot 10^{-5}$	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$8,95 \cdot 10^{-5}$
Ryzyko utraty wartości ekonomicznej R_4				
R_A	0	0	0	0
R_B	$5,98 \cdot 10^{-5}$	$6,04 \cdot 10^{-5}$	$3,02 \cdot 10^{-5} **$	$6,04 \cdot 10^{-5} **$
R_C	$7,07 \cdot 10^{-5}$	$7,14 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5} **$	$1,77 \cdot 10^{-5} **$
R_M	$83,9 \cdot 10^{-8}$	$83,5 \cdot 10^{-8}$	$0,232 \cdot 10^{-8} **$	$0,232 \cdot 10^{-8} **$
R_U	0	0	0 **	0 **
R_V	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$3,10 \cdot 10^{-6}$	$3,98 \cdot 10^{-6} **$	$3,98 \cdot 10^{-6} **$
R_W	$4,82 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$	$2,39 \cdot 10^{-6} **$	$2,39 \cdot 10^{-6} **$
R_Z	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4} **$	$1,12 \cdot 10^{-4} **$
R_4	$4,29 \cdot 10^{-4}$	$4,31 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-4} **$	$1,97 \cdot 10^{-4} **$
* – przy założeniu nieprzerwanego przebywania osób w budynku (8760 godzin rocznie)				
** – przy założeniu 10 osób pracujących na stałe w budynku (wartość obiektu 2,25 miliona euro)				

Biorąc pod uwagę komponenty ryzyka, otrzymano zmniejszenie wartości komponentów R_A , R_B i R_M oraz zwiększenie R_U i R_V . Komponenty R_C , R_W i R_Z uległy zwiększeniu w przypadku ryzyka utraty usługi publicznej oraz zmniejszeniu w przypadku ryzyka strat materialnych.

Na zakończenie należy zwrócić uwagę na istotny praktyczny skutek zastosowania nowej edycji normy (2012) w miejsce dotychczasowej (2008). Mianowicie, według edycji z 2008 roku urządzenie piorunochronne klasy IV jest niewystarczające do redukcji ryzyka strat piorunowych do wartości tolerowanych, konieczne jest zastosowanie LPS klasy III. Natomiast według nowej edycji normy (2012) wystarczające okazało się zastosowanie urządzenia piorunochronnego klasy IV.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono porównanie wyników obliczeń ryzyka strat piorunowych w obiekcie radiokomunikacyjnym, prowadzonych zgodnie z zaleceniami różnych edycji normy PN-EN 62305-2: edycji z 2008 roku [2] oraz nowej edycji wprowadzonej przez PKN w 2012 roku [8]. Przeprowadzono szczegółowe porównania poszczególnych komponentów oraz całkowitych ryzyk utraty życia i zdrowia, utraty usługi publicznej oraz strat materialnych. Obliczenia prowadzono za pomocą własnego arkusza kalkulacyjnego oraz programu DEHNsupport Toolbox.

W przypadku obliczeń prowadzonych przy użyciu własnego arkusza kalkulacyjnego i programu DEHNsupport Toolbox otrzymano zbliżone wyniki, zarówno w zakresie ryzyk całkowitych jak i poszczególnych komponentów tych ryzyk.

Wyniki obliczeń prowadzonych zgodnie z zaleceniami różnych edycji normy PN-EN 62305-2 (2008 i 2012) potwierdziły występowanie i wskazały na praktyczne skutki istotnych różnic w podejściu do zagadnienia wyznaczania ryzyka strat piorunowych w tych edycjach. W szczególności pokazały, że metodyka analizy ryzyka zawarta w nowej edycji normy (w porównaniu do edycji wcześniejszej) może prowadzić do wyboru mniej restrykcyjnych środków ochrony wymaganych do redukcji ryzyka utraty życia i zdrowia oraz ryzyka strat materialnych do wartości tolerowanych. Z drugiej strony, stosowanie nowej edycji normy może prowadzić do wyboru bardziej restrykcyjnych

środków ochrony w przypadku ryzyka utraty usługi publicznej.

Program DEHNsupport Toolbox stanowi użyteczne narzędzie do analizy ryzyka strat piorunowych w obiektach budowlanych, umożliwiając usprawnienie procesu obliczeń, szczególnie w zakresie wyboru właściwych środków ochrony. Ograniczenia jego funkcjonalności w stosunku do ogólnych procedur norm PN-EN 62305-2 są nieznaczne i nie powinny wpływać zasadniczo na wyniki analiz.

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 62305-1:2008. Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne.
2. PN-EN 62305-2:2008. Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
3. PN-EN 62305-3:2009. Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
4. PN-EN 62305-4:2009. Ochrona odgromowa. Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach.
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 10 grudnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. nr 239, poz. 1597.
6. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, Dz. U. 1994 nr 89, poz. 414.
7. PN-EN 62305-1:2011. Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne.
8. PN-EN 62305-2:2012. Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
9. PN-EN 62305-3:2011. Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
10. PN-EN 62305-4:2011. Ochrona odgromowa. Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach.
11. Markowska R., Sowa A. W.: Ochrona odgromowa obiektów radiokomunikacyjnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2013.
12. DEHNsupport Toolbox Pomoc dla projektanta, DS709/PL/0911, Materiały DEHN Polska 2011. Internet http://www.dehn.pl/docs/publikacje/software/ds709_dehnsupport_pl.pdf, 13.10.2014.
13. ITU-T Recommendation K.39.(10/1996), Series K: Risk assessment of damages to telecommunication sites due to lightning discharge.

CALCULATION OF RISK OF LIGHTNING LOSSES IN RADIOCOMMUNICATION OBJECT ACCORDING TO PN-EN 62305-2

The paper presents comparison of results of analysis of risk of lightning losses in large radiocommunication object, performed according to the recommendations of different editions of standard PN-EN 62305-2: edition of year 2008 and new edition introduced by PKN (Polish Standardization Committee) in 2012. The work compares also the results of risk calculation performed with using author's own calculation sheet and DEHNsupport Toolbox software, for which very good agreement is observed. The results of the analyses performed according to the different editions of standard PN-EN 62305-2 (2008 and 2012) indicate on some practical effects of substantial differences in the approaches to the problem of calculation of risk of lightning losses in the two editions. In particular, the results show that the risk calculation procedure introduced in the new edition of the standard may lead to selection of considerably less restrictive protection measures for reduction of the loss of life and of the economic loss (according to 2008 edition LPS of class III is required, while according to 2012 edition LPS of class IV is sufficient). On the other hand, the application of the new edition might lead to selection of generally more restrictive protection measures for reduction of the risk of loss of service to the public. The software DEHNsupport Toolbox is useful tool for analysis of risk of lightning losses in building objects. Limitations in its functionality with respect to the overall procedures of standards PN-EN 62305-2 are slight and should not influence significantly the results of risk analysis.

Keywords: lighting protection, risk of lighting losses, calculation of lighting protection level, radiocommunication object.

ANALIZA ROZPŁYWU PRĄDU UDAROWEGO W URZĄDZENIU PIORUNOCHRONNYM I DOŁĄCZONYCH INSTALACJACH

Grzegorz MASŁOWSKI, Stanisław WYDERKA, Lesław KARPIŃSKI, Robert ZIEMBA
Grzegorz KARNAS, Kamil FILIK, Paweł SZCZUPAK

Politechnika Rzeszowska,
Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
tel.: +48 17 8651253 e-mail: maslowski@prz.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono poligon badawczy systemów ochrony odgromowej należący do Politechniki Rzeszowskiej. Przeprowadzono badania rozptyłu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego i dołączonej instalacji. W badaniach wykorzystano mobilny generator udarów prądowych i oryginalny system pomiarowy. Uzyskane wyniki potwierdzają rejestracje dokonane na Florydzie z wykorzystaniem wyładowań atmosferycznych prowokowanych. Kształty fal prądowych nie są jednakowe w różnych miejscach badanego układu i zależą od parametrów częstotliwościowych poszczególnych elementów instalacji, natomiast efektywność odprowadzania prądu piorunowego do ziemi przez urządzenie piorunochronne zależy od relacji między wartościami impedancji uziemienia obiektu budowlanego i uziemienia najbliższej stacji transformatorowej.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, ochrona odgromowa, badania poligonowe, prąd udarowy

1. WSTĘP

Bezpośrednie wyładowania atmosferyczne powodują rozptył prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego i dołączonych do niego instalacjach przewodzących. Badanie tego rozptyłu z wykorzystaniem wyładowań prowokowanych przeprowadzono po raz pierwszy w 1997 r. w Międzynarodowym Centrum Badań Wyładowań Atmosferycznych w Camp Blanding na Florydzie (International Center for Lightning Research and Testing - ICLRT). Uzyskane wyniki eksperymentalne oraz rezultaty modelowania i symulacji komputerowych opisano w pracach [1,2]. Kolejne testy przeprowadzono w ICLRT w latach 2004 i 2005 z wykorzystaniem rzeczywistego obiektu będącego typowym domem jednorodzinny [3,4]. Dzięki podjętej w 2005 r. współpracy z ośrodkiem na Florydzie badania poligonowe kontynuowano w Polsce z wykorzystaniem między innymi mobilnego generatora udarów prądowych i światłowodowego układu pomiarowego z ekranowanymi przetwornikami elektro-optycznymi. Pierwsze testy przeprowadzono w latach 2007 i 2008 na terenie Politechniki Rzeszowskiej [5,6]. Od 2012 r. badania rozpoczęto na nowym poligonie badawczym o znacznie większej powierzchni [7]. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę tego poligonu badawczego wraz z opisem

wykorzystywanego układu eksperymentalnego oraz pierwsze uzyskane rejestracje. Dokonano również zwięzłej analizy rozptyłu prądów w badanym układzie.

2. POLIGON BADAWCZY

Nowy poligon badawczy narażeń piorunowych o powierzchni około 5 ha znajduje się na terenie należącym do Politechniki Rzeszowskiej, położonym 50 km na południe od Rzeszowa w miejscowości Huta Poręby (rys. 1).

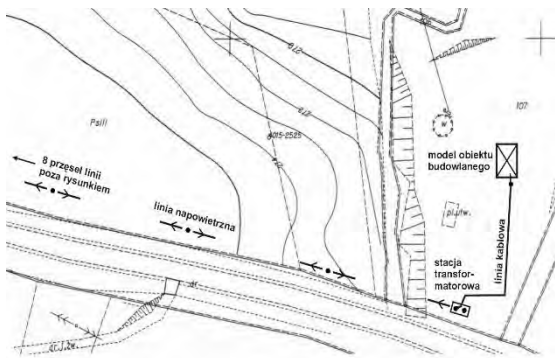


Rys. 1. Satelitarny obraz terenu poligonu badawczego z zaznaczonymi granicami i lokalizacją zbudowanych obiektów

Mapkę części tego terenu z zainstalowanymi obiektami testowymi przedstawiono na rys. 2.

Do podstawowych obiektów poligonu badawczego należą: model budynku mieszkalnego z urządzeniem piorunochronnym i instalacją elektryczną, stacja transformatorowo-rozdzielcza słupowa SN/nn, linie napowietrzna i kablowa. Na terenie poligonu znajduje się także kontener magazynowy do przechowywania urządzeń probierczych i pomiarowych.

Stacja transformatorowa SN/nn (rys. 3) i linia napowietrzna niskiego napięcia zostały zbudowane z urządzeń i elementów zdemontowanych przez służby energetyczne z wcześniej eksploatowanej sieci elektroenergetycznej.



Rys. 2. Mapa geodezyjna części terenu poligonu badawczego z naniesionymi oznaczeniami wybudowanych obiektów



Rys. 3. Słupowa stacja transformatorowo-rozdzielcza z przyłączoną linią napowietrzną

Stacja transformatorowa ŻH-160 jest wyposażona w typowe urządzenia rozdzielcze. Jej głównym urządzeniem jest transformator olejowy T3ZONE 30/20 o mocy 30 kVA, napięciu górnym 15 kV i dolnym 400 V oraz o grupie połączeń Yz5. W czasie badań rolę linii SN będzie pełnić wybudowana wzdłuż drogi powiatowej (rys. 2), niezasilana niskonapięciowa linia napowietrzna, składająca się z 11 przeset o łącznej długości 484 m oraz długości przewodów ($4 \times \text{AL } 35 \text{ mm}^2$) równej 506 m. Linia kablowa niskiego napięcia (rys. 2) o długości 50 m jest wykonana z zastosowaniem kabla YAKY $4 \times 35 \text{ mm}^2$, ułożonego w gruncie na głębokości 60 cm. Linia ta łączy rozdzielnicę niskiego napięcia stacji transformatorowo-rozdzielczej z wolnostojącym złączem kablowym ZK-1, ulokowanym 2,3 m od ściany modelu budynku mieszkalnego (rys. 4).



Rys. 4. Model budynku mieszkalnego z instalacją elektryczną i urządzeniem piorunochronnym

Żyłą PEN kabla jest z jednej strony połączona z uziemieniem stacji transformatorowo-rozdzielczej, a z drugiej z zaciskiem uziemiającym złącza kablowego, z którym z kolei połączony jest uziom poziomy wykonany z ocynkowanego płaskownika stalowego o długości 20 m, ułożonego na głębokości 45 cm wzdłuż linii kablowej. Zacisk uziemiający złącza kablowego jest połączony także, ułożonym w gruncie ocynkowanym płaskownikiem stalowym, z najbliższym uziomem urządzenia piorunochronnego budynku mieszkalnego.

Podstawowymi urządzeniami probierczymi są trzy w pełni zautomatyzowane, sterowane komputerowo generatory udarów prądowych:

- mobilny generator udarów prądowych, GUP100-8/20, o napięciu pracy do 80 kV, energii 50 kJ i prądzie szczytowym do 100 kA, do symulacji wieloprądowych składowych wyładowań piorunowych (wyładowań głównych);
- mobilny generator udarów prądowych, GUP-80/10, o napięciu pracy do 80 kV, energii 10 kJ i prądzie szczytowym do 50 kA, który również może być wykorzystywany do symulacji oddziaływań wyładowań głównych;
- mobilny generator udarów piorunowych długotrwałych, GUP-10/100, o napięciu pracy do 10 kV, energii 100 kJ, wartości szczytowej prądu do 500 A i czasie trwania impulsów do 100 ms.

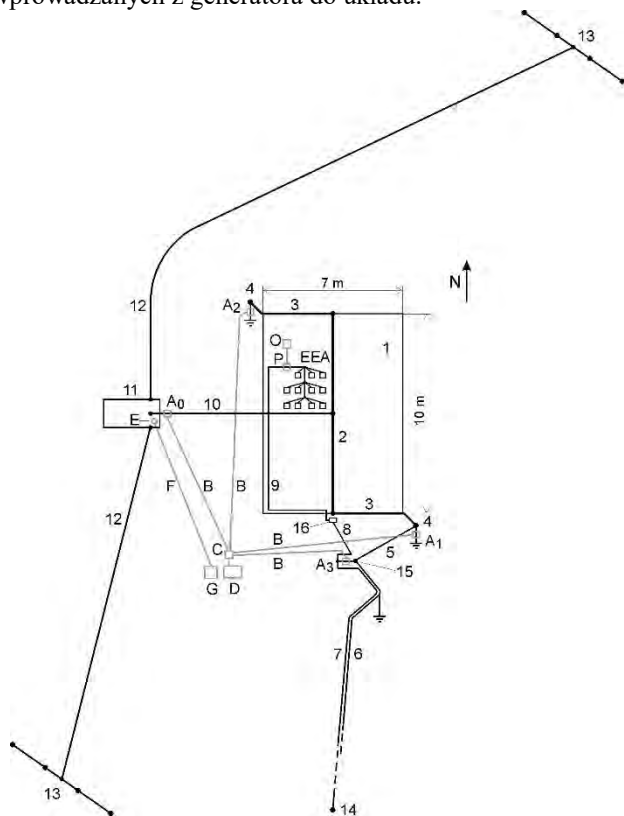
Dwa pierwsze generatory umożliwiają wytwarzanie udarów prądowych odwzorowujących, w szerokim zakresie amplitud i kształtów, wyładowania główne - podstawowe składowe naturalnych wyładowań piorunowych. Trzeci z wymienionych generatorów umożliwia wytwarzanie udarów prądowych odwzorowujących składowe długotrwałe naturalnych wyładowań atmosferycznych, występujące po niektórych wyładowaniach głównych piorunów wielokrotnych. Składowe długotrwałe cechują się energią wielokrotnie większą, nawet ponad rząd wartości, od energii wyładowań głównych i są zasadniczo odpowiedzialne za destrukcyjne efekty wyładowań atmosferycznych, w tym za wzniesienie pożarów.

W przeprowadzonych badaniach rozptyłu prądów piorunowych, obok opisanych wyżej urządzeń probierczych, zastosowano unikatowe układy (nowej generacji) przetwarzania i rejestracji udarów prądowych, oparte na technologii elektrooptycznej. W 2010 roku zbudowano, przy współpracy pracowników Politechniki Rzeszowskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej i Politechniki Poznańskiej, prototypowy system składający się z przetwornika analogowo-cyfrowego i elektrooptycznego, które umieszczono w metalowym ekranie bezpośrednio przy boczniku prądowym, optycznego faliowodu oraz przetwornika optoelektronicznego [9]. Taka konstrukcja umożliwia transmisję wszystkich danych pomiarowych światłowodem w postaci cyfrowej, co sprawia, że zmierzone przebiegi nie są podatne na zaburzenia elektromagnetyczne i warunki atmosferyczne. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania testów z udziałem generatorów prądów udarowych, które są źródłem silnych zaburzeń elektromagnetycznych.

3. UKŁAD EKSPERYMENTALNY

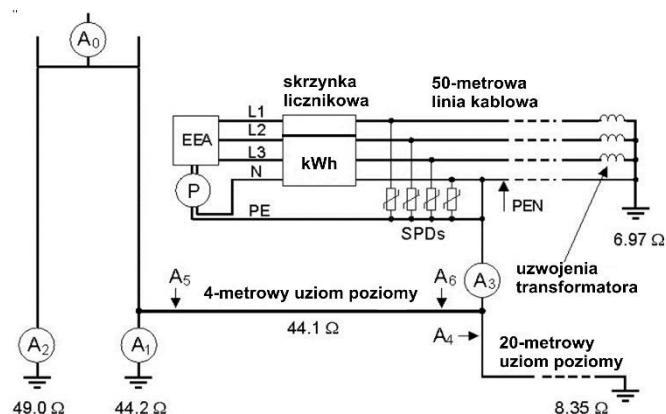
Badania rozptyłu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym i dołączonych instalacjach przewodzących przeprowadzono w oparciu o układ eksperymentalny

pokazany na rys. 5. Zastępczy schemat elektryczny tego układu, uwzględniający najważniejsze elementy, został natomiast przedstawiony na rys. 6. Rejestracje prądów w wybranych elementach urządzenia piorunochronnego i dołączonej instalacji dokonano za pomocą boczników i pięciokanałowego układu pomiarowego. Prądy o znacznie mniejszych wartościach szczytowych płynące w instalacji elektrycznej obiektu mierzono za pomocą sondy Pearsona i oscyloskopu. Należy podkreślić, iż jedną z najważniejszych zalet eksperymentu była powtarzalność uderów prądowych wprowadzanych z generatora do układu.



Rys. 5. Schemat badanego układu: 1 – model obiektu budowlanego, 2 – zwód poziomy na kalenicy dachu z trzema zwodami pionowymi, 3 – przewody odprowadzające, 4 – uziomy pionowy, 5 – 4-metrowy uziom poziomy, 6 – 20-metrowy uziom poziomy, 7 – żyła PEN 50-metrowego kabla, 8 – przewód PE obwodu zasilającego, 9 – przewody instalacji elektrycznej obiektu, 10 – izolowany przewód miedziany, 11 – generator, 12 – przewody izolowane obwodu powrotnego generatora, 13 – uziom na końcu przewodów powrotnych, 14 – uziom stacji transformatorowej, 15 – złącze kablowe wolnostojące, 16 – skrzynka licznikowa, A – punkty pomiarowe, B – łącza światłowodowe, C – pięć konwerterów elektrooptycznych, D – komputer, E – konwerter optoelektryczny generatora, F – światłowód, G – pulpit sterujący generatorem, O – oscyloskop, P – sonda prądowa, EEA – urządzenia domowe (Electrical

and Electronic Appliances – EEA)

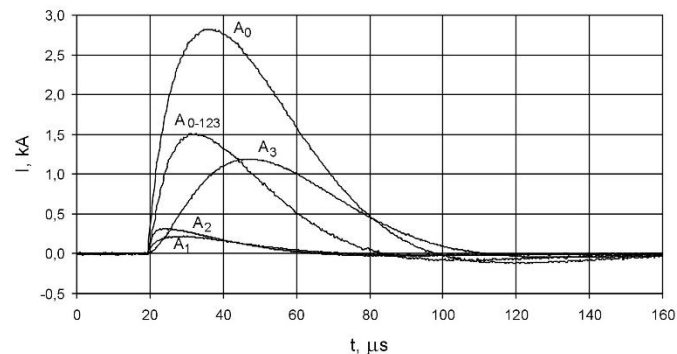


Rys. 6. Zastępczy schemat elektryczny układu

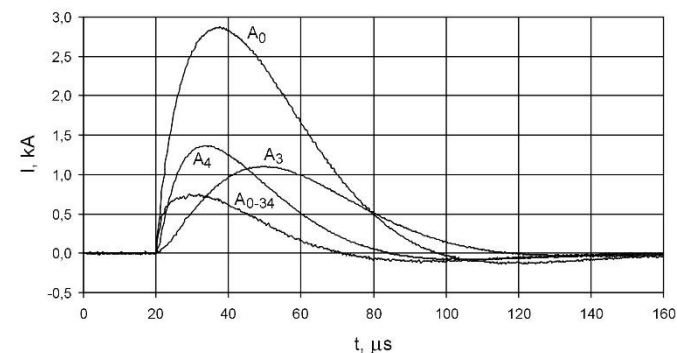
W układzie pomiarowym zastosowano ekranowany dzielnik napięcia, przetwornik analogowo-cyfrowy i przetwornik elektrooptyczny. Przetworzone dyskretne wartości chwilowe prądu w postaci impulsów światła są przysyłane światłowodem do części pomiarowo-rejestrującej układu składającej się z przetwornika optoelektronicznego z buforem pamięci i laptopa. Zamontowanie ekranowanego przetwornika bezpośrednio na boczniku i światłowodowa transmisja cyfrowa wyeliminowały zakłócenia wysokiej częstotliwości.

4. ANALIZA ROZPŁYWU PRĄDÓW UDAROWYCH

Wprowadzony z generatora удар prądowy rozplywa się w dwóch kierunkach zwodem odgromowym poziomym, a następnie przewodami odprowadzającymi do uziomów i do ziemi. W przypadku uziomu przy narożu budynku po stronie południowej, część prądu wpływa do nieizolowanego przewodu łączącego ten uziom z uziomem złącza kablowego. Część prądu wypływa z tego przewodu bezpośrednio do ziemi, a pozostała wpływa do uziomu złącza kablowego, do żyły PEN linii kablowej, wypływając do ziemi przez uziemienie stacji transformatorowo-rozdziałowej, oraz do żyły PE przewodu przyłączeniowego. Ta ostatnia niewielka część prądu wpływając do przewodu PE instalacji elektrycznej może wpłynąć do żył czynnych tej instalacji przez przyłączone do niej odbiorniki energii elektrycznej. Na rys. 7 i 8 przedstawiono rozptyw prądów zarejestrowany w badanym układzie.



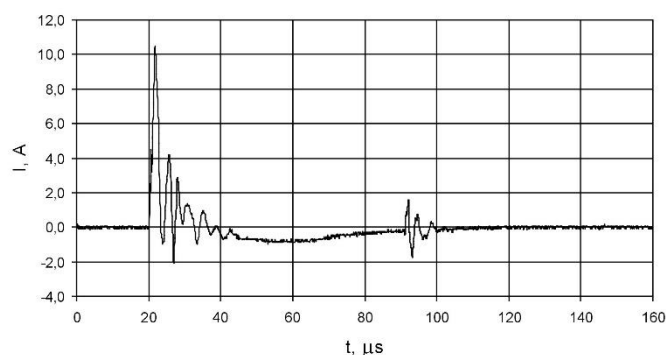
Rys. 7. Rozptyw prądu w badanym układzie: A_0 – prąd wprowadzany z generatora, A_1 i A_2 – prądy płynące do uziomów pionowych, A_3 – prąd wpływający do instalacji elektrycznej obiektu i przewodu PEN kabla, A_{0-123} – wyznaczony prąd ($A_{0-123} = A_0 - A_1 - A_2 - A_3$) wpływający do ziemi poprzez 4-metrowy i 20-metrowy uziom poziomy



Rys. 8. Rozptyw prądu w badanym układzie: A_0 – prąd wprowadzany z generatora, A_3 – prąd wpływający do instalacji elektrycznej obiektu i przewodu PEN kabla, A_4 – prąd wpływający do ziemi z 20-metrowego uziomu poziomego, $A_{0-34} = A_0 - A_3 - A_4$ wyznaczony prąd wpływający do ziemi poprzez uziomy pionowy i 4-metrowy uziom poziomy

Wyraźnie widać, iż kształt fal prądowych nie jest jednakowy w różnych elementach instalacji. Prądy

wpływające do uziomów pionowych (przebiegi A₁ i A₂) mają krótszy czas narastania do wartości szczytowej w porównaniu do prądu wprowadzanego z generatora, natomiast prąd wpływający do przewodu PEN kabla posiada zbocze narastające dużo łagodniejsze. Świadczy to o większym udziale pojemności w impedancji uziomów pionowych (filtracja składowych widma prądu o niższych częstotliwościach) oraz indukcyjności w przypadku kabla (filtracja składowych widma prądu o wyższych częstotliwościach). Dodatkowo warto zauważyć, iż stosunek wartości szczytowej prądu płynącego do uziemienia transformatora (przebieg A₃) do wartości szczytowej prądu z generatora wynosi ok. 38%. Wartość ta jest miarą efektywności odprowadzania prądów piorunowych do ziemi przez lokalne uziemienie obiektu i zależy od relacji pomiędzy wielkością impedancji uziemienia obiektu i uziemienia stacji transformatorowej.



Rys. 9. Prąd płynący w instalacji elektrycznej z dołączonymi urządzeniami domowymi AGD i RTV (rys.6, punkt P)

Podczas badań rejestrowano również prądy płynące w instalacji elektrycznej obiektu wyposażonego w typowe urządzenia domowe. Jak widać na rys. 9 ich wartości szczytowe są dwa rzędy mniejsze w porównaniu do prądów płynących w urządzeniu piorunochronnym. Wynika to z dużej impedancji obwodu, którym ten prąd płynie do uziemienia transformatora, czyli przewodów fazowych instalacji, kabla, uzwojeń transformatora i jego przewodu neutralnego. Obecność urządzeń domowych jest przyczyną licznych oscylacji związanych ze zjawiskiem odbicia fal prądowych. Oprócz oscylacji nakładających się bezpośrednio na grzbiet opadający zarejestrowanej fali prądowej występują po upływie około 50 μ s dodatkowe oscylacje, które trwają około 10 μ s.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano poligon badawczy systemów ochrony odgromowej oraz dokonano analizy rozpręgu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego wyposażonego w typowe urządzenia domowe i dołączonego poprzez linię kablową do stacji transformatorowej. Uzyskane wyniki potwierdzają rejestracje dokonane na Florydzie, zgodnie z którymi kształty fal prądowych nie są jednakowe w różnych miejscach badanego

układu i zależą od parametrów częstotliwościowych poszczególnych elementów instalacji, natomiast efektywność odprowadzania prądu piorunowego do ziemi przez urządzenie piorunochronne zależy od relacji pomiędzy wielkością impedancji uziemienia obiektu i uziemienia najbliższej stacji transformatorowej.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Rakov V.A., Uman M.A., Fernandez M.I., Mata C.T., Rambo K.J., Stapleton M.V., and Sutil R.R., Direct Lightning Strikes to the Lightning Protection System of a Residential Building: Triggered-Lightning Experiments, IEEE Trans. on Pow. Del., 17 (2002), n.2, pp. 575–586.
2. Sutil R.R., Rakov V.A., Uman M.A.: EMTP modeling of direct lightning strikes to the lightning protective system of a residential building, Proc. of 26th ICLP, Krakow, Poland, 2002.
3. DeCarlo B. A., Rakov V. A., Jerauld J. E., Schnetzer G. H., Schoene J., Uman M. A., Rambo K. J., Kodali V., Jordan D. M., Maxwell G., Humeniuk S., Morgan M., Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building - Part I: Triggered-Lightning Experiments, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 23, n. 4, Oct. 2008, pp. 2439-2446.
4. Li L., Rakov V. A., Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building - Part II: Numerical Modeling, IEEE Trans. on EMC, Vol. 23, No. 4, Oct. 2008, pp. 2447–2455.
5. Maslowski G., Rakov V.A., Wyderka S., Bajorek J., DeCarlo B.A., Jerauld J., Schnetzer G.H., Schoene J., Uman M.A., Rambo K.J., Jordan D.M., Krata, W., Testing of Lightning Protective System of a Residential Structure: Comparison of Data Obtained in Rocket-Triggered Lightning and Current Surge Generator Experiments, Journ. of High Voltage Eng., China Vol. 34, No. 12, 2008, pp. 2575-82.
6. Maslowski G., Wyderka S., Rakov V.A., DeCarlo B.A., Li L., Bajorek J., Ziemba R., Experimental investigation and numerical modeling of surge currents in lightning protective system of a residential building, Journ. of Lightn. Research, No. 4, 2012, pp. 18-26.
7. Maslowski G., Bajorek J., Wyderka S.: Developing of Lightning Research Center in South East Part of Poland, Asia- Pacific Int. Conf. on Lightning, Nov. 1- 4, 2011, Chengdu, China.
8. Maslowski G., Wyderka S., Ziemba R., Karnas G., Filik K., Karpinski L.: Surge Current Distribution in the Lightning Protection System of a Test House Equipped in Electrical and Electronic Appliances, Proc. of 32nd ICLP, Shanghai, China, 2014.
9. Buczek L., Wyderka S., Jaworski M., Fiber optic links in broadband registration system of electrical signals in presence of high voltage and strong electromagnetic disturbances, Electrical Review, R. 88 No. 9a/2012, pp. 171-174.

ANALYSIS OF IMPULSE CURRENT DISTRIBUTION IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEM AND CONNECTED INSTALLATIONS

The paper presents a new test site of lightning protection systems belonging to the Rzeszow University of Technology. Analysis of impulse current distribution in the lightning protection system and the connected installations has been conducted. An impulse current generator was used together with the original measurement system during experimental tests. Obtained results confirm registrations made in Florida with usage of triggered lightning experiments. Current waveforms are not the same in lightning protection system and are influenced by frequency dependent parameters of different parts of the installation. The effectiveness of lightning protection system depends on the relation between the amount of impedances of the local grounding system and the grounding system of the transformer station.

Keywords: lightning, lightning protection, test site experiments, impulse current

PROGRAM KOMPUTEROWY WSPOMAGAJĄCY PROJEKTOWANIE INSTALACJI ODGROMOWYCH

Tadeusz MASŁOWSKI

Elko-Bis Systemy Odgromowe Sp. z o.o.

tel.: +48 697 731 859, e-mail: tadeusz.maslowski@elkobis.com.pl

Streszczenie: Aplikacje typu CAD mają szerokie zastosowanie w inżynierii budowlanej. Program ELKO-BIS CAD umożliwia: sporządzanie rysunków technicznych korzystając z wbudowanej biblioteki elementów instalacji odgromowej, obliczenia numeryczne parametrów stref ochronnych i odstępów izolacyjnych, projektowanie graficzne stref ochronnych metodą kąta ochronnego, sporządzanie zestawień materiałowych, dostęp do szczegółowych informacji technicznych zawartych w poradniku ochrony odgromowej oraz stronie internetowej Elko-Bis. Elko-Bis CAD współpracuje z większością programów CAD a w szczególności z wersjami operującymi na przestrzeni 2D. Innowacyjne narzędzia takie jak np. szablon siatki zwodów, specyfikacja systemów ochrony rur znacznie ułatwiają i przyspieszają proces projektowania instalacji odgromowych.

Słowa kluczowe: grafika inżynierska, wyznaczanie stref ochronnych, obliczanie odstępów izolacyjnych, specyfikacje materiałowe.

1. WSTĘP

Aplikacje typu CAD mają szerokie zastosowanie w inżynierii budowlanej. Pod nazwą CAD (ang. Computer Aided Design) kryje się wiele skomplikowanych procesów, które służą do opracowania dokumentacji projektowej stanowiącej podstawę do wykonania robót budowlanych. W aplikacjach typu CAD można wykonywać grafikę sterowaną za pomocą specjalnych narzędzi automatyzujących proces rysowania, dokonywać różnych obliczeń, zestawień. Można też wykonać wizualizację wykonanego projektu.

ELKO-BIS CAD jest pierwszą tego typu aplikacją w branży odgromowej wykonaną przez polską firmę dla szerokiego grona osób uczestniczących przy realizacji inwestycji i utrzymaniu instalacji odgromowych: inwestorów, projektantów, wykonawców i kosztorysantów. Głównym celem programu jest komputerowe wspomaganie projektowania instalacji odgromowych dla obiektów budowlanych według obowiązującej normy PN-EN 62305.

2. PODSTAWOWE MOŻLIWOŚCI

ELKO-BIS CAD umożliwia:

- obliczenia numeryczne parametrów stref ochronnych i odstępów izolacyjnych [1],
- projektowanie graficzne stref ochronnych metodą kąta ochronnego [1],

- sporządzanie rysunków instalacji odgromowych w powiązaniu z programem CAD,
- dostęp do wbudowanego poradnika odgromowego,
- dostęp do katalogu produktów poprzez przekierowanie na stronę internetową ELKO-BIS,
- sporządzanie zestawień materiałowych, dla elementów liniowych w metrach i kilogramach.

3. PLATFORMA INFORMATYCZNA

Komputer do pracy z programem ELKO-BIS CAD musi posiadać oprogramowanie CAD oraz arkusz kalkulacyjny Microsoft Excel. ELKO-BIS CAD współpracuje z wieloma znanymi na rynku aplikacjami typu CAD między innymi: AutoCAD, BricsCAD, ZWCAD, IntelliCAD, BitCAD, progeCAD, ARES Commander Edition, GstarCAD. Część informatyczną programu wykonała firma Cadprofi, twórca wielu nakładek do programów CAD dla producentów takich jak: CABLOFIL, ZUCCINI, LEGRAND, HAGER. Dla rysowania i specyfikowania elementów liniowych takich jak zwody lub uziomy zastosowano specjalną technologię informatyczną, która pozwala używać ELKO-BIS CAD w środowiskach CAD LT ograniczonych do płaszczyzny 2D. Aplikacje typu LT są najczęściej używane przez projektantów branży elektrycznej z powodów ekonomicznych. Instalacja programu polega na uruchomieniu pliku typu exe skopiowanego do komputera na którym program ma być zainstalowany. Po uruchomieniu pliku startowego aplikacja instaluje się automatycznie bez potrzeby dodatkowych ustawień wewnętrznych w środowisku CAD. Przed przystąpieniem do pracy niezbędna jest rejestracja dla możliwości powiadomień użytkownika o nowych wersjach programu.

4. SPECYFIKA DZIAŁANIA

Program ELKO-BIS CAD jest bardzo przyjazny w działaniu. W jego głównym oknie dialogowym wybieramy elementy do rysowania. Natomiast ich powielanie, zmiany atrybutów, wydłużanie lub skracanie linii i wiele innych operacji można wykonywać korzystając ze standardowych narzędzi CAD. Elementy wstawiane do rysunku są blokami, w których zaprogramowane są informacje służące do wykonywania zestawień materiałowych. Każdy element

wprowadzany na rysunek zakłada w programie CAD nową warstwę. Umożliwia to stosowanie technik separacji, blokowania lub edycji warstw bardzo użytecznych podczas procesu projektowania i specyfikowania instalacji odgromowej. Nazwy warstw zawierają między innymi numery katalogowe elementów co ułatwia nawigację i wybór stosowanej warstwy jako bieżącej. Określając warstwę wprowadzonego elementu liniowego jako bieżącą możemy rysować zwody lub uziomy liniowe korzystając ze standardowego polecenia programu CAD. We wprowadzanych do projektu elementach możemy edytować i zmieniać atrybuty. Jest to bardzo pomocne w przypadku, kiedy w bibliotece nie mamy danego elementu. Wtedy po zmianie atrybutu i wprowadzeniu do projektu nowego elementu możemy wygenerować ten element w zestawieniach. Wartość polecenia opcją jest zliczanie elementów graficznych spoza wbudowanej biblioteki elementów-bloków. Opcja ta może być wykorzystywana również przez kosztorysantów innych instalacji np. oświetlenia, gniazd wtyczkowych, teletechniki.

5. PRACA Z PROGRAMEM

Główne okno dialogowe zawiera katalogi w których poruszamy się jak w oknach systemu Windows. Katalogi ułożone są hierarchicznie począwszy od klasy ochrony odgromowej, rodzaju materiału a następnie rodzaju elementu: drut odgromowy, maszty, obudowy i złącza kontrolne, pozostałe wyroby. Sposób wybierania elementu jest bardzo intuicyjny i sprowadza się do przejścia w drzewie katalogów do elementu końcowego z ewentualnym podaniem parametrów pomocniczych. Z głównego okna dialogowego możemy wprowadzić do rysunku legendę elementów instalacji odgromowej, szablony opisów oraz ramki i tabelki rysunkowe.

Poza możliwością wyboru elementów punktowych możemy do projektu wstawiać scalone moduły systemowe takie jak: uziomy, zwody, przewody odprowadzające, elementy ochrony rurociągów, elementu zwodów naprężnych. Moduły te poza wiodącymi elementami liniowymi zawierają inne niezbędne do zestawień takie jak uchwyty, drążki izolacyjne, złącza. Na uwagę zasługuje moduł szablonu siatki zwodów. Po podaniu charakterystycznych punktów wprowadzony szablon na rysunek dachu umożliwia rysowania siatki zwodów o wymiarach dopasowanych do klasy LPS obiektu podlegającego ochronie odgromowej. Rysowane elementy liniowe uwzględniają spadki określone w dokumentacji w procentach, stopniach lub cm. Wszystkie elementy wprowadzone z biblioteki mają swój symbol identyfikowany w katalogu produktów ELKO-BIS. Wielkość tych oznaczeń można zmieniać dostosowując je do skali wydruku. Symbole elementów można na rysunku przesuwając w celu uzyskania przejrzystości całego projektu. Grafika elementów odgromowych (kolor, grubość linii) może być dopasowana do indywidualnych potrzeb projektanta i zmieniana w menadżerze warstw programu CAD. Elementy liniowe można rysować w technice przez punkty wskazane myszką lub z tzw. opcją odsunięcia, czyli z określonym dystansem od punktów j.w. Opcja odsunięcia w przypadku zwodów zwiększa czytelność rysunku, wyróżniając zwód od krawędzi budynku. Podobnie jest w przypadku rysowania uziomów otokowych. Ustala się wielkość odsunięcia np. 1m i prowadząc myszkę po punktach krawędzi budynku rysuje się uziom, który zamyka się automatycznie po zamknięciu

punktów na obwodzie budynku przez myszkę. Elementy wybierane z biblioteki można zmniejszać lub powiększać, nie można ich rozbijać, ponieważ tracą wtedy właściwości bloków i nie będą występowały w generowanych zestawieniach. Wybierając z biblioteki maszt odgromowy możemy wywołać jego rzut z góry lub z boku z promieniem ochrony na poziomie podstawy masztu. Rzuty masztów z góry i z boku stanowią podstawę do graficznego wyznaczenia stref ochronnych metodą kąta ochronnego. Tą metodę można łatwo zastosować w środowisku CAD LT. Obsługę programu ułatwia wbudowana instrukcja w postaci pliku w formacie pdf oraz film pokazujący podstawowe techniki pracy. W bazie materiałowej programu są elementy produkowane przez Elko-Bis. Jednak zastosowane narzędzia programowe są uniwersalne i umożliwiają obliczenia niezależnie od wyboru dostawcy materiałów. Program udostępniany jest bezpłatnie przez producenta Elko-Bis Systemy Odgromowe Wrocław na stronie www.elkobis.com.pl. Dostępna jest wersja w języku polskim i angielskim.

6. ARKUSZE INFORMACYJNE

Program ELKO-BIS CAD zawiera szereg wbudowanych arkuszy w formacie Excel. Jednym z nich jest poradnik ochrony odgromowej, którego jedną z zakładek pokazano na rysunku 1.

Poradnik zawiera wybrane informacje dotyczące instalacji odgromowych [1] takie jak:

- materiały w instalacji odgromowych,
- parametry stref ochronnych,
- wymiarowanie elementów instalacji odgromowych,
- warunki stosowania połączeń dachowych jako zwodów odgromowych,
- okresy pomiędzy przeglądami,
- oraz inne:
- strefy wiatrowe w Polsce [2],
- średnia roczna liczba dni z burzą w Polsce [4],
- strefy obciążenia śniegiem gruntu w Polsce [3],
- obliczenia naroży dachowych,
- zachowanie podczas burzy,
- resuscytacja krążeńiowo-oddechowa [5].

7. ARKUSZE KALKULACYJNE

Szczególnie interesujące są arkusze, w których wykonane są kalkulatory numeryczne. W arkuszach do wyznaczania stref ochronnych dla zadanych gabarytów obiektu i ustalonej klasy ochrony odgromowej [1] automatycznie wyliczane są parametry zwodów pionowych służących do jego ochrony. W nakładce ELKO-BIS CAD umieszczono arkusze do wyznaczania stref ochronnych metodą kąta ochronnego, toczącej się kuli [1] dla różnych obiektów, również dla ogniw fotowoltaicznych jak w przykładowym arkuszu na rysunku 2.

W arkuszach do obliczeń odstępów izolacyjnych, jak przykładowym arkuszu na rysunku 3 zastosowano algorytm według normy PN-EN 62305:2011.

8. ARKUSZE SPECYFIKACYJNE

Odrębną grupę arkuszy w programie ELKO-BIS CAD stanowią specyfikacje rozwiązań systemowych. Specyfikacja dla budynku mieszkalnego umożliwia zestawienia elementów

instalacji odgromowych dla prostych obiektów budowlanych z dachem dwuspadowym lub kopertowym. W specyfikacji elementów ochrony kominów występują specjalne obejmy mocowane do chronionych rur, do których montuje się drążki izolacyjne łączone między sobą na szczytach linka odgromową ALDREY. System ten zakłada montaż kompletnych zestawów takich jak zestaw: przelotowy, narożny, końcowy. Wskazując ilości każdego z zestawów arkusz podaje szczegółowy wykaz materiałów do zastosowania w systemie. Na uwagę zasługuje nowy arkusz specyfikacyjny dotyczący osprzętu do kabli wysokonapięciowych. W najbliższym czasie będzie on wprowadzony do programu ELKO-BIS CAD. Obecnie dostępny jest do pobrania na stronie www.elkobis.com.pl. W arkuszu tym podane są elementy do różnych sposobów montażu kabli wysokonapięciowych: na ścianie, na konstrukcjach i na połąci dachowej.

9. WNIOSKI KOŃCOWE

Program ELKO-BIS CAD umożliwia nowe podejście do projektowania instalacji odgromowych. Wbudowane

różnorodne moduły zawierają podstawowe informacje dotyczące projektowania instalacji odgromowych [1], narzędzia obliczeniowe numeryczne i graficzne, panele specyfikacyjne i różne specjalne pomoce do grafiki inżynierskiej w środowisku CAD. Sprawne algorytmy i nowoczesna platforma informatyczna znacznie ułatwiają i przyspieszają proces projektowania i tworzenia dokumentacji przy realizacji instalacji odgromowych.

10. BIBLIOGRAFIA

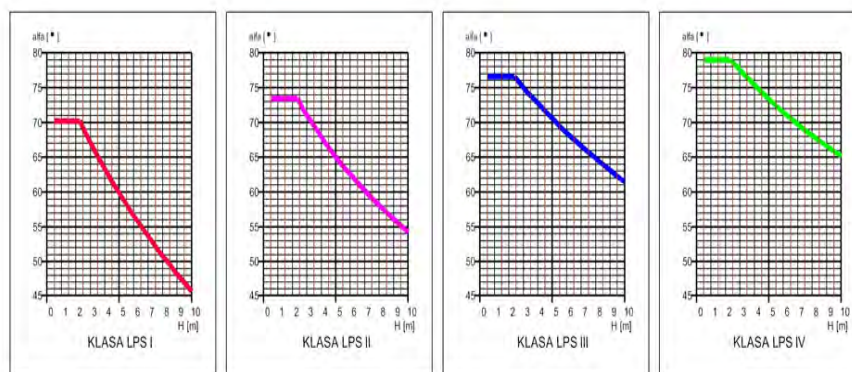
1. PN-EN 62305: Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
2. PN-EN 1991-1-4: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru, Warszawa 2008,
3. PN-80/B-02010/Az1: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie śniegiem, Warszawa 2006,
4. Instytut Metrologii i Gospodarki Wodnej pod redakcją Haliny Lorenc: Atlas klimatu Polski, Warszawa 2005,
5. Janusz Andres, Rudolph W. Kostner: Wytyczne resuscytacji 2010, Kraków 2010

PORADNIK ODGROMOWY WG PN-EN 62305

PARAMETRY STREF OCHRONNYCH

Klasa LPS	Metoda ochrony			Typowe odległości między przewodami odprowadzającymi i pomiędzy przewodami otokowymi
	Promień toczonej kuli r [m]	Wymiary siatki zwodów W [m]	Kąt ochronny α	
I	20	5 x 5	Patrz wykresy obok	10
II	30	10 x 10		10
III	45	15 x 15		15
IV	60	20 x 20		20

Wykresy wykonano dla długości masztów produkowanych przez Elko-Bis



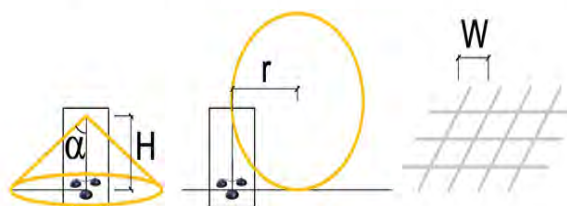
PARAMETRY PRĄDÓW PIORUNOWYCH

Klasa LPS	Składowa wyładowania	Wartość podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy			
		Wartość szczytowa [kA]	Stromość narastania [kA/ μ s]	Czas czoła [μ s]	Czas do półszczytu [μ s]
I	pierwsza składowa	200	20	10	350
II		150	15	10	350
III		100	10	10	350
IV		100	10	10	350
I	kolejne składowe	50	200	0,25	100
II		37,5	150	0,25	100
III		25	100	0,25	100
IV		25	100	0,25	100

UWAGI

Przedstawiono wartości kątów i promieni ochronnych dla płaszczyzny odniesienia H poziomej

Metoda kąta ochronnego ma geometryczne ograniczenia i nie może być zastosowana, jeśli wysokość H jest większa niż promień r toczonej się kuli

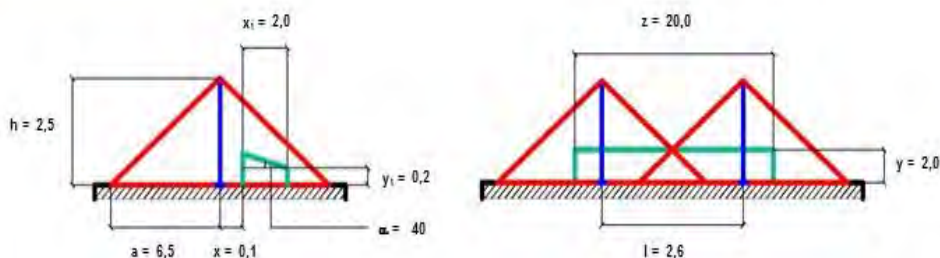


Rys.1. Poradnik ochrony odgromowej. Parametry stref ochronnych

WYZNACZANIE STREF OCHRONNYCH DLA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH METODĄ KĄTA OCHRONNEGO WG PN-EN 62305-3
PRZY ZASTOSOWANIU MASZTÓW ODGROMOWYCH PRODUKCJI ELKO-BIS
MASZTY W UKŁADZIE LINIOWYM POSADOWIONE NA POZIOMEJ PŁASZCZYZNIE ODNIESIENIA

KLASA LPS I

Odlegość od masztu do ogniwa	x [m]	0,1
Kąt nachylenia ogniwa względem podłoża	α [°]	40
Wysokość górna ogniwa	y [m]	2,0
Wysokość dolna ogniwa	y ₁ [m]	0,2
Długość ogniwa	z [m]	20,0
Szerokość ogniwa	x ₁ [m]	2,0
Proponowana wysokość masztu	h [m]	2,5
Promień ochronny	a [m]	6,55
Ilość masztów	[szt.]	8

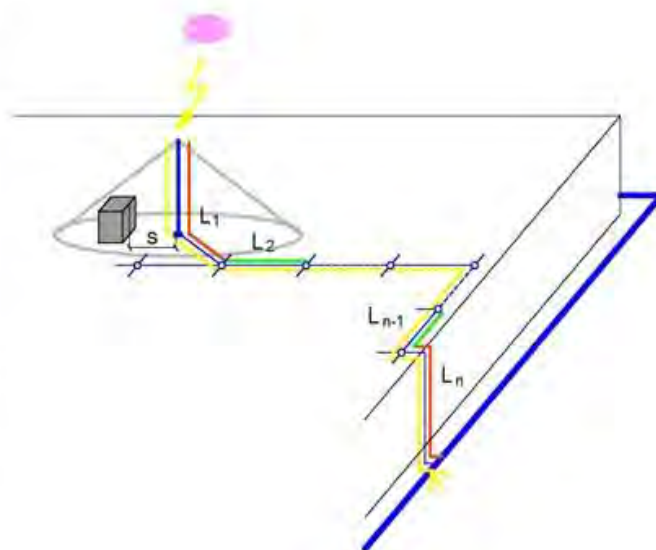


Rys. 2. Zakładka z arkusza: Ochrona fotowoltaika metoda stożka

UPROSZCZONA METODA WYZNACZANIA ODSTĘPÓW IZOLACYJNYCH
WG PN-EN 62305:2011 (19 ODCINKÓW OBLICZENIOWYCH)

Klasa LPS	WSTAW	sk
1. klasa I	2	0,06
2. klasa II		
3. klasa III lub IV		
Materiał odstępu izolacyjnego	WSTAW	km
1. powietrze	1	1
2. beton, cegła		
3. elementy dystansujące		
Ilość przewodów odprowadzających	WSTAW	
	8	
Ilość zwodów przyłączonych do masztu	WSTAW	
Wstaw wartości z zakresu 1,2	2	
s_{min} [m]		0,56

Nr odcinka	WSTAW
L1	10,0
L2	10,0
L3	10,0
L4	10,0
L5	0,0
L6	0,0
L7	0,0
L8	0,0
L9	0,0
L10	0,0
L11	0,0
L12	0,0
L13	0,0
L14	0,0
L15	0,0
L16	0,0
L17	0,0
L18	0,0



$$s_{min} \geq \frac{k_1}{k_m} \cdot (k_{e1} \cdot L_1 + k_{e2} \cdot L_2 + \dots + k_{en} \cdot L_n)$$

Rys. 3. Zakładka z arkusza: Obliczanie odstępów izolacyjnych

APPLICATION SUPPORTING DESIGN PROCESS OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS.

CAD applications are widely used in construction engineering. Under the name of CAD (ang. Computer Aided Design) we understand a complex series of processes used for the development of project documentation that are necessary for the implementation and acceptance of construction works.

The ELKO- BIS CAD allows to:

- preparation of technical drawings using the built-in library of lightning protection elements,
- numerical calculations of protection zones and insulation gaps parameters,
- graphic design of protection zones using protective angle method,
- creating lists of elements,
- access to detailed technical information provided in design supporting spreadsheets,

Application supports most of CAD programs available on the market in particular the versions commonly used by electricians limited to 2D space.

The Elko-Bis CAD uses many common drawing techniques used in CAD environments in a very intuitive way. Innovative tools such as air-termination grids and specification of pipe protection, greatly simplifies and accelerates the design process of lightning protection systems.

Keywords: engineering graphics, protection zones, insulation gaps, material specifications.

WPLYW TEMPERATURY WARYSTOROWYCH OGRANICZNIKÓW PRZEPIEĆ ZnO NA PRĄDY UPŁYWOWE

Marek OLESZ

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć
tel: 583471820 fax: 583472136 e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule omówiono wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych w zakresie prądu upływowego warystorowych ograniczników przepięć z tlenku cynku ZnO dla temperatur w zakresie 263 K ÷ 373 K. Badania wykonano w celu stwierdzenia powtarzalności charakterystyk ograniczników przepięć oraz obliczenia współczynników poprawkowych koniecznych dla przeliczania wyników pomiarów prądu upływowego na temperaturę odniesienia. Procedura taka jest konieczna podczas porównywania wyników badań wykonywanych w różnych warunkach zewnętrznych. Dla temperatur od 263 K do 323 K należy liczyć się nawet z dwukrotną zmianą prądu upływowego w stosunku do przyjętej temperatury odniesienia wynoszącej 293 K.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć ZnO, prąd upływowy, wpływ temperatury

1. WSTĘP

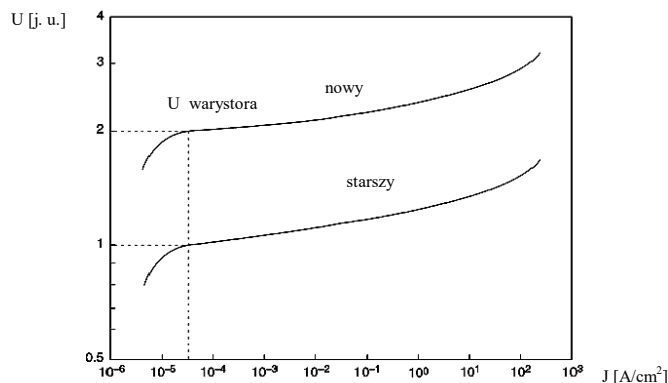
Ograniczniki przepięć spełniają ważną rolę w instalacjach elektroenergetycznych zarówno niskich (nn) jak i wysokich napięć. Przede wszystkim, pod warunkiem prawidłowego doboru, zapewniają skuteczną ochronę elementów systemu – głównie transformatorów energetycznych – przed przepięciami pochodzenia piorunowego i łączeniowego. Ochrona przed przepięciami łączeniowymi jest szczególnie ważna w związku z upowszechnianiem się w sieciach średnich napięć (SN) łączników próżniowych, które szczególnie w starszych rozwiązaniach konstrukcyjnych mają właściwości „zrywania” prądu przed jego przejściem przez zero, co powoduje generowanie przepięć o znacznej wartości i długim czasie trwania w porównaniu do przepięć atmosferycznych. Z kolei w instalacjach zawierających elementy energoelektroniczne ze względu na przyjęte rozwiązania techniczne układów sterowania, ograniczniki przepięć stanowią obok układów filtrujących ważny element ograniczania poziomu przepięć w układach izolacyjnych maszyn elektrycznych zasilanych z przemienników częstotliwości. W przypadku instalacji niskiego napięcia zasilających układy automatyki lub sieci teleinformatyczne ograniczniki zapewniają ochronę układów elektronicznych przed uszkodzeniem, a przede wszystkim przed nieprawidłowym działaniem rozpatrywanym w kategoriach kompatybilności elektromagnetycznej jak np. nieoczekiwana

zmiana stanu logicznego w urządzeniu, zerowanie układu procesorowego, zaburzenie sygnału sterującego uniemożliwiające odbiór przesyłanej informacji.

Podstawowym elementem ogranicznika są warystory wytworzone na bazie tlenku cynku ZnO z odpowiednimi domieszkami (głównie bizmutu – przewodnika o charakterze jonowym), które dzięki wielofazowej strukturze charakteryzują się nieliniową charakterystyką napięciowo - prądową.

Warystor ZnO jest elementem, którego charakterystyka napięciowo-prądowa $U(I)$ zawiera trzy charakterystyczne obszary – przedprzebieciowy, przebieciowy i nasycenia (rys. 1). Charakterystyka $U(I)$ zależy od temperatury ogranicznika T , która w części przedprzebieciowej powoduje wzrost wartości prądu (wysokostratna pojemność), a w fazie przewodzenia jego zmniejszenie (rezystancja o małej oporności).

Powyższe zachowanie warystora wynika z zjawisk fizycznych występujących na granicach ziaren otrzymanego spieku. W stanie przedprzebieciowym między ziarnami występuje około 3,5 V spadek napięcia [1]. Poniżej napięcia przebiecia przewodnictwo ma charakter omowy wynikający z emisji termoelektronowej Schottky'ego przez barierę potencjału [2]. Dla obszaru przedprzebieciowego istnieje szereg innych modeli dla których uwzględnia się podwójną barierę Schotky'ego, nieomowe przewodzenie i inne zjawiska fizyczne [3].



Rys. 1. Charakterystyka warystora ZnO

Po osiągnięciu napięcia przebiecia, które zgodnie z zasadami ochrony przeciwprzebieciowej powinno być

wyższe od napięcia pracy chronionego urządzenia, a niższe od wytrzymałości napięciowej izolacji rozpoczyna się według rysunku 1 wzrost prądu wskutek tunelowania elektronów przez barierę potencjału. Proces ten jest wspomagany przez generowanie dodatkowych dziur. W obszarze tzw. przebiccia, prąd I osiąga wartości rzędu kiloamperów, a jego wartość nie zależy już od temperatury, ale głównie od napięcia U i współczynnika nieliniowości α zgodnie z zależnością (1):

$$I = k_a U^\alpha \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik nieliniowości określa zależność $\log I_1/I_2/\log(U_1/U_2)$ [3, 4]

Przy wyższych napięciach, wskutek redukcji barier między ziarnami, charakter przewodzenia prądu w warystorze jest typowo rezystancyjny przy wartościach rzędu pojedynczych omów. Obserwuje się dalszy wzrost napięcia przy niewielkiej zmianie prądu wskutek zwiększenia się rezystancji ziaren ZnO wynikających z braku nośników prądu.

Szczególnie interesujący dla celów diagnostycznych warystorów jest pierwszy zakres – przedprzebieciowy, gdy występuje wówczas normalny stan pracy ogranicznika. Dzięki temu możliwe jest określenie jego stanu technicznego poprzez pomiar prądu upływowego lub co jest bardziej miarodajne jego składowej czynnej przy napięciu roboczym sieci.

Na poziomie sieci SN energetyka zawodowa eksploatuje zazwyczaj ograniczniki aż do stanu uszkodzenia. Z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej w przedsiębiorstwach energetycznych sprawdza się okresowo według wewnętrznej instrukcji eksploatacji: ciągłość połączeń oraz rezystancje uziemień stacji transformatorowo-rozdzielczych i słupów, na których montuje się ograniczniki. Zazwyczaj, poza ogranicznikami chroniącymi transformatory w głównych punktach zasilających – nie wykonuje się badań stanu wewnętrznego ograniczników, które jak wiadomo ulegają degradacji pod wpływem czasu, temperatury i uderów prądowych [4, 5, 8]. Zmienia się wówczas ich charakterystyka, która może nie zapewniać prawidłowej ochrony w stanach krytycznej pracy systemu elektroenergetycznego.

W przypadku ograniczników w sieciach nn diagnostyka poza specjalnymi zastosowaniami w obszarach techniki wojskowej, medycyny, obszarów zagrożonych wybuchem nie jest wykonywana. W większości przypadków stosuje się zdalny lub na podstawie oględzin monitoring warystorów polegający na wymianie wadliwych wkładek ceramiki ZnO, które podczas przepływu zbyt dużego prądu wyładowczego na skutek zadziałania układu detekcji wysokiej temperatury powinny automatycznie odłączyć się od napięcia.

2. METODY I PROBLEMY POMIARU PRĄDU UPŁYWOWEGO

Dla ograniczników stosowanych w sieciach nn nie ma w normie [6] wymagań co do kontroli prądu upływowego – jednakże wytwórcy w procesie produkcji takie wprowadzają nawet na każdej sztuce wyrobu. Analiza wartości prądu upływowego w badaniach typu jest podstawowym kryterium osiągnięcia przez ogranicznik stabilności cieplnej po przyłożeniu zdefiniowanych w normie uderów prądowych przykładowych w odpowiedniej liczbie i odstępach

czasowych. Stan stabilności cieplnej zostaje osiągnięty, jeśli prąd upływowy ogranicznika w warunkach zdefiniowanych przez normę nie przekracza wartości 1 mA. W praktyce w obszarach specjalnych zastosowań producenci na podstawie wymagań badań typu zaproponowali różne przyrządy umożliwiające szybkie zdiagnozowanie stanu warystora ZnO. Zazwyczaj zasada ich działania polega na sprawdzeniu jednego lub kilku punktów charakterystyki napięciowo-prądowej warystora, które nie powinny przekroczyć wartości granicznych podanych przez producenta. Podane urządzenia wymagają zazwyczaj wyłączenia ogranicznika z sieci w celu przeprowadzenia pomiaru prądu upływowego lub napięcia przy prądzie 1 mA, które następnie są porównywane z wartościami dopuszczalnymi.

Inne sposoby diagnostyczne, które nie wymagają wyłączenia ogranicznika z sieci mogą być oparte na nawiązaniu komunikacji z specjalnym modulem umieszczonym w strukturze ogranicznika lub pośrednich pomiarów prądu upływowego metodą cęgową.

W przypadku diagnostyki ograniczników przepięć SN podano w normie [9] następujące sposoby: licznik zadziałań, odczyt prądu ciągłego najlepiej z wydzieleniem składowej czynnej, sygnalizacja stanu częściowego lub całkowitego zniszczenia elementu warystorowego (np. odłączniki), przyrządy analizujące temperaturę, harmoniczne prądu upływowego, straty mocy czynnej.

W praktyce najczęściej wykorzystuje się metodę pomiaru prądu upływowego wykonując pomiary eksploatacyjne na ogranicznikach pracujących w sieci okresowo (diagnostyka okresowa) lub w sposób ciągły (monitoring z zapisem wartości prądu upływowego na karcie pamięci lub w systemie nadzoru). Ze względu na pojemnościowy charakter prądu upływowego pogorszenie stanu ogranicznika powoduje jego niewielką zmianę. W związku z powyższym w praktyce powstała grupa metod wykorzystująca w analizie diagnostycznej pomiar prądu upływowego, ale z wydzieloną składową rezystancyjną na podstawie poniższych sposobów:

- metoda kompensacyjna polegająca na wygenerowaniu składowej pojemnościowej i odjęciu jej od sygnału prądu upływowego [3],
- określenie wartości chwilowej prądu przy szczytowej wartości napięcia [3],
- metoda zmodyfikowanego przesunięcia prądu [3, 5] – polega na generowaniu za pomocą odpowiednich algorytmów odpowiednio przesuniętego fazowo prądu pojemnościowego.

W przypadkach pomiarów cęgami należy dokonać ich kalibracji w układzie odpowiednich wzorców pomiarowych oraz uwzględnić wpływ poziomu napięcia, temperatury oraz szczególnie odkształcenia napięcia na wynik końcowy pomiaru.

Niniejsza publikacja przedstawia wyniki pomiarów prądów upływowych warystorów ZnO prowadzące do określenia współczynników umożliwiających przeliczenie wyników pomiarów na poziom odniesienia określony temperaturą 293 K. W normie [9] podano przykładowe charakterystyki współczynników poprawkowych w funkcji temperatury bez podania odchyłek od wartości średniej oraz analizy wpływu zmiany struktury ogranicznika na poziom prądu upływowego. W związku z tym przeprowadzono badania dla warystorów o różnych wymiarach i pochodzących od kilku producentów.

3. WPŁYW TEMPERATURY

Wzrost temperatury powoduje obniżenie napięcia trwałej pracy w sposób zależny od składu chemicznego ceramiki warystora [7, 8]. Przy znacznej zawartości tlenków żelaza i aluminium zmiany te mogą być nawet kilkukrotne dla wybranej temperatury. Spotykane współczynniki temperaturowe K określone wzorem (2) wg [11] są podawane na poziomie $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-3}/K$.

$$K = \frac{\frac{\Delta U}{U}}{\frac{\Delta T}{T - T_0}} = \frac{U_T(1mA) - U_{T_0}(1mA)}{U_{T_0}(1mA) \cdot (T - T_0)} \quad (2)$$

gdzie:

$U_T(1mA)$ – napięcie w temperaturze T przy prądzie 1 mA

$U_{T_0}(1mA)$ – napięcie w temperaturze T_0 przy prądzie 1 mA

T – temperatura ogranicznika ZnO

T_0 – temperatura odniesienia przyjęta na poziomie 293 K

Dla większości ograniczników przepięć w prawidłowym stanie technicznym napięcie przy wymuszonym prądzie upływowym ze wzrostem temperatury o 20 K, zmniejsza się o około 1% [11]. Zwiększone wydzielanie ciepła w strukturze warystora wpływa na wartość napięcia na jego zaciskach i obniża dopuszczalne poziomy udarów prądu i energii w funkcji temperatury.

Innym częściej stosowanym w praktyce sposobem jest określenie wartości prądu upływowego $I(U_c)$ przy napięciu trwałej pracy ogranicznika U_c , a następnie wyliczenie współczynników temperaturowych k_T będących wprost przeliczeniem na temperaturę odniesienia np. 293 K według zależności (3).

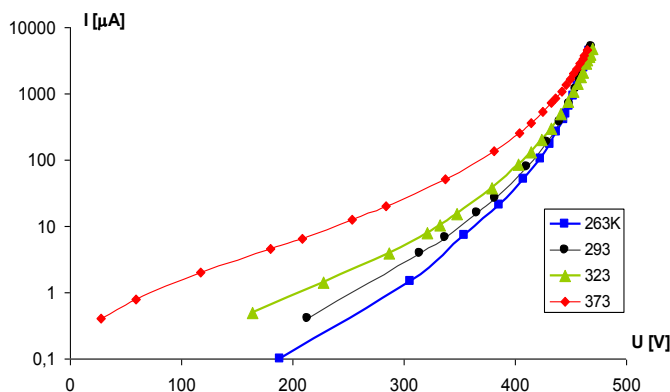
$$I_{T_0}(U_c) = k_T \cdot I_T(U_c) \quad (3)$$

W celu wyznaczenia współczynników korekcyjnych stosowano warystory ZnO dwóch producentów A i B. W jednym przypadku badania dotyczyły 8 ograniczników przepięć o napięciu trwałej pracy 275 V pochodzących od wytwórcy A. Natomiast w drugim badano warystory (z każdego rodzaju po 10 sztuk) pochodzące od producenta B o napięciu 0,28 kV, 0,5 kV, 1 kV i 3 kV. Ograniczniki przechowywano w komorze cieplnej przez okres 5 godzin aż do unormowania rozkładu temperatury w strukturze warystora, a następnie wykonywano pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych w układzie z poprawnie mierzonym prądem wymuszając napięcie stałe lub przemienne pochodzące w drugim przypadku z generatora napięcia sinusoidalnego o niskiej zawartości wyższych harmonicznych.

Współczynniki korekcyjne wyznaczono w dwóch stanach pracy – przy napięciu stałym (producent A i B) na podstawie standardowo wyznaczonych charakterystyk prądowo-napięciowych oraz przy napięciu przemiennym (tylko producent A) wyznaczając składową rezystancyjną prądu upływowego według metodyki opisanej w [5].

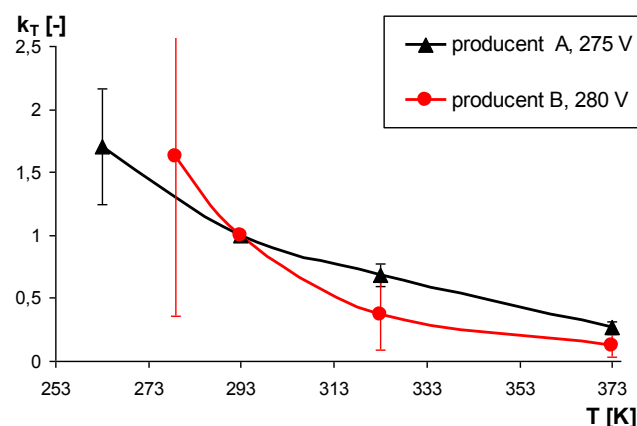
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe badanych ograniczników przy napięciu trwałej pracy $U_c = 275 V$ i znamionowym prądzie wyładowczym 20 kA, 8/20 μs . Powyżej napięcia stałego odpowiadającego amplitudzie

napięcia trwałej pracy obserwuje się niewielki wpływ temperatury na poziom prądu upływowego.



Rys. 2. Charakterystyki $I(U)$ dla napięcia stałego przykładowego ogranicznika przepięć pochodzącego od producenta A

Na podstawie zmierzonych charakterystyk $I(U)$ obliczono pokazane na rys. 3 współczynniki k_T dla napięcia stałego. Współczynniki te dla warystorów pochodzących od producentów A i B cechowanych na podobne napięcie trwałej pracy są istotnie zróżnicowane. Wyznaczone współczynniki poprawkowe szczególnie w niskich temperaturach otoczenia charakteryzują się znacznym rozrzutem wyników wartości prądu.

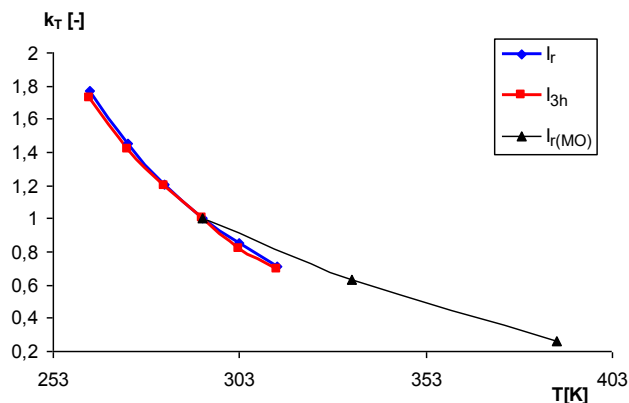


Rys. 3. Współczynniki poprawkowe temperatury obliczone na podstawie pomiarów przy napięciu stałym do przeliczania pomiarów prądu upływowego na warunki odniesienia dla $T = 293 K$

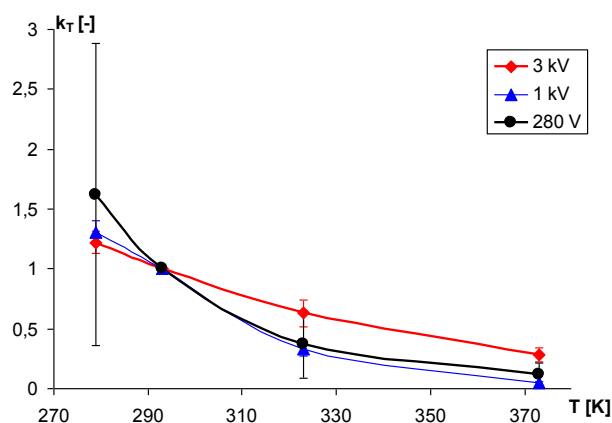
Dla ograniczników producenta A wyznaczono dodatkowo przebieg współczynnika $k_T(T)$ z pomiarów składowej czynnej prądu upływowego przy napięciu przemiennym, który jest zbliżony do danych podanych w [9, 10] dla zakresu temperatur 263 K $\div$ 303 K. Dla wyższych temperatur obserwowano nieznacznie większe wartości współczynnika k_T co może wynikać z właściwości badanej ceramiki ZnO (rys. 4).

Publikacje dotyczące wpływu temperatury na prąd upływowo podają różne wartości współczynników poprawkowych, które raczej nie są podawane w kartach katalogowych producentów [7 – 9].

Należy nadmienić, że określenie charakterystyki napięciowo-prądowej może wskazywać także na uszkodzenie cieplne ogranicznika. Powstają wówczas anormalnie duże prądy upływowe, płynące także przy napięciu przemiennym wskazujące na nieprawidłowy stan ogranicznika.



Rys. 4. Porównanie pomiarów prądu upływowego przy napięciu przemiennym, I_r , I_{3h} – składowa rezystancyjna i 3 – harmoniczna prądu upływowego według [9, 10], $I_r(MO)$ – składowa czynna prądu upływowego wyznaczona przez autora dla producenta A



Rys. 5. Wpływ gabarytów ogranicznika producenta B (wysokość warystora wynosi dla 280 V – 3,5 mm, 1 kV – 8 mm i dla 3 kV – 25 mm) na wartość współczynnika k_T

Na rysunku 5 porównano wpływ gabarytów ogranicznika związanych z napięciem trwałej pracy U_c na przebieg współczynnika temperaturowego k_T . Wzrost napięcia U_c i tym samym objętości warystora powoduje wyraźne ograniczenie wpływu temperatury na prąd upływowy, na co wskazuje bardziej płaska charakterystyka $k_T(T)$.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Charakterystyki korekcyjne wpływu temperatury dla ograniczników pochodzących od różnych producentów są

inne. Cechą serii ograniczników może być zarówno znaczny rozrzut wartości prądu upływowego, jak i inne uśrednione wartości współczynnika k_T .

Analiza ograniczników o różnych napięciach trwałej pracy tego samego producenta wskazuje na istotne różnice w przebiegu charakterystyk korekcyjnych. Przy niższych napięciach U_c współczynniki korekcyjne osiągają wyższe wartości, co może mieć związek z łatwiejszym nagrzewaniem mniejszej objętościowo struktury warystora w czasie przepływu prądów upływowych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Tanaka S., Takahashi K., Direct measurements of voltage – current characteristic of single grain boundary of ZnO varistors. J. Eur. Ceram. Soc. 19, 6-7, 1999, p. 727 – 730.
2. Levinson L. M., Philip H. R., The physics of metal oxide varistors, Journal of Applied Physics, 1975, vol. 46, pp. 1332-1341.
3. Chrzan K., Wysokonapięciowe ograniczniki przepięć, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2003, ISBN: 83-7125-108-4 4.
4. Haddad M., Warne D., Advances in High Voltage Engineering, The Institution of Engineering and Technology, London, 2007.
5. Olesz M., Wyznaczanie składowej rezystancyjnej prądu upływu ogranicznika metodą wektorów ortogonalnych, Przegląd Elektrotechniczny nr 11b, 2012.
6. PN EN 61643 – 11:20, Niskonapięciowe urządzenia do ograniczania przepięć, Część 11 – Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby.
7. Sawalha A., Abu-Abdeen M., Sedky A., Electrical conductivity study in pure and doped ZnO ceramic system, Physica B 404, 2009, pp. 1316–1320.
8. Zhang Y., Han J., Microstructure and temperature coefficient of resistivity for ZnO ceramics doped with Al_2O_3 , Materials Letters 60, 2006, pp. 2522–2525.
9. PN-EN 60099-5:1999/A1:2004, Ograniczniki przepięć - Zalecenia wyboru i stosowania.
10. Larsen V., Lien K., In-service testing and diagnosis of gapless metal oxide surge arresters, IX International Symposium on Lightning Protection, 2007, Brazil
11. EPCOS, SIOV Metal Oxide Varistors, Epcos AG, Corporate Center, 2008.

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE LEAKAGE CURRENT OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS

The article discusses the results of measurements of current - voltage characteristics in terms of leakage current metal oxide surge arresters (ZnO) for temperatures in the range 263 K - 373 K. The study was performed in order to determine the repeatability characteristics of surge arresters and calculate the correction factors necessary for translating the results of measurements of the leakage current at the reference temperature.

Such a procedure is necessary when comparing the results of tests performed in different external conditions. Effect of temperature on the leakage current is observed only for voltages not exceeding maximum continuous operating voltage. When performing measurements at temperatures ranging from 263 K to 323 K can be expected even with the double change of leakage current in relation to the reference temperature of 20°C. In addition, arresters with higher continuous operating voltage have a lower effect of temperature on the leakage current. There is a significant influence of the chemical composition of the varistor on the level of leakage current, and thus the value of the correction factor k_T .

Key-words: surge arresters, leakage current, influence of temperature

**ANALIZA SYGNATUR POLA ELEKTRYCZNEGO WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH
W REJONIE BIESZCZAD NA PODSTAWIE KOMPLEKSOWYCH POMIARÓW IMPULSÓW
FALI ELEKTROMAGNETYCZNEJ W PAŚMIE CZĘSTOTLIWOŚCI OD 0 DO 3 MHz
WYKONANYCH W AKADEMICKIM OŚRODKU SZYBOWCOWYM POLITECHNIKI
RZESZOWSKIEJ I POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
W BEZMIECHOWEJ W MAJU 2014 R.**

Konrad SOBOLEWSKI¹, Grzegorz KARNAS², Piotr BARAŃSKI³, Grzegorz MASŁOWSKI⁴

1. Konrad Sobolewski, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel.: (22) 234 7856, konrad.sobolewski@ee.pw.edu.pl
2. Grzegorz Karnas, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
tel.: (017) 8651243, gkarnas@prz.edu.pl
3. Piotr Barański, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa
tel.: (22) 6915-872, baranski@igf.edu.pl
4. Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
tel.: (017) 8651253, maslowski@prz.edu.pl

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono kompleksowe pomiary piorunowego pola elektromagnetycznego z równoczesnym wykorzystaniem kilku anten. Przedmiot badań dotyczył incydentu burzowego z dnia 20 maja 2014 r. zarejestrowanego w AOS PRz i PW¹ w Bezmiechowej Górnej. Zestaw pomiarowy składał się z dwóch anten pola „szybkiego” (0,5 Hz - 3 MHz) oraz jednej anteny pola „wolnego” – młynka (0 Hz - 10 Hz). Anteny pola szybkiego pozwoliły na obserwację składowej radiacyjnej, porównanie danych z dwóch identycznych czujników pomiarowych i weryfikację pracy układu wyzwającego. Dodatkowo na wieży pomiarowej zainstalowano atestowany miernik pola EM Maschek ESM-100 o zakresie 5 Hz - 400 kHz. Umożliwiło to zaobserwowanie dobowych zmian trzech składowych wektora oraz modułu pól elektrycznego i magnetycznego. W artykule przeprowadzono analizę pomiarów z wykorzystaniem programu Matlab, generującego wykresy pola elektromagnetycznego w funkcji czasu.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, detekcja i lokalizacja wyładowań piorunowych, mechanizm wyładowania piorunowego, ochrona odgromowa

1. WPROWADZENIE

Jednym z istotnych problemów współczesnego świata jest zapewnienie bezpiecznego środowiska pracy dla urządzeń elektronicznych, które przede wszystkim należy chronić zwłaszcza przed szkodliwymi zakłóceniami EM.

Jednym z zagrożeń wciąż pozostają wyładowania atmosferyczne, których proces inicjacji w chmurach burzowych jest jeszcze niewystarczająco zbadany i wymaga nowych laboratoryjnych oraz polowych akcji pomiarowych. Wyładowania te, będące szerokopasmowym źródłem emisji licznych energetycznych impulsów EM, są w stanie zakłócić pracę rozpowszechnionego sprzętu komputerowego, a nawet doprowadzić do jego kompletnego zniszczenia. Z tego względu niezbędne jest prowadzenie badań terenowych, mających na celu lepsze poznanie naturalnych uwarunkowań wielu złożonych procesów fizycznych, prowadzących do elektryzacji chmur burzowych oraz akumulacji w nich olbrzymich ładunków elektrycznych, sięgających nawet kilku setek C [4].

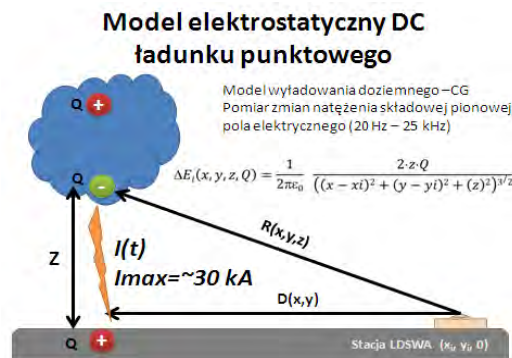
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy amplitudowo-częstotliwościowej sygnatur pola elektromagnetycznego wyładowań doziemnych i wewnątrzchmurowych zarejestrowanych podczas jednotygodniowej terenowej akcji pomiarowej w rejonie Bieszczad i elektrowni szczytowo-pompowej Solina.

2. METODA POMIAROWA

Naziemne pomiary zmian pola elektrycznego, generowanego przez wyładowania atmosferyczne w

¹ AOS PRz i PW – Akademicki Ośrodek Szybowcowy Politechniki Rzeszowskiej i Politechniki Warszawskiej

atmosferze ziemskiej, w szerokim paśmie częstotliwości od ułamków Hz do dziesiątek GHz [5] pozostają nadal najbardziej dostępnym ekonomicznie i sprzętowo sposobem do wyznaczania podstawowych parametrów udarów piorunowych [7].



Rys. 1 Schemat ideowy obrazujący koncepcję naziemnego pomiaru zmiany pola elektrycznego ΔE , wywołanej doziemnym ujemnym udarem piorunowym, oraz jego aplikacji w organizacji wielopunktowej naziemnej sieci pomiarowej LDSWA² umożliwiającej badanie struktury elektrycznej doziemnych wyładowań wielokrotnych [8].

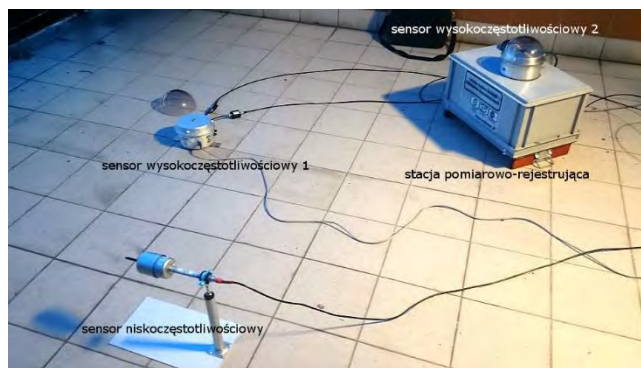
Przykładową organizację takich pomiarów, dającą także możliwość wyznaczania struktury elektrycznej wyładowań doziemnych przedstawiono na rysunku 1.

W zakresie bardzo wolnych zmian natężenia pola elektrycznego od 0 do 10 Hz, za pomocą mierników dynamicznych, np. z wirującym dipolem [1], można poza badaniem krzywych powrotu pola po wyładowaniach atmosferycznych i związanej z ich przebiegiem redystrybucji przestrzennego ładunku elektrycznego w otoczeniu pomiarowym, śledzić cały cykl rozwoju aktywności elektrycznej chmury burzowej, począwszy od chwili pojawienia się w nim pierwszych wyładowań wewnątrzchmurowych do jego stadium dyssypacji, w którym zaczynają dominować wyładowania doziemne. Z kolei zastosowanie płaskich lub prętowych anten elektrycznych przyłączonych do specyfikowanych wzmacniaczy ładunkowych [9], pracujących z przetwornikami A/D w radiowym zakresie częstotliwości LF, daje możliwość cyfrowej rejestracji charakterystycznych przebiegów falowych, tzw. sygnatur, obrazujących szybkie zmiany pola E generowane przez poszczególne składowe udarów piorunowych, np. udary krótkotrwałe typu RS (ang. return stroke), czy udary długotrwałe typu CC (ang. continuing current), a także przez ciągi impulsów wyładowań wewnątrzchmurowych. Dzięki temu w zebranych materiale pomiarowym można nie tylko dokonać selekcji między dwoma głównymi grupami wyładowań atmosferycznych, ale także szczegółowo opisać charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową wszystkie typy wyładowań doziemnych i ich składowe, tzn. zarówno pojedyncze czy wielokrotne incydenty udarów piorunowych [6].

3. SPRZĘT POMIAROWY

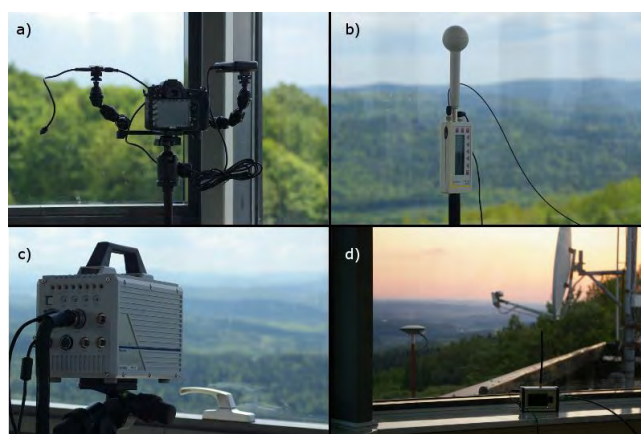
Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano zestaw aparaturowy składający się z dwóch anten pola elektrycznego

mierzących pole elektryczne odpowiednio w zakresie częstotliwości 0,5 Hz ÷ 3 MHz oraz 20 Hz ÷ 100 kHz. Dodatkowo zastosowano czujnik niskiej częstotliwości, tzw. młynek z wirującym dipolem, pracujący w paśmie częstotliwości od 0 Hz do 10 Hz (rys. 2).



Rys. 2 Sensory pomiarowe (nisko- i wysokoczęstotliwościowy) oraz stacja pomiarowo-rejestrująca.

Użyte anteny, sensory oraz układ wyzwalania toru wysokoczęstotliwościowego wykonano w laboratoriach wysokonapięciowych Politechniki Warszawskiej [3] oraz Politechniki Rzeszowskiej [2]. Powyższy zestaw umożliwia rejestrację składowych elektrostatycznej, pośredniej oraz radiacyjnej zmian pola E emitowanego wskutek przepływu prądu udarowego w kanałach wyładowań doziemnych, bliskich i odległych od stacji pomiarowej. Ponadto sygnał z toru wolnego i synchronizujący go z torem wysokoczęstotliwościowym znacznik czasowy (ze wspólnego odbiornika GPS) rejestrowano jednocześnie na dwóch kanałach cyfrowego oscyloskopu. Dodatkowym sprzętem pomiarowym użytym do równoczesnych rejestracji trzech składowych wektora oraz modułu pola elektrycznego E i magnetycznego H, w czasie emisji burzowych zakłóceń elektromagnetycznych w paśmie częstotliwości 5 Hz ÷ 400 kHz, był atestowany miernik firmy Maschek (typ ESM-100) z funkcją archiwizacji danych na komputerze oraz przenośny miernik do celów weryfikacyjnych (rys. 3 b, d).



Rys. 3 Dodatkowy sprzęt wykorzystywany w rejestracjach: a) aparat fotograficzny z akcesoryjnym wyzwalaczem oraz urządzeniem GPS, b) miernik pola elektrycznego Maschek ESM-100, c) szybka kamera cyfrowa firmy Photron, d) miernik wolnych zmian natężenia pola elektrycznego.

² LDSWA - Lokalny System Detekcji Wyładowań Atmosferycznych

W trakcie rejestracji kompleksowych zmian pola E podjęto również próbę rejestracji fotograficznej obserwowanych doziemnych wyładowań piorunowych oraz rozwoju czasowego ich kanałów wyładowczych. Wykorzystano do tego celu cyfrowy aparat fotograficzny wyposażony w urządzenie GPS oraz programowalny wyzwalacz, jak również szybką kamerę cyfrową do filmowania, z bardzo dużą szybkością 1000 klatek/s, ewolucji czasowej liderów krokowych bliskich uderzeń doziemnych (rys. 3 a, c). Niestety ze względu na stosunkowo duże zaciemnienie w czasie burzy oba aparaty optyczne należało ustawić w sposób wyjątkowo stabilny, co w dużej mierze ograniczyło możliwość ich łatwego przesuwania i koniecznej adaptacji oświetleniowej oraz zmiany kadru, związanej z szybkim przemieszczaniem się obserwowanych chmur burzowych i miejscem ich wyładowań doziemnych.



Rys. 4 Rozległa chmura burzowa z widocznym rdzeniem silnego opadu, w bliskim otoczeniu punktu pomiarowego.

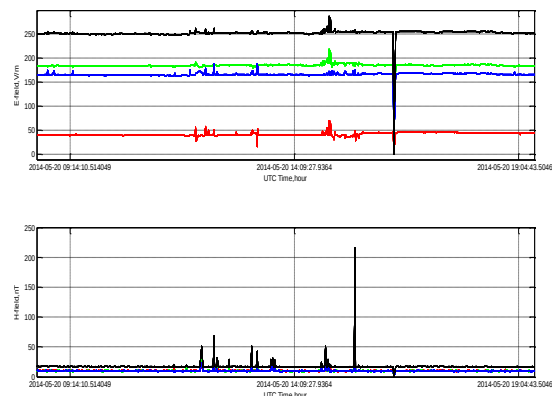
W rezultacie nie udało się wykonać czytelnych zdjęć rozwoju czasowego kanałów wyładowczych wyładowań doziemnych. Natomiast wizualne obserwacje kilku bliskich kanałów, następujących po sobie uderzeń doziemnych, wykazały dużą zmienność w namiarach ich azymutalnych kierunków, od NNE do S. Świadczyły one zatem o jednoczesnej aktywności elektrycznej różnych komór burzowych w otoczeniu stacji pomiarowej.

4. WYNIKI

Szczegółową analizę zebranego materiału pomiarowego przeprowadzono w oparciu o własne skrypty i procedury opracowane do uruchomienia w środowisku programu MATLAB. Procedury te umożliwiły pokazanie na zsynchronizowanych czasowo wykresach charakterystycznych sygnatur pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych zarejestrowanych w obu torach pomiarowych oraz wszystkich kanałach miernika Maschek³. Jak widać na rysunku 5, w momentach pojawienia się bliskich wyładowań atmosferycznych następuje skokowa zmiana natężenia obu pól. Pole elektryczne obniża się do zera, co wynika z chwilowego zrównania się potencjałów chmury i ziemi na skutek przepływu prądu piorunowego. Drugim efektem jest ujemny skok pola magnetycznego, o nieznacznej

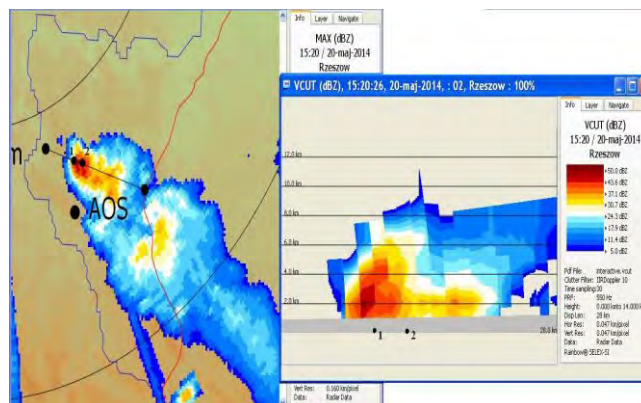
amplitudzie, wynikającej w tym przypadku prawdopodobnie z odległości wyładowania od punktu pomiarowego.

W przypadku wyładowań międzymurowych występuje odmienny przebieg zjawiska, ponieważ zmiany pola elektrycznego nie są aż tak gwałtowne, jak w przypadku wyładowania doziemnego. Natomiast większe zmiany wyładowania występują bezpośrednio nad punktem pomiarowym. Zestawiając zatem dwa różne typy przeprowadzonych rejestracji, można dokonać rozróżnienia, czy odnoszą się one do przypadku wystąpienia wyładowania doziemnego, czy też wewnątrzmurowego.



Rys. 5 Przykładowe⁴ rejestracje wartości pola elektrycznego i magnetycznego przy pomocy miernika Maschek.

Dla niektórych zarejestrowanych uderzeń piorunowych naniesiono lokalizacje geograficzne miejsc ich uderzeń na dopasowane czasowo mapy (skany) radarowe (CAPPI, EHT i VCUT) pochodzące z radaru dopplerowskiego IMGW-PIB⁵ w Rzeszowie. Metoda ta pozwoliła zidentyfikować charakterystyczne obszary komórek burzowych, w których doszło do inicjacji rozpatrywanych uderzeń doziemnych.



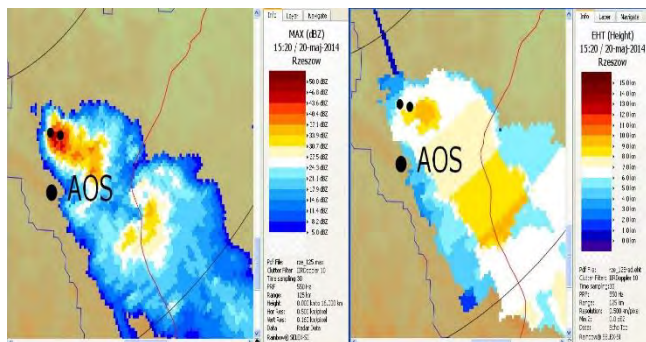
Rys. 6 Skan radarowy oraz przekrój pionowy jednej z chmur burzowych (wzdłuż cienkiej linii pokazanej na skanie radarowym w lewym panelu) w bliskim otoczeniu stacji pomiarowej (AOS) z naniesioną lokalizacją (otrzymaną z systemu LINET) dwóch uderzeń piorunowych (oznaczenia 1 i 2) jednego z doziemnych wyładowań wielokrotnych zarejestrowanych w naszych pomiarach. Odległość horyzontalna uderzeń 1 i 2 od punktu pomiarowego AOS wyniosła ok. 10 km.

³ Przyrząd udostępnia cztery kanały pomiarowe związane z trzema składowymi pola elektrycznego (E_x , E_y , E_z) oraz wypadkową (E_{xyz}).

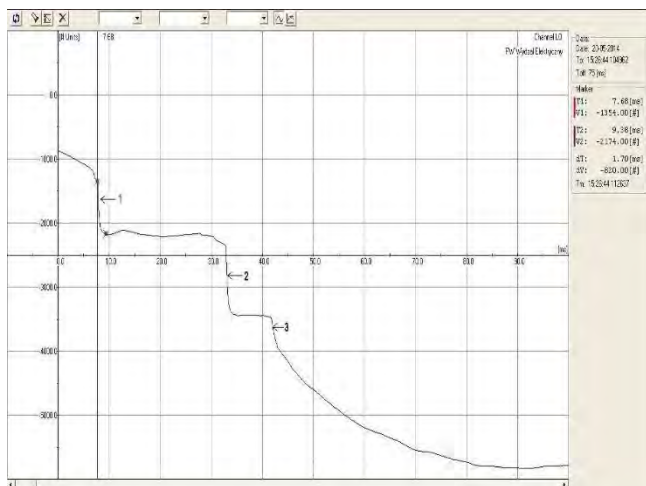
⁴ Przykładowe, nawiązujące do skanów radarowych przedstawionych na kolejnych rysunkach.

Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, ISSN 2353-1290, Nr 39/2014

⁵ CAPPI - ang. Constant Altitude Plane Position Indicator, EHT - ang. Echo Height Top, VCUT - ang. Vertical CUT, IMGW-PIB - Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowy Instytut Badawczy



Rys. 7 Skan radarowy (skan maksymalnej odbiciowości) oraz mapa wysokości wierzchołka echa (EHT) odpowiadające czasowo sytuacji przedstawionej na rys. 5.



Rys. 8 Sygnatura zmian pola E w wielokrotnym wyładowaniu doziemnym zarejestrowana w torze wysokoczęstotliwościowym 2 z własną stacją pomiarową (patrz rys. 2). Składowymi tego wyładowania były dwa ujemne uderzenia krótkotrwałe (typu RS) oznaczone przez 1 i 2 oraz trzeci końcowy uderzenie długotrwałe (oznaczony przez 3), zawierający oprócz fazy RS także fazę CC. Lokalizacje uderzeń 1 i 2 w odniesieniu do bazy pomiarowej (AOS) są podane na odnośnych skanach radarowych (patrz rys. 5 i 6). Amplitudy zmian pola E są tu podane w jednostkach umownych, tj. bitach przetwornika A/D stacji pomiarowej.

Na podstawie powyższych przykładowych skanów radarowych z naniesioną lokalizacją miejsc uderzeń piorunowych jesteśmy w stanie określić, w którym miejscu chmury burzowej miała miejsce ich inicjacja. W tym przypadku zlokalizowano je w bliskim sąsiedztwie głównego rdzenia opadowego tej chmury burzowej i strefie prądu zstępującego. Natomiast rozpoznanie samej struktury doziemnych wyładowań wielokrotnych i ich składowych jest możliwe na podstawie zarchiwizowanych cyfrowych plików pomiarowych, których przykładową wizualizację z przeglądarki danych przedstawia rysunek 8.

5. WNIOSKI

Pierwsza wyjazdowa sesja pomiarowa w 2014 r. potwierdziła konieczność dalszego prowadzenia opisanych w referacie badań. Zebrane dane umożliwiły po raz pierwszy przeprowadzenie kompleksowej analizy zmian pola elektrycznego w czasie występowania różnych wyładowań atmosferycznych w rejonie Bieszczad oraz wskazały na możliwość zastosowania nowej techniki pomiarowej do bardziej precyzyjnego wyznaczania ich amplitudowych oraz czasowych parametrów. Może to posłużyć do weryfikacji

obecnie przyjętych normatywnych zakresów zmienności opisywanych parametrów w charakterystyce naturalnych uderzeń piorunowych. Zdobyta wiedza zastosowana w wykonaniu właściwej ochrony przeciwprzepięciowej i odgromowej, może pomóc w ograniczeniu szkodliwych oddziaływań wyładowań atmosferycznych na pracę wrażliwego sprzętu elektronicznego. W konsekwencji będzie można również wprowadzić nowe wytyczne odnośnie projektowania profesjonalnych zabezpieczeń przeciwprzepięciowych, co wypłynie na podniesienie poziomu ochrony odgromowej w życiu codziennym.

Wyznaczone z zebranych danych pomiarowych parametry doziemnych uderzeń piorunowych w rejonie Bieszczad mogą być wykorzystane do zwiększenia poziomu ochrony odgromowej naziemnej infrastruktury gospodarczej, jak np. rozwijające się farmy wiatrowe, czy istniejąca duża zaporą wodną w tej części Polski. Należy zauważyć, że dopracowanie własnych procedur komputerowych do analizy amplitudowo - częstotliwościowej danych pomiarowych, otrzymywanych jednocześnie z kilku wolnych i szybkich sensorów zmian pola E w czasie wyładowań doziemnych, może zapewnić większą precyzję czasową w prognozowaniu występowania tego rodzaju groźnych zjawisk atmosferycznych. W efekcie zaowocuje to wzrostem bezpieczeństwa wrażliwej na zakłócenia elektromagnetyczne infrastruktury naziemnej oraz mniejszymi kosztami ewentualnych napraw lub przestojów w dopływie energii elektrycznej.

6. BIBLIOGRAFIA

- Berliński J., Pankanin G., Kubicki M.: Large scale monitoring of troposphere electric field, Proceedings of the 13-th ICAE, Beijing, China, August 13-17 2007, vol. I, s. 124-126.
- Karnas G., Masłowski G., Barański P., Berliński J., Pankanin G.: Instrumentation and data analysis process at the new lightning research station in Poland, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 6/2013, s. 217-220.
- Łoboda M., Betz H. D., Barański P., Wiszniewski J., Dziewit Z.: New Lightning Detection Networks in Poland – LINET and LLDN, The Open Atmospheric Science Journal, 3, 2009, s. 29-38.
- MacGorman, D.R., Rust W.D.: The electrical nature of storms, Oxford University Press, New York, 1998, s. 49-53.
- Pierce E. T.: Atmospherics and radio noise, Golde R. H. (wyd.) Lightning, vol. 1, Physics of Lightning, Academic Press, New York, 1977, s. 351-384.
- Rakov V. A.: Electromagnetic Methods of Lightning Detection, Surv. Geophys., 34, 2013, s. 731-753.
- Rakov V.A., Uman M.A.: Lightning: Physics and Effects, Cambridge University Press, Cambridge, 2003, s. 108-213.
- Sobolewski K., Barański P., Wiszniewski J., Łoboda M.: Struktura elektryczna doziemnych piorunowych wyładowań wielokrotnych na podstawie danych uzyskanych z Lokalnego Systemu Detekcji Wyładowań Atmosferycznych (LSDWA) w rejonie Warszawy w 2009 r., Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 289, Elektrotechnika 33, 2013, s. 215-229.
- Uman M. A.: The Lightning Discharge, Academic Press, Orlando, Florida, 1987, s. 345-351.

ANALYSIS OF LIGHTNING DISCHARGE ELECTRIC FIELD SIGNATURES OBTAINED FROM THE COMPREHENSIVE MEASUREMENTS OF ASSOCIATED ELECTROMAGNETIC PULSE RADIATION IN THE FREQUENCY RANGE FROM 0 TO 3 MHZ, CARRIED OUT AT THE ACADEMIC GILDER CENTER OF THE RZESZÓW AND WARSAW TECHNICAL UNIVERSITIES AT BEZMIECHOWA IN MAY 2014

We have presented in this paper some results obtained from the amplitude-frequency analysis of electric field signatures associated with cloud-to-ground (CG) and intra-cloud (IC) lightning discharges that were recorded in the Bieszczady region during the one-week field campaign. The apparatus set used in this campaign consisted of three electric field sensors, i.e. the fast-track unit that was operated in the frequency range from 0.5 Hz to 3 MHz, the slow-track unit that was operated in the frequency range from 20 Hz to 100 kHz and the field mill with rotating dipole operating in the frequency range from 0 Hz to 10 Hz. Such complete measuring devices have allowed for recoding both the electrostatic, intermediate and radiation components of the electric field changes associated with close and distant lightning flash incidents. Additionally, we have used the certified Maschek meter (type ESM-100) for simultaneous recordings of three vector components and the module of electric and magnetic fields connected with the electromagnetic interferences in the frequency range from 5 Hz to 400 kHz that have occurred during observed thunderstorms. The data stream obtained from the Maschek meter has been separately archived on a portable computer. The detailed analysis of all collected data was carried out on the basis of own scripts and procedures designed to operate in the Matlab environment. The relevant parameters of lightning CG strokes that we have determined from the collected electric and magnetic field measurement data in the Bieszczady region can be used to increase the level of lightning protection of the ground industrial infrastructure existing in this part of Poland, such as several developing wind farms or the large water dam of the electric power plant "Solina".

Keywords: lightning flash, cloud-to-ground lightning stroke, lightning detection and location network, lightning protection.

USZKODZENIA ELEKTRONICZNYCH LICZNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ W WYNIKU NIEWŁAŚCIWEGO DOBORU OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

Jarosław WIATER

Politechnika Białostocka

tel: +48 857469979

e-mail: jaroslawwiater@we.pb.edu.pl

Streszczenie: W artykule scharakteryzowano narażenia udarowe liczników energii elektrycznej. Zaprezentowano wyniki próby udarowej przyłącza kablowego zasilanego z napowietrznej linii napowietrznej nn zabezpieczonej liniowym ogranicznikiem przepięć. Przyłączy wyposażone zostało w elektroniczny licznik energii elektrycznej. Badanie przeprowadzono dla układu pracującego pod napięciem, z wykorzystaniem prądu udarowego 10/350 μ s o wartości szczytowej 3 kA. W wyniku analizy zaobserwowano eksplozję ogranicznika przepięć i uszkodzenie licznika.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć, ochrona odgromowa, liczniki energii elektrycznej.

1. WSTĘP

Stworzenie warunków zapewniających pewne i niezawodne działanie systemu elektroenergetycznego oraz pracujących w nim nowoczesnych elektronicznych systemów pomiarowych wymaga posiadania podstawowych informacji o:

- charakterze narażeń udarowych występujących w systemie elektroenergetycznym,
- poziomach odporności udarowej stosowanych urządzeń elektronicznych,
- właściwościach i zasadach doboru odpowiednich rozwiązań wykorzystywanych do ochrony przed narażeniami udarowymi,
- urządzeniach oraz systemach, z którymi one współpracują.

Układy pomiaru zużycia energii elektrycznej narażone są na działanie przepięć pojawiających się w sposób losowy w wybranych częściach rozbudowanego systemu przesyłu i rozdziału energii. Zaburzenia mogą wystąpić zarówno w liniach napowietrznych jak i kablowych. Źródłem zaburzeń może być lokalny wzrost potencjałów i występujące różnice potencjałów wywołane przez napięcia i prądy udarowe powstające podczas:

- operacji łączeniowych wykonywanych w obwodach WN/SN w normalnym i awaryjnym stanie pracy stacji,
- bezpośrednich wyładowań piorunowych na terenie stacji lub w bliskim ich sąsiedztwie,
- wyładowań piorunowych w napowietrzne linie przesyłowe WN/SN, SN/nn

- działania ograniczników przepięć w obwodach WN, SN i nn.

Napięcia i prądy udarowe mogą być również źródłem impulsowego pola elektromagnetycznego oddziałującego bezpośrednio na urządzenia. Zaburzenia impulsowe pola elektromagnetycznego mogą być promieniowane przez urządzenia elektroenergetyczne i linie wysokich napięć podczas stanów nieustalonych w systemie.

2. NARAŻENIA UDAROWE LICZNIKÓW

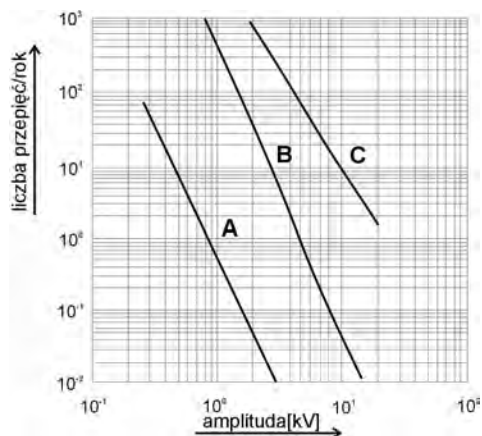
Liczniki energii elektrycznej mogą być podłączone do sieci elektroenergetycznej bezpośrednio, przez przekładniki prądowe (połączenie półpośrednie) lub przez przekładniki prądowe i napięciowe (połączenie pośrednie). W zależności od układu połączeń, liczniki mogą być narażone na oddziaływanie części prądu piorunowego oraz wszelkiego rodzaju przepięć występujących w sieciach elektroenergetycznych różnych napięć.

Znacznie częściej liczniki narażone są na działanie przepięć dochodzących z sieci elektroenergetycznej linią napowietrzną lub od strony obiektu budowlanego. W większości przypadków występujące przepięcia mają kształt tłumionej sinusoidy lub przebieg dwuwykładniczy. Na podstawie dostępnych danych można przyjąć, że w ciągu roku w instalacji elektrycznej wystąpią pojedyncze przepięcia o wartościach szczytowych w przedziale od 1000 V do 5000 V.

W sieci elektroenergetycznej ułożonej w terenie podmiejskim lub wiejskim liczba przepięć będzie wielokrotnie większa. W ciągu roku mogą wystąpić przepięcia o wartościach szczytowych przekraczających 5 kV.

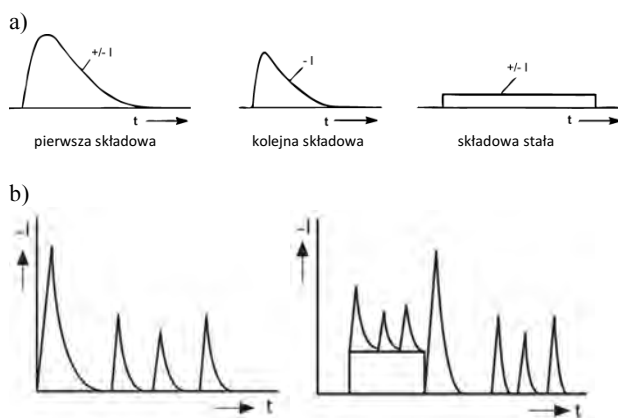
Podjęmowane są również próby uporządkowania dostępnych wyników i wykreślenia krzywych umożliwiających wyznaczenie liczby przepięć o dowolnej amplitudzie, jakie mogą wystąpić w ciągu roku w instalacji elektrycznej [1]. Przykład takich przebiegów przedstawiono na rys. 1, gdzie: krzywa A (małe wystawienie na zakłócenia); przepięcia w podziemnych kablach zasilających ułożonych w miastach, krzywa B (wystawienie średnie); przepięcia w biegnących przez tereny podmiejskie kablach podziemnych z dołączonymi odcinkami linii napowietrznych, krzywa C (wystawienie duże); przepięcia w liniach napowietrznych biegnących przez tereny niezabudowane.

Otrzymane krzywe wyznaczono uwzględniając różny "stopień wystawienia" obwodów niskonapięciowych sieci zasilających na działanie impulsów zakłócających.



Rys.1. Krzywe określające liczby przepięć o różnych amplitudach wywołanych w ciągu roku w obwodach sieci zasilającej przez zewnętrzne źródła zakłóceń [1]

W przypadku najbardziej niebezpiecznym może dojść do bezpośredniego wyładowania piorunowego w linię napowietrzną. Należy zwrócić szczególną uwagę na charakter losowy zjawiska - rys. 2. Trudno jest przewidzieć rzeczywistą liczbę kolejnych składowych wyładowania piorunowego.



Rys.2. Normatywny (a) [2,3] i możliwy do wystąpienia (b) kształt i sekwencja występowania składowych prądu doziemnego wyładowania piorunowego [2,3,4]

W rzeczywistych warunkach bardzo często się zdarza sytuacja, w której przyjęty w normach kształt i sekwencja występowania kolejnych składowych doziemnego wyładowania piorunowego jest inna. Ten fakt dodatkowo zwiększa poziom narażenia liczników energii elektrycznej na uszkodzenie.

Bezspornie do uszkodzenia ogranicznika przepięć może dojść w przypadku przekroczenia maksymalnego prądu wyładowczego $I_{\max}$. Nie mniej jednak ze względu na losowy charakter zjawisk zmiana kształtu prądu na wejściu ogranicznika (energii udaru) może być równie niebezpieczna.

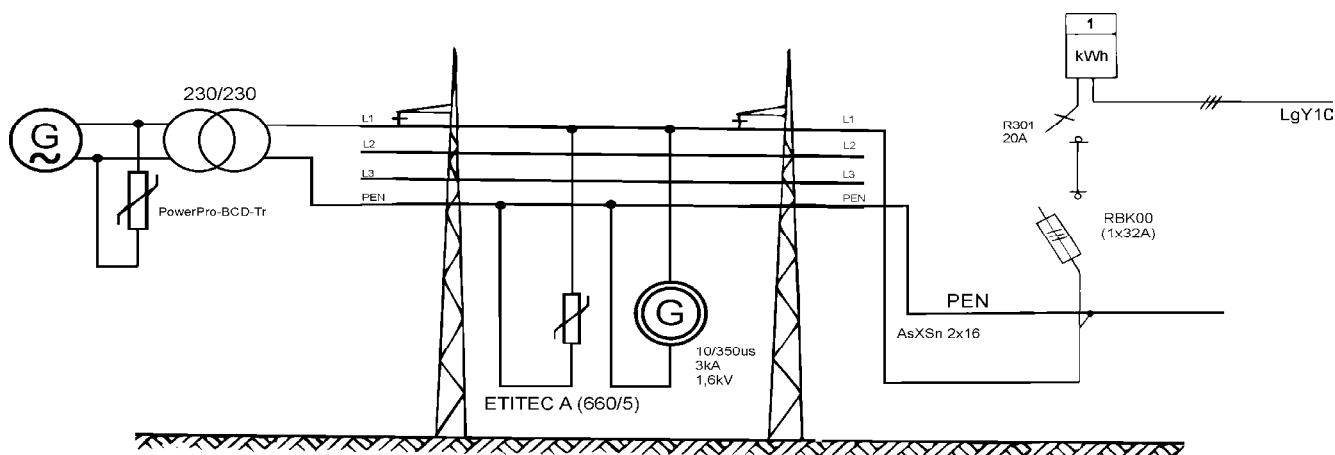
Prowadzone obecnie przez Ministerstwo Gospodarki zmiany w prawie energetycznym zakładają konieczność wymiany liczników energii elektrycznej. Ten krok mający dostosować nasz kraj do standardów europejskich niesie za sobą ryzyko zwiększenia strat powstałych w wyniku wyładowań piorunowych, co bezpośrednio przekłada się na konieczności prowadzenia badań w tym zakresie.

3. ANALIZA SKUTKÓW PRZEPŁYWU PRĄDU UDAROWEGO PRZEZ LINIOWE OGRANICZNIKI PRZEPIĘĆ W NAPIĘTRZNEJ SIECI PRZESYŁOWEJ NISKIEGO NAPIĘCIA

Aby przeanalizować skutki przepływu prądu udarowego przez liniowe ograniczniki przepięć w napowietrznej sieci przesyłowej niskiego napięcia zbudowano stanowisko pomiarowe składające się z:

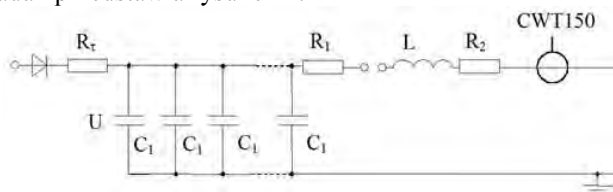
- linii napowietrznej niskiego napięcia o długości 8 metrów ($4 \times AL\ 50\ mm^2$),
- izolowanego od ziemi źródła zasilania 1-f 230V podłączonego za pośrednictwem transformatora separującego do linii napowietrznej, zabezpieczonego od przepięć ogranicznikiem ucinającym klasy 1 ($I_{\max}(10/350\mu s)=25kA$),
- generatora prądów udarowych o kształcie 10/350 μs , wartości szczytowej 3 kA przy napięciu znamionowym baterii kondensatorów $U_n=1,6\ kV$,
- przyłącza kablowego w obudowie OPS 26 + OPS 24,
- 1-fazowego elektronicznego licznika energii elektrycznej,
- liniowego ogranicznika przepięć $I_n=5\ kA$, $I_{\max}(8/20\mu s)=25kA$.

Schemat stanowiska pomiarowego zamieszczono na rysunku 3. Podczas badań wykorzystano wysokonapięcio-



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe do badania skutków niewłaściwego doboru ogranicznika przepięć na licznik energii elektrycznej

wy generator prądowy, który wytwarzał udary prądowe o wartości szczytowej do 50 kA i różnych kształtach. Zmiana parametrów generowanych uderów dokonywana jest poprzez wymianę elementu rezystancyjno-indukcyjnego. Uproszczony schemat generatora wykorzystywanego do badań przedstawia rysunek 4.

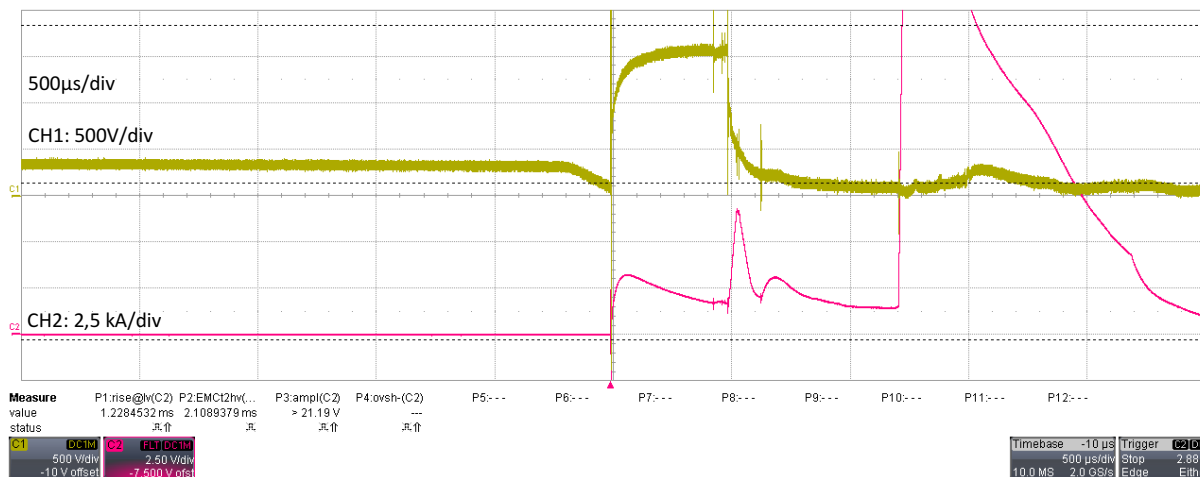


Rys. 4. Generator uderów prądowych wykorzystany podczas badań, gdzie:

C_1	–	246,8 μF
L, R_1, R_2	–	zmiennne wartości zależne od żadanego kształtu uderu prądowego
R_t	–	rezystor ograniczający czas ładowania generatora
CWT150	–	cewka Rogowskiego do pomiaru prądu

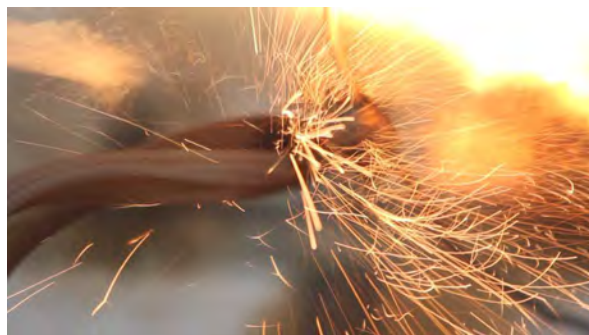
Do pomiaru napięcia na wejściu licznika energii elektrycznej wykorzystano wysokonapięciową sondę firmy Tektronix typu P6015A $U_{\text{max}}=40 \text{ kV}$ o płaskiej charakterystyce przenoszenia w zakresie od 10 Hz do 30 MHz (pasmo 3dB) przy napięciu 6 kV oraz oscyloskop cyfrowy INSTEK GDS-840S. Oscyloskop miał możliwość rejestracji otrzymanych przebiegów w formacie cyfrowym na pamięć przenośną typu USB. Do pomiaru prądu na wyjściu generatora wykorzystano cewkę Rogowskiego firmy PEM typu CWT150 $I_n=30 \text{ kA}$, o płaskiej charakterystyce przenoszenia w zakresie od 0,2 Hz do 16 MHz (pasmo 3dB).

Podczas badań prąd uderowy o wartości szczytowej 3 kA 10/350 μs doprowadzono do przewodów linii napowietrznej w połowie jej długości. W odległości 50 cm od punktu wprowadzenia prądu zainstalowano liniowy ogranicznik przepięć. Na skrajnym końcu linii podłączono izolowane od ziemi źródło napięcia 1-f 230V. Dzięki temu przeprowadzono pomiary w układzie z pracującym licznikiem energii elektrycznej (próba pod napięciem). Na przeciwnym krańcu linii zainstalowano przyłącze kablowe w obudowie OPS 26 + OPS 24 zgodnie ze schematem zamieszczonym na rys. 3. Podczas próby zarejestrowano przebieg napięcia na wejściu licznika energii elektrycznej oraz prąd na wyjściu generatora - rys. 5.

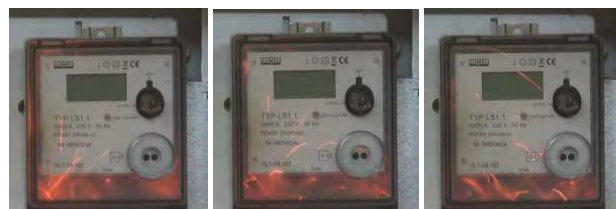


Rys. 5. Przebieg napięcia L1-PEN na wejściu licznika energii elektrycznej (CH1) oraz prądu na wyjściu generatora (CH2)

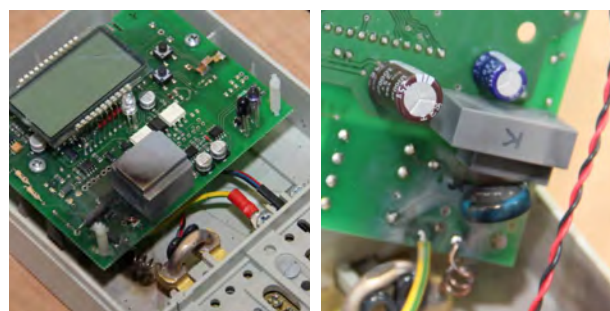
W wyniku przeprowadzonej próby doszło do eksplozji zainstalowanego warystorowego ogranicznika przepięć, bezpiecznika mocy i topikowego w przyłączy. Zaobserwowano również uszkodzenie licznika energii elektrycznej. Na kolejnych rysunkach zaprezentowano zdjęcia poklatkowe wykonane podczas badań.



Rys. 6. Eksplozja liniowego ogranicznika przepięć



Rys. 7. Zdjęcia poklatkowe licznika energii elektrycznej podczas badań



Rys. 8. Uszkodzony licznik energii elektrycznej



Rys. 9. Zniszczone bezpieczniki

Po zakończeniu testów, wymianie zniszczonych bezpieczników zaobserwowano, że licznik energii elektrycznej pomimo uszkodzenia w dalszym ciągu dostarcza energię elektryczną do odbiorcy nie pełniąc swojej funkcji kontrolno-rozliczeniowej.

4. WNIOSKI

Podsumowując przeprowadzone badania należy zauważyć, iż najbliższym czasie zakłady energetyczne staną przed koniecznością wymiany liczników energii elektrycznej. Bodźcem do działania jest zmieniające się prawo i postęp technologiczny. Minimalizacja kosztów własnej działalności będzie wymagała od dostawców energii zwiększenia niezawodności sprzętu im podległego. Należy również zauważyć, że w niedalekiej przyszłości odczyt energii elektrycznej

będzie prowadzony zdalnie. Stąd też problem właściwej ochrony liczników przed przepięciami w niedalekiej przyszłości będzie miał coraz większe znaczenie.

Należy zauważyć, iż stosowanie ograniczników przepięć typu 2 do ochrony przyłączy napowietrznych jest niewystarczające. Ta błędna i często stosowana praktyka w zakładach energetycznych może w przyszłości doprowadzić do lawinowo rosnących strat związanych z koniecznością wymiany liczników energii elektrycznej. Jest ona również sprzeczna ze strefową koncepcją ochrony odgromowej i przepięciowej [1].

BIBLIOGRAFIA

1. Sowa A.W.: Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa. Wydanie II poprawione. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP. Warszawa 2005.
2. DEHN + SÖHNE. Lightning Protection Guide. Neu-markt Germany 2007.
3. IEC 61312-1:1995. Protection against lightning electromagnetic impulse - Part 1: General principles.
4. IEC 62305-1:Ed2:2010-12. Protection against lightning – Part 1: General principles.
5. ANSI/IEEE Std 81-1983 - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.

ENERGY METERS DAMAGES AS A RESULT OF INPROPER SURGE PROTECTION DEVICES SELECTION

Paper describes overvoltage hazard for energy meters. Study were made for circuit that consist of overhead transmission line, low voltage power supply, high voltage current surge generator, surge protection device (SPD) and energy meter. Typical lightning surge current (3 kA; 10/350 μ s) where produced by generator and conducted to line. Test were provided for fully functional circuit supplied from isolated from ground power source. As a result of that explosion of SPD were observed. Also energy meter were damaged. Investigation proves that SPD class 2 are not sufficient for energy meter protection which are supplied from overhead transmission lines.

Key-words: lightning protection, energy meters, surge protection devices, SPD

OCENA CIĄGŁOŚCI POŁĄCZEŃ URZĄDZENIA PIORUNOCHRONNEGO NA PODSTAWIE POMIARÓW METODĄ UDAROWĄ

Stanisław WOJTAS

Politechnika Gdańska

tel: +48583471611, e-mail: s.wojtas@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: Wskutek przyłączenia wszystkich elementów uziemionych związanych z obiektem budowlanym do szyny ekwipotencjalnej powstaje rozległy i skomplikowany układ uziemień. Stosowane powszechnie systemy dociepleń często utrudniają dostęp zacisków kontrolnych urządzenia piorunochronnego obiektu. Ocena parametrów i ciągłości połączeń takiego urządzenia może być trudna do realizacji za pomocą metod klasycznych, które podczas okresowej kontroli wymagają odłączania poszczególnych elementów uziemiających od szyny ekwipotencjalnej oraz rozłączania zacisków kontrolnych. Zaprezentowano wyniki badań na obiektach rzeczywistych popartych symulacjami komputerowymi, które wskazują, że pomiary wykorzystujące metodę udarową mogą być bardzo pomocne w ocenie takich układów ochrony odgromowej. W pracy podano warunki geometryczne obiektu, w których na podstawie pomiarów urządzenia piorunochronnego metodą udarową bez rozłączania zacisków kontrolnych można wnioskować o ciągłości połączeń przewodów uziemiających z uziomem.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, pomiary uziemień, metoda udarowa pomiaru uziemień.

1. WSTĘP

Współczesne obiekty budowlane mają elewacje zawierające warstwy ocieplające oraz są wyposażone w główną szynę wyrównania potencjałów, co może utrudniać lub uniemożliwiać rozłączanie systemów uziemiających poszczególnych mediów w celu przeprowadzenia indywidualnych testów kolejnych elementów uziomu. Testy takie mają na celu nie tylko określenie wartości impedancji uziomów, ale także ocenę systemu połączeń elementów urządzenia piorunochronnego. Miejscami najczęściej podlegającymi sprawdzeniu ciągłości połączeń są połączenia przewodów uziemiających z uziomami, bo tam najczęściej rozpoczyna się proces korozji elementów przewodzących.

Znaczenie sprawnego oraz poprawnie działającego systemu ochrony odgromowej i przeciwpięciowej rośnie nie tylko wskutek stosowania coraz większej liczby wrażliwych na przepięcia urządzeń, ale także z powodu wyższej w ostatnich latach liczby wyładowań atmosferycznych w porównaniu ze średnią liczbą wyładowań rejestrowaną w badaniach z ubiegłego wieku [1]. Jedną z przyczyn rosnącej liczby wyładowań atmosferycznych może być wzrost średniej temperatury. W literaturze panuje zgodna opinia o dodatniej korelacji między temperaturą a intensywnością wyładowań atmosferycznych.

W materiałach na ten temat można spotkać stwierdzenia, że wzrost średniej temperatury o 1 stopień prowadzi do wzrostu wyładowań w granicach od 10 do nawet 100% [2].

Poprawnie przeprowadzone pomiary parametrów uziemień, a także właściwa interpretacja uzyskanych wyników, są bardzo ważnymi elementami zapewniającymi bezpieczeństwo obsługi oraz poprawną pracę urządzeń elektrycznych i elektronicznych we wszelkich obiektach wyposażonych w uziemienia ochronne i robocze oraz narażonych na oddziaływanie przepięć spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi. Metody właściwej oceny uziemień odgromowych powinny być przedmiotem wytycznych normalizacyjnych. Jednak procedury takiej oceny w aktualnych normach są formułowane dość niejednoznacznie i wymagają od użytkownika sporej dozy samodzielnej interpretacji zarówno na etapie projektowania jak również testów eksploatacyjnych oraz opracowywania wyników pomiarów.

Ogólnie można stwierdzić, że uziemienia wyraźnie dzielą się na dwie kategorie: pracujące przy częstotliwościach sieciowych oraz odgromowe, jednak pomiary rezystancji obu typów uziemień wykonuje się najczęściej przy prądach niskiej częstotliwości, a więc metodami określanymi, jako statyczne. Rezystancja uziomu zmierzona w takich warunkach może być miarą przydatności uziomu tylko w zakresie częstotliwości sieciowych, a nie w dziedzinie szybkich udarów prądowych charakterystycznych dla wyładowań atmosferycznych. Ocena zdolności ochronnej uziemienia powinna uwzględniać jego właściwości przy przebiegach o parametrach czasowych podobnych do tych, jakie panują podczas rzeczywistego wyładowania [3;4]. Wprowadzona w ostatnich latach norma PN-EN 62305 [5] w przeciwieństwie do poprzednio obowiązującej normy PN-E 05003 [6] nie ogranicza długości uziomów odgromowych, a zawiera jedynie uwagę, że „redukcja rezystancji uziemienia przez wydłużenie jest praktycznie możliwa do 60 m”.

Celem pracy jest analiza możliwości oceny ciągłości połączeń przewodów uziemiających ze zintegrowanym systemem uziomów na podstawie pomiarów jego impedancji metodą udarową bez rozłączania zacisków kontrolnych testowanego urządzenia piorunochronnego.

2. KONTROLA STANU URZĄDZENIA PIORUNOCHRONNEGO

Wśród wykonawców pomiarów często dominuje przekonanie, że procedura kontrolna powinna odbywać się w oparciu o wskazania aktualnej edycji normy. Jednak w przypadku, gdy kontrolowany obiekt został zbudowany w czasie obowiązywania starszej normy, wtedy obowiązuje w stosunku do niego zasada ochrony zastanej i postanowienia tej normy są brane pod uwagę podczas kontroli. W takiej sytuacji jedynie odchylenia od przepisów obowiązujących podczas budowy będą wykazane w protokole pokontrolnym, jako usterki [7].

Kryterium przydatności uziemienia w obiektach podlegających ochronie obostrzonej i specjalnej stanowi wg PN-E 05003.03:1989 (p.1.3.7) rezystancja udarowa określana jako: „rezystancja między uziomem a ziemią odniesienia mierzona przy prądzie udarowym o kształcie odwzorowującym prąd pioruna”. Norma ta określa również sprzęt potrzebny do wyznaczenia tej rezystancji, jako mostek (miernik) udarowy, czyli: „urządzenie pomiarowe umożliwiające pomiar rezystancji tylko tej części uziemienia, która bierze udział w odprowadzaniu prądu pioruna”. Pomiar rezystancji udarowej wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych, ponieważ celem tego pomiaru jest określenie rezystancji wypadkowej uziemienia, czyli tej, która bierze udział w odprowadzaniu z danego punktu prądu piorunowego do gruntu [6].

Przyjęta w ostatnich latach norma PN-EN 62305 do stosowania w systemach ochrony odgromowej obiektów budowlanych wprowadza pojęcie „umownej impedancji uziemienia” określonej, jako „stosunek wartości szczytowej napięcia na uziomie do wartości przepływającego w nim prądu, które na ogół nie występują jednocześnie” [5].

Impedancję udarową wyznacza się zgodnie z definicją zawartą w normach [5;6] według zależności:

$$Z_m = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (1)$$

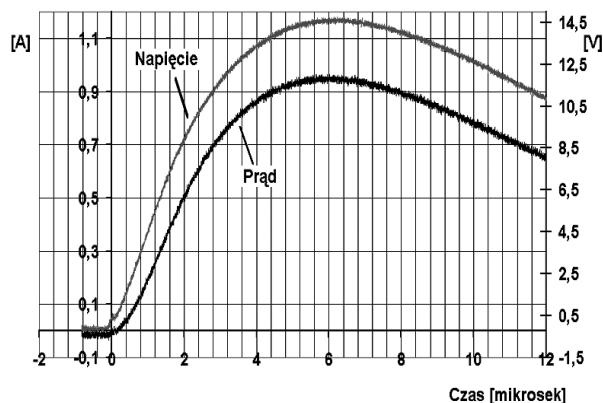
gdzie $U_{\max}$ oraz $I_{\max}$ oznaczają odpowiednio wartości maksymalne spadku napięcia na uziomie oraz prądu wymuszającego ten spadek i zostały pokazane na rysunku 1. W przypadku uziomu skupionego np. pionowego o niewielkiej długości można zaobserwować brak przesunięcia czasowego między ekstremami prądu i napięcia (rysunek 1a). Dla bardziej rozległego uziomu spadki indukcyjne powodują przesunięcie między wartościami maksymalnymi obu przebiegów, jak to można zobaczyć na rysunku 1b, a więc impedancja uziemienia jest definiowana umownie w dziedzinie czasu – iloraz wielkości występujących w różnych czasach.

Sprawdzanie ciągłości połączeń jest ważnym elementem okresowej kontroli zewnętrznych urządzeń piorunochronnych. Najczęściej ulegają korozji i tracą ciągłość połączenia przewodów uziemiających z uziomami, a zaciski probiercze umożliwiają sprawdzanie ciągłości. Takie prace kontrolne są uciążliwe, a często wręcz niemożliwe do realizacji ze względu na brak dostępu do takich zacisków lub po prostu na ich brak.

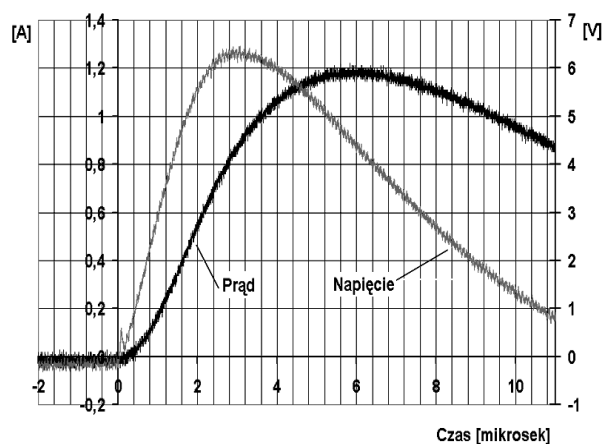
Rysunek 2 pokazuje rozptył prądów podczas pomiarów uziemień. Miernik oznaczony numerem 1 jest dołączony do przewodu uziemiającego, który ma połączenie z uziomem. Praktycznie cały prąd i miernika wpływa do uziomu, jako i_1 , a tylko znikoma część tego prądu oznaczona, jako i_2 trafia do uziomu poprzez przewody odprowadzające oraz zwody urzą-

dzenia piorunochronnego. W przypadku oznaczonym numerem 2 miernik jest dołączony do przewodu uziemiającego, który nie ma bezpośredniego połączenia z uziomem. Całkowity prąd i miernika wpływa do uziomu poprzez system przewodów odprowadzających oraz zwodów obiektu. Spadek napięcia na tych elementach powiększa wynik pomiaru. Gdy pomiar odbywa się przy niskiej częstotliwości zbliżonej do sieciowej, ten dodatkowy spadek napięcia wynika wyłącznie z rezystancji przewodów i praktycznie nie wpływa na uzyskany wynik. Podczas pomiarów z wykorzystaniem prądów szybkochłonnych lub udarowych spadek napięcia na tych przewodach jest znacznie większy, wynikający z ich indukcyjności własnej.

a)



b)

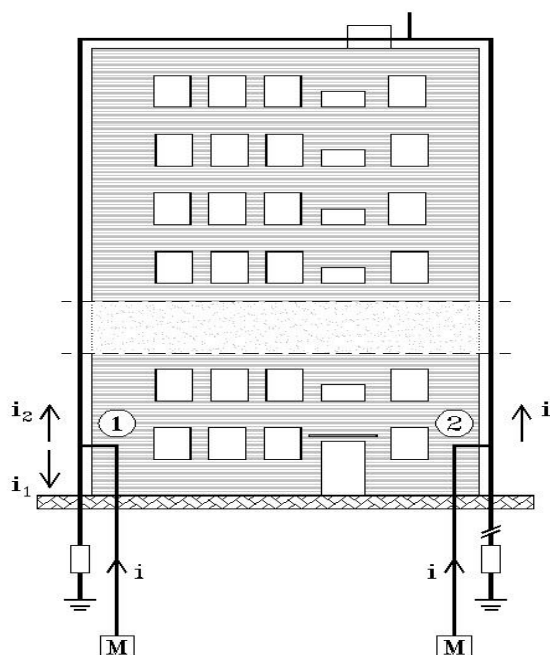


Rys. 1. Oscylogramy prądu i spadku napięcia na uziomie skupionym – a) i rozległym – b) generowane miernikiem udarowym uziemień

Jeżeli podczas pomiarów z dołączaniem miernika udarowego do kolejnych przewodów odprowadzających uzyskuje się zbliżone wyniki, wtedy można stwierdzić, że wszystkie przewody uziemiające mają bezpośrednie połączenie ze wspólnym systemem uziomów. W przypadku, gdy jeden (lub więcej) z uzyskanych wyników jest wyraźnie wyższy od pozostałych, można wnioskować, że te przewody uziemiające nie mają bezpośredniego połączenia z uziomem. Wzrost rejestrowanej impedancji wynika z wydłużenia drogi przepływu prądu pomiarowego i wynikających stąd dodatkowych spadków indukcyjnych, jak to zostało pokazane w przypadku oznaczonym numerem 2 na rysunku 2.

W pracy podjęto próbę odpowiedzi na pytanie o minimalną długość przewodów odprowadzających wynikającą z wyso-

kości obiektu, która spowoduje zauważalny wzrost otrzymanych wartości impedancji uziomu, jeżeli dany przewód nie ma połączenia z uziomem.



Rys. 2. Rozpyły prądu miernika udarowego M podczas pomiaru impedancji urządzenia piorunochronnego bez rozłączania zacisku kontrolnego w przypadku prawidłowego połączenia przewodu uziemiającego z otokiem - przewód uziemiający oznaczony jako 1 i w sytuacji braku takiego połączenia - przewód 2

3. WYNIKI POMIARÓW I SYMULACJI KOMPUTEROWYCH IMPEDANCJI UZIOMÓW

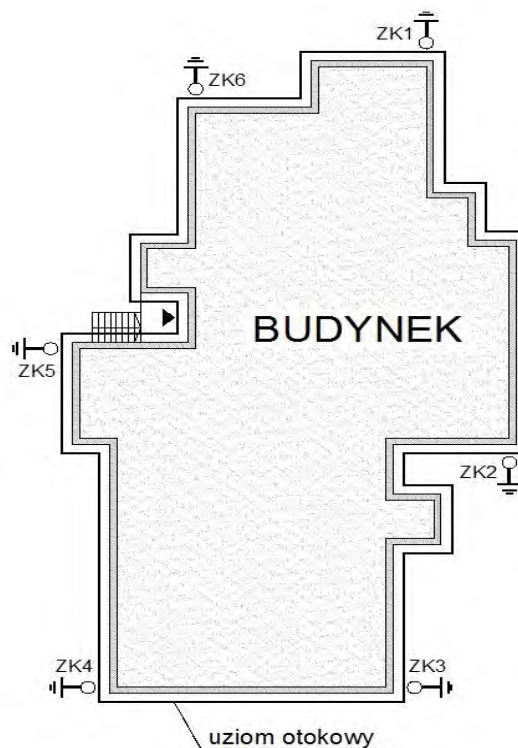
Na rysunku 3 przedstawiono rzut przyziemia 1-klatkowego budynku mieszkalnego o 8 kondygnacjach z zaznaczonym schematem urządzenia piorunochronnego zewnętrznego. Instalacja odgromowa budynku zawiera 6 przewodów odprowadzających, z których każdy na wysokości ok. 1 m nad ziemią był zaopatrzony w zacisk kontrolny. Przewody uziemiające były dołączone do uziomu otokowego budynku..

W przedstawionym obiekcie wykonano pomiary rezystancji udarowej uziemienia w trzech konfiguracjach połączeń, których ideę przedstawia rysunek 4. Podczas badań został użyty dostępny na rynku miernik o czasie czoła uderu pomiarowego równym 4 μ s. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 5 w postaci histogramu oznaczonego jako „pomiar” z następującymi opisami:

1. Z_Z – zwarty zacisk kontrolny,
2. Z_D – miernik dołączony do przewodu poniżej rozwartego zacisku kontrolnego,
3. Z_G – miernik dołączony do przewodu powyżej rozwartego zacisku kontrolnego.

Zaprezentowane wyniki wskazują, że przy zwartym zacisku kontrolnym (Z_Z) otrzymuje się wartości obniżone o ok. 10% w stosunku do zacisku rozwartego (Z_D). Przy obiektach niższych różnice te mogą być nieco większe ze względu na mniejszą indukcyjność przewodów bocznikujących mierzone połączenie z uziomem. Wyniki umieszczone na histogramie oznaczonym, jako Z_G odpowiadają sytuacji, w której mierzony przewód uziemiający jest przerwany poniżej powierzchni gruntu. Analiza pomiarów wszystkich przewodów odprowadzających obiektu wykonanych bez ich rozłączania

pozwole na szybkie wykrycie przewodu, który nie ma galwanicznego połączenia z otokiem uziemienia, ponieważ uzyskany w tym przypadku wynik będzie znacznie przewyższał (w przypadku analizowanego budynku około dwukrotnie) poziom wyników uzyskanych dla pozostałych przewodów. Wzrost wartości impedancji w przypadku oznaczonym, jako Z_G wynika z tego, że przepływ prądu odbywa się poprzez przewody odprowadzające i zwody na dachu budynku, a wynikające stąd indukcyjne spadki napięcia zwiększają otrzymany wynik impedancji przy takiej konfiguracji pomiaru. W takim przypadku można spodziewać się wzrostu potencjału w urządzeniu piorunochronnym pod wpływem ewentualnego wyładowania atmosferycznego.



Rys. 3. Rzut przyziemia budynku mieszkalnego z zaznaczonymi przewodami odprowadzającymi i zaciskami kontrolnymi ZK oraz uziomem otokowym

W celu przeprowadzenia symulacji komputerowych i obliczeń impedancji uziemień układ połączeń urządzenia piorunochronnego omawianego budynku mieszkalnego został zamodelowany w programie PSpice, a schemat zastępczy układu przedstawia rysunek 6. Parametry schematu zastępczego uziomu w postaci czwórników zostały wyznaczone jako iloczyn długości danego elementu uziomu i jego parametrów jednostkowych R' , L' , G' oraz C' obliczonych na podstawie następujących zależności zamieszczonych w literaturze [8]:

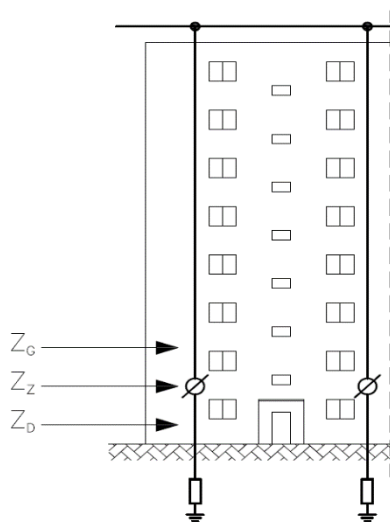
$$R' = \frac{\rho_c}{\pi \cdot a^2} \quad (2)$$

$$G' = \frac{2 \cdot \pi}{\rho \left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} - 1 \right)} \quad (3)$$

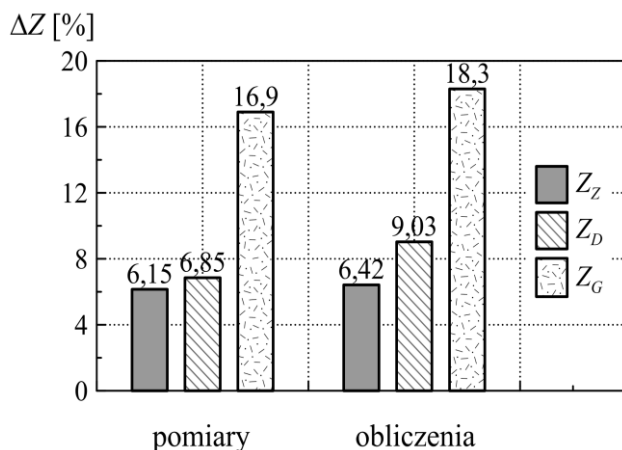
$$L' = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} - 1} \quad (5)$$

gdzie: ρ_c oznacza rezystywność materiału przewodu, a – promień przewodu, ρ – rezystywność gruntu, h – głębokość pograżenia uziomu, l – długość przewodu, μ_o – przenikalność magnetyczną próżni, ϵ_o – przenikalność dielektryczną próżni, ϵ_r – przenikalność względną gruntu



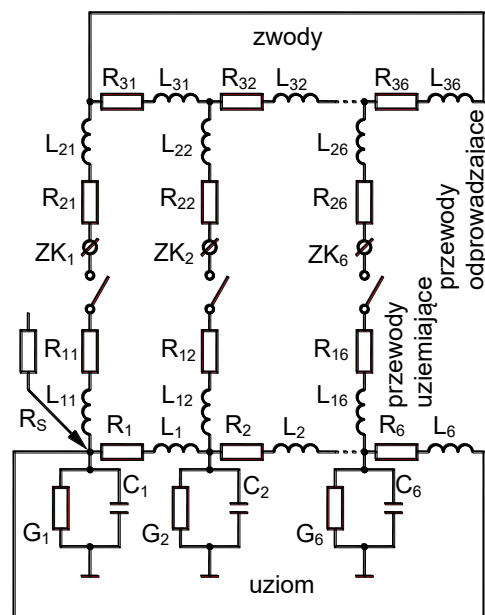
Rys. 4. Ilustracja sposobu podłączenia miernika udarowego podczas pomiaru uziemień 8 kondygnacyjnego budynku mieszkalnego, Z_Z – zwarty zacisk kontrolny, Z_D – miernik podłączony poniżej otwartego zacisku kontrolnego, Z_G – miernik podłączony powyżej otwartego zacisku kontrolnego



Rys. 5. Średnia wartość impedancji udarowej systemu ochrony odgromowej budynku mieszkalnego uzyskane dla poszczególnych przewodów odprowadzających przy połączeniach miernika z uziomem według oznaczeń na rysunku 4 uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń symulacyjnych w układzie z rysunku 6

W tak zestawionym schemacie zastępczym urządzenia piorunochronnego budynku przeprowadzono w programie PSpice symulację pomiarów impedancji udarowej według procedury połączeń realizowanej podczas badań

rzeczywistych przedstawionych na rysunku 4. Zamodelowany generator udarów prądowych zapewniał udary o czasie czoła 4 μ s, a więc analogiczne z udarami generowanymi przez miernik podczas badań obiektu rzeczywistego [10]. Wyniki uzyskane w oparciu o wyrażenie (1) z tak wykonanych badań symulacyjnych zostały przedstawione na rysunku 5 jako histogramy z opisem „obliczenia”. Otrzymane wartości impedancji z pomiarów i symulacji, zwłaszcza impedancji oznaczonych jako Z_Z oraz Z_G , są zbliżone i różnice nie przekraczają 10%. Zaprezentowane wyniki obliczeń symulacyjnych wskazują, że przyjęty schemat zastępczy został zrealizowany przy poprawnych założeniach i może być wykorzystany przy badaniach wpływu wysokości budynku na otrzymywane wartości impedancji Z_Z oraz Z_G .



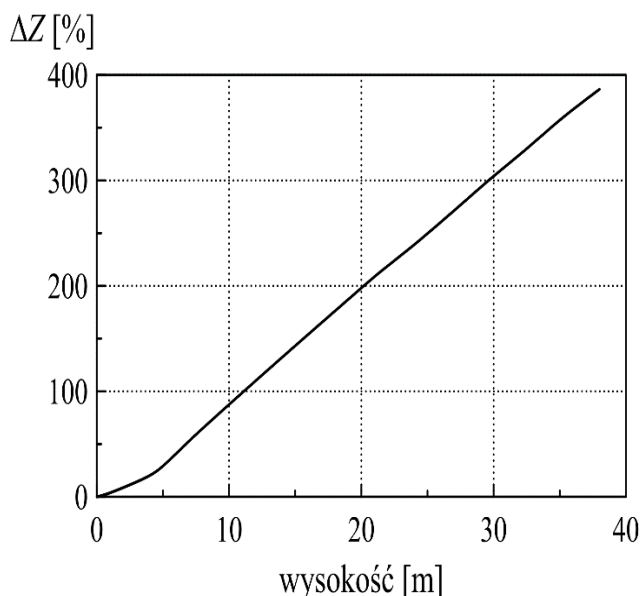
Rys. 6. Schemat zastępczy urządzenia piorunochronnego budynku, elementy z indeksami dwucyfrowymi reprezentują przewody odprowadzające i uziemiające oraz zwody, a z indeksami jednocyfrowymi – poszczególne fragmenty uziomu

Zmianę wysokości budynku realizowano na schemacie z rysunku 6 poprzez różnicowanie wartości L oraz R przewodów odprowadzających, a więc elementów L_{21} do L_{26} oraz R_{21} do R_{26} [11]. Wpływ wysokości budynku na wartość pomiaru przy braku połączenia przewodu uziemiającego z uziomem była wyznaczana jako przyrost impedancji ΔZ określonej wyrażeniem:

$$\Delta Z = \frac{Z_G - Z_Z}{Z_Z} \cdot 100\%, \quad (6)$$

gdzie impedancje Z_G oraz Z_Z zostały zdefiniowane na rysunku 4. Wyniki pokazane na rysunku 7 wskazują, że już przy obiekcie o 2 kondygnacjach uzyskuje się około 50% wzrost impedancji, a przy 4 kondygnacjach wartość impedancji wzrasta około 2-krotnie. Taka skala wzrostu impedancji mierzonej dla poszczególnych przewodów odprowadzających jest bardzo łatwa do zauważenia w praktyce pomiarowej. W posumowaniu można stwierdzić, że brak połączenia przewodu uziemiającego z uziomem może być łatwo wykryty na podstawie pomiarów metodą udarową bez rozłączania zacisków kontrolnych.

W praktyce eksploatacyjnej oprócz korozji powodującej całkowite przerwanie ciągłości przewodu uziemiającego można spotkać wzrost rezystancji połączenia tego przewodu z uziomem, zwłaszcza, gdy jest to połączenie skręcane. W celu oceny możliwości wykrycia zwiększonej rezystancji takiego połączenia poprzez pomiary impedancji uziomu metodą udarową przeprowadzono badania symulacyjne. Podczas tych badań schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 6 był modyfikowany w ten sposób, że analizowany przewód uziemiający był połączony z uziomem poprzez rezystor R_s , jak to zostało pokazane na rysunku 6. Wartości R_s były zmieniane w przedziale od 0 do 150 Ω .

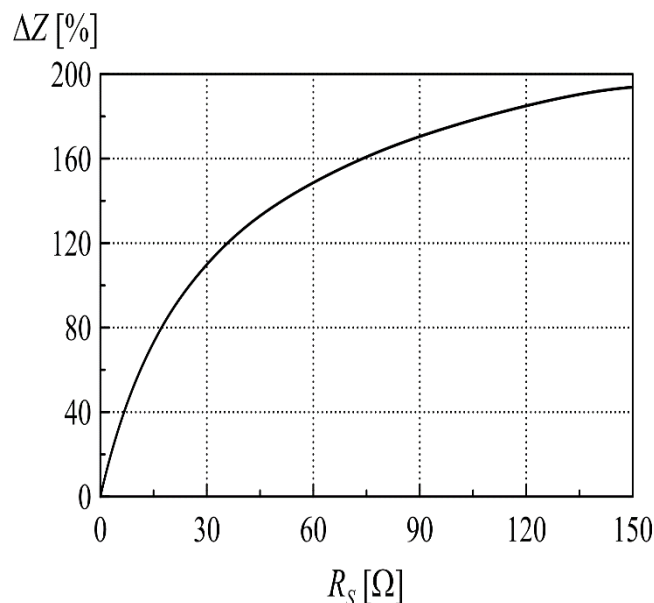


Rys. 7. Wyniki symulacji wpływu wysokości analizowanego budynku mieszkalnego na przyrost wzrost impedancji udarowej mierzonej przy braku bezpośredniego połączenia danego przewodu uziemiającego z uziomem

Wyniki symulacji zostały pokazane na rysunku 8 w postaci wykresu wzrostu rejestrowanej impedancji ΔZ w funkcji wtrącanej do obwodu rezystancji styku R_s . Analiza wykresu wskazuje, że pojawienie się dodatkowej rezystancji styku przewodu uziemiającego z uziomem wartości 10 Ω powoduje około 50% wzrost mierzonej impedancji udarowej. Rezystancja styku na poziomie około 30 Ω już skutkuje około 100% wzrostem mierzonej impedancji. W praktyce eksploatacyjnej wzrost rezystancji przedsięwzięcia na styku przewód uziemiający oraz uziom może pojawiać się, gdy zamiast połączeń spawanych zostały zastosowane zaciskowe połączenia rozłączne. Wzrost rezystancji połączeń urządzenia piorunochronnego, nawet niedostępnych, umieszczonych w ziemi, może być wykrywany za pomocą pomiarów udarowych bez rozłączania zacisków kontrolnych. Możliwość taka jest tym bardziej cenna, że w niektórych urządzeniach piorunochronnych, montowanych zwłaszcza w strefach zagrożonych wybuchem, są stosowane połączenia spawane, których podczas badań kontrolnych nie można rozłączać [9].

W literaturze pojawiają się stwierdzenia o braku konieczności mierzenia rezystancji statycznej podczas sprawdzania stanu technicznego urządzenia piorunochronnego [7]. Mała wartość rezystancji uziemienia, a takich wyników najczęściej należy oczekiwać w przypadku rozległych uziemień, nie musi świadczyć o jego dobrym stanie, podobnie jak wysoki wynik rezystancji nie musi dyskwalifikować przydatności uziomu w systemie ochrony odgromowej. Dla wydania

ostatecznej oceny konieczna jest znajomość konfiguracji sieci uziemiającej i weryfikacja połączeń zapewniających ciągłość przewodu uziemiającego oraz połączeń przewodów odprowadzających z uziomem. W wielu przypadkach nieodzownym warunkiem oceny uziemień może być ich odkopanie, a to często okazuje się niewykonalne i wtedy metoda udarowa może stanowić rozsądną alternatywę.



Rys. 8. Wyniki symulacji wpływu rezystancji styku przewodu uziemiającego z uziomem na wyniki pomiarów impedancji udarowej realizowanych bez rozłączania zacisków kontrolnych urządzenia piorunochronnego budynku mieszkalnego o 8 kondygnacjach

5. WNIOSKI

Ocena stanu urządzeń piorunochronnych współczesnych obiektów kubaturowych podczas okresowych testów sprawdzających z zastosowaniem klasycznych mierników niskiej częstotliwości okazuje się często niemożliwa ze względu na utrudniony dostęp z powodu zewnętrznych warstw docieplających oraz złożonego systemu wzajemnych połączeń elementów uziemionych z wykorzystaniem szyn ekwipotencjalnych.

Pomiary z zastosowaniem mierników wykorzystujących przebiegi szybkozmiennych dołączanych kolejno do poszczególnych przewodów odprowadzających bez rozłączania zacisków kontrolnych pozwalają wykryć brak połączenia danego przewodu z uziomem lub wzrost rezystancji takiego połączenia.

Zaprezentowane wyniki pomiarów oraz obliczeń symulacyjnych wskazują, że wraz ze wzrostem długości przewodów odprowadzających, a więc wzrostem wysokości testowanego obiektu, rośnie wartość impedancji rejestrowanej dla wadliwego przewodu uziemiającego. Wzrost impedancji o około 100% uzyskuje się już dla wysokości obiektu powyżej 10 m przy braku połączenia lub przy rezystancji połączenia powyżej 20 Ω .

Metody udarowe i wysokoczęstotliwościowe pozwalają oceniać przydatność uziemień do celów ochrony odgromowej bez czasochłonnych zabiegów związanych odłączaniem dalej położonych mas metalowych oraz podnoszą bezpieczeństwo obiektów chronionych podczas wyładowań atmosferycznych ze względu na bardziej wiarygodną ocenę systemu uziemień.

BIBLIOGRAFIA

1. Łoboda M., Thern S., Marciniak R.: Central European Lightning Detection Network and Lightning Data in Poland, XIII International Conference on Electromagnetic Disturbances, 24-26 Sept. 2003, Białystok, Poland
2. Price C.: Thunderstorms, Lightning and Climate Change, 29 ICLP, Uppsala, 2008
3. Wojtas S.: Lightning impulse efficiency of horizontal earthings, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10, 2012
4. Wojtas S., Wołoszyk M.: Ocena uziemień odgromowych według aktualnych przepisów normalizacyjnych, VI Krajowa Konferencja N-T "Urządzenia Piorunochronne w Projektowaniu i Budowie, SEP Kraków, 20.10.2011
5. PN-EN 62305-1:2008 - Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne.
6. PN-E 05003-1:1986 - Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne.
7. Musiał E.: Kontrola stanu technicznego urządzeń ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej, Biul. SEP INPE, 2008, Nr 100, s. 18-36
8. Velazquez R. Mukhedkar D.: Analytical modelling of grounding electrodes transient behavior, IEEE Trans. On PAS, vol. PAS 103, No 6, 1984
9. PN-E 05003-3:1989 – Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona obostrzona
10. Szuman M.: Badania ciągłości połączeń przewodów uziemiających z uziomami, Praca magisterska, Wydział EIA PG, 2014
11. Szpor S., Samuła J.: Ochrona Odgromowa, WN-T, Warszawa, 1983.

CONNECTION CONTINUITY ASSESSMENT OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEM ON THE GROUND OF IMPULSE TESTS

Due to connections of all earthing elements associated with a building structure to equipotential bonding a wide and complicated earthing system is created. Commonly used insulation systems often impede access control terminals of object lightning protection device. Parameters and the continuity assessment of such a device may be difficult to achieve using conventional methods that require disconnections of the individual elements of equipotential grounding as well as disconnecting control terminals. The results of tests on real objects supported by computer simulations that indicate that the measurements using impulse method can be very helpful in assessing such harsh lightning protection systems. The paper presents the geometric conditions of the object in which the measurements impact method lightning protection device without disconnecting the control terminals can be inferred about the continuity of the grounding wires from the earthing electrode.

Keywords: lightning protection, earthing test, effective length of earthing

MODELOWANIE PRZEPIĘĆ POWODOWANYCH WYŁADOWANIAM I ATMOSFERYCZNYMI W UKŁADACH ZASILANIA URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Zofia WRÓBEL

PKP PLK S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie
tel.: 17 7111343e-mail: zwrobel@prz.edu.pl

Streszczenie: Sieci trakcyjne i urządzenia sterowania ruchem kolejowym (srk) obejmując swym zasięgiem znaczne obszary kraju są narażone na oddziaływanie wyładowań atmosferycznych. Zagrożenie to może być wynikiem bezpośredniego trafienia pioruna w sieć trakcyjną czy linię potrzeb nietrakcyjnych (LPN). Może też być wynikiem napięć indukowanych przez pobliskie wyładowania doziemne. Powstałe uszkodzenia urządzeń elektrycznych i elektronicznych lub ich komponentów powodują straty np. w postaci opóźnień pociągów i związanych z tym skutków. Zapobieganie tego rodzaju zakłóceniom jest problemem bardzo złożonym i wymaga wzajemnego połączenia wielu zagadnień, a jedną z metod jest analiza matematyczna.

W referacie przedstawiono wyniki modelowania przepięć indukowanych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. Analizę przeprowadzono w pakiecie Lightning –Inducet OverVoltage (LIOV).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, przepięcia indukowane, modelowanie cyfrowe

1. WPROWADZENIE

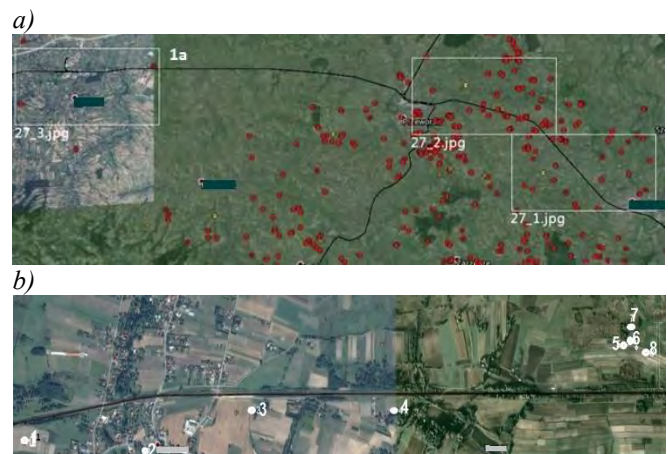
Modelowanie matematyczne jest już od pewnego czasu domeną analiz komputerowych. Znaczna różnorodność dostępnych symulatorów komputerowych, wśród których można znaleźć wyspecjalizowane pakiety obliczeniowe przygotowane do analizy ściśle określonych problemów sprawia, że nie jest konieczne tworzenie własnych programów obliczeniowych. Zaawansowane modele matematyczne zawsze jednak zawierają założenia upraszczające. W symulatorach utworzonych do analizy linii transmisyjnych można znaleźć metody od najczęściej stosowanych, jak: metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (Finite Difference Time Domain), metoda elementów skończonych (Finite Element Method), metoda momentów (Method of Moment), metoda macierzy linii transmisyjnej (Transmission Line Matrix) po rzadziej stosowane, jak: metoda elementów brzegowych (Boundary Element Method) i metoda linii (Method of Lines) stosowana przez firmę Eagleware [1].

Wybrany do modelowania przepięć indukowanych pakiet LIOV [2] został utworzony w wyniku współpracy kilku uczelni europejskich: Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu w Bolonii, Laboratorium Techniki Wysokich Napięć

Szwajcarskiego Instytutu Technologicznego i Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu "La Sapienza" w Rzymie.

2. PRZYJĘTE DO ANALIZY MODELE UKŁADÓW

Na rysunkach 1.a i 1.b zamieszczono przykładowe, zarejestrowane wzdłuż trasy kolejowej wyładowania atmosferyczne. Dla wybranych udarów wyznaczono w artykule przepięcia indukowane. Wartości wybranych udarów zamieszczono odpowiednio w tabelach 1 i 2.



Rys. 1. Fragmenty linii kolejowej z zarejestrowanymi wyładowaniami atmosferycznymi podczas burz w dniach:
a) 27 maja 2014 r. [3] i b) 17 lipca 2014 r. [4]

Numerację udarów z rysunku 1.a celowo pominięto, ponieważ w przedstawionej analizie z tego zapisu wykorzystano tylko dane udaru o wartości maksymalnej, oznaczonego na rysunku 1.a jako 1a.

Pozostałe wyładowania atmosferyczne mieściły się na dwóch osobnych zdjęciach oznaczonych jako 27_1 i 27_2 na ogólnym zdjęciu (rys. 1.a). Dodatkowo, na rysunku 1b zaznaczono osiem wyładowań atmosferycznych wymienionych w tabeli 2.

Tabela 1 – Wybrane, zarejestrowane w dniu 27 maja 2014 r. udary w pobliżu fragmentu linii kolejowej [3]

Data	G (GMT)	Wyładowanie		Wartość maksymalna (kA)	Numer na mapie
		1 - doziemne	+ polaryzacja dodatnia		
		2- między chmurami	- polaryzacja ujemna		
2014.05.27	15:51:09.960	1		157.5	1
2014.05.27	15:20:35.983	1		-018.9	2
2014.05.27	14:41:30.727	1		007.0	3
2014.05.27	15:18:19.539	1		-009.2	4
2014.05.27	15:17:52.940	1		-025.3	5
2014.05.27	15:17:52.901	1		-021.6	6
2014.05.27	15:17:52.864	1		-031.4	7
2014.05.27	15:18:19.397	1		-011.5	8
2014.05.27	15:18:19.365	1		-046.9	9
2014.05.27	15:16:49.721	1		-068.6	10
2014.05.27	15:17:23.547	1		-009.2	11
2014.05.27	15:17:23.528	1		-020.0	12
2014.05.27	15:13:54.591	1		-016.3	13

Tabela 2. Wybrane udary, zarejestrowane w dniu 17 lipca 2014 r. w pobliżu fragmentu linii kolejowej [4]

Data	G (GMT)	Wyładowanie		Wartość maksymalna (kA)	Numer na mapie
		1 - doziemne	+ polaryzacja dodatnia		
		2- między chmurami	- polaryzacja ujemna		
2014.07.17	15:11:54.494	1		-023.2	1
2014.07.17	15:01:26.532	1		-013.3	2
2014.07.17	15:12:11.254	1		-015.3	3
2014.07.17	15:08:20.088	1		-021.9	4
2014.07.17	15:11:55.107	1		-010.7	5
2014.07.17	15:11:54.906	1		-007.8	6
2014.07.17	15:11:54.603	1		-015.6	7
2014.07.17	15:11:54.772	1		-043.8	8

Rejestrację udarów wykonano w systemie LINET. System zanotował bardzo wiele wyładowań w promieniu 2 km od linii kolejowej w czasie obydwu burz. Dokładność lokalizacji miejsca wystąpienia wyładowania wykonano z błędem 150-200 m. Polega ona na zastosowaniu techniki TOA (Time-of-Arrival) zoptymalizowanej dzięki wykorzystaniu systemu GPS przy średnim błędzie rozdzielczości czasu dla całego systemu wynoszącym 0,2 μ s. W zamieszczonych tabelach 1 i 2 pominięto dane dotyczące lokalizacji udarów tj. długość i szerokość geograficzną.

3. MODELOWANIE NAPIĘĆ INDUKOWANYCH

Zgodnie z normą [5] wyróżnia się trzy rodzaje wyładowań: wyładowanie dodatnie, pierwszą składową wyładowania ujemnego i składowe kolejne (sekwencyjne) [6]. Prądy wyładowań dodatnich mogą osiągać wartości maksymalne rzędu 200 kA. Wyładowania dodatnie są zjawiskami rzadkimi i charakteryzują się tym, że wyładowanie ma swój początek w górnej części chmury burzowej. Ten rodzaj wyładowania charakteryzuje się dużą energią, co ma znaczenie w analizie i modelowaniu [7].

Pakiet LIOV (Lightning-Induced Over Voltage) [1] daje możliwość wyznaczania napięć dla napowietrznej linii transmisyjnej umieszczonej w określonej odległości od kanału wyładowania atmosferycznego. W modelowaniu sprzężenia pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego z linią transmisyjną wyznaczone są składowe pola elektrycznego i magnetycznego w pobliżu linii. Pakiet LIOV składa się z podprogramów: MTLF (Modified-Transmission Line Fields) and MTLV (Modified-Transmission Line Voltages). Podprogram MTLF.exe służy do wyznaczania pola magnetycznego powstałego w wyniku przepływu prądu w kanale wyładowania przy uwzględnieniu prędkości prądu w kanale wyładowania atmosferycznego. Podprogram MTLV.exe natomiast służy do wyznaczania napięć indukowanych wzdłuż linii.

W pakiecie założono, że prąd u podstawy kanału wyładowania atmosferycznego jest określony zależnością zaproponowaną przez Heidlera [8] i zastosowaną również w normie [5]:

$$i(0,t) = i_{H1}(0,t) + i_{H2}(0,t) + i_{DE}(0,t) \quad (1)$$

czyli jest sumą dwóch funkcji Heidlera $i_{H1}(0,t)$ i $i_{H2}(0,t)$ opisanych zależnością (2) i parametrami zestawionymi w tabeli 3 oraz trzeciej - funkcji dwuwykładniczej opisanej zależnością (4):

$$i(0,t) = \sum_{k=1}^2 \frac{I_{mk}}{\eta_k} \frac{\left(\frac{t}{\tau_k}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_k}\right)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{2k}}\right) \quad (2)$$

w której: I_{mk} - wartość maksymalna prądu,
 τ_{1k} - podstawa czasu pierwszego członu funkcji,
 τ_{2k} - podstawa czasu drugiego członu funkcji.

Współczynnik η_k wyznacza się z zależności:

$$\eta_k = \exp\left(-\frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}} \left(\frac{\eta_k \tau_{2k}}{\tau_{1k}}\right)^{1/\eta_k}\right) \quad (3)$$

Tabela 3. Parametry funkcji opisanej wzorem (4) [1]

Prąd piorunowy – kolejna składowa wyładowania ujemnego					
k	I_{mk}, kA	$\tau_{1k}, \mu\text{s}$	$\tau_{2k}, \mu\text{s}$	η_k	η_k
1	10,7	0,25	2,5	2	0,639
2	6,5	2,1	230	2	0,874

W pakiecie przyjęto, że prąd u podstawy kanału wyładowania atmosferycznego ma postać zapisaną wzorem:

$$i_{DE}(0,t) = I_m ((1 - e^{-\alpha t}) - (1 - e^{-\beta t})) \quad (4)$$

Przykładowo, podane w normie [5] dla I-ego poziomu ochrony wartość maksymalna i kształty przebiegów prądu, wynoszą dla:

- długotrwałej składowej wyładowania: 400 A; 0,5 s,
- pierwszej składowej wyładowania: 200 kA; 10/350 μ s,
- kolejnych składowych wyładowania: 50 kA; 0,25/100 μ s.

W normie [5] postać czasowa prądu piorunowego dla pierwszego (10/350 μ s) i kolejnych (0,25/100 μ s) składowych wyładowań zapisana jest wzorem (o parametrach podanych w tabeli 4):

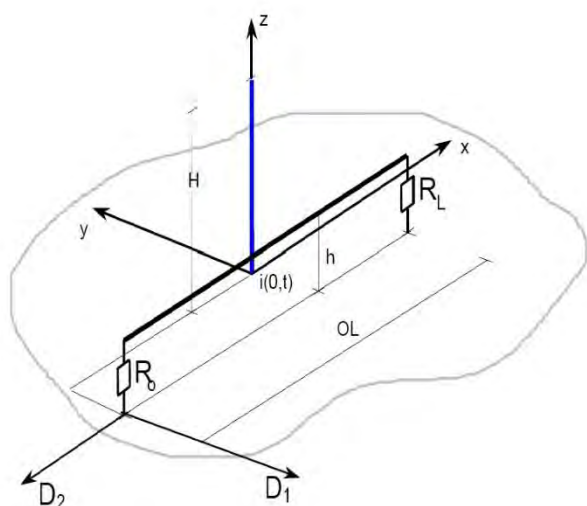
$$i(t) = \frac{I}{k} \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \exp(-t/\tau_2) \quad (5)$$

gdzie:

- k – współczynnik korekcyjny wartości maksymalnej,
- τ_1 – stała czasowa czoła udaru,
- τ_2 – stała czasowa grzbietu udaru.

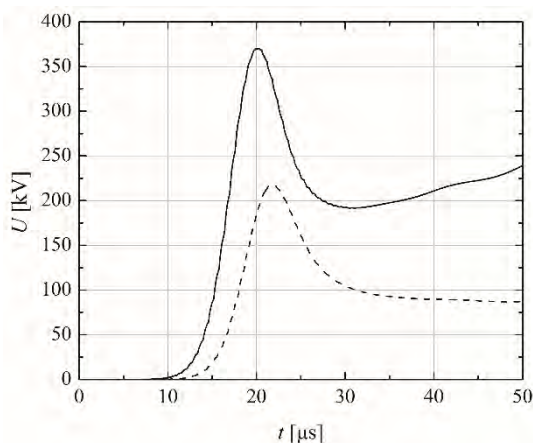
Tabela 4. Parametry uderów piorunowych dla różnych poziomów ochrony odgromowej [5]

Parametry	Pierwsze wyładowanie w kanale			Kolejne wyładowanie w kanale		
	Poziom ochrony odgromowej			Poziom ochrony odgromowej		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
$I(kA)$	200	150	100	50	7,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,933	0,933	0,933
$\tau_1(\mu s)$	19	19	19	0,454	0,454	0,454
$\tau_2(\mu s)$	485	485	485	143	143	143



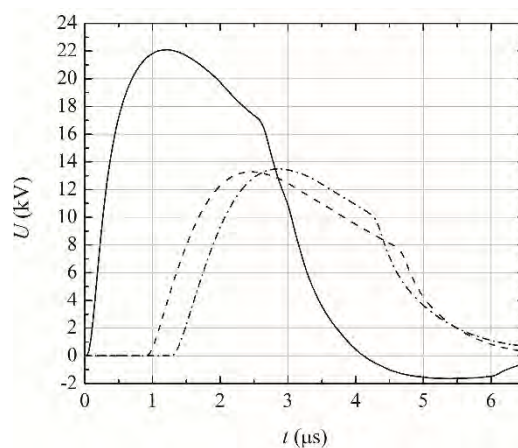
Rys. 2. Układ kanału wyładowania – linia transmisyjna [1]

W modelowaniu dla oszacowanej wartości uderu z rysunku 1.a [3], zmodyfikowano model źródła uderu do wartości maksymalnej pierwszego wyładowania. W normie [5] podane są parametry dla uderu o wartości maksymalnej 150 kV. Takie dane przyjęto do obliczeń (tabela 4). Proponowane jako przykładowe dane w programie LIOV zawierają sygnał wejściowy, czyli prąd pioruna, wprowadzony w danej odległości (rys. 2) od napowietrznej linii transmisyjnej o zadanych parametrach elektrycznych i geometrycznych [9]. Program zawiera również takie dane, jak: czas obserwacji, liczba próbek przyjętych do analizy. Ich wartości wpisuje się w kolejne okna programu.

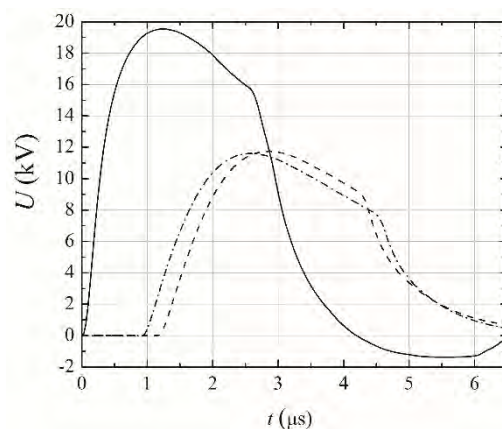


Rys. 3. Przebiegi przepięć dla: linii LPN (dla odległości - 40 m); linie przerywane – przepięcia na obu końcach linii, linia ciągła – napięcie najbliższej kanału wyładowania

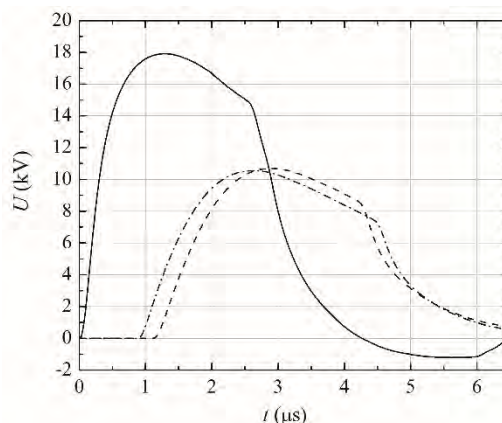
a)



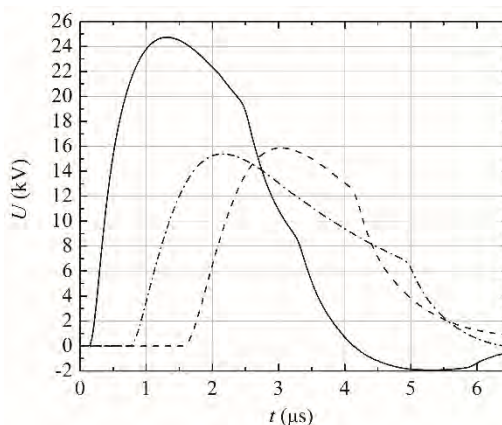
b)



c)



d)



Rys. 4. Przykładowe wyniki dla napięć indukowanych w linii LPN otrzymane w programie LIOV dla lokalizacji uderów (rys. 1.b), oznaczonych numerami: a) 5, b) 6, c) 7, d) 8 i o parametrach, jak w tabeli 2

Do obliczeń dla przewodów LPN o symetrycznym trójkątnym układzie przewodów przyjęto średnicę $d = 1$ cm, jak w przyjętym modelu (rys. 2). Jako obciążenie linii zadano impedancje równe wartości impedancji falowej przewodów (linii LPN). Przyjęty do obliczeń odcinek linii miał długość 1000 m (rys. 1.a). Kanał pioruna usytuowano (w połowie linii) na prostopadłej osi symetrii linii w odległości $y = 40$ m tj. takiej, jak dla analizowanej sytuacji, czyli uderu o wartości około 157 kA. Wyniki przedstawiono na rysunku 3. Dla analizowanego wyładowania atmosferycznego przepięcia indukowane w linii LPN osiągnęły wartości znacznie 350 kV. Z analizy dokumentacji dotyczącej rejestracji usterek urządzeń kolejowych wynika, że ten uder był niszczący dla uszkodzonych urządzeń srk. Celowym byłoby przeprowadzenie podobnej analizy dla napięć indukowanych w kablach zasilających urządzenia srk. Dla wyników analizy zawartych na rysunkach 4.a÷4.d założono, że w połowie linii znajdowała się szafa odcinka blokady liniowej, w której nastąpiło uszkodzenie urządzeń. Kanał pioruna był wprowadzany na prostopadłej osi symetrii linii w odległościach y takich, jak dla wybranych przykładowo zarejestrowanych uderów. Z rysunku 1.b w analizie uwzględniono cztery punkty 5÷8 znajdujące się w pobliżu miejsca uszkodzenia urządzeń zasilających samoczynną blokadę liniową (sbl). Miejsca uderzenia pioruna znajdowały się odpowiednio w odległościach dla kolejnych uderów: 5 - 218 m, 6 - 245 m, 7 - 265 m i 8 - 190 m od linii LPN. Odległość kanału pioruna od szafy do toru wynosiła odpowiednio dla kolejnych uderów: 5 - 40 m, 6 i 7 - 60 m, 8 - 130 m. W analizie przyjęto jednakową wartość amplitudy prądu uderu, jak w modelu programu LIOV (tabela 4). Przedstawione na rysunkach 4.a÷4.d wyniki analizy ilustrują wpływ odległości uderu od linii LPN na wzrost napięć indukowanych. Linią ciągłą oznaczono napięcie indukowane w miejscu zainstalowania szafy z urządzeniami sbl. Linia kreskowana oznacza przebieg napięcia na początku układu, a linia oznaczona jako kreska-kropka, na końcu analizowanego odcinka 1000 m. Uwzględniając parametry uderów zawarte w tablicy 2 można przypuszczać, że to właśnie ostatni uder nr 8 o wartości maksymalnej 43,8 kA mógł spowodować uszkodzenie urządzeń sbl. Potwierdzają to również rejestracje uszkodzeń urządzeń zasilających sbl.

4. PODSUMOWANIE

Linie potrzeb nietrakcyjnych nie są chronione przewodami odgromowymi. Przepięcia pojawiające się

w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna mogą osiągać wartości megawoltów. Jest to bardzo dużym zagrożeniem dla urządzeń srk i trakcji. Przepięcia indukowane są równie niebezpieczne jak w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna. Chociaż przy uderzeniu pioruna w pobliżu linii potrzeb nietrakcyjnych ich wartości są niższe, to obszar oddziaływania tego rodzaju napięć i liczba wyładowań piorunowych w roku są znacznie większe. Zawarta w artykule analiza, z wykorzystaniem danych dotyczących zarejestrowanych rzeczywistych uderów, może być przydatna w projektowaniu układów zabezpieczających urządzenia srk od przepięć pochodzenia atmosferycznego i koordynacji izolacji.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Swanson D.G. Hoefer W.R.J.: Electromagnetic Simulators – Theory and Practice. Proceedings of 15th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC Zurich'03, 18-20 Feb. 2003, pdf files: T3.pdf, 1t3.pdf-8t3.pdf.
2. LIOV: Lightning-Induced Over Voltage Code: <http://www.ing.unibo.it/die/liov/>
3. Materiały udostępnione przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie ©.
4. Materiały udostępnione przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie ©.
5. PN-62305-1:2012 (wersja angielska). Ochrona odgromowa - Część 1: Wymagania ogólne.
6. Rakov V.A., Uman M.A.; Lightning Physics and Effects. Cambridge University, 2003.
7. Zofia Wróbel, Robert Ziemba, Mariusz Gamracki: Szacowanie zagrożenia piorunowego sieci trakcyjnych, Technika Transportu Szynowego, nr 11/2008, 31-34.
8. Heidler F.: Traveling Current source model for LEMP calculation. Proceedings of VI Symposium EMC, Zurich 1985 s. 157-162.
9. Napolitano F., Borghetti A., Nucci C.A., Rachidi F., Paolone M.: Use of the full-wave Finite Element Method for the numerical electromagnetic analysis of LEMP and its coupling to overhead lines. Electric Power Systems Research 94 (2013) 24-29.

THE MODELLING OF SURGES INDUCED DUE TO LIGHTNING STROKES IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF THE RAILWAY TRAFFIC CONTROLLING DEVICES

The tench of the power supply systems of the railway traffic controlling devices needs are not protected by lighting wires. Surges appearing in the case of the direct thunderbolt shock can be a range of megavolts. This is a very large threat for rtc devices and the traction. Surges induced are dangerous the same as in the case of the direct thunderbolt shock. Though, at the shock of the thunderbolt near the line of the power supply systems of the railway traffic controlling devices wires needs, their value is lower, the influence area of such like voltages and the number of fulminic discharges in one year are considerably greater. The contained in the article analysis with the utilization of given data concerning registered real strokes can be useful in the projection of the rtc devices protectors of atmospherical origin surges or of the isolation co-ordination.

Keywords: electromagnetic compatibility, surges induced, numerical modelling.

SPONSOR GŁÓWNY



SPONSORZY

w porządku alfabetycznym



