

PRĄDY WYRÓWNAWCZE W UZIOMACH FUNDAMENTOWYCH I SZTUCZNYCH

Marek OLESZ¹

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 583471820 fax: 583472136

e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule omówiono zasady wykonywania uzimów fundamentowych i sztucznych. Przedstawiono wyniki pomiarów prądów w instalacji zawierającej stal zbrojeniową w fundamencie, połączoną z układem uziomu sztucznego w ziemi wykonanym z stali ocynkowanej.

Słowa kluczowe: uzioły sztuczne i fundamentowe, prądy wyrównawcze

1. WSTĘP

W praktyce coraz częściej wykonuje się uzioł instalacji piorunochronnej w wykonaniu fundamentowym, które polega na umieszczeniu dodatkowych elementów metalowych – zazwyczaj stalowych – w betonie. Takie rozwiązanie techniczne w przypadku grubości warstwy betonu przynajmniej 50 mm zapewnia bardzo dobrą ochronę przed korozją ze względu na powstanie na powierzchni stali pasywnej warstwy tlenku żelaza. W niektórych konstrukcjach betonowych może dochodzić do zakwaszania betonu eliminującego stan neutralny w warstwie stal – beton. W konsekwencji występuje korozja wżerowa stali przebijającej warstwę pasywną, co powoduje mikropęknięcia i dalsze uszkodzanie zbrojenia [3].

W przypadku konieczności rozbudowy uziołu fundamentowego o dodatkowy uzioł sztuczny – np. w celu możliwości kontroli rezystancji uziemienia obiektu, należy pamiętać o zastosowaniu materiału o podobnym poziomie potencjału elektrodowego w ziemi, w stosunku do stali w betonie. Warunek ten jest spełniony w przypadku zastosowania w uziołie sztucznym miedzi lub stali nierdzewnej. Dla innych materiałów, jak powszechnie stosowanych elementów ze stali ocynkowanej, występuje różnica potencjału w stosunku do uziołu fundamentowego o wartości około 1 V, która może powodować przepływ prądów wyrównawczych usuwających po pewnym czasie powłokę cynkową na uziołie sztucznym.

Ponieważ w praktyce spotyka się tego rodzaju rozwiązania, więc dla jednego z nich wykonano pomiary prądów wyrównawczych w celu dokonania oceny tempa utraty powłok ochronnych w zastosowanym systemie uziemień. Dodatkowo przeanalizowano wytyczne normy [1] dotyczące możliwości zastosowania dodatkowych uzimów sztucznych wykonanych z różnych materiałów współpracujących z uziołem fundamentowym obiektu budowlanego.

2. WYMAGANIA NORMALIZACYJNE

Podstawowym dokumentem zestawiającym wymagania dla projektowania, wykonania i kontroli uzimów jest [1]. W normie określono wymagania dotyczące ochrony obiektów budowlanych przed uszkodzeniami za pomocą urządzeń piorunochronnych (LPS), jak również ludzi i zwierząt przed porażeniem przez napięcie dotykowe i krokowe w pobliżu LPS. Obecna edycja normy [1] ma zastosowanie do projektowania, instalowania, sprawdzania i eksploatacji LPS w obiektach budowlanych bez ograniczenia ich wysokości.

Dla instalacji piorunochronnej norma [1] zaleca wykonywanie uzimów fundamentowych ze względu na niską i stabilną w czasie rezystancję uziemienia. Wynika to między innymi z niewielkiej rezystywności betonu zbrojonego umieszczonego w gruncie, którą szacuje się nawet po kilkudziesięciu latach na wartość poniżej 300 Ωm [3]. Wynika to między innymi z faktu, że fundament betonowy nawet usytuowany w gruncie piaszczystym, posiada większą wilgotność niż jego otoczenie wskutek występowania dużej ilości kapilar o małej średnicy.

W celu wykonania uziołu fundamentowego norma [1] nakazuje, zgodnie z rysunkiem 1, wprowadzenie w fundament odpowiedniej długości przewodów, uzależnionej od klasy LPS i rezystywności gruntu. Zasada obliczania długości wymaganego uziołu fundamentowego i ewentualnego dodatkowego uziołu sztucznego jest podobna jak dla uzimów otokowych typu B instalowanych na zewnątrz obiektu. Wymiar uziołu powinien więc spełniać wymaganie punktu 5.4.2 normy [1], tzn. średni promień obszaru r_e ma być mniejszy od wartości l_1 na rysunku 1. Promień obszaru zastępczego r_e oblicza jako pierwiastek z ilorazu powierzchni uziołu fundamentowego S przez liczbę π . Jeśli nie spełniono warunku $r_e > l_1$, wówczas należy zastosować dodatkowy uzioł poziomy (równanie (1)) lub pionowy (równanie (2)) o długości według poniższych wymagań:

$$l_r = l_1 - r_e \quad (1)$$

$$l_v = \frac{l_1 - r_e}{2} \quad (2)$$

Dodatkowo wymaga się według punktu 5.4.3 [1], aby uziomy sztuczne – w celu uzyskania stabilnych warunków gruntu w czasie eksploatacji – zakopywać głębiej niż 50 cm od powierzchni gruntu, w odległości co najmniej 1 m od ścian budynku.

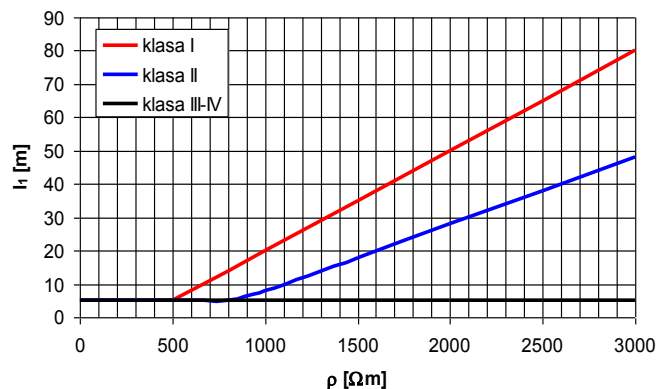
W normie [1] podano szereg dodatkowych wymagań dotyczących materiałów, wykonania i sprawdzenia konstrukcji uziomu fundamentowego. Uziom tego rodzaju musi posiadać prawidłową jakość połączeń elementów uziemiających z prętami zbrojeniowymi, aby nie dopuścić do nadmiernych naprężeń mechanicznych towarzyszących odprowadzaniu prądu piorunowego do ziemi (p. 4.3 w [1]).

W przypadku uziomów fundamentowych zaleca się stosowanie przewodów o przekroju co najmniej 8 mm i gładkiej powierzchni w odróżnieniu do żebrowanych prętów zbrojeniowych. Podczas kontroli konstrukcji stalowej w obiektach żelbetowych wykorzystywanych w ochronie odgromowej, należy sprawdzić ciągłość galwaniczną konstrukcji poprzez wykonanie:

- spawania na długości minimum 30 mm,
- zaciskania,
- nie zalecanego wiązania na zakładkę na długości przekraczającej 20 - krotną średnicę pręta (punkt E.4.3.3 [1]).

Producenci systemów uziemień [5, 6] proponują różne rodzaje specjalnych złączy do mocowania prętów lub taśm z prętami zbrojenia.

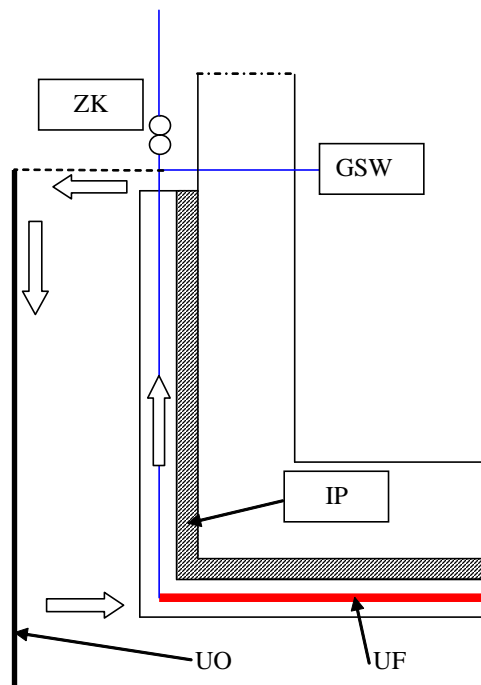
Dodatkowo jakość połączeń potwierdza się przez pomiar rezystancji elektrycznej, która nie może przekraczać 0,2 Ω (p. 4.3). Norma nie podaje warunków sprawdzenia rezystancji połączeń – tj. metody i wartości prądu, przy którym należy wykonać pomiar. Wymienione oględziny i otrzymane w pomiarach prawidłowe wartości rezystancji są podstawą akceptacji wykonanej konstrukcji stalowej jako naturalnego uziomu do odprowadzenia prądu wyładowania atmosferycznego.



Rys. 1. Minimalna długość l_1 uziomu w funkcji rezystywności gruntu ρ i klasy LPS [1]

W normie [1], w załączniku E można znaleźć przykłady rozwiązań uziomu fundamentowego w przypadku braku, bądź występowania izolacji cieplnej konstrukcji budynku. Rozwiązania te są pokazane na trzech rysunkach E40 (a ÷ c) bez wystarczających szczegółów konstrukcyjnych rozwiązania izolacji przeciwwilgociowej i cieplnej (rys. 2). Również producenci uziomów nie podają w swoich katalogach dokładnych sposobów rozwiązania elementów uziemienia fundamentowego. Szczegółowo zalecenia te podają prace [4, 7], które zaczerpnięto z źródeł niemieckich, głównie z normy DIN 18014.

Stalowe pręty zbrojenia w betonie generują zbliżoną wartość potencjału elektrycznego, co przewody miedziane w ziemi. Różnica jest niewielka ponieważ miedź i stal miedziowana w gruncie ma potencjał (0 ÷ -0,2) V w stosunku do elektrody odniesienia Cu/CuSO₄, natomiast stal w betonie w wilgotnym gruncie (-0,1) ÷ (-0,3) V. W przypadku stali ocynkowanej różnica jest zasadnicza, bo potencjał ten wynosi (-0,7) ÷ (-1) V [4].



Rys. 2 Uziom fundamentowy połączony z uziomem sztucznym. Strzałkami zaznaczono kierunek przepływu prądu. UO – przewód uziemiający FeZn od uziomu otokowego, UF – uziomy fundamentowy, ZK – złącze kontrolne, GSW – główna szyna wyrównania potencjałów, IP – izolacja przeciwwilgociowa.

Metale używane na uziomy, również fundamentowe powinny odpowiadać materiałom podanym w Tabelicy 7 normy [1], według której dopuszcza się zarówno miedź, stal, stal cynkowaną ogniowo, stal nierdzewną. W przypadku stali ocynkowanej podano uwagę o konieczności całkowitego jej osadzenia w betonie i łączeniu przynajmniej co 5 metrów ze stalą zbrojeniową.

Odrębnym problemem jest współpraca uziomów wykonanych z różnych materiałów umiejscowionych w betonie i glebie (rys. 2). Norma w przypadku stosowania materiałów o różnych potencjałach elektrochemicznych sugeruje indywidualną analizę zachowania korozyjnego w ziemi poprzez wzięcie pod uwagę:

- wskazówek dostępnych w literaturze dla poszczególnych gruntów,
- doświadczeń z uziomami w innych, pobliskich obiektach, gdzie prawdopodobnie grunt ma podobną strukturę i właściwości chemiczne,
- starannego zakopywania uziomów tak, aby węgiel lub gruz budowlany nie pozostawał w bezpośrednim kontakcie z uziomem.

Dodatkowo w celu uniknięcia korozji zaleca się stosować uziomy otokowe sztuczne wykonane:

- ze stali nierdzewnej lub miedzi, które mogą być łączone bezpośrednio ze zbrojeniem w betonie,
- ze stali ocynkowanej, jeśli połączenie ze zbrojeniem stalowym w betonie wykona się przez iskierniki zdolne do

przewodzenia prądu wyładowania piorunowego - tzw. odgraniczniki prądu stałego [4] wraz z przewodami uziemiającymi dobranymi według tablic 8 i 9.

- ze stali ocynkowanej, jeśli w betonie umieszczono części stalowe, które nie są bezpośrednio połączone z uziomem w ziemi.

W przypadku stosowania materiałów nie zalecanych, np. jak w przypadku uziomu sztucznego z bednarki ocynkowanej podłączonej do uziomu fundamentowego (stal w betonie) należy próbować redukować zjawiska korozyjne przez zwiększenie wymiarów elementów oraz dodatkowe środki ochrony przed korozją (izolacja lub ochrona katodowa).

3. OBIEKT BADAŃ

Uziom analizowanego obiektu wykonano jako fundamentowy na zasadzie ułożenia bednarki FeZn 30x4 mm pod płytą fundamentową. Bednarka ta łączyła stopy fundamentowe słupów stalowych konstrukcji budynku. Uziom ten połączono przez spawanie ze zbrojeniem poziomym i pionowym budynku. Dodatkowo w części technologicznej ułożono bednarkę FeZn 30x4 mocowaną do ścian budynku w charakterze szyny wyrównawczej, do której dołączono wszystkie części przewodzące konstrukcji i obudów znajdujących się wewnątrz budynku. Dodatkowo ułożono uziemienie otokowe o wymiarach 30,5 m x 19 m w odległości 1 m od budynku wykonane z płaskownika FeZn 40x5 mm i połączone z uziomem fundamentowym w 5 – ciu punktach za pomocą złącz pomiarowych przy filarach konstrukcji nośnej.

Powyższe rozwiązanie jest nie zalecane w świetle wymagań normy [1]. Umieszczenie stali w betonie stanowiącym środowisko zasadowe powoduje zwiększenie odporności na korozję stali, która w betonie posiada potencjał elektrochemiczny zbliżony do miedzi w gruncie. W przypadku połączenia ze stalą w betonie bednarki FeZn uziomu otokowego powstaje różnica potencjałów rzędu 1 V co powoduje przepływ prądu rozpuszczającego stal w gruncie (rys. 2). Wskutek podanego zjawiska w normie [1] podano zalecenia łączenia uziomów fundamentowych z miedzią, stalą pomiedziowaną lub nierdzewną.

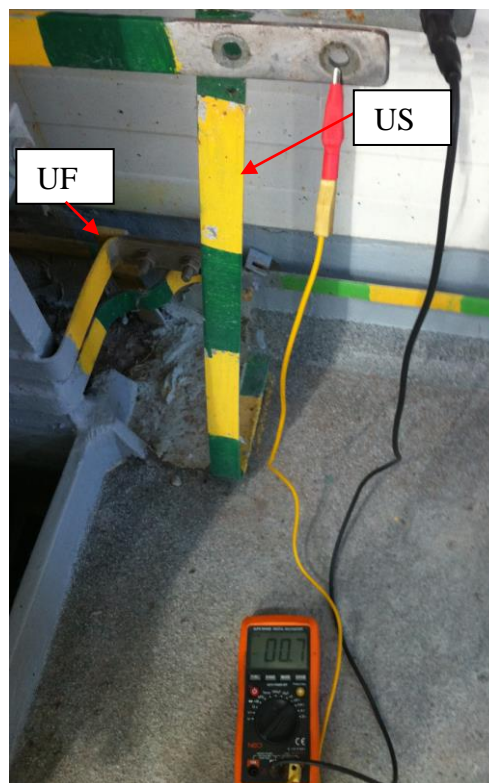
W analizowanym przypadku mamy do czynienia z specyficznym rozwiązaniem umieszczenia w betonie zarówno elementów stalowych i ocynkowanych połączonych ze sobą przez spawanie. Oznacza to, że wystąpi różnica potencjału pomiędzy wieloma punktami w fundamencie prowadząc do usunięcia po pewnym czasie powłoki cynku w betonie. Mimo tego pozostała stal będzie nadal chroniona przed korozją przez warstwę betonu.

4. WYNIKI BADAŃ

W celu określenia wartości prądów wyrównawczych w instalacji odgromowej budynku wykonano pomiary prądów metodą bezpośrednią poprzez rozłączenie wszystkich połączeń kontrolnych i włączanie w kolejne złącza mikroamperomierza prądu stałego. Poziom prądu nie przekraczał dla instalacji wyrównania potencjałów 0,1 μ A, a w przypadku uziomu otokowego 0,8 μ A. Napięcie pomiędzy uziomem fundamentowym i otokowym nie przekraczało wartości 1 mV. Otrzymane wyniki pomiarów odbiegają od spodziewanych według literatury, prawdopodobnie z powodu braku całkowitego odizolowania obu uziomów [3, 7]. Jednym z powodów nieprawidłowych wartości podczas

stosowania metody bezpośredniej jest duża rezystancja wewnętrzna mikroamperomierza wynosząca 1000 Ω na zakresie 200 μ A lub 10 Ω na zakresie 20 mA, co powoduje przepływ prądu innymi połączeniami równoległymi, które mają mniejszą rezystancję. W związku z powyższym wykonano dodatkową serię pomiarów za pomocą miernika cęgowego z przetwornikiem hallotronowym. Ze względu na niewielki poziom mierzonego prądu i dryft zera miernika otrzymane wyniki są obarczone dużą niedokładnością.

W analizowanym układzie mamy do czynienia z korozją stykową wywołaną kontaktem dwóch metali o różnym potencjale elektrodowym, znajdujących się w środowisku korozyjnym.



Rys. 3. Pomiar prądu wyrównawczego w miejscu przyłączenia uziomu sztucznego do uziomu fundamentowego (UF – bednarka z uziomu fundamentowego, US – wyprowadzenie z uziomu sztucznego typu otokowego)

W przypadku korozji elektrochemicznej początkowa różnica potencjałów V_0 między metalami jest różnicą ich potencjałów elektrodowych na anodzie V_A i katodzie V_C według (3).

$$V_0 = V_A - V_C \quad (3)$$

Połączenie obu powierzchni rozpoczyna natychmiast przepływ prądu, który powoduje zmianę początkowego potencjału elektrod przed zetknięciem. Potencjał katody staje się bardziej ujemny (polaryzacja katodowa), a anody dodatni (polaryzacja anodowa). Proces polaryzacji ma duże znaczenie dla dalszego przebiegu korozji, gdyż skutecznie zmniejsza – nawet o kilkadziesiąt razy prąd korozji w stosunku do stanu przed polaryzacją [2]. Maksymalną wartość gęstości J_A prądu, która pojawi się w obwodzie można obliczyć z zależności [7]:

$$J_A = \frac{V_C - V_A}{\varphi_C} \cdot \frac{A_C}{A_A} \quad (4)$$

gdzie:

J_A – średnia gęstość prądu anodowego w $[A/m^2]$,
 V_A, V_C – potencjał odpowiednio anody i katody w $[V]$,
 φ_C – współczynnik związany z rezystancją spowodowaną polaryzacją katody (przykładowe współczynniki: stal w gruncie około $1 \Omega m^2$, miedź w gruncie około $5 \Omega m^2$, stal w betonie około $30 \Omega m^2$),
 A_C, A_A – powierzchnia odpowiednio katody i anody w $[m^2]$.

Według monografii [3] przepływ prądu stałego przez beton powoduje korozję stali, której produkty powstają w betonie przylegającym do stali. Ponieważ objętość tych produktów jest co najmniej dwa razy większa od skorodowanego materiału, to procesowi temu dodatkowo mogą towarzyszyć mikropęknięcia poprzez które powietrze i woda wymuszają dalszą korozję stali. Natomiast w strefie katody (betonu) rośnie koncentracja jonów zasadowych pogarszająca jego wytrzymałość oraz przyczepność do zbrojenia.

Masę skorodowanego metalu m_k w $[g]$ określa się z I prawa Faradaya:

$$m_k = kJtk_e \quad (5)$$

gdzie: k – równoważnik elektrochemiczny w $[g/As]$
 J – gęstość prądu w $[A/m^2]$
 t – czas przepływu prądu w $[s]$
 k_e – współczynnik uwzględniające inne, towarzyszące elektrolizie zjawiska, $k_e = 1,4$ dla małych gęstości prądu – poniżej $1 \mu/m^2$

Grubość zniszczonej warstwy metalu o gęstości c wynosi:

$$K = \frac{m_k}{c} \quad (6)$$

Po 35 latach eksploatacji usunięta w procesie korozji warstwa stali K_{FE} w $[mm]$ wyniesie według wzoru empirycznego [3]:

$$K_{FE} \approx 40Jk_e \quad (7)$$

Przekrój zastosowanej bednarki dla uziomu otokowego wynosi $S = 4 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm} = 2 \text{ cm}^2$. Według [3] dla metalowych urządzeń podziemnych przyjmuje się jako bezpieczną gęstość prądu $J=75 \text{ mA/m}^2$. W takim przypadku po 35 latach można się spodziewać zmniejszenia grubości o $4,2 \text{ mm}$. Oszacowany poziom gęstości prądu na podstawie wzoru (4) przy założeniu stosunku powierzchni katodowej do anodowej na poziomie $0,05$ wynosi 50 mA/m^2 . Stosunek ten ustalono na podstawie większej liczby prętów zbrojeniowych w uziemieniu fundamentowym połączonych z taśmą FeZn w stosunku do powierzchni dodatkowego uziomu otokowego.

Pozostaje otwartą kwestią sposób oceny zagrożenia korozyjnego uziemień fundamentowych współpracujących z zakopanymi w gruncie elementami FeZn. Najprostszym sposobem wydaje się pomiar napięcia pomiędzy obydwoimi uziomami na etapie zasypywania fundamentu, po wizualnej inspekcji umożliwiającej stwierdzenie odizolowania wymienionych uziomów. Innym sposobem może być zastosowanie amperomierzy cęgowych wykorzystujących przetwornik hallotronowy, których rozdzielczość jest na poziomie 10 mA .

W przypadku większej powierzchni anodowej (stal w betonie) w stosunku do części katodowej (uziom sztuczny w gruncie), co zdecydowanie w analizowanym typie uziomu występuje, mamy do czynienia z mniejszym tempem reakcji chemicznej. Według [4, 7] zagrożenie korozyjne występuje w sytuacji, kiedy różnica potencjałów przekracza $0,1 \text{ V}$, a stosunek powierzchni katody do anody jest powyżej 100 . W przypadku porównywalnych powierzchni katody i anody zagrożenie korozyjne występuje dopiero przy różnicy potencjałów powyżej $0,6 \text{ V}$ [4].

5. WNIOSKI

Uzupełnienie uziomu fundamentowego o uziom otokowy wykonany ze stali ocynkowanej zagraża korozji temu ostatniemu. W związku z tym lepiej stosować uziomy sztuczne z stali nierdzewnej lub miedziowanej [1].

W analizowanym obiekcie ze względu na mniejszą powierzchnię katody wykonanej ze stali ocynkowanej w gruncie nie stwierdza się występowania nadmiernych prądów powodujących zagrożenie korozyjne.

W celu poprawnego pomiaru prądów wyrównawczych konieczne jest zastosowanie amperomierzy cęgowych ze stabilną korekcją wartości zerowej prądu stałego.

6. BIBLIOGRAFIA

1. PN – EN 62305-3:2011E, Ochrona odgromowa -- Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia
2. H. Jodko, D. Mayer, J. Orłowski, T. Czarnota, Korozja. Poradnik. Tablice korozyjne tworzyw metalowych i niemetalowych, PWT, Warszawa 1958
3. K. Wołkowiński, Uziemiaenia urządzeń elektroenergetycznych WNT Warszawa, 1972
4. E. Musiał, Uziomy fundamentowe i parafundamentowe, Miesięcznik SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, 2011 r., nr 143
5. Katalog, Lightning Protection, Main Catalogue, Dehn + Söhne, 2007
6. Katalog, Systemy ochrony przeciwprzebieciowej i odgromowej,
7. Poradnik, Lightning Protection Guide, Dehn + Söhne, 2007

EQUALIZING CURRENTS IN FOUNDATION AND ARTIFICIAL EARTH ELECTRODES

Key-words: artificial earth – termination system, foundation earth electrodes, equalizing current

Abstract:

The article describes the principles of both foundation and artificial earth electrodes. Current measurements in the installation reinforcing steel in the foundation connected to the earth electrodes made of hot dip coating steel are discussed.