

Pole elektryczne wokół słupa linii 110 kV z układem łączności

Electric field around a 110 kV line pole with a communication system

Streszczenie. Na podstawie zaimplementowanego modelu przęsła z innowacyjnym słupem PLN111 T dokonano szeregu symulacji rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni obliczeniowej. Jako wartość definiującą narażenie na oddziaływanie pola obrano wartość skuteczną definiowaną za okres napięcia sieciowego (20 ms). Dla pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz wyznaczono wartość maksymalną wartości natężenia pola elektrycznego w obszarze przyziemnym na poziomie 2720 V/m – wartość występująca w obszarze największego zwisu linii dla odległości przewodu od ziemi 5,85 m. W obszarze przysłupowym wartość pola elektrycznego nie przekracza 380 V/m. Lokalne wzrosty natężenia pola elektrycznego przy konstrukcji słupa związane są z występowaniem ostrych krawędzi konstrukcji stalowej, jednak nie powodują wzrostu wartości pola ponad wartość dopuszczalną. W bliskim otoczeniu anteny dookólnej wartość natężenia pola elektrycznego nie przekracza 2400 V/m. W odległości około 250 mm od anteny wartość ta zmniejsza się poniżej 200 V/m. Obliczone wartości natężenia pola elektrycznego w obu przypadkach – zarówno wokół anteny jak i na wysokości 2 m nad ziemią, w miejscu dowolnym na obszarze przęsła i pasa służebności są niższe od wartości dopuszczalnej długotrwałe, która wynosi 10 kV/m.

Abstract. Based on the span model implemented with the innovative PLN111 T pole, a series of simulations were conducted to analyze the electric field distribution within the computational space. The root mean square (RMS) value, calculated over the mains voltage period (20 ms), was used to define exposure to the field. For an electric field with a frequency of 50 Hz, the maximum field intensity at ground level was determined to be 2720 V/m, located in the region of the largest line sag for the distance of the line conductor from the ground 5.85 m. In the area near the pole, the electric field value does not exceed 380 V/m. Local increases in electric field intensity near the pole structure are due to sharp edges of the steel frame but do not exceed permissible limits. Around the omnidirectional antenna, the electric field strength does not exceed 2400 V/m in close proximity. However, at a distance of around 250 mm from the antenna, this drops to below 200 V/m. The calculated electric field strengths in both scenarios—near the antenna and at a height of 2 m above ground level, within any location in the span and easement zone—remain below the long-term permissible limit of 10 kV/m.

Słowa kluczowe: linie napowietrzne WN, rozkład pola elektrycznego, układy łączności

Keywords: high voltage overhead lines, electric field distribution, communication systems

Wstęp

Pole elektryczne i magnetyczne generowane przez linie wysokiego napięcia są ważnym tematem badawczym i pomiarowym z uwagi na ich oddziaływanie na środowisko wokół obiektów liniowych i konstrukcji zawierających infrastrukturę energetyczną [1, 2, 3, 6]. Wartość natężenia pola zależy od różnych czynników, takich jak ukształtowanie terenu, konfiguracja słupów, rozmieszczenie i fazowanie przewodów, wartość napięcia i prądu obciążenia linii w stanie normalnej oraz awaryjnej pracy.

Obliczanie trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego w obszarze pod linią wysokiego napięcia z uwzględnieniem skomplikowanej konstrukcji słupowej wymaga przy zastosowaniu szybkich komputerów o znacznej zdolności obliczeniowej, dużego nakładu pracy i czasu na wykonanie analiz symulacyjnych. Badania te, w ramach niniejszego opracowania optymalizowano pod kątem czasu obliczeń przy wykorzystaniu algorytmu iteracyjnej weryfikacji błędów obliczeniowych oraz stosując obliczenia w dziedzinie zespolonej napięć linii elektroenergetycznej.

W referacie przedstawiono wyniki analizy rozkładu pola elektrycznego wokół zaimplementowanej w oprogramowaniu OPERA konstrukcji słupa elektroenergetycznego PLN111 T z zainstalowanym na nim osprzętem łączności (w postaci dookólnej anteny nadawczo-odbiorczej) oraz dodatkowym układem elektroenergetycznym umożliwiającym bezpośrednie zasilanie z sieci 110 kV przez przekładnik napięcia współpracujący z dodatkowym, zaprojektowanym energoelektronicznym układem zasilania. Wymieniona konstrukcja jest jednym z nowatorskich rozwiązań projektowych pochodzących z projektu pt. Nowatorskie konstrukcje specjalnego przeznaczenia jedno i dwutorowych słupów dla linii wysokich napięć wraz z układem łączności zasilanym bezpośrednio z linii wysokiego napięcia (PYLON 2) realizowanego w latach 2020 – 2023 w konsorcjum Energa Invest (aktualnie Orlen Projekt) i Politechniki Gdańskiej.

W rozwiązaniu tym zaproponowano na słupie linii 110 kV instalację anteny oraz układu zasilania dla systemów

łączności. Rozwiązanie to umożliwi wykorzystanie tych linii do pokrycia terenów obecnie nieobjętych zasięgiem, szczególnie tam gdzie nie jest możliwe zasilanie takich obiektów z typowej sieci niskiego napięcia. Rozwiązanie zakłada innowacyjny sposób zasilania układów łączności z wykorzystaniem przekładników napięciowych (tzw. mocy), umożliwiających zasilanie odbiorów niskonapięciowych z linii wysokiego napięcia bez konieczności budowy dodatkowej struktury zasilającej z linii niskiego napięcia.

W innych projektowanych konstrukcjach słupów dzięki wprowadzeniu poprzeczników izolatorowych uzyskano ograniczenie obszaru zajętego przez linię napowietrzną 110 kV – mniejsza szerokość pasa technologicznego; skrócenie czasu budowy nowych linii elektroenergetycznych – łatwiejszy montaż poprzecznika, istotne zmniejszenie wagi słupa i minimalizacja kosztów budowy.

Założenia do obliczeń i wykorzystywane oprogramowanie symulacyjne

Wprowadzony do oprogramowania model obliczeniowy odzwierciedlał rzeczywistą konstrukcję słupową. Obliczenia prowadzono metodą elementów skończonych. Do analizy wybrano słup PLN111 T zawierający układ łączności i zasilania z uwagi na spodziewaną optymalizację natężenia pola elektromagnetycznego. Obecność przewodów jednotorowej linii elektroenergetycznej z jednej strony słupa pozwala ograniczyć oddziaływanie pola na układ antenowy jak i wartości rejestrowane pod konstrukcją słupową.

W ramach prac obliczeniowych przeprowadzono proces przygotowania i obliczeń modelu przęsła linii WN w oparciu o model kratownicowy słupa z uwzględnieniem rzeczywistych przekrojów i zwisu linii WN (tabela 1). Obliczenia przeprowadzono za pomocą oprogramowania numerycznego korzystającego z metody elementów skończonych Opera 3D Simulia ze zintegrowaną nakładką na oprogramowanie CST Studio 2022, korzystającą z modułu obliczeń elektrycznych i magnetostatycznych w dziedzinie zespolonej. Model 3D przęsła opracowano we wbudowanym do oprogramowania module Modellera. Weryfikacji błędów obliczeniowych dokonano na podstawie

zastosowania algorytmu minimalizacji błędu obliczeń w trakcie kolejnych iteracji obliczeń jądra modelu.

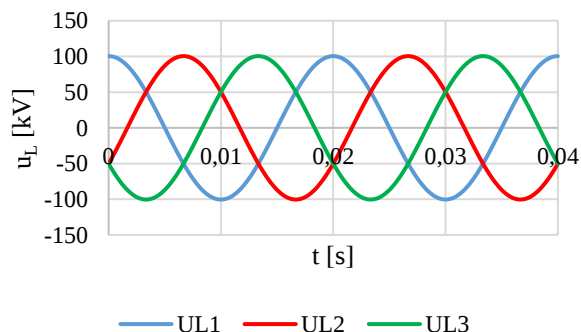
Przyjęto następujące założenia obliczeniowe wynikające z projektu konstrukcji słupa, linii 110 kV oraz norm [4, 5]:

- przedmiotem symulacji jest pojedyncze przęsło z jednym słupem typu PLN 111 T w wersji przelotowej oraz dwoma odcinkami linii WN 110 kV (napięcie maksymalne 123 kV (RMS)) o trójkątnym układzie przewodów,
- przyjęto wartość maksymalną zwisu przewodów fazowych, uzyskując odległość 5,85 m nad ziemią dla przewodów podwieszonych najniżej,
- wprowadzono minimalną długość przęsła linii, tj. 180 m,
- uwzględniono zamocowanie anteny dookólnej na szczycie konstrukcji słupa oraz układ zasilania w bocznej części.

W ramach badań zrealizowano następujące prace:

- zdefiniowano wymagania do założeń obliczeniowych, pozyskano dane wejściowe,
- na podstawie dostarczonej dokumentacji zbudowano model 3D słupa PLN 111 T jak najbardziej zbliżony do konstrukcji rzeczywistej,
- obliczono rozkład składowej elektrycznej pola EM dla modelu przęsła w pasie o szerokości 60 m.

W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych założono odzwierciedlenie zbliżonych do istniejących w rzeczywistości warunków odniesienia dla modelu obliczeniowego, umiejscowionego w wydzielonym obszarze obliczeniowym równym wielkości przęsła linii WN z uwzględnieniem pasa wokół linii o szerokości 30 m. Rejestracji pola dokonywano na wysokości 2 m nad ziemią według wytycznych rozporządzenia dotyczącego dopuszczalnych wartości pola elektromagnetycznego [2, 3]. W obliczeniach uwzględniono podstawową harmoniczną (50 Hz) przebiegów napięciowo - prądowych zasilających rozpatrywaną linię elektroenergetyczną (Rys. 1) z możliwością wyodrębnienia rozkładu pola elektrycznego dla dowolnego kąta fazowego.



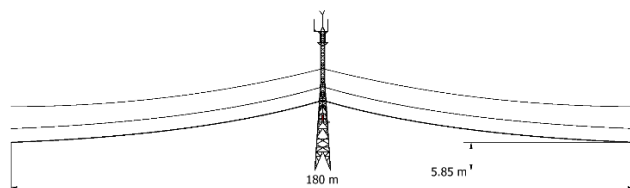
Rys. 1. Przebiegi napięcia w liniach fazowych modelu przęsła linii WN 110 kV

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie parametrów technicznych oraz wymiarów modelu słupa, linii fazowych oraz odgromowych.

Tabela 1. Zestawienie wymiarów przewodów i ich położenia

Lp.	Przewód	Typ przewodu	Przekrój przewodu	Odległość od osi słupa [m]	Wysokość zawieszenia [m]	Odległość do środka przęsła [m]
		-	[mm ²]			
1	L1	311-A1F/ 32-20SA	342,25	3,6	20,5	10,2
2	L2			2,75	16,5	5,85
3	L3			6,6	16,5	5,85
4	odgromowy	61-A1/ 36-ST1A	97,03	2,25	27,3	16,5

Antenę dookólną umieszczoną na szczycie modelu słupa odseparowano od konstrukcji przewodzącej słupa. Ze względu na nieokreślony rozkład potencjału wykonano podłączenie do konstrukcji za pomocą znacznej rezystancji o wartości ok. 100 MΩ, co stanowi wartość zbliżoną do impedancji wspólnej wzmacniacza oraz symetryzatora antenowego.



Rys. 2. Model geometryczny słupa PLN111 T w przęśle (wymiarów charakterystycznych między punktami maksymalnego zwisu linii)

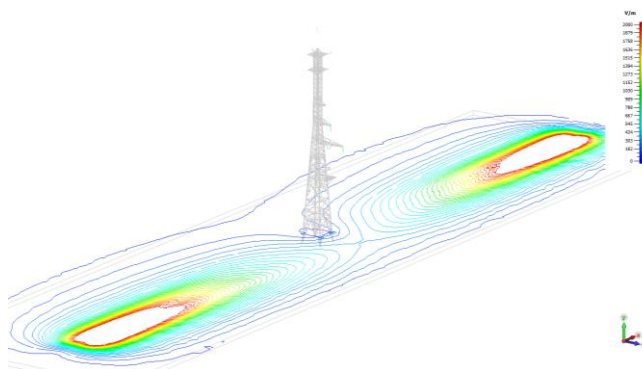
Korzystając z oprogramowania symulacyjnego dokonano przypisania materiałów, potencjałów linii i innych elementów czynnych, prądów roboczych w liniach oraz określenia warunków brzegowych typu otwartego II rodzaju (na składową styczną natężenia pola elektrycznego $E_t = 0$ w płaszczyźnie ziemi oraz wpływu i wypływu linii z obszaru obliczeniowego oraz warunek otwarty asymptotyczny w płaszczyźnie prostopadłej). Zdefiniowano również niemagnetyczną i półprzewodzącą płaszczyznę „ziemi” o zadanym zerowym potencjale odniesienia.

Na Rys. 2 przedstawiono widok modelu geometrycznego słupa i linii. W modelu tym wydzielono podprzestrzenie obliczeniowe niezbędne do sterowania gęstością siatki elementów skończonych oraz konieczne do implementacji algorytmu kontroli błędu obliczeń. Średnia wielkość charakterystyczna siatki elementów skończonych na powierzchni słupa wyniosła ok. 0,1 m, natomiast w przestrzeni obliczeniowej swobodnej: ok. 0,4 m. W objętości modelu ok. 420 tys. m³ ostatecznie zastosowana, optymalna liczba węzłów siatki elementów skończonych wyniosła około 17,2 mln.

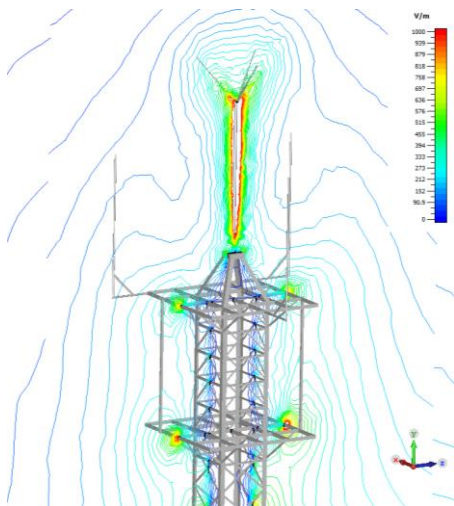
Wyniki obliczeń rozkładu pola elektrycznego

Na podstawie zaimplementowanego modelu przęsła ze słupem PLN111 T dokonano szeregu symulacji rozkładu pola elektrycznego w rozpatrywanych przestrzeniach obliczeniowych. W celu wyznaczenia wartości narażeń polowych wokół linii wykonano wizualizację rozkładu składowej elektrycznej E pola elektromagnetycznego:

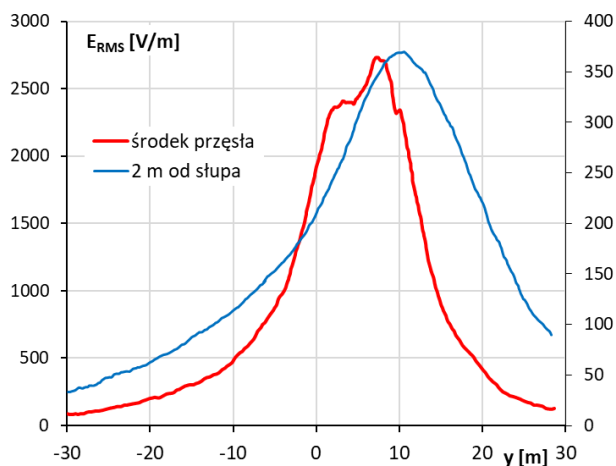
- na wysokości 2 m nad poziomem terenu dla terenu płaskiego w całym obszarze obliczeniowym oraz wokół konstrukcji słupowej (rys. 3, 5, 6),
- w obszarze anteny dookólnej (rys. 4).



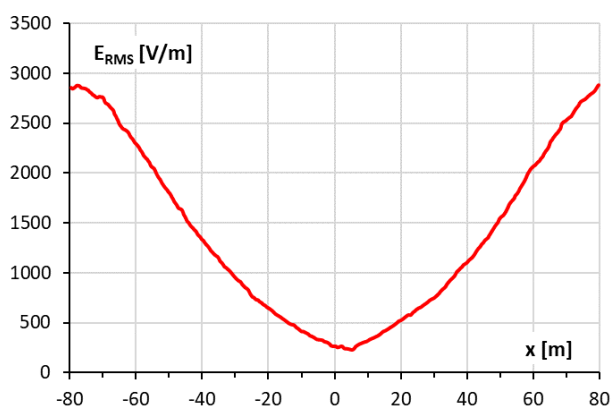
Rys. 3. Izolinie rozkładu natężenia pola elektrycznego pod modelem słupa PLN111 T na wysokości 2 m nad ziemią



Rys. 4. Wizualizacja rozkładu wartości skutecznej RMS (za okres napięcia sieciowego) natężenia pola elektrycznego E w przekroju anteny wzdłuż toru linii – mapa izolinii



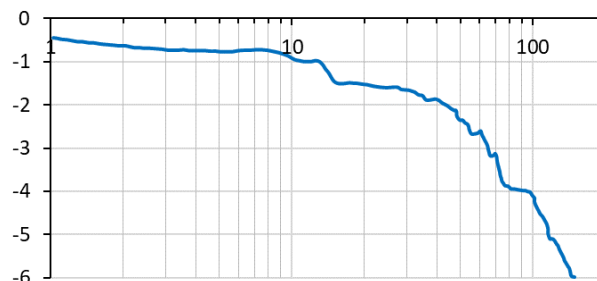
Rys. 5. Wizualizacja rozkładu wartości skutecznej RMS (za okres napięcia sieciowego) natężenia pola elektrycznego E na wysokości 2 m nad ziemią w osi poziomej prostopadłej do toru linii WN w środku przęsła (skala po lewej) i 2 m od słupa (skala po prawej)



Rys. 6. Wizualizacja rozkładu wartości skutecznej RMS (za okres napięcia sieciowego) natężenia pola elektrycznego E na wysokości 2 m nad ziemią w osi poziomej wzdłuż toru linii WN (0 m na osi odciętych wyznacza położenie konstrukcji słupa)

Jako wartość definiującą narażenie na oddziaływanie pola obrano wartość skuteczną (średniokwadratową) definiowaną za okres napięcia sieciowego (20 ms).

Na Rys. 7 przedstawiono zależność błędu obliczeń (zaokrąglenia) w funkcji numeru iteracji obliczeniowej. Dla modelu obliczeniowego zoptymalizowano proces obliczeń osiągając już po 140 iteracjach akceptowalny błąd obliczeniowy rzędu 10^{-6} wartości względnej potencjału skalarnego lub wektorowego, co w praktyce oznacza błąd procentowy wartości pola E poniżej 1%.



Rys. 7. Wizualizacja wartości błędów obliczeń w funkcji liczby iteracji algorytmu obliczeniowego

Wnioski

Na podstawie obliczeń symulacyjnych rozkładu pola elektrycznego w obszarze obliczeniowym składającym się z linii WN oraz konstrukcji słupowej PLN111 T na obszarze całego przęsła (o długości minimalnej 180 m) nie stwierdzono przekroczenia wartości dopuszczalnych długostrzale. Dodatkowo konstrukcja słupa PLN111 T wykazuje korzystne cechy ekranujące dla częstotliwości podstawowej harmonicznej i umożliwia skuteczne umiejscowienie systemów radiokomunikacji na szczycie konstrukcji.

Przedstawione na rysunkach 3-6 wyniki symulacji numerycznych metodą elementów skończonych pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że dla przyjętych konfiguracji przewodów konstrukcji słupowych PLN111 serii T maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego na wysokości 2 m pod linią i w otoczeniu słupa nie przekraczają wartości dopuszczalnych, dla miejsc dostępnych dla ludzi w ograniczonym czasie przebywania określonych przepisami i wynikających z norm, tj. $IPNp-E = 10 \text{ kV/m}$.

Podziękowania: Mikołaj Nowak – laureat stypendium naukowego START korzystający z wsparcia finansowego Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP).

Praca dofinansowana z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (POIR.04.01.04-00-0060/20).

Autorzy: dr hab. inż. Marek Olesz, marek.olesz@pg.edu.pl; dr inż. Mikołaj Nowak, mikolaj.nowak@pg.edu.pl; dr inż. Leszek Litzbarski, leszek.litzbarski@pg.edu.pl; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, mgr inż. Paweł Szwarzewski, pawel.szwarzewski@energia.pl; Orlen Projekt S. A.

LITERATURA

- [1] Szałkowski D., Bieńkowski P., Gumieła J., Ograniczenie natężenia pola elektrycznego pod linią napowietrzną 110 kV poprzez dedykowaną konfigurację geometryczną przewodów roboczych, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 12/2017
- [2] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, Dz.U. 2019 poz. 2448
- [3] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dziennik Ustaw 2018, poz. 1286
- [4] PN-EN 50341-1:2013-03, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne
- [5] PN-EN 50341-2-22:2016-04, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski
- [6] Skomudek W., Szpindler P., Rozkład składowych pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych wysokich napięć wykonanych na słupach pełnościennych, PAK vol. 59, nr 7/2013