

Stanisław WYDERKA¹
Grzegorz MASŁOWSKI²
Robert ZIEMBA³
Grzegorz KARNAS⁴
Kamil FILIK⁵

BADANIE ROZPŁYWU PRĄDU UDAROWEGO W URZĄDZENIU PIORUNOCHRONNYM I INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ BUDYNKU

W artykule przedstawiono wyniki badań poligonowych oraz symulacyjnych, rozplywu prądu udarowego w urządzeniu piorunochronnym, kablowej linii zasilającej i instalacji elektrycznej budynku jednorodzinnej z przyłączonymi urządzeniami AGD i RTV. Badania przeprowadzono w 2013 roku na poligonie badawczym Politechniki Rzeszowskiej w miejscowości Huta Poręby koło Dynowa. Udary prądowe wprowadzono z generatora do zwodu odgromowego na dachu budynku. Rozplyw prądu w poszczególnych elementach badanego obiektu mierzono i rejestrowano za pomocą wielotorowego elektrooptycznego układu pomiarowego. Dla weryfikacji wyników pomiarów, przeprowadzono badania symulacyjne rozplywu prądu udarowego w elementach obiektu zamodelowanego w programie ATP-EMTP. Parametry schematu zastępczego urządzenia piorunochronnego (LPS) w tym elementów uziemienia badanego obiektu w postaci uziołów pionowych i poziomych, wyznaczono na podstawie ich wymiarów geometrycznych oraz wartości rezystywności gruntu. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ konfiguracji, wymiarów i impedancji elementów badanego obiektu na rozplyw prądu w układzie. Zauważono wpływ częstotliwościowych zależności parametrów układu na zmiany kształtów zmierzonych prądów. Wyniki symulacyjne wykazały dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Niewielkie różnice wynikają z przyjętego w symulacjach dwu-wykładniczego przebiegu prądu, który nie odwzorowuje w pełni prądu generatora.

¹ Autor do korespondencji: Stanisław Wyderka, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 1773, swyderka@prz.edu.pl

² Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 8651253, maslowski@prz.edu.pl,

³ Robert Ziemba, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 8651330, ziemba@prz.edu.pl

⁴ Grzegorz Karnas, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 8651243, gkarnas@prz.edu.pl

⁵ Kamil Filik, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 8651298, kfilik@prz.edu.pl

Słowa kluczowe: urządzenie piorunochronne, instalacja elektryczna, rozptyw prądu udarowego, pomiary i symulacje

1. Wstęp

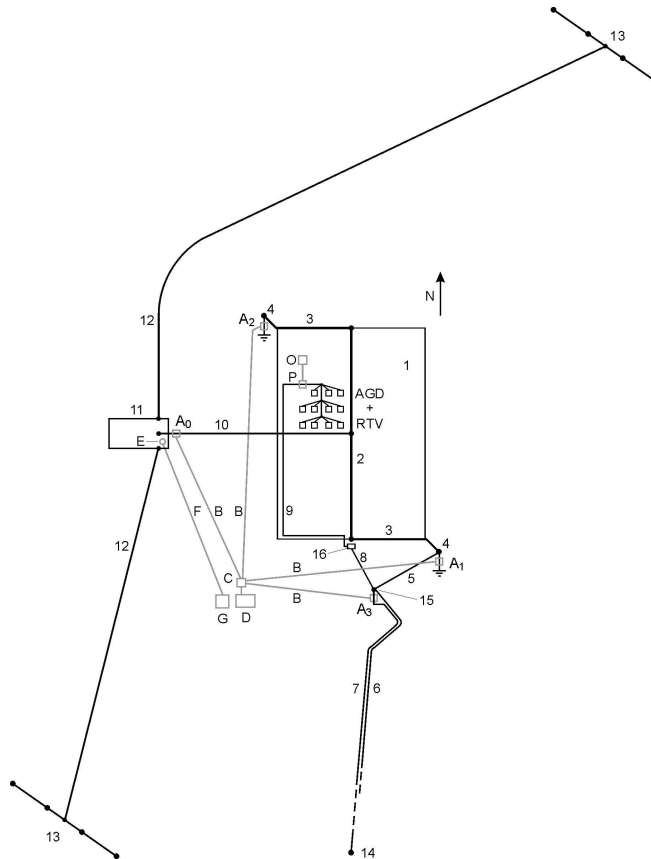
Złożona natura wyładowań atmosferycznych i ich oddziaływań zmusza do prowadzenia badań eksperymentalnych w warunkach poligonowych, które pozwalają na uwzględnienie przede wszystkim rozptywu prądów udarowych w gruncie oraz zastosowanie rzeczywistych rozmiarów układów [1].

Na poligonie badawczym Politechniki Rzeszowskiej powstałym w Hucie Poręby koło Dynowa wykonano badania rozptywu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym, zasilającej linii kablowej oraz instalacji elektrycznej niewielkiego obiektu budowlanego o wymiarach: długość 10 m, szerokość 7 m i wysokość 5 m. Badania przeprowadzono zgodnie z ustaleniami i zaleceniami prezentowanymi w wybranej literaturze z tego zakresu [2, 3] oraz w oparciu o własne doświadczenia [4 - 8]. Przeprowadzono pomiary i rejestracje rozptywu prądu udarowego w uziomach urządzenia piorunochronnego, w żyłce PEN linii kablowej połączonej z uziemionym punktem neutralnym uzwojenia nn transformatora. Zastosowano typową konfigurację urządzenia piorunochronnego ze zwodem poziomym na kalenicy obiektu budowlanego z trzema dodatkowymi zwodami pionowymi, z dwoma przewodami odprowadzającymi i dwoma uziomami przy przeciwległych narożach budynku. Udary z generatora wprowadzano do zwodu poziomego.

2. Układ probierczo-pomiarowy

Badanie rozptywu prądów udarowych w elementach całego badanego obiektu przeprowadzono z zastosowaniem układu probierczo-pomiarowego przedstawionego na rys. 1. Zastosowano generator udarów prądowych piorunowych GUP-80/10 (11) o parametrach: energia maksymalna 10 kJ, napięcie pracy 10 - 80 kV, największa wartość prądu udarowego 50 kA.

Zacisk wyjściowy generatora przyłączono, za pomocą przewodu miedzianego (10), do zwodu urządzenia piorunochronnego (2) na dachu budynku. Przewód ten podparto wspornikiem wystającym ponad kalenicę budynku, żeby uzyskać kierunek przepływu prądu zbliżony do pozycji kanału naturalnego wyładowania piorunowego do urządzenia piorunochronnego.



Rys. 1. Schemat układu probierczo-pomiarowego: 1 - budynek mieszkalny, 2 - zwód poziomy z trzema prętami pionowymi, 3 - przewód odprowadzający, 4 - uziom pionowy, 5 - połączenie podziemne, 6 - poziomy uziom złącza kablowego, 7 - żyła PEN podziemnej linii kablowej, 8 - przewód PE podziemnego obwodu zasilającego, 9 - obwód instalacji elektrycznej w budynku, 10 - izolowany przewód miedziany, 11 - generator uderów prądowych, 12 - izolowany przewód obwodu powrotnego, 13 - cztery połączone uziomy pionowe, 14 - system uziemienia stacji transformatorowej, 15 - wolnostojące złącze kablowe, 16 - skrzynka licznikowa, A - bocznik prądowy, dzielnik napięciowy, przetwornik analogowo-cyfrowy i elektrooptyczny, B - światłowód, C - przetwornik optoelektroniczny i pamięć buforowa, D - laptop, E - przetwornik optoelektroniczny, F - światłowód, G - cyfrowy układ sterowania generatorem

Fig. 1. Schematic diagram of test-measurement system: 1 - dwelling-house, 2 - horizontal air termination with three vertical rods, 3 - connecting conductor, 4 - vertical earth electrode, 5 - underground connection, 6 - horizontal earth electrode of cable termination box, 7 - PEN conductor of underground cable line, 8 - PE conductor of underground supplying circuit, 9 - circuit of building electrical installation, 10 - insulated copper conductor, 11 - current surge generator, 12 - insulated conductor of returning circuit, 13 - four connected vertical earth electrodes, 14 - grounding system of transformer station, 15 - free-standing cable termination box, 16 - watt-hour meter box, A - current shunt, voltage divider, analogue-digital and electro-optical converters, B - optic waveguide, C - optoelectronic converter and memory buffer, D - laptop, E - optoelectronic converter, F - optic waveguide, G - digital controller of generator

Działanie układu probierczo-pomiarowego można opisać postępując za rozplywem prądu w badanym obiekcie. Wprowadzony z generatora prąd udarowy płynie w zwodzie poziomym (2) w obydwóch kierunkach, a następnie w dwóch przewodach odprowadzających (3) do uziomów pionowych (4) i do ziemi. W przypadku uziołu pionowego przy narożu południowo-wschodnim budynku, część prądu może wpływać do niez izolowanego przewodu (5) łączącego ten uzioł z poziomym uziołem, w postaci płaskownika (6), złącza kablowego (15). Następnie, prąd płynący w przewodzie (5) dzieli się na dwie części, jedną płynącą poprzecznie z tego przewodu do gruntu i drugą płynącą do końca przewodu, która z kolei dzieli się dalej na trzy części.

Pierwsza z nich może wpływać do uziołu złącza kablowego (6) i do ziemi. Druga część prądu wpływa do przewodu PEN kabla podziemnego (7) i dalej przez system uzimienia stacji transformatorowej (14) do gruntu. Ostatnia, trzecia część prądu może wpływać do przewodu PE (8) obwodu zasilającego instalację elektryczną (9) w budynku i dalej, przez obwody wejściowe podłączonych urządzeń oraz przyłączone do nich przewody fazowe instalacji elektrycznej i linii kablowej, wpływać do uzwojeń niskiego napięcia transformatora i przez system uzimienia stacji do gruntu.

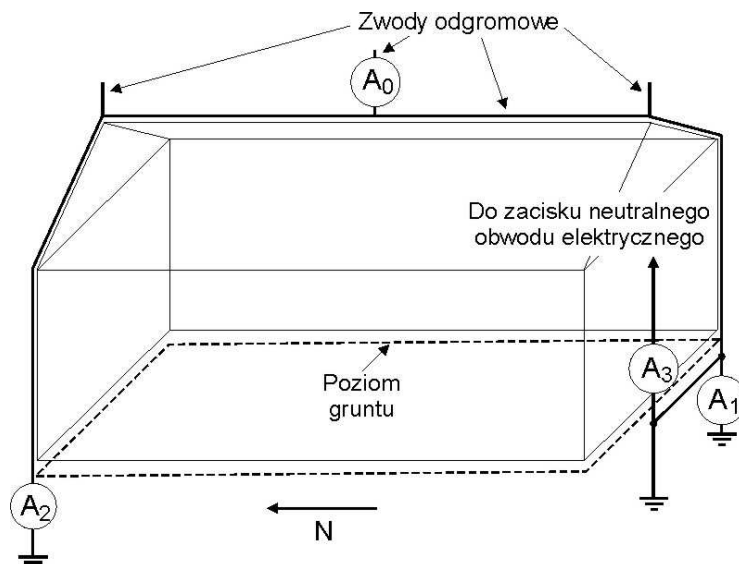
Wszystkie prądy wpływające do gruntu płyną z powrotem do generatora przez dwa zespoły uziołów pionowych (13) i dwa przewody izolowane obwodu powrotnego (12). Dla uzyskania możliwie jednorodnego rozkładu prądu probierczego w gruncie oraz możliwie małej impedancji na jego drodze, osiem uziołów pionowych obwodu powrotnego zostało rozlokowanych w znacznych odległościach od obiektu testowego, symetrycznie względem urządzenia piorunochronnego zainstalowanego na budynku.

Rejestracje prądów wykonano za pomocą wielotorowego elektrooptycznego układu pomiarowego umożliwiającego rejestrację jednocześnie sześciu prądów w elementach badanego obiektu [9]. Każdy z sześciu torów pomiarowych składał się z przetwornika analogowo-cyfrowego i elektrooptycznego, umieszczonego w metalowym ekranie (A) i przyłączonego do bocznika prądowego, optycznego falowodu (B) oraz przetwornika optoelektronicznego z buforem pamięci (C). Podstawowe parametry charakteryzujące każdy system to: zakres napięcia wejściowego (z bocznika prądowego) od 0 do ± 100 V, maksymalna częstotliwość próbkowania mierzonego napięcia 50 MS/s, pasmo przetwarzania i transmisji łączy od 0 do 20 MHz, przebieg wyjściowy w postaci cyfrowej, zasilanie autonomiczne akumulatorowe. Wszystkie dane w formie cyfrowej były transmitowane światłowodem. Wyjścia optoelektronicznych układów pomiarowych (C) były połączone poprzez koncentrator z portem USB laptopa. Opracowane programowanie w środowisku Matlab umożliwiło zapisanie w pamięci komputera wszystkich mierzonych przebiegów prądów udarowych, powstałych przez rozdzielenie udaru prądowego wytworzonego przez generator.

Na rys. 2 przedstawiono dodatkowe informacje o konfiguracji urządzenia piorunochronnego i punktach pomiaru prądu. Schemat elektryczny badanego

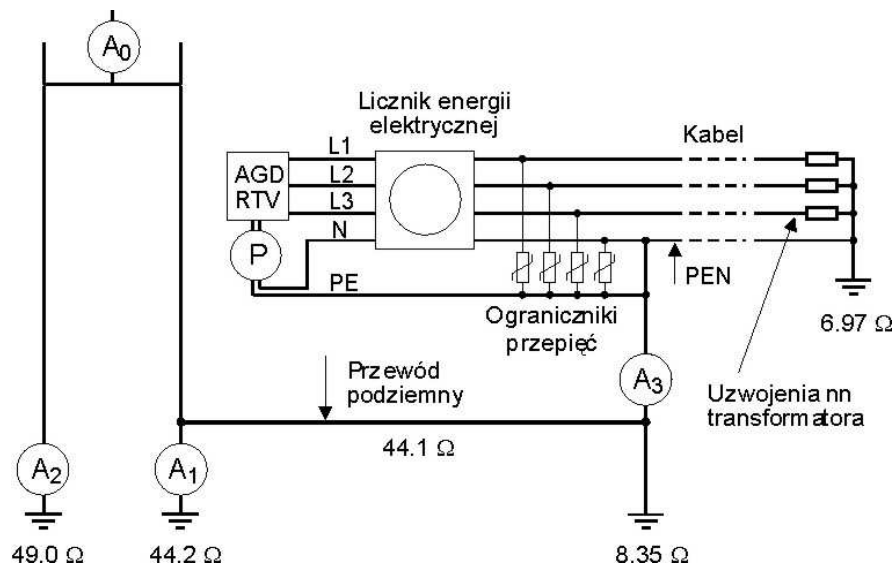
objektu i systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 3. Wewnętrzna instalacja budynku była połączona przez złącze kablowe z kablem podziemnym. Przeciwny koniec kabla był połączony z uzwojeniami niskiego napięcia transformatora zasilającego. Żyłka neutralna na końcu kabla była połączona z systemem uziemienia stacji transformatorowej, złożonym z dwóch poziomych równoległych płaskowników o długości 8 m każdy, umieszczonych na głębokości 0,6 m. Stałoprądowe rezystancje uziemień, podane na schemacie (rys. 3) dla poszczególnych uziemień, pomierzono metodą trójelektrodową za pomocą miernika uziemień typu MRU-100.

Rezystywność gruntu na terenie, na którym został zbudowany obiekt testowy, została zmierzona metodą Wennera z zastosowaniem czterech sond. Jej wartość wynosiła $53,5 \Omega\text{m}$. Zmierzona przy prądzie stałym rezystancja wszystkich połączonych ze sobą systemów uziemień obiektu testowego była równa $3,54 \Omega$. Prąd wprowadzany do obiektu testowego był mierzony przy zacisku wyjściowym generatora (punkt A_0), podczas gdy rozprzyskające się prądy były mierzone w punktach oznaczonych A_1 , A_2 , A_3 i P (rys. 1, 2 i 3).



Rys. 2. Szkic urządzenia piorunochronnego na modelu budynku z zaznaczonymi punktami pomiarowymi rozprzysk prądu udarowego

Fig.2. Sketch of lightning protection system on the building model with marked measurement points of surge current distribution

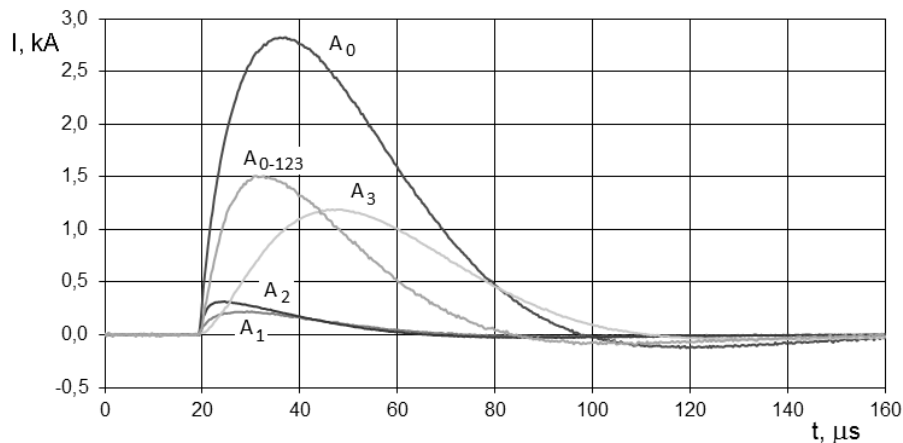


Rys. 3. Schemat elektryczny układu pobierczego z zaznaczonymi punktami pomiarowymi rozplywu prądu udarowego

Fig. 3. Equivalent circuit of test system with marked measurement points of surge current distribution

3. Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza

Zgodnie z opracowaną metodologią przeprowadzono rejestracje rozplywu prądu udarowego w uziomach urządzenia piorunochronnego i w żyłce PEN linii kablowej połączonej z uziemionym punktem neutralnym uzwojenia nn transformatora (rys. 1 i rys. 3). Rejestracje przeprowadzono dla kilku wartości napięcia naładowania generatora. Najbardziej wartościowe wyniki uzyskano dla napięcia 30 kV. Ze względu na problemy z rejestracją prądu wpływającego z urządzenia piorunochronnego do złącza kablowego przez krótkie połączenie podziemne w postaci ocynkowanego płaskownika stalowego, przeprowadzono jego obliczenia. Prąd ten rozdziela się na cztery różne obwody. W dwóch z nich nie był mierzony prąd wypływający z tego płaskownika do ziemi i prąd wpływający do uziomu złącza kablowego. W pozostałych dwóch rejestrowano prądy, tzn. prąd wpływający do żyły PEN kabla i prąd płynący przewodami PE i N instalacji elektrycznej budynku. Sumę dwóch prądów nie zarejestrowanych w czasie pomiarów obliczono odejmując od prądu wprowadzonego z generatora (w punkcie A_0) prądy zmierzone w punktach A_1 , A_2 i A_3 . Obliczony prąd oznaczono symbolem A_{0-123} . Wybrane wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Rozptył prądów w badanym obiekcie (rys. 1, 2 i 3): A_0 - prąd wprowadzony z generatora do zwodu odgromowego, A_1 i A_2 - prądy wpływające do pionowych uziołów prętowych urządzenia piorunochronnego, A_3 - prąd wpływający do instalacji elektrycznej budynku i linii kablowej, A_{0-123} - prąd obliczony ($A_{0-123} = A_0 - A_1 - A_2 - A_3$) wpływający do ziemi z płaskownika łączącego urządzenie piorunochronne ze złączem kablowym i z uziołom tego złącza

Fig. 4. Current distribution in test object (Figs. 1, 2 and 3): A_0 - current flowing from the generator to air termination, A_1 i A_2 - currents flowing into vertical earth rods of lightning protection system, A_3 - currents flowing into building electrical installation and cable line, A_{0-123} - calculated current ($A_{0-123} = A_0 - A_1 - A_2 - A_3$) flowing into the ground from tape conductor connecting lightning protection system with cable termination box, and from earth electrode of this termination

Podobnie, jak w poprzednich etapach badań [5, 6], uzyskane przebiegi prądu udarowego w poszczególnych elementach badanego obiektu różnią się od siebie nie tylko wartością szczytową, ale także szybkością narastania. Przyczyną obu różnic jest wartość i charakter impedancji elementów, przez które przepływa prąd, a dokładniej jej zależność od częstotliwości. Przeprowadzone w poprzednich etapach badania impedancji transformatora rozdzielczego, linii napowietrznej, linii kablowej, instalacji elektrycznej [10], a także badania impedancji urządzenia piorunochronnego przeprowadzone w czasie obecnych badań, wykazały silne zmiany modułu i fazy tych impedancji w funkcji częstotliwości.

Przedstawione na rys. 4 przebiegi wskazują, że wprowadzony z generatora prąd udarowy (A_0) dzieli się nierównomiernie na prądy w poszczególnych elementach badanego obiektu. Relatywnie duże wartości impedancji uziołów urządzenia piorunochronnego spowodowały, że wpływające do nich prądy (w punktach A_1 i A_2) mają niewielkie wartości. Ponadto, 3...4 krotnie krótszy czas narastania tych prądów w porównaniu do prądu wprowadzanego z generatora (A_0) świadczy o dużym udziale reaktancji pojemnościowej w impedancji uziołów urządzenia piorunochronnego.

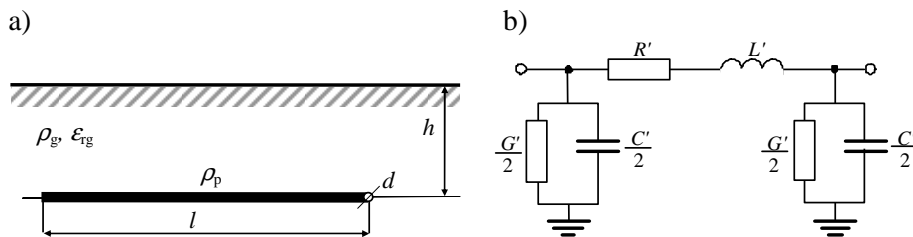
Podobny, ale wyraźnie mniejszy wpływ tej reaktancji na impedancję uzimienia jest widoczny (przebieg A_{0-123} na rys. 4) w przypadku dwóch (ułożonych

poziomo w gruncie) płaskowników ze stali ocynkowanej: łączącego urządzenie piorunochronne ze złączem kablowym (o długości 4 m) oraz pełniącego rolę uziomu złącza kablowego (o długości 20 m). Czas narastania prądu A_{0-123} jest tylko o około 30 % krótszy od czasu narastania udaru (A_0), a jego wartość szczytowa świadczy o tym, że wypadkowa impedancja doziemna tych dwóch płaskowników jest kilkakrotnie mniejsza od impedancji uziomów urządzenia piorunochronnego. Znajduje to także potwierdzenie w podanych na rys. 3 wartościach zmierzonej rezystancji doziemnej tych elementów. W przebiegu prądu A_3 , wpływającego do żyły PEN kabla i jednocześnie (niewielka jego część) do żył PE i N przewodu instalacji elektrycznej, przeważają składowe udaru o mniejszych częstotliwościach powodujące, że ten przebieg charakteryzuje się około 1,5 krotnie dłuższym czasem czoła w porównaniu do przebiegu z generatora (A_0).

Ze względu na znacznie mniejsze wartości (około 100 razy) prądu płynącego w czasie badań w obwodzie wewnętrznej instalacji elektrycznej przez urządzenia AGD i RTV, w porównaniu do prądów w innych elementach badanego obiektu, do jego rejestracji nie można było wykorzystać łączy światłowodowych wyposażonych w boczniki prądowe do pomiarów w zakresie kiloamperów. Do pomiaru tego prądu zastosowano sondę Pearsona połączoną z oscyloskopem cyfrowym. Zarejestrowane przebiegi sumarycznego prądu w przyłączonych do instalacji elektrycznej obwodach wejściowych jednocześnie wszystkich jedenastu urządzeń AGD i RTV są trudne do interpretacji. Wynika to, między innymi, ze znacznego stopnia złożoności impedancji wejściowych tych urządzeń. Koreponduje to z wynikami badań tych impedancji w funkcji częstotliwości [10], na podstawie których stwierdzono, że większość urządzeń AGD i RTV charakteryzuje się silną zależnością modułu i kąta fazowego impedancji wejściowej od częstotliwości, zwłaszcza w zakresie częstotliwości powyżej 20 kHz. Prąd przepływający przez urządzenia AGD i RTV, płynie dalej przez skrzynkę licznikową z zainstalowanymi ogranicznikami przepięć, przez linię kablową i uzwojenia nn transformatora. Badania wykazały, że z wyjątkiem urządzeń AGD i RTV, pozostałe elementy obwodu, w tym szczególnie ograniczniki przepięć i uzwojenia transformatora, nie wpływają zauważalnie na przebieg prądu w tym obwodzie. Ograniczenie tego prądu do ułamka procenta prądu wprowadzanego z generatora do urządzenia piorunochronnego wynika głównie z wielokrotnie większych impedancji wejściowych urządzeń AGD i RTV w porównaniu do impedancji, jaką napotyka prąd płynący do uziomu złącza kablowego.

4. Model obwodowy badanego układu

Do analiz porównawczych z otrzymanymi wynikami pomiarów, opracowano model obwodowy badanego układu do symulacji komputerowych w programie ATP-EMTP. Do tego celu zastosowano modele obwodowe przewodu podziemnego pionowego i poziomego, przewodu napowietrznego oraz kabla podziemnego. Na rys. 5a pokazany jest układ przewodu poziomego o średnicy d (przekroju poprzecznym S_p), długości l , rezystywności ρ_p , pograżonego na głębokości h w gruncie o rezystywności ρ_g oraz względnej przenikalności elektrycznej ϵ_{rg} . W wielu współczesnych publikacjach wykorzystuje się podane przez Sundego [11] wzory na parametry obwodowe takiego przewodu w postaci kaskady czwórników typu Π jak na rys. 5b.



Rys. 5. Uziom poziomy: a) schemat, b) model obwodowy odcinka uziomu

Fig. 5. Horizontal earth electrode: a) diagram, b) equivalent circuit of earth electrode segment

Zależności na parametry jednostkowe tego modelu mają postać:

$$R' = \frac{\rho_p}{S_p} \quad [\Omega/\text{m}] \quad (1)$$

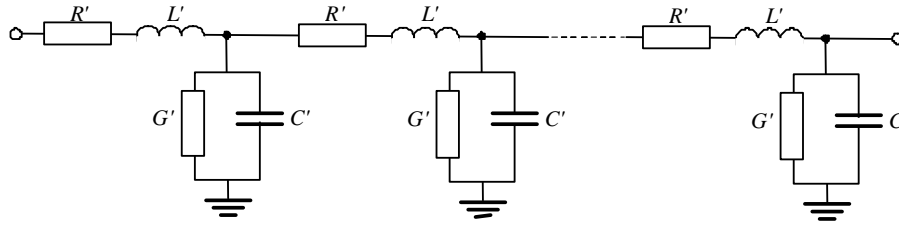
$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{dh}} - 1 \right) \quad [\text{H}/\text{m}] \quad (2)$$

$$G' = \frac{\pi}{\rho_g \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{dh}} - 1 \right)} \quad [\text{S}/\text{m}] \quad (3)$$

$$C' = \frac{28(1 + \epsilon_{rg})}{\left(\ln \frac{2l}{\sqrt{dh}} - 1 \right)} \quad [\text{pF}/\text{m}] \quad (4)$$

Wzory te uznawane są za wystarczająco dokładne w wielu przypadkach badania układów podziemnych przewodów poziomych. Schemat zastępczy prze-

wodu jest złożony z kaskady czwórników reprezentujących odcinki przewodu o długości Δl : $R = R' \Delta l$, $L = L' \Delta l$, $G = G' \Delta l$, $C = C' \Delta l$. Można go przedstawić w postaci kaskady czwórników typu Γ jak na rysunku 6.



Rys. 6. Model obwodowy uziomu poziomego

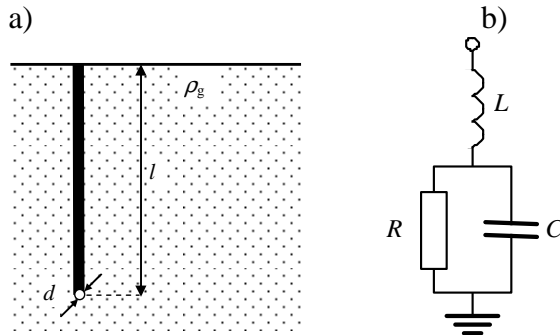
Fig. 6. Equivalent circuit of horizontal earth electrode

Dla przewodu pionowego (rys. 7a) przyjęto w modelowaniu komputerowym schemat obwodowy jak na rys. 7b z danymi: l – długość przewodu, d – średnica przewodu, h ρ_g - rezystywność gruntu. Zależności na parametry jednostkowe tego modelu mają postać [12]:

$$R = \frac{\rho_g}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (6)$$

$$C = 2\pi \epsilon l \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (7)$$



Rys. 7. Uziom pionowy: a) schemat, b) model obwodowy

Fig. 7. Vertical earth electrode: a) diagram, b) equivalent circuit

Linie kablową zasilającą instalacje wewnętrzna budynku zamodelowano odcinkiem bezstratnej linii długiej. Celem zapewnienia poprawności obliczeń zastosowano podział przewodów podziemnych na odcinki (segmenty), których długość l_{seg} , dla maksymalnej częstotliwości w widmie wymuszenia (f_{max}), spełnia warunek dany zależnością:

$$l_{\text{seg}} < \lambda/6 \quad (8)$$

gdzie λ jest długością fali w gruncie o rezystywności ρ_g , aproksymowaną zależnością:

$$\lambda = 3160\sqrt{\rho_g/f_{\text{max}}} \quad (9)$$

Z wykorzystaniem przyjętych modeli przewodów utworzono schemat analizowanego układu jak na rys. 8. Jako model generatora udarowego przyjęto źródło prądu udarowego o kształcie aproksymowanym zależnością dwuwykładniczą:

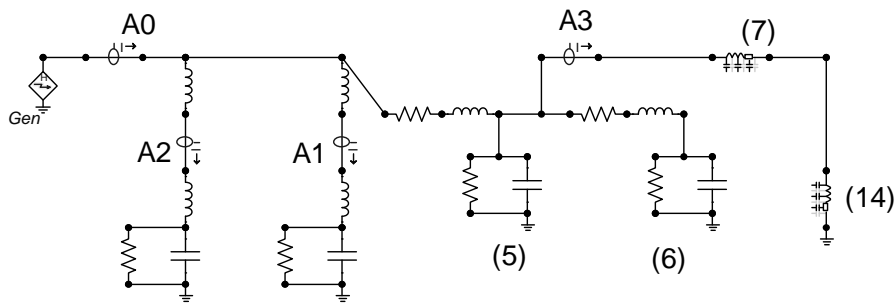
$$i(t) = A \cdot I_m [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (10)$$

gdzie: α, β – współczynniki kształtu udaru,

A – współczynnik korekcyjny wartości maksymalnej udaru.

W celu uzyskania zgodności z udarem zmierzonym w układzie rzeczywistym, co do wartości maksymalnej udaru oraz jego czasu trwania czoła $T_1 = 12 \mu\text{s}$ i czasu do półszczytu na grzbiecie $T_2 = 50 \mu\text{s}$, wyznaczono współczynniki we wzorze (10) równe: $A = 2,33$; $\alpha = 33700$; $\beta = 116000$.

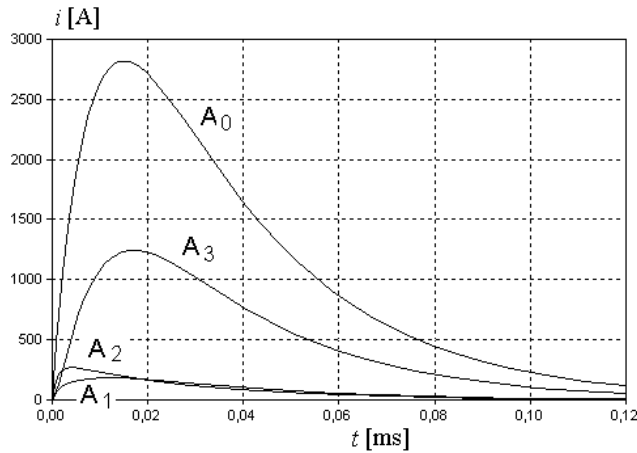
Schemat obliczeniowy analizowanego układu w programie ATP EMTP przedstawiono na rys. 8. Oznaczenia elementów na schemacie odpowiadają oznaczeniom na rys. 1.



Rys. 8. Model obwodowy analizowanego układu

Fig. 8. Lumped equivalent circuit of analyzed system

Wyniki symulacji komputerowej odpowiadające przedstawionym na rys. 4 wynikom pomiarowym przedstawione są na rys. 9.



Rys. 9. Wyniki symulacji rozptyłu prądów w badanym obiekcie (rys. 1, 2 i 3): A_0 - prąd wprowadzony z generatora do zwodu odgromowego, A_1 i A_2 - prądy wpływające do pionowych uziomów prętowych urządzenia piorunochronnego, A_3 - prąd wpływający do instalacji elektrycznej budynku i linii kablowej

Fig. 9. Current distribution in test object (Figs. 1, 2 and 3): A_0 - current flowing from the generator to air termination, A_1 and A_2 - currents flowing into vertical earth rods of lightning protection system, A_3 - currents flowing into building electrical installation and cable line

Wyniki modelu obwodowego (rys. 9) wykazują dużą zgodność z wartościami pomierzonymi (rys. 4), co do wartości maksymalnych otrzymanych przebiegów. Różnice w kształcie wynikają z niedokładnego odwzorowania udaru wymuszającego. Jako aproksymację udaru w symulacji przyjęto przebieg dwuwykładniczy (10) o parametrach zapewniających równość czasów trwania czoła i czasów do półszczytu na grzbiecie. Jednak przebieg zmierzony pochodził z generatora, którego uproszczony schemat zastępczy składa się z szeregowo połączonych elementów RLC a przebieg prądu wyjściowego ma postać oscylacyjnego rozwiązania układ 2-go rzędu w postaci sinusoidy tłumionej wykładniczo [13]. W aproksymacji przebiegu prądu generatora funkcją dwuwykładniczą nie jest możliwe uzyskanie takiego samego kształtu, głównie na jego grzbiecie. Na różnice w przebiegach symulacyjnych wpływ ma także nie uwzględnienie w modelu urządzeń podłączonych do instalacji i transformatora zasilającego.

5. Podsumowanie

Przeprowadzono badania rozplywu piorunowych prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym, linii zasilającej i wewnętrznej instalacji elektrycznej z przyłączonymi urządzeniami AGD i RTV. Rejestracje prądów udarowych przeprowadzono z zastosowaniem wielotorowego łącza światłowodowego, umożliwiającego jednoczesny pomiar prądu w kilku odgałęzieniach badanego obwodu.

Podobnie, jak w poprzednim etapie badań, stwierdzono wpływ charakteru obwodu na kształt przepływającego w nim prądu, tzn. na czas występowania jego wartości szczytowej. W relacji do przebiegu udaru wprowadzanego z generatora do zwodu odgromowego, prądy wpływające do ziemi przez uziomy urządzenia piorunochronnego, przez pobliski uziom złącza kablowego oraz przez podziemny przewód (płaskownik stalowy) łączący to urządzenie ze złączem kablowym, charakteryzował się znacznie krótszym czasem narastania, uwidaczniając istotny udział reaktancji pojemnościowej w impedancji tych elementów uziemiających. Natomiast, prąd płynący przez żyłę PEN do odległego o około 50 m uziomu stacji transformatorowej charakteryzował się wyraźnie dłuższym czasem narastania czoła w porównaniu do prądu wprowadzanego z generatora. Wskazuje to na znaczący udział reaktancji indukcyjnej w tym obwodzie i jest związane z prezentowanym w literaturze pojęciem długości efektywnej uziomu.

Uzyskane pomiary prądów płynących w instalacji elektrycznej z przyłączonymi urządzeniami AGD i RTV są trudne do odtworzenia za pomocą symulacji komputerowych z uwagi na złożony charakter impedancji wejściowych tych urządzeń. Z przeprowadzonych badań wynika jednak, że prądy te charakteryzują się wartościami szczytowymi około stukrotnie mniejszymi w porównaniu z wartością szczytową prądu wprowadzanego do układu z generatora oraz posiadają zgodnie z przewidywaniami charakter oscylacyjny. Dalsze prace eksperymentalne są planowane w najbliższym sezonie letnim w 2014 r. na poligonie badawczym w Hucie Poręby w celu dalszego rozpoznania istotnych uwarunkowań wpływających na rozplyw prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym i dołączonej do obiektu budowlanego instalacji elektrycznej.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Literatura

- [1] Masłowski G.: Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, seria: Rozprawy, Monografie, nr 208, Kraków, 2010
- [2] 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

- [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 Transactions on Power Delivery*, vol. 23, n. 4, Oct. 2008 pp. 2439-2446
- [4] Masłowski 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. and Krata W., Testing of Lightning Protective System of a Residential Structure: Comparison of Data Obtained in Rocket-Triggered Lightning and Current Surge Generator Experiments, *High Voltage Engineering, China*, 34 (2008), n. 12, pp. 2575-2582
- [5] Masłowski G., Wyderka S., Rakov V.A., DeCarlo B.A., Li L., Bajorek J., Ziemia R., Measurements and numerical modeling of currents in lightning protective system of a residential building. X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9-13, 2009, pp. 587-592.
- [6] Masłowski G., Wyderka S., Rakov V.A., DeCarlo B.A., Li L., Bajorek J., Ziemia R., Experimenta investigation and numerical modeling of surge currents in lightning protective system of a residential building, *Journal of Lightning Research*, No. 4, 2012, pp. 18-26
- [7] Masłowski G., Wyderka S., Bajorek J., Ziemia R., Badanie efektywności urządzenia piorunochronnego niewielkiego obiektu budowlanego. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86 nr 5/2010, ss. 229-232
- [8] Masłowski G., Wyderka S. Układ probierczo-pomiarowy do poligonowych badań narażeń piorunowych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88, NR 5a, 2012, ss. 67-72
- [9] Buczek Ł., Wyderka S., Jaworski M., Światłowodowy system szerokopasmowej rejestracji sygnałów elektrycznych w środowisku wysokich napięć i silnych zaburzeń elektromagnetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 88, NR 9a, 2012, ss. 171-174
- [10] Wyderka S., Masłowski G., Ziemia R., Karnas G., Frequency Characteristics of Supplying Transformer and Electrical Appliances of Residential Building In Modeling of Lightning Current Distribution, *ICLP, Vienna, Austria*, September 2-7, 2012.
- [11] Sunde, E. D., *Earth Conduction Effects in the Transmission Systems*, New York: Dover, 1968.
- [12] Juan A. Martinez Velasco (Ed.), *Power System Transients. Parameter Determination*, CRC Press, Boca Raton, London, New York, October 2009
- [13] Bajorek J., Knott M., Wyderka S.: Efficiency of ZnO arrester models simulation of lightning overvoltages. 21st ICLP, BERLIN, Germany 1992, Pap. No. 5.07.

INVESTIGATION OF SURGE CURRENT DISTRIBUTION IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEM AND ELECTRICAL INSTALLATION OF BUILDING

Summary

The paper presents results of the lightning protection system (LPS) tests for a small residential structure with the connected home appliances and electronics, conducted in 2013 at the new test site in Poland using the mobile surge current generator. Current surges were injected from generator to the air termination on the building roof. Current distribution in individual elements of test object was measured and registered with multi-channel electro-optical measurement system. The current waveshapes in the vertical ground electrodes differed from the injected current waveshapes and from the current waveshapes in other parts of the test system.

Computer simulation using ATP-EMTP were carried out in order to verify the results of measurements. Vertical and horizontal ground electrodes were modeled for specified parameter resulting from the geometrical configuration of the system and the measured soil conductivity. Conducted investigations showed the significant influence of configuration, dimensions and impedance of test object on current distribution. A significant influence of frequency dependent components of the system impedances on current waveshapes has been noticed.

Computed results show a good agreement with the experimental data. Small differences in the current waveshapes result mainly from the adopted double-exponential mathematical approximation which does not perfectly match the current injected from the generator.

Keywords: lightning protection system, electrical installation, surge current distribution, measurements and simulations

DOI: 10.7862/re.2013.26

Tekst złożono w redakcji: listopad 2013

Przyjęto do druku: grudzień 2013