

Projektowanie układów uziomów dla linii WN i najwyższych napięć w aspekcie utrzymania wysokiego poziomu ich trwałości

Mirosław Zielenkiewicz

Centrum Ochrony przed Przepięciami i Zakłóceniami Elektromagnetycznymi
w Białymstoku – RST sp.j., m.zielenkiewicz@rst.pl

PRZEZNACZENIE UZIOMÓW LINII NAPIĘĆ 110 -400 kV I GŁÓWNE WYMAGANIA PSE

Linie wysokich napięć (WN - 110 kV i 60 kV) i linie najwyższych napięć (NN - 750 kV, 400 kV i 220 kV) z oczywistych powodów wymagają stosowania skutecznych środków zabezpieczeń służących nie tylko zapewnieniu ich nieprzerwanego funkcjonowania, ale również mających za zadanie ochronę przed porażeniem ludzi znajdujących się w ich pobliżu. Jednym z podstawowych elementów sieci elektroenergetycznych zapewniających to bezpieczeństwo jest układ uziomów słupów linii napowietrznych, od którego jakości, mierzonej trwałością jego zaprojektowanych parametrów w czasie, zależy rzeczywista skuteczność zastosowanych środków ochronnych.

Najistotniejsze zadania układu uziomów linii 110-400 kV to z pewnością:

- a) utrzymanie odpowiednio niskich poziomów napięć:
 - na powierzchni gruntu a także na przewodzących prąd elementach konstrukcji urządzeń elektrycznych połączonych z tym uziomem w celu ochrony życia ludzi i zwierząt;
 - na izolacji głównej linii w trakcie ograniczenie wartości przepięć,
- b) zapewnienie przepływu prądów elektrycznych z linii do gruntu w warunkach:
 - normalnej pracy dla zapewnienia poprawnego funkcjonowania sieci, instalacji i urządzeń;
 - w stanach awaryjnych, gdy trwałemu uszkodzeniu ulega izolacja główna;
 - przy czasowym przebiciu izolacji głównej w wyniku oddziaływania przepięć, np. w wyniku bezpośrednich wyładowań piorunowych.

W związku z tym uziom linii WN i NN powinien być projektowany tak, aby spełniał jednocześnie wymagania ochrony przeciwporażeniowej oraz odgromowej. W Standardowych Specyfikacjach Funkcjonalnych PSE (w dalszej treści niniejszego artykułu nazywanych standardowymi specyfikacjami bądź specyfikacjami) odnoszących się do linii NN możemy znaleźć następujące wymagania dotyczące uziomów:

- a) każdy słup linii powinien być wyposażony w układ uziomów [2],
- b) układ uziomów powinien być dobrany do warunków zwarciowych występujących w linii elektroenergetycznej oraz spełniać wymagania w zakresie ochrony odgromowej linii ([2], [3]),
- c) wartość rezystancji uziemienia słupa linii elektroenergetycznej mierzona metodą spadku napięcia o małej częstotliwości (np. częstotliwości sieciowej):
 - w istniejących liniach NN [4]: nie powinna być większa a od 15 Ω dla gruntów o rezystywności $\rho \leq 1000 \Omega\text{m}$ lub 20 Ω dla gruntów o rezystywności $\rho > 1000 \Omega\text{m}$, niezależnie od sezonowych zmian rezystywności gruntu;
 - w liniach nowobudowanych [3]: nie powinna być większa od 15 Ω , niezależnie od sezonowych zmian rezystywności gruntu,
- d) dla słupów zlokalizowanych w miejscach często uczęszczanych, jeśli w pobliżu uziomów słupa linii wystąpi przekroczenie dopuszczalnych wartości napięć dotykowych rażeniowych, to należy zastosować dodatkowe środki wyrównywania i ograniczania potencjału, takie jak: otokowe uziomy wyrównawcze i/lub warstwy elektroizolacyjne na powierzchni gruntu lub ograniczyć dostęp do miejsc, w których napięcia rażeniowe mogą stanowić zagrożenie dla ludzi [3].

TRWAŁOŚĆ UKŁADU UZIOMÓW

W ogólnie przyjmowanym stanowisku [6] trwałość uziomu odnoszona jest do stopnia skorodowania jego elementów i określana jest jako okres jego użytkowania od chwili zainstalowania do czasu, gdy z powodu korozji ziemnej metalowych elementów może nastąpić zmniejszenie ich przekroju porzecznego na tyle znacznego, że istnieje duże prawdopodobieństwo ich przerwania. Mając jednak na uwadze zasadnicze przeznaczenie układu uziomów, jakim jest przewodzenie prądów w stanach nienormalnej pracy sieci elektroenergetycznej podczas bezpośrednich wyłączeń atmosferycznych lub awarii urządzeń skutkujących zwarciami doziemnymi, wydaje się, że **pojęcie trwałości uziomów należy przede wszystkim powiązać ze zdolnością wszystkich elementów układu uziomów - w całym okresie ich eksploatacji - do przewodzenia prądów zwarciovych i udarowych (piorunowych), o wartościach przyjętych do obliczeń na etapie projektowania a wynikających z miejsca lokalizacji uziomu w sieci elektroenergetycznej oraz spodziewanego poziomu zagrożenia piorunowego, bez zmiany wymaganych parametrów elektrycznych i mechanicznych w czasie. Odporność korozyjna układu uziomów powinna być przy tym tak dobrana, że w zaplanowanym okresie eksploatacji nie powinno być możliwe zmniejszenie przekroju przewodników układu uziomu do wartości, przy których zostanie ograniczona ich zdolność przewodzenia prądu.**

WYKORZYSTANIE POSADOWIEŃ SŁUPÓW NA UZIOMY A TRWAŁOŚĆ UKŁADÓW UZIOMÓW SŁUPÓW WN I NN

Wykorzystanie naturalnych uziomów zawsze wspomaga uzyskanie odpowiednich wartości rezystancji uziemienia układu uziomów i przyczynia się do zmniejszenia kosztów ich budowy. Również w odniesieniu do układów uziomów linii WN i NN w standardowych specyfikacjach [3] i [4] zapisano wymaganie wykorzystania uziomów naturalnych w postaci fundamentów słupów i ich konstrukcji wsporczych oraz zakopanych części słupów uzupełnianych uziomami sztucznymi. Przykład często stosowanych posadowień słupów wykonanych w formie żelbetowych stóp fundamentowych został pokazany na rys. 1.

Skorzystajmy z definicji zaproponowanej przez E.Musiąła [7], słusznie przyjmując, że „*uziom fundamentowy stanowią elementy metalowe zalane betonem w fundamencie budowli, mającym niezawodną styczność elektryczną z otaczającym gruntem*”. I właśnie ta niezawodna styczność z gruntem, a także stabilne warunki temperaturowe i wilgotnościowe żelbetowej konstrukcji umieszczonej w gruncie, przekładające się na niezmiennosc jej parametrów elektrycznych w czasie a zatem i na trwałość układu uziomów, to podstawowe przyczyny, dla których zdecydowano się na wykorzystanie zbrojonych stąg fundamentów na uziomy.

Spróbujmy ocenić, w jakim zasadnym jest wykorzystanie posadowień słupów linii WN i NN jako naturalnych uziomów. Jeśli przyjmujemy, że rezystancja uziomu fundamentowego wyraża się następującą empiryczną zależnością [8]

$$R = 0,2 \frac{\rho}{\sqrt[3]{V}} [\Omega] \quad (1)$$

gdzie: ρ – lokalna rezystywność gruntu, [$\Omega \text{ m}$], V – to objętość fundamentu, [m^3], to dla celów projektowych możemy zgrubnie oszacować, jaką spodziewaną rezystancję będzie miała na przykład stopa fundamentowa o znanych wymiarach geometrycznych.

Szacunkowe wyliczenia dla stopy fundamentowej typu T 310-65 o kształtach widocznych na rys. 1 pokazują, że jej objętość wynosi **1,16 m³** (przy wymiarach: podstawa w formie cylindra o średnicy 1,2 m i wysokości 0,27 m; część górna w formie ściętego stożka z podstawą o średnicy ok. 0,8 m, wysokości - 2,9 m i średnicy górnej – 0,4 m). W tabeli 1 zestawiono szacunkowe wartości rezystancji tej stopy pogrążonej w gruntach o różnych rezystywnościach.



Rys. 1. Prefabrykowane żelbetowe stopy fundamentowe słupów linii WN (dzięki uprzejmości ELBUD sp. z o.o. sp. k.)

Tabela 1. Szacunkowe wartości rezystancji stopy fundamentowej typu T 310-65 w gruntach o różnych rezystywnościach									
	R, Ω								
$\rho, \Omega\text{m}$	50	100	150	200	250	300	500	1000	3500
V, m ³									
1,16	9,53	19,06	28,59	38,12	47,65	57,17	95,29	190,58	667,04

W skrajnych przypadkach fundamenty słupów linii napowietrznej utrzymujące stabilnie ich konstrukcję zawierają żelbet o objętości przekraczającej nawet 100 m³. Dla przykładu: przy budowie linii 400 kV Ełk-Łomża, gdzie z uwagi na warunki geologiczne konieczne było zaprojektowanie posadowienia wybranych słupów E33 na palach fundamentowych jedno stanowisko fundamentowe słupa zawierało cztery oddzielne fundamenty, z których każdy składał się z prostokątnego oczepu (zwieńczającego układ pali), kotwy oraz z 4 cylindrycznych pali fundamentowych. Dla słupa przelotowego E33 Pn+0 o wysokości maksymalnej 58,40 m i wymiarach w podstawie 8,80 x 5,30 m zaprojektowano stanowisko fundamentów, którego podziemna część składa się z czterech prostokątnych oczepów P/450, każdy o wymiarach 4,5x4,5x0,8 m oraz czterech cylindrycznych pali, każdy o średnicy \varnothing 0,8 m i długości 12 m. Objętość takiego jednego kompletu oczepu z czterema palami wynosi 40,33 m³, a sumaryczna objętość czterech zestawów fundamentów takiej podziemnej żelbetowej konstrukcji nośnej słupa to aż **161,31 m³**. W ostatnim wierszu tabeli 2 zestawiono szacunkowe wartości wypadkowej rezystancji stanowiska fundamentowego pogrążonego w gruntach o różnych rezystywnościach.

Z przedstawionych szacunkowych wyliczeń wynika, iż nawet dla stosunkowo małych objętości fundamentów rezystancja naturalnego uziomu fundamentowego słupów linii Wn i NN osiąga na tyle niskie wartości, że do kategorii zaniedbań należy zaliczyć fakt jej nieuwzględnienia już na etapie projektowania.

Tabela 2. Szacunkowe wartości rezystancji fundamentu żelbetowego o różnych objętościach V w zależności od rezystywności gruntu ρ , w którym go pograżono										
		R, Ω								
$\rho, \Omega\text{m}$		50	100	150	200	250	300	500	1000	3500
V, m^3										
1		10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	100,00	200,00	700,00
2,5		7,37	14,74	22,1	29,47	36,84	44,21	73,68	147,36	515,76
5		5,85	11,7	17,54	23,39	29,24	35,09	58,48	116,96	409,36
7,5		5,11	10,22	15,33	20,43	25,54	30,65	51,09	102,17	357,61
10		4,64	9,28	13,92	18,57	23,21	27,85	46,42	92,83	324,91
25		3,42	6,84	10,26	13,68	17,1	20,52	34,2	68,4	239,4
50		2,71	5,43	8,14	10,86	13,57	16,29	27,14	54,29	190,01
75		2,37	4,74	7,11	9,49	11,86	14,23	23,71	47,43	165,99
100		2,15	4,31	6,46	8,62	10,77	12,93	21,54	43,09	150,81
150		1,88	3,76	5,65	7,53	9,41	11,29	18,82	37,64	131,75
161,31		1,84	3,67	5,51	7,35	9,19	11,02	18,37	36,74	128,59

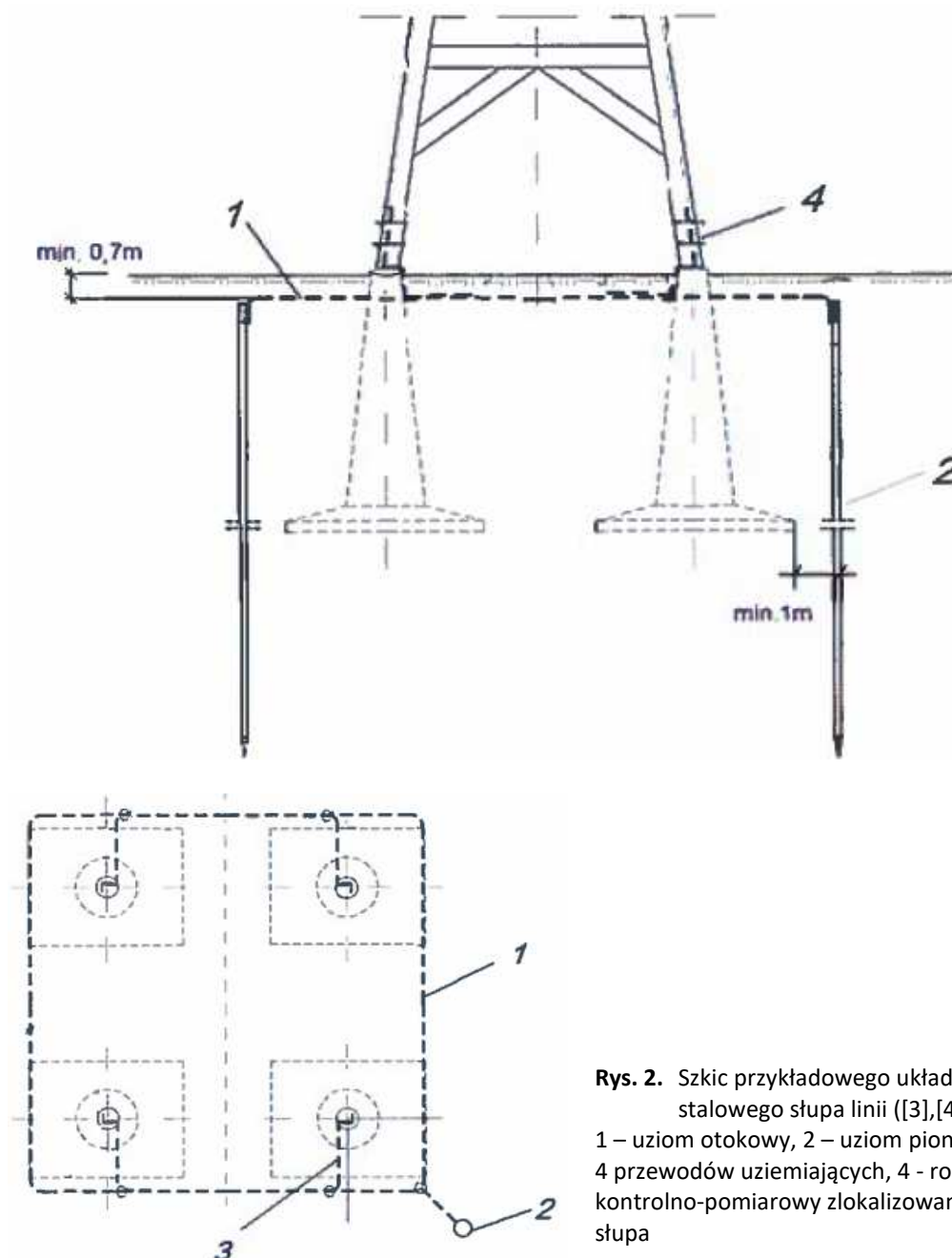
Należy w tym miejscu zaznaczyć, iż chociaż wymagania standardowych specyfikacji funkcjonalnych PSE odnoszące się do uziomów wyraźnie podkreślają konieczność wykorzystania fundamentów słupów, ale również i konstrukcji wsporczych słupów oraz zakopanych części słupów jako uziomów naturalnych, to niestety brak w nich szczegółowych rozwiązań w tym zakresie. Taki stan w rezultacie przekłada się na wysoki poziom zwątpienia co do stopnia spełnienia wymagań tych specyfikacji w odniesieniu do uziomu fundamentowego w aktualnie opracowywanych rozwiązaniach projektowych.

Pamiętać również należy, że żelbetowe posadowienia słupów linii elektroenergetycznych nie powinny być stosowane jako jedyne elementy układu uziomów mając na względzie niekorzystne zjawiska cieplne przejawiające się w betonie pod wpływem przepływających prądów zwarciovych. Ich uzupełnienie uziomami dodatkowymi sztucznymi w postaci łączonych wzajemnie elementów pograżanych pionowo stanowi doskonały dodatek do uziomów fundamentowych nie tylko z uwagi na możliwość odprowadzenia w ten sposób znacznej części energii cieplnej wyzwolanej podczas przepływu prądów zwarciovych do gruntu, ale również ze względu na ich korzystne dynamiczne charakterystyki rozpraszania w gruncie energii prądów wyładowań piorunowych.

Przyjrzyjmy się zatem rys. 2, na którym zamieszczono graficzne przedstawienie przykładowego układu uziomów stalowego słupa linii, zaczerpnięte ze specyfikacji [3] i [4], identycznego dla linii istniejących i nowoprojektowanych. Jak można zauważyć, istotnym elementem układu uziomów słupów linii WN i NN (występującym „*incognito*” na rys. 2, bo nienazwanym) są prefabrykowane żelbetowe stopy fundamentowe z uwagi na ich znaczne rozmiary i, jak pokazano to wcześniej, ze względu na ich wydatny udział w wypadkowej rezystancji uziomu. Brak wskazania na tym rysunku stóp fundamentowych obniża w oczach projektanta ich wagę przy późniejszym podejmowaniu decyzji o ich wykorzystaniu jako uziomu naturalnego. Potwierdzeniem tej tezy jest fakt, że w niektórych projektach linii WN i NN nie ma żadnych odniesień do konieczności wykorzystania fundamentów słupów jako uziomów naturalnych.

Osiągnięcie konkretnej wartości tej rezystancji, z uwagi na znaczne różnice odnośnie do

rezystywności różnych gatunków gleby, wymaga wielkiej staranności od projektanta już na etapie podejmowania decyzji o kształcie i konstrukcji uziomu. Do podstawowych elementów tej staranności należy zaliczyć wykonanie pomiarów lokalnej rezystywności gruntu przed rozpoczęciem projektowania układu uziomów słupów linii elektroenergetycznej oraz oszacowanie na tej podstawie spodziewanej wartości rezystancji wnoszonej do układu uziomów słupa przez uziomy fundamentowe. Niezbędna wydaje się przy tym bliska współpraca z geologiem, który zawsze dokonuje analizy warunków glebowych w miejscu posadowienia słupa, a następnie przekazuje wyniki swoich badań konstruktorowi stóp fundamentowych. Na przykładzie wyników tabeli 1 i tabeli 2 widać znaczne różnice w wartości osiąganey rezystancji tych samych objętości uziomów przy różnych rezystywnościach. Tak więc takim samym układem uziomów w różnych warunkach glebowych projektant może osiągać diametralnie różne wartości rezystancji uziemienia, co ma szczególne znaczenie w trudnych warunkach glebowych, przy bardzo wysokich rezystywnościach gruntu. Stąd wniosek, że wymagania wobec rzetelności projektanta muszą być bardzo wysokie.



Rys. 2. Szkic przykładowego układu uziomów stalowego słupa linii ([3],[4]):
 1 – uziom otokowy, 2 – uziom pionowy, 3 – jeden z 4 przewodów uziemiających, 4 - rozłączny zacisk kontrolno-pomiarowy zlokalizowany na konstrukcji słupa

Wydaje się, że przedstawione argumenty wyraźnie potwierdzają potrzebę stosowania naturalnych uziomów fundamentowych z uwagi na cel, jakiemu mają one służyć: czyli przewodzeniu prądów o znacznych wartościach. Trzeba jednak pamiętać, że z założenia taki uziom tworzy samo stalowe zbrojenie żelbetowego fundamentu powiązane wzajemnie drutem wiązałkowym. Z oczywistych względów nie można przypisać takiemu połączeniu dobrego przewodnictwa prądu elektrycznego. Istnieje więc, potwierdzone badaniami, poważne zagrożenie, że przepływ przez taki uziom prądów o dużych wartościach, rzędu kA - dziesiątek kA, może powodować nieodwracalne zmiany w strukturze żelbetowego fundamentu w wyniku powstawania naprężeń mechanicznych w otulinie betonowej prętów zbrojeniowych. Przyczyną tych naprężeń jest zarówno wydzielanie się ciepła z uwagi na dużą gęstość prądów jak i znaczny opór przejścia połączeń wykonanych drutem wiązałkowym oraz elektrodynamiczne oddziaływanie prądów. Należy podkreślić, że maksymalna wartość prądu zwarcia 1- i 3-fazowego sieci przesyłowej 110-400 kV została określona jako równa 63 kA i z pewnością przepływ tak dużych prądów przez uziom fundamentowy może mieć znaczący wpływ na jego trwałość.

Na pytanie jak dobierane są parametry elementów uziomu fundamentowego słupa do spodziewanych wartości prądów zwarciovych trudno jest niestety odpowiedzieć, gdyż brak takich wskazówek w standardowych specyfikacjach odnoszących się zarówno do budowy uziomów ([3], [4]) jak i do samych fundamentów [5]. Brak także takich odniesień w tych specyfikacjach do konstrukcji uziomu fundamentowego także odnośnie do jego zdolności przewodzenia prądów udarowych pochodzenia piorunowego. Znaleźć tu można co prawda słuszne wymaganie, aby elementy połączeniowe uziomów i przewodów uziemiających przeznaczone do stosowania w gruncie lub w powietrzu spełniały wymagania normy PN-EN 62561-1:2012E [14] dla odporności klasy H na oddziaływanie prądów wyładowań atmosferycznych, jednak nie określa się tu warunków dla połączeń stali zbrojeniowej w fundamencie. Przy tym zdecydowanie nie we wszystkich projektach uziomu słupa spotyka się wymaganie potrzeby spełnienia takich wymogów oraz konieczności dołączenia odpowiedniej deklaracji wykonawcy w tym zakresie po wykonaniu montażu. Brak wykazu norm przywołanych w specyfikacjach [3], [4] z pewnością również nie ułatwia prawidłowego wykonania zaleceń zamieszczonego w specyfikacjach.

Należy wziąć przy tym pod uwagę niepewność co do wartości oporności wzajemnych połączeń zbrojenia wykonanych za pomocą drutu wiązałkowego, a więc spodziewaną dużą rezystancję przejścia powiązań prętów zbrojeniowych a w związku z tym wypada godzić się z tezą, że „uziom fundamentowy naturalny to rozwiązanie na ogół niedoskonałe, które powinno być wykluczone z poważnych rozważań” [7]. Dla zapewnienia pewności połączeń zbrojenia konieczne jest zastosowanie rozwiązań gwarantujących ich galwaniczną ciągłość poprzez dodanie dodatkowych przewodników trwale łączących konstrukcję żelbetową za pomocą małooporowych połączeń. z tego powodu uziom fundamentowy z dodatkowymi przewodami należy jednak zaliczyć do uziomów fundamentowych sztucznych. Norma dotycząca uziemienia instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV [12] nie wnosi wielu szczegółów w tym przedmiocie. Warto więc skorzystać z wymagań norm odgromowych [13], gdzie znajdziemy liczne informacje dotyczące sposobu zapewnienia galwanicznej ciągłości konstrukcji stalowej w obiektach żelbetowych. W normie tej, dla przykładu, nie uznaje się za ciągły galwanicznie żelbet, jeśli całkowita rezystancja elektryczna mierzona od jego najwyższej części do ziemi jest większa od 0,2 Ω . W takim wypadku stal zbrojeniowa nie może być wykorzystywana jako naturalny przewód odprowadzający i należy stosować zewnętrzne przewody odprowadzające prąd piorunowy.

W związku z niepewnością odnośnie zdolności odprowadzania prądów piorunowych przez naturalne uziomy fundamentowe istotnym wydaje się konieczność uzupełnienia Standardowych Specyfikacji Funkcjonalnych PSE o wymagania w stosunku do uziomu fundamentowego słupów w warunkach przepływu przez jego kubaturę prądów zwarciovych oraz udarów prądowych wskutek wyładowań piorunowych dla zapewnienia odpowiedniego poziomu jego trwałości. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż zaproponowana w niniejszym artykule definicja trwałości uziomów

powiązana z ich zdolnością - w całym okresie ich eksploatacji - do przewodzenia określonych wartości prądów (zwarciovych i udarowych) doskonale wpisuje się w opisane warunki prawidłowego funkcjonowania uziomów fundamentowych.

Dla poprawienia ogólnego poziomu trwałości układu uziomów warto również wprowadzić konieczność stosowania na połączenia jego elementów zgrzewania egzotermicznego, szczególnie w miejscach lokalizacji wszystkich podziemnych połączeń elementów układu uziomu. Podniesie to na bardzo wysoki poziom odporność korozyjną tych najbardziej zagrożonych korozją miejsc i zmniejszy koszty eksploatacyjne z uwagi na brak potrzeby osłaniania takich połączeń przed wilgocią.

PROBLEMY Z DOBREM ODPOWIEDNIH MATERIAŁÓW NA UZIOMY

Kolejnym, istotnym zadaniem projektanta w zapewnieniu wysokiego poziomu trwałości jest właściwy dobór materiałów na uziomy. Aktualne Standardowe Specyfikacje Techniczne uziomów linii NN dopuszczają stosowanie na uziomy sztuczne następujących materiałów: miedzi, stali miedziowanej lub stali cynkowej. Dodatkowo zaznaczono, iż:

- a) uziomy pionowe powinny być wykonane z rur miedzianych, prętów miedzianych lub prętów stalowych miedziowanych;
- b) uziomy poziome (w tym otokowe) oraz przewody uziemiające powinny być wykonane z taśm miedzianych, taśm stalowych miedziowanych lub taśm stalowych cynkowanych.

Zarówno miedź jak i stal miedziowana – to materiały, które doskonale dopasowują się do potencjału elektrochemicznego uziomu fundamentowego, charakteryzującego się potencjałem bliskim potencjałowi miedzi. Zastanawiające jest jednak umieszczenie w tym wykazie taśm stalowych cynkowanych, gdyż różnica potencjałów między stalą ocynkowaną w gruncie ($-0,7 \div -1,0$ V) a uziomem fundamentowym ($-0,1 \div -0,3$ V) zdecydowanie przekracza 0,1 V uznawane za bezpieczne z punktu widzenia zagrożenia korozyjnego dla wartości stosunku pól powierzchni elektrod $S_K/S_A > 100$ (S_K – powierzchni uziomu fundamentowego będącym katodą i S_A - powierzchni taśmy cynkowej w gruncie stanowiącej anodę) lub 0,6 V przy zbliżonych polach powierzchni obu elektrod [7]. W związku z tym, że obydwie elektrody pomieszczone są w gruncie i betonie, a więc w środowisku elektrolitycznym, to połączenie ich za pośrednictwem przewodu uziemiającego skutkuje przepływem prądu korozyjnego między anodą i katodą w tak powstałym ogniwie korozyjnym. Chociaż prądy te nie są duże, ale płyną stale, z uwagi na zwarcie elektrod tak powstałego ogniwa elektrolitycznego, powodując przyspieszoną korozję stali.

Od wielu lat wiadomo, że stal cynkowana nie zawsze jest najkorzystniejszym rozwiązaniem, jeżeli chodzi o warunki glebowe, a w niektórych przypadkach (np. połączeń z żelbetowym fundamentem) jej stosowanie jest wręcz zabronione według zaleceń obowiązujących norm. Zagadnienie to było już wielokrotnie szczegółowo opisywane w literaturze technicznej na przestrzeni ostatnich lat. Zarówno normy dotyczące instalacji elektrycznych[9], jak i normy z zakresu ochrony odgromowej zwracają uwagę na ryzyko korozji elektrochemicznej stali ocynkowanej pograżonej w gruncie łączonej ze stalą zbrojeniową w otulinie betonu uziomu fundamentowego. Problem ten poruszany jest również w licznych publikacjach technicznych (np. [7], [9], [10]).

Występowanie taśm stalowych cynkowanych w Standardowych Specyfikacjach Technicznych z pewnością wynika z faktu, iż jeszcze do niedawna taśmy stalowe miedziowane nie były dostępne na rynku, a używanie taśm miedzianych było zbyt drogie. Obecnie jednak dostępne są taśmy ze stali miedziowanej, które zarówno ze względu na potencjał elektrochemiczny zbliżony do potencjału fundamentu jak i akceptowalną cenę powinny zastąpić taśmy ze stali cynkowej, przestarzałe technicznie w charakterze elementów uziomu sztucznego łączonego z uziomem fundamentowym. Zaleca się odpowiednie dostosowanie w tym zakresie Standardowych Specyfikacji Technicznych odnoszących się do uziomów linii 110-40 kV.

Jeszcze jednym z powodów, dla których w specyfikacjach wymienia się taśmy stalowe cynkowane jest konieczność podłączenia do uziomu stalowej konstrukcji nośnej słupów za pośrednictwem przewodu uziemiającego. Klóci się to niestety z potencjałami elektrochemicznymi innych elementów układu uziomów słupa. Optymalnym w tym miejscu rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie taśmy miedziowanej elektrolitycznie pokrytej cienką warstwą cyny, dla odpowiedniego ograniczenia różnicy potencjałów w miejscu styku z cynkowaną konstrukcją nośną słupa. Rozwiązanie to jest nieznacznie droższe o taśmy miedziowanej, jednak szeroko już stosowane za granicą na rynkach arabskich.

Należy pamiętać o tym, iż układ uziomów sztucznych każdego słupa powinien być montowany jeszcze przed zasypaniem fundamentu z uwagi na fakt, iż każde jego późniejsze odkopywanie będzie wymagało odpowiedniego zabezpieczenia konstrukcji słupa dla zachowania jego stateczności. Także jakakolwiek ewentualna naprawa tego uziomu w trakcie eksploatacji linii elektroenergetycznej wiąże się z koniecznością stosowania podrażających tę naprawę środków zabezpieczających stateczność słupa. Jest to kolejny argument na stosowanie uziomów sztucznych o jak najdłuższym okresie trwałości.

DOBÓR PRZEKROJU PRZEWODÓW UZIEMIAJĄCYCH

Zgodnie z wymaganiami stawianymi w Standardowej Specyfikacji Funkcjonalnej PSE [1] przekrój przewodów odgromowych powinien być dobrany do prądów zwarciovych występujących w chronionej linii oraz wymaganej wytrzymałości mechanicznej. Analogiczne zapisy można tu znaleźć również odnośnie do elementów układu uziomów. Z wymagań specyfikacji PSE można wywnioskować, że układ uziomów powinien być projektowany na maksymalny prąd zwarcia jedno- lub 3-fazowego z ziemią z uwzględnieniem spodziewanego czasu ich trwania. Według zapisów specyfikacji [1]:

- a) maksymalna wartość prądu zwarcia 1- i 3-fazowego w węzłach elektroenergetycznej sieci przesyłowej dla wszystkich poziomów napięć: 110 kV, 220 kV i 400 kV została określona jako równa 63 kA [1], a standardowe szeregi wartości znamionowych prądów zwarciovych dla stacji, urządzeń i aparatury to: 31,5 kA; 40 kA; 50 kA; 63 kA (prądy w lokalizacjach słupów linii osiągają mniejsze wartości i wymagają dodatkowych obliczeń, jednak osiągają one wartości nawet około 20 kA);
- b) czasy likwidacji zwarć 3-fazowych, 3-fazowych z ziemią, 2-fazowych, 2-fazowych z ziemią, 1-fazowych z ziemią w systemie elektroenergetycznym, licząc od początku powstania zwarcia do czasu przerwania łuku nie powinny przekroczyć:
 - 120 ms - przy działaniu zabezpieczenia podstawowego dla sieci 400 kV i sieci 220 kV
 - 150 ms - przy działaniu zabezpieczenia podstawowego dla sieci 110 kV,
 - 500 ms - przy działaniu zabezpieczeń rezerwowych w sieci 400 kV i 220 kV,
 - 800 ms - przy działaniu zabezpieczeń rezerwowych w sieci 110 kV dedykowanych dla zabezpieczanego elementu sieci,
 - 350 ms - w przypadku działania układu rezerwy lokalnej wyłącznikowej wyłączającej wyłączniki zasilające miejsce zwarcia.

Z uwagi na zjawiska ciepłe związane z przepływem prądu zwarciovego przez elementy układu uziomów słupa linii elektroenergetycznej, mając na uwadze powyższe charakterystyki prądowe i czasowe spodziewanych prądów zwarciovych, przy doborze materiałów na układy uziomów szczególnie istotne powinno być również uwzględnienie, oprócz wartości prądu zwarciovego obliczonej dla danej lokaty słupa, także rzeczywistego czasu trwania zwarcia w miejscu jego lokalizacji, zależnego od czasu zadziałania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeń w danej linii.

Obciążalność prądowa uziomu jest to największa wartość prądu jaki może być przewodzony przez uziom do ziemi bez nadmiernego nagrzewania elementów uziomu i otaczającego gruntu. Przy zbyt dużych wartościach prądu i nadmiernej gęstości prądu, woda zawarta w gruncie w pobliżu uziomu odparowuje, powodując wysuszenie gruntu i wzrost jego rezystywności. Tym bardziej nie jest

dopuszczalne przekroczenie temperatur plastyczności przewodów uziomowych, gdyż skutkować to będzie w pierwszej kolejności spłynięciem warstwy ochrony korozyjnej, a następnie możliwym nadwyżeniem ciągłości tych przewodów lub nawet całkowitą jej utratą.

Dobierając przewody uziemiające projektant opiera się zazwyczaj o tabele przewodów wykonanych z różnych materiałów, o różnych kształtach i przekrojach, zamieszczonych w normach dotyczących uziomów (np. dla instalacji zasilania elektroenergetycznego do 1 kV lub powyżej 1 kV oraz w normach odgromowych). Należy zaznaczyć, że tabele te zawierają minimalne wymiary materiałów stosowanych na przewody uziomowe z uwagi na ich wytrzymałość mechaniczną oraz odporność korozyjną oraz że nie wszystkie zawarte w tych tabelach dane się pokrywają. Minimalne wymiary pozyskane z tablic niekoniecznie muszą być tymi właściwymi, szczególnie przy przewodzeniu prądów zwarciovych rzędu dziesiątek kA. W takich przypadkach konieczne jest rozważenie wstępnego podziału tego prądu na kilka przewodów, a następnie ocenę jego zdolności do odprowadzania tak dużych wartości prądu. Możemy skorzystać ze wzoru na prądy dopuszczalne dla określonego przekroju przewodów uziemiających i przewodów uziomowych lub wymaganego przekroju przewodu w funkcji prądu, zamieszczonego w normie odnoszącej się do uziemienia instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV [12]:

$$I = \frac{A K}{\sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}}, \quad (2)$$

gdzie: I [A] – znamionowy prąd płynący przez przewód lub uziom (wartość skuteczna),
 A [mm²] – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu uziemiającego/uziomowego
 t_F [s] – czas trwania doziemienia,
 K A√s/mm² – stała zależna od materiału przewodnika uziomu przy temperaturze początkowej 20°C,
 β – odwrotność rezystancyjnego współczynnika temperaturowego przewodnika, przez który przepływa prąd przy temperaturze 0°C,
 θ_i [°C] – temperatura początkowa,
 θ_f [°C] – temperatura końcowa.

lub z analogicznego wzoru zaczerpniętego z przewodnika IEEE po bezpieczeństwie przy uziemianiu stacji elektroenergetycznych [15]:

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad (3)$$

gdzie: I [kA] – znamionowy prąd płynący przez przewód lub uziom (wartość skuteczna),
 A [mm²] – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu uziemiającego/uziomowego,
 $TCAP$ – pojemność cieplna na jednostkę objętości,
 t_c [s] – czas przepływu prądu,
 K_o [°C] – $1/\alpha_o$ lub $(1/\alpha_r) - T_r$ - współczynnik temperaturowy,
 T_m [°C] – maksymalna dopuszczalna temperatura,
 T_a [°C] – temperatura otoczenia,
 T_r [°C] – temperatura odniesienia dla stałej materiałowej,
 α_o [1/°C] – współczynnik cieplny rezystywności przy 0°C,
 α_r – współczynnik cieplny rezystywności przy temperaturze T_r ,
 ρ_r [μΩcm] – rezystywność przewodu,

W normie [12] do wzoru (2) dołączono wartości stałych β i K jedynie dla miedzi, aluminium i stali, w związku z czym wzór ten jest nieprzydatny przy stosowaniu metali z powłokami ochronnymi (np. FeZn, FeCu) - tzw. bimetalu. Wzór (3) jest zdecydowanie bardziej przydatny, gdyż pozwala wykonać obliczenia dla bimetalu, czyli np. dla stalowych płaskowników pokrytych elektrolitycznie warstwą miedzi, które, jak stwierdzono w niniejszym artykule, powinny być stosowane na uziomy poziome i przewody uziemiające stanowisk słupów linii 110-400 kV.

Zakładając, że integralność całego przekroju przewodu musi być utrzymywana przez cały okres eksploatacji słupa dla połączenia bimetalicznego należy do obliczeń przyjmować temperaturę topnienia metalu o niższej temperaturze topnienia, gdyż jej przekroczenie oznacza uszkodzenie powłoki ochronnej, a jednocześnie zmniejszenie przewodności.

W tabeli 3 przedstawione zostały wyniki obliczeń porównawczych przekrojów przewodów uziemiających/uziomowych różnych metali i bimetalii dopuszczonych do stosowania w ziemi przy założeniu, że będzie przez nie płynął prąd zwarciovowy 20 kA. Jak należało się spodziewać płaskownik miedziany, z uwagi na najlepszą przewodność będzie miał przy takim prądzie najmniejszy przekrój Cu 20x4 mm, jednak w dalszym ciągu będzie średnio około 2-krotnie droższy od płaskownika FeCu 40x4 mm wykonanego ze stali pokrytej warstwą miedzi o grubości minimum 70 μm . Płaskowniki stalowe dla takiego prądu zwarciovowego wymagają zdecydowanie większych przekroi poprzecznych: StSt 80x4 mm i FeZn 75x4 mm. W przypadku płaskownika stalowego pokrytego warstwą cynku decydującą okazuje się bardzo niska temperatura topnienia warstwy cynku $T_m = 419^\circ\text{C}$.

Dane obliczeniowe			Materiał przewodu uziemiającego/uziomowego			
			FeCu	Cu	StSt - stal nierdzewna	FeZn
Wartość maksymalna prądu zwarciovowego	I	20 kA				
Czas trwania zwarcia [s]	tc	1 s				
Maksymalna temp. otoczenia	Ta	25 °C				
Maksymalna dopuszczalna temperatura (topnienia)	T_m	1085 °C	1085 °C	1400 °C	419 °C	
Pojemność cieplna na jednostkę objętości	TCAP	3,85	3,42	4,03	3,93	
Współczynnik cieplny rezystywności przy 0°C [1/°C]	α_0	0,00378	0,00381	0,0013	0,0032	
Rezystywność przewodu [$\mu\Omega\text{cm}$]	ρ_r	9,67	1,78	72	20,1	
Współczynnik temperaturowy [°C]	Ko	245	245	749	293	
Przekrój poprzeczny przewodu	Powierzchnia [mm^2]	A	154,33	70,53	301,62	284,99
	Wymiary poprzeczne	a x b	40x4 mm	20x4 mm	80x4 mm	75x4 mm

Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż w wymaganiach PSE nie określono dokładnie, jakiej grubości powinny być ochronne warstwy przeciwkorozyjne na przewodach uziemiających i uziomowych (prętach pograżanych pionowo i płaskownikach). Oznacza to, iż mogą być zastosowane produkty niekonieczne dobrej jakości. Na przykład norma PN-EN 50522 [12] dopuszcza stosowanie cienkiej warstwy miedzi 100 μm na miedzianych prętach stalowych używanych jako uziomy pionowe, zaś norma odgromowa PN-EN 62305 [13] za minimalną miedzi powłokę dla tych prętów przyjmuje 250 μm . Stosowanie cieńszych niż 250 μm warstw miedzi na prętach pograżanych pionowo należy uznać za poważny błąd, gdyż dawno dowiedziono, że mniejsze warstwy grożą odsłonięciem gołej stali przy wbijaniu w grunt, a więc przyspieszona korozją uziomu.

Sezonowe zmiany rezystywności gruntu

Wymaganie, aby układ uziomów utrzymał zaprojektowaną wartość rezystancji uziemienia w trakcie całego okresu użytkowania bez względu na sezonowe zmiany rezystywności gruntu zostało zapisane w specyfikacjach funkcjonalnych dla linii napięć WN i NN. Brak w nich jednak zaleceń jak w rzeczywistości to wymaganie spełnić oraz jak je kontrolować, a nie jest to zadanie proste. Z obserwacji publikowanych rozwiązań projektowych linii 110-400 kV wynika, że to zagadnienie nie zawsze jest w nich analizowane.

W dokumentacjach projektach spotyka się, co prawda, niezbędne stwierdzenie w stylu: „Rezystancja uziemienia słupów (mierzona bez wpływu rezystancji uziemień sąsiednich słupów) nie powinna być większa od 15 Ω bez względu na sezonowe zmiany rezystancji (*aut.* powinno być: rezystywności !) gruntu”. Czy rzeczywiście jest to zadanie wykonawcy, co sugeruje swoim wpisem projektant ? Jak tego dokonać, gdy nie zmierzono wcześniej rezystywności gruntu w miejscu lokalizacji stanowiska słupa już na etapie projektowania ?

Propozycje rozwiązań projektowych spotykane w standardach również nie do końca godzą się z wymaganiami zachowania stabilności rezystancji uziomu pomimo sezonowych zmian rezystywności gruntu, gdyż uziomy są układane najczęściej zbyt płytko. Warto przypomnieć, że w naszej strefie klimatycznej sezonowe zmiany rezystywności gruntu odnoszą się głównie do wpływu na jej wartość dwóch czynników: wilgotności oraz temperatury. Wilgotność gruntu zależy od stopnia lokalnej wodoprzepuszczalności i zawsze można się spodziewać występowania wód zawieszonych na kontaktach gruntów o różnej wodoprzepuszczalności, czyli piasków i nasypów piaszczystych z podścielającymi je glinami na nawet na płytkich głębokościach poczynając od 0,1 m po powierzchnię terenu. Wyraźnego zwiększenia wilgotności gruntów spodziewać się należy w okresach mokrych, czyli porach poopadowych, a w szczególności poroztopowych. W miejscach, w których występują podłoża słabo przepuszczalne przemieszczanie się wód w głąb gruntu może postępować powoli z uwagi na występowanie podłoży słabo przepuszczalnych już na głębokościach 0,5 - 2 m. Dane na temat lokalnej wodoprzepuszczalności projektant uziomu może uzyskać analizując dokumentację geologiczną wykonywaną zawsze przed posadowieniem fundamentów słupów linii, jednak wiadomo, iż rosnącemu poziomowi wilgotności zawsze towarzyszy zmniejszanie się rezystywności gruntów, co z punktu widzenia wartości lokalnej rezystancji uziomu jest korzystne. Obecność wody w gruncie ma jednak niekorzystny wpływ na odporność korozyjną elementów układu uziomów i w miejscach, gdzie spodziewamy się stałego występowania zwiększonej wilgotności gruntu należy stosować uziomy o wysokiej odporności korozyjnej takie jak: stal nierdzewna, miedź czy stal miedziowana – zdecydowanie najtańsza z nich.

Powszechnie wiadomo też, że przez znaczną część roku temperatury powietrza w Polsce spadają poniżej 0 °C przenosząc się w miesiącach zimowych do gruntu na głębokości określane głębokością przemarzania h_z . Ma to oczywiście znaczenie dla wartości rezystywności gruntu, gdyż ta - po obniżeniu temperatury poniżej 0 °C - wzrasta znacznie osiągając często wartości kilkukrotnie – kilkunastokrotnie większe od tych, znanych nam przy temperaturach dodatnich, przyjmowanych do projektowania uziomów jako dane wyjściowe. Warto więc dla celów projektowania uziomów skorzystać ze znanej od 1981 roku mapy stref przemarzania gruntu zamieszczonej w wycofanej już normie PN-B-03020:1981 [7], na której powierzchnię Polski podzielono na cztery strefy przemarzania:

I strefa - głębokość przemarzania: 0,8 m,

II strefa - głębokość przemarzania: 1,0 m,

III strefa - głębokość przemarzania: 1,2 m,

IV strefa - głębokość przemarzania: 1,4 m.

W normach odgromowych znajdziemy zalecenie, aby głębokość pograżenia oraz typ uziomów dobierać w taki sposób, aby rezystancja uziemienia była stabilna. Oznacza to, że w rozwiązaniach projektowych uziomów należy minimalizować szybkość ich korozji, wysychania i wpływu przemarzania gruntu. Obecne jednak z wymagań Standardowych Specyfikacji Technicznych wynika (rys. 2), że uziomy poziome powinny być układane na głębokości nie mniejszej niż 70 cm pod powierzchnią gruntu. W każdej strefie przemarzania w naszym kraju na tej głębokości grunt przemarznie podnosząc radykalnie wartość rezystancji poziomych elementów uziomu sztucznego słupa. Z tego powodu w normach odgromowych [13] zaleca się, aby górna część uziomu pionowego do głębokości zamarzania gruntu nie była uznawana za użyteczną w warunkach zamarzania. Z oczywistych powodów zalecenie to powinno dotyczyć również uziomów poziomych.

Wydaje się, że przedstawienie w Standardowych Specyfikacjach Funkcjonalnych PSE w jednoznacznej formie wymagań odnoszących się do zminimalizowania wpływu sezonowych zmian rezystywności gruntu jest bardzo aktualne i potrzebne. Pomoże to z pewnością projektantom, zazwyczaj nie posiadającym pełnej wiedzy w tym zakresie, w przedsięwzięciu określonych działań, gwarantujących ustabilizowanie wartości rezystywności gruntu w otoczeniu uziomu słupów w okresie całego roku kalendarzowego, ale i całym zaplanowanym okresie eksploatacji uziomu.

Podsumowanie

Trwałość układu uziomów napowietrznych linii elektroenergetycznych powinna być dobierana stosownie do zaplanowanego okresu użytkowania, dla którego został przeznaczony. Dla linii elektroenergetycznych na napięcie znamionowe 110-400 kV czas ten określany jest obecnie co najmniej na 50 lat.

Podstawowym kryterium długotrwałości układu uziomów w gruncie jest jego odpowiednio dobrana odporność korozyjna. Trwałość ta dotyczy nie tylko przewodników pokrytych właściwą warstwą metali chroniącą przed korozją w gruncie. Trwały powinien być również dobrze wykonany fundament o parametrach odpowiadających zaleceniom norm odgromowych, czyli wytrzymujący warunki cieplne towarzyszące przepływowi prądów zwarciovych oraz dynamiczne naprężenia powstające przy przepływie piorunowych udarów prądowych przez jego żelbetową konstrukcję. Dla złagodzenia warunków cieplnych w betonie przy przepływie prądów zwarciovych i piorunowych korzystnym jest wspomoczenie uziomów fundamentowych dodatkowymi uziomami sztucznymi bazującymi na wzajemnie połączonych pionowo pograżanych uziomach głębinowych, których potencjał elektrochemiczny jest zbliżony do potencjału miedzi.

Trwałość układów uziomów należy przede wszystkim powiązać ze zdolnością jego wszystkich elementów - w całym okresie ich eksploatacji - do przewodzenia prądów zwarciovych i udarowych (piorunowych), o wartościach przyjętych do obliczeń na etapie projektowania a wynikających z miejsca lokalizacji uziomu w sieci elektroenergetycznej oraz spodziewanego poziomu zagrożenia piorunowego, bez zmiany wymaganych parametrów elektrycznych i mechanicznych w czasie. Odporność korozyjna układu uziomów powinna być przy tym tak dobrana, aby w zaplanowanym okresie eksploatacji nie było możliwe zmniejszenie przekroju przewodników układu uziomu do wartości, przy których zostanie ograniczona ich zdolność przewodzenia prądu.

Proponuje się uaktualnienie Standardowych Specyfikacji Technicznych PSE odnoszących się do uziomów linii elektroenergetycznych 110-400 kV o dodatkowe wymagania, a w tym m.in. określające szczegółowo:

- metodykę uwzględniania rezystancji żelbetowych elementów posadowień słupów;
- szczegółowe parametry materiałów stosowanych na uziomy;
- określenie sposobu kontroli dostawy wysokiej jakości produktów dostarczanych na miejsce montażu uziomów.

W podobny sposób powinny być przejrane standardowe specyfikacje dotyczące uziomów stacji energetycznych z uwagi na konieczność ich odświeżenia.

LITERATURA

- [1] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna PSE: 2015-10 - Krajowy System Elektroenergetyczny.
- [2] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna PSE: 2017-09 – Linia napowietrzna 400 kV.
- [3] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna PSE: 2014-02 – Linia napowietrzna 400 kV. Uziemienia.
- [4] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna PSE: 2014-02 – Uziemienia dla istniejących linii NN.

- [5] Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna PSE: 2017-09 – Linia napowietrzna 400 kV. Fundamenty.
- [6] Wołkowiński K. Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych, wyd. 3 (rozszerzone i całkowicie zmienione), WNT, Warszawa, 1967.
- [7] Musiał E. Uziomy fundamentowe i parafundamentowe, Miesięcznik SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, nr 143, s. 3-33, sierpień 2011 (wersja uzupełniona http://www.edwardmusial.republika.pl/pliki/uziomy_fundamentowe.pdf)
- [8] Rudolph W., Winter O. EMV nach VDE 0100, VDE Verlag GmbH, Berlin- Offenbach, 1995.
- [9] Maksimowicz T., Zielenkiewicz M., Zalecenia norm dotyczące materiałów stosowanych na uziomy sztuczne łączone z uziomem fundamentowym, elektro.info, nr 4/2013
- [10] Zielenkiewicz M., Maksimowicz T., Marciniak R., Instalacje uziemiające – zalecenia norm, Miesięcznik SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, nr 184-185, s. 67-87. styczeń 2015
- [11] PN-B-03020:1981: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [12] PN-EN 50522:2011: Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV
- [13] PN-EN 62305-3:2011: Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia
- [14] PN-EN 62561-1:2012: Elementy urządzenia piorunochronnego (LPSC). Część 1: Wymagania dotyczące elementów połączeniowych
- [15] IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding