



**PTPiREE**

**KONFERENCJA  
OCHRONA PRZED PORAŻENIEM  
I PRZED PRZEPIĘCIAMI  
W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH**

**29-30 LISTOPADA 2023 R., WISŁA**

**Szczegółowe informacje:**

**<http://ochrona.ptpiree.pl>**



**PTPiREE**





Konferencja  
**Ochrona przed porażeniem  
i przed przepięciami  
w sieciach elektroenergetycznych**  
29-30 listopada 2023 r., Wisła



Materiały konferencyjne  
zostały przygotowane na podstawie  
składów komputerowych  
dostarczonych przez Autorów

Wydawca: Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej  
ul. Wołyńska 22, 60-637 Poznań  
tel. +48 61 846-02-00, fax +48 61 846-02-09  
[www.ptpiree.pl](http://www.ptpiree.pl) e-mail: [ptpiree@ptpiree.pl](mailto:ptpiree@ptpiree.pl)



## SPIS TREŚCI

Referaty zostały umieszczone w materiałach zgodnie z kolejnością nadsyłania

Nr sesji / Nr referatu	Tytuł	Strona
1/1	<b>Normy oraz inne dokumenty odzwierciedlające aktualny stan wiedzy technicznej w relacji do dokumentów prawnych</b> <i>Mec. Tomasz Ogłódek (Kancelaria Radców Prawnych Tomasz Ogłódek)</i> .....	5
1/2	<b>Podstawy prawne odpowiedzialności prawnej za szkody wyrządzone osobie i mieniu w działaniach związanych z ruchem sieciowym</b> <i>Mec. Tomasz Ogłódek (Kancelaria Radców Prawnych Tomasz Ogłódek)</i> .....	9
4/1	<b>Współczesne problemy powodujące wzrost zagrożenia powodowanego przez przebiegi</b> <i>dr inż. Jarosław Wiater (Politechnika Białostocka)</i> .....	13
4/2	<b>Wybrane zagadnienia z zasad ochrony przed przebiegami</b> <i>dr inż. Dominik Duda (Politechnika Śląska)</i> .....	23
4/3	<b>Monitorowanie stanu technicznego i ocena jakości ograniczników przebiegów zabudowanych w spółce dystrybucyjnej ENEA Operator</b> <i>dr hab. inż. Marek Olesz prof. PG (Politechnika Gdańska), Miroslaw Ciechański (Enea Operator Sp. z o.o.)</i> .....	33
4/4	<b>Ochrona przebiegowa wielkoskalowych systemów magazynowania energii</b> <i>Krzysztof Wincencik (DEHN POLSKA Sp. z o.o.)</i> .....	57
5/1	<b>Metody pomiaru uziemień rozległych</b> <i>Roman Domański (Sonel S.A.)</i> .....	65
5/2	<b>Analiza porównawcza metod pomiarowych: odwracania biegunowości, dudnieniowej i selektywnej częstotliwościowej do oceny systemów uziemienia</b> <i>Sirko Böhme (DNV GL Dresden), Prof. Gerd Valtin (HTWK Leipzig), Moritz Pikisch (OMICRON electronics Deutschland GmbH)</i> .....	77
3/3	<b>Wybrane pomiary skuteczności ochrony przed porażeniem w sieciach i obiektach elektroenergetycznych w ujęciu praktycznym</b> <i>Miroslaw Kiełboń (Politechnika Śląska)</i> .....	87



**NORMY ORAZ INNE DOKUMENTY  
ODZWIERCIEDLAJĄCE AKTUALNY STAN WIEDZY TECHNICZNEJ  
W RELACJI DO DOKUMENTÓW PRAWNYCH**

*Mec. Tomasz Ogłódek  
(Kancelaria Radców Prawnych Tomasz Ogłódek)*

### **Uzasadnianie wyboru tematu**

Kiedy zadano mi pytanie o moc prawną i wiążącą dokumentów prywatnych np. w postaci dokumentów referencyjnych dotyczących zasad ochrony przed porażeniem w stacjach elektroenergetycznych średniego napięcia (SN/nn, SN/SN i SN) oraz w liniach nn w zakresie projektowania, budowy i eksploatacji wypracowanych przez Operatorów Systemów Dystrybucyjnych będących członkami PTPIREE<sup>1</sup>, wzbudziło to moje zainteresowanie albowiem w praktyce sądowej wielokrotnie miałem do czynienia z nienormatywnymi źródłami prawa, branżowymi kodeksami postępowania, zasadami ogólnymi, instrukcjami wewnętrznymi. W praktyce stosowania prawa w OSD oraz w sądach orzekających tego rodzaju „źródła prawa” budzą wątpliwości. Postaram się przybliżyć zagadnienie i przekazać wnioski na przyszłość – celem ułatwienia działań OSD na polu popularyzacji powszechnie obowiązujących norm branżowych i wewnętrznych.

### **Źródła prawa cywilnego**

Podstawowym źródłem prawa jest oczywiście prawo stanowione. Akt prawny, który przeszedł określoną ścieżkę legislacyjną i został w sposób prawidłowy promulgowany (czyli ogłoszony). Dla porządku podam, że prawo stanowione, według hierarchii źródeł prawa to Konstytucja, ustawy, ratyfikowane umowy międzynarodowe, rozporządzenia, akty prawa miejscowego. Od 1 maja 2004 roku prawo UE jest źródłem prawa zrównanym ze źródłami prawa krajowego. Prawo UE wiąże strony i sądy (sądy w Polsce są również sądami Unii). Prawo UE znajduje w Polsce bezpośrednie stosowanie i dopóki Polska jest członkiem Unii, różne wypowiedzi podyktowane bieżącymi celami politycznymi tego nie zmieniają.

Te sprawy nie są jednak interesujące z punktu widzenia tematu związania stron dokumentami prywatnymi wydawanymi np. przez PTPIREE.

Norma prawa, w przeciwieństwie do umowy, wiąże strony w sposób abstrakcyjny i generalny (a nie indywidualny i konkretny – jak umowa).

### **Zwyczaj i prawo zwyczajowe jako źródło prawa**

Zapomina się, że zwyczaj i prawo zwyczajowe jest powszechnie obowiązującą normą. Wiążą podmioty na równi z prawem stanowionym, ale mechanizm związania normami zwyczajowymi nie jest taki prosty jak w przypadku prawa stanowionego. Zatem zwyczaj, to:

---

<sup>1</sup> Źródło <http://www.ptpiree.pl/opracowania/ochrona-przed-porazeniem>

1. norma powszechnie stosowana w danym okresie (zwykle dłuższym);
2. norma powszechnie przyjęta i stosowana w danym środowisku np. energetycznym;
3. norma powszechna dla danych stosunków – np. przy obsłudze sieci, przy projektowaniu.
4. norma często spisywana i promowana przez organizacje i zrzeszenia profesjonalne.

Nie ulega wątpliwości, że spisanie normy zwyczajowej i jej promowanie ułatwia ustalenie treści zwyczaju. W literaturze przedmiotu podkreśla się jako przykład zwyczaje handlowe spisane przez organizacje kupieckie np. zwyczaje handlowe. Brak spisania „normy zwyczajowej” przy zachowaniu pozostałych przesłanek dla wykazania zwyczaju nie pozbawia zwyczaju jego mocy obowiązującej jako źródła prawa.

Normy przyjęte i utrwalone przez PTRiEE niewątpliwie są normami zwyczajowymi, o których nowa w przepisach. A samo stowarzyszenie PTRiEE jest organizacją profesjonalną utrwalającą normy techniczne.

### Zwyczaj – jak wykazać, że wiąże strony

Najłatwiejszy sposób, to uczynienie z norm dodatkowej klauzuli umownej. Nie trzeba tego robić poprzez uczynienie z norm załącznika do umowy – wystarczy podać źródło – miejsce ogłoszenia, wskazać że strony dobrowolnie przyjmują te normy – jako element umowy, najlepiej jeszcze podać wersję (czyli normy z jakiej daty). Wówczas mamy jednak do czynienia z normą umowną, a nie zwyczajową. Norma wiąże strony na zasadach umownych i nie przestrzeganie normy ma charakter naruszenia art. 471 KC.

Powszechne i szerokie powoływanie norm w umowach – powoduje dodatkowy skutek w postaci utrwalenia i upowszechnienia wśród profesjonalistów określonej normy zachowania.

Stosowanie norm jako elementu umowy nie powoduje jednak ich stosowania jako faktu prawotwórczego.

Sama norma zwyczajowa nie jest aktem prawotwórczym. Może jednak pośrednio uzyskać doniosłość prawną. Normy prawa cywilnego – wprost odsyłają do zwyczajów. Dzięki temu prawo cywilne staje się bardziej elastyczne. Można wymienić np. art. 56 KC<sup>2</sup>, art. 65 KC<sup>3</sup>, 69 KC<sup>4</sup>, 354 KC<sup>5</sup>.

---

<sup>2</sup> Art. 56 [Skutki czynności prawnej] Czynność prawna wywołuje nie tylko skutki w niej wyrażone, lecz również te, które wynikają z ustawy, z zasad współżycia społecznego i z ustalonych zwyczajów.

<sup>3</sup> Art. 65 [Wykładnia]

§ 1. Oświadczenie woli należy tak tłumaczyć, jak tego wymagają ze względu na okoliczności, w których złożone zostało, zasady współżycia społecznego oraz ustalone zwyczaje.

§ 2. W umowach należy raczej badać, jaki był zgodny zamiar stron i cel umowy, aniżeli opierać się na jej dosłownym brzmieniu.

<sup>4</sup> Dotyczy milczącego przyjęcia oferty – nie przytaczam albowiem nie ma związku z tematem.

<sup>5</sup> Art. 354 [Sposób wykonania zobowiązania. Obowiązek współdziałania]

§ 1. Dłużnik powinien wykonać zobowiązanie zgodnie z jego treścią i w sposób odpowiadający jego celowi społeczno-gospodarczemu oraz zasadom współżycia społecznego, a jeżeli istnieją w tym zakresie ustalone zwyczaje - także w sposób odpowiadający tym zwyczajom.

§ 2. W taki sam sposób powinien współdziałać przy wykonaniu zobowiązania wierzyciel.

Przesłanką konieczną do zastosowania normy zwyczajowej na zasadzie analogicznej do źródła prawa, jest możliwość wykazania przez stronę zainteresowaną powołania się na doniosłość powszechności tej normy w określonej grupie zawodowej.

Dowody na stosowanie normy zwyczajowej zgodnie z art. 6 KC powołuje ten podmiot, który wywodzi skutki prawne ze stosowania danej normy. Dowód najczęściej wykorzystywany do dowodu z opinii biegłego technika (często w postępowaniu połączony z wydaniem szerszej opinii). Dowodem mogą być też inne osobowe źródła dowodowe – np. przesłuchanie świadków czy stron. Dowodem mogą być też źródła pośrednie np. wykazanie, że dla uzyskania określonych kwalifikacji energetycznych konieczna jest znajomość określonych norm.

### **Rola PTRiPEE w upowszechnianiu norm**

Jak wykazano wyżej norma zwyczajowa w określonych okolicznościach może wiązać strony tak, jak źródło prawa. Aby tak się stało norma musi być powszechnie przyjęta w danym środowisku. Aby tak się stało, w mojej ocenie rola Izby gospodarczych, stowarzyszeń branżowych w tym PTRiPEE nie może sprowadzać się do jej upowszechniania tylko wewnątrz danej organizacji. Aby mówić o powszechnym stosowaniu normy musi ona być stosowana w całym środowisku, w całej branży i powszechnie. Promocja norm może odbywać się wśród naukowców, studentów i słuchaczy studiów podyplomowych na politechnice, może być kierowana do nauczycieli zawodu i uczniów techników. Dobrym środowiskiem dla upowszechniania normy są również użytkownicy systemu, izby gospodarcze, biegli sądowi.

W przeciwieństwie do związania normą prawa stanowionego (która jeśli jest ogłoszona - obowiązuje), normy prawa zwyczajowego muszą zyskać walor trwałego i powszechnego użycia w danym środowisku.



PODSTAWY PRAWNE ODPOWIEDZIALNOŚCI PRAWNEJ ZA SZKODY  
WYRZĄDZONE OSOBIE I MIENIU W DZIAŁANIACH ZWIĄZANYCH Z RUCHEM SIECIOWYM

*Mec. Tomasz Ogłódek*  
*(Kancelaria Radców Prawnych Tomasz Ogłódek)*

### **Uzasadnianie wyboru tematu**

Działalność przedsiębiorstw sieciowych wiąże się z ryzykiem wyrządzenia szkody na osobie lub w mieniu. Znajomość podstawowych zasad prawnych dotyczących odpowiedzialności pozwoli na odpowiednie zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie, komunikację ze służbami prawnymi przedsiębiorstwa – np. celem postawienia właściwych zadań przed prawnikami obsługującymi przedsiębiorstwa energetyczne. Omówienie tematyki odpowiedzialności może być przydatne nie tylko w pracy przedsiębiorstw sieciowych ale również może być pomocne w życiu codziennym. Ryzyko związane z porażeniem jest stałym elementem działania przedsiębiorstw sieciowych – i nie da się go wyeliminować. Znajomość podstaw odpowiedzialności pomoże w minimalizacji szkód i odpowiedzialność. Popularyzacja zagadnień prawnych i podwyższanie kultury prawniczej leży w interesie wszystkich – albowiem adresatem norm prawnych nie są tylko adwokaci, radcy prawni, sędziowie i prokuratorzy. Adresatem normy prawnej są wszyscy.

Przedstawione krótkie omówienie nie aspiruje do wyczerpania tematu, ani w sensie praktycznym, ani teoretycznym, nie stanowi nawet „encyklopedii prawa”. W żaden sposób nie zastąpi służb prawnych OSD, ale zachęca do korzystania z pomocy prawników i używania pojęć wspólnych na płaszczyźnie odpowiedzialności – przez techników i prawników.

### **Odpowiedzialność cywilna**

Podstawową dziedziną prawa regulującą odpowiedzialność są normy prawa cywilnego. Normy prawa cywilnego zakładają, że podmioty prawa działają samodzielnie i za swoje działania i zaniechania odpowiadają. Regulacja norm prawnych dotyczących odpowiedzialności dzieli odpowiedzialność (w sposób najbardziej podstawowy) na odpowiedzialność deliktową i kontaktową.

### **Odpowiedzialność deliktowa – czyli 415 KC**

Odpowiedzialność deliktowa to odpowiedzialność wyrządzona czynem niedozwolonym. Norma art. 415 KC stanowi, że „Kto z winy swej wyrządził drugiemu szkodę, obowiązany jest do jej naprawienia”. Zakres odpowiedzialności jest szeroki, bo może chodzić również o zdarzenia, które spowodowały szkodę bez winy człowieka – np. oderwanie się części budynku. Wina w ujęciu prawnym art. 415 KC to mówiąc najkrócej zarzucalność wobec określonej osoby. Osoba poniżej lat 13 nie może ponosić winy, albowiem nie można jej postawić zarzutów w rozumieniu art. 415 KC.

W zakresie odpowiedzialności deliktowej – można mówić o następujących przestankach:



1. Musi zaistnieć szkoda w rozumieniu prawnym. Szkodę w ujęciu prawnym należy rozumieć jako uszczerbek w aktywach. Nie każda szkoda ekonomiczna w mieniu (również na osobie) – jest szkodą w ujęciu prawnym – taką gdzie da się komuś przypisać odpowiedzialność. Jeśli np. przy okazji naprawy sieci uszkodzone zostały narzędzia, przez pracownika działającego prawidłowo - to jest szkoda w znaczeniu ekonomicznym, ale nie ma szkody w znaczeniu prawnym. Nie można w tym przypadku przypisać nikomu odpowiedzialności – podobnie będzie jeśli np. tynk z naszego domu spadnie na nasz rower.
2. Musi wystąpić zdarzenie – fakt (czyli delikt - czyn niedozwolony), z którym ustawa łączy odpowiedzialność.
3. Musi zaistnieć adekwatny związek przyczynowy między szkodą a zdarzeniem (faktem), a szkoda jest następstwem tego zdarzenia.

Cechą charakterystyczną tej odpowiedzialności opartej o art. 415 KC jest konieczność wykazania winy. To poszkodowany na podstawie art. 6 KC jest zobowiązany do wykazania winy.

Inne odmiany odpowiedzialności deliktowej to odpowiedzialność za szkody wyrządzone przy sprawowaniu władzy publicznej – np. na podstawie art. 417 KC, odpowiedzialność za cudze czyny - art. 429 KC (tzw. wina w wyborze), odpowiedzialność za zwierzęta art. 431 KC, odpowiedzialność w związku ze szkodą poniesioną w cudzym i wspólnym interesie i w związku z zapobieżeniem szkodzie art. 438 KC (np. pompowałem wodę z cudzego stawu, ale celem gaszenia pożaru).

Dla przedsiębiorstw sieciowych (np. w związku z przepięciami, czy porażeniami) – kluczowe znaczenie ma jednak nie odpowiedzialność oparta o art. 415 KC (winę) – ale odpowiedzialność oparta o zasadę ryzyka (art. 435 KC). Odpowiedzialność oparta o ryzyko wiąże się rozwojem gospodarki – mówiąc najkrócej – jeśli korzystasz dla napędzania biznesu z sił przyrody (np. prądu elektrycznego) – to w zdarzeniu z takim podmiotem dla jednostki (np. dla poszkodowanego) – zbyt dużym ciężarem jest konieczność wykazywania winy. Ciężar dowodu z art. 6 KC jest odwrócony.

### **Odpowiedzialność deliktowa oparta o ryzyko**

Norma art. 435 par. 1 KC brzmi następująco: „Prowadzący na własny rachunek przedsiębiorstwo lub zakład wprawiany w ruch za pomocą sił przyrody (pary, gazu, elektryczności, paliw płynnych itp.) ponosi odpowiedzialność za szkodę na osobie lub mieniu, wyrządzoną komukolwiek przez ruch przedsiębiorstwa lub zakładu, chyba że szkoda nastąpiła wskutek siły wyższej albo wyłącznie z winy poszkodowanego lub osoby trzeciej, za którą nie ponosi odpowiedzialności.”

W tym przypadku przedsiębiorstwo energetyczne, chcąc uwolnić się od odpowiedzialności, musi wykazać tak zwane przesłanki (okoliczności) egzoneracyjne. Są to przesłanki wyłączające odpowiedzialność. Ich wykazanie, w przeciwieństwie do odpowiedzialności opartej o winę, należy do przedsiębiorstwa (zasada odwróconego ciężaru dowodowego).

Do przesłanek egzoneracyjnych zaliczamy:

1. Zaistnienie siły wyższej
2. Wyłączna wina poszkodowanego
3. Wyłączna wina osoby trzeciej, za którą przedsiębiorstwo nie ponosi odpowiedzialności.

Z punktu widzenia praktyki, najważniejsze jest aby umieć wykazać zaistnienie jednej z przyczyn wyłączających odpowiedzialność. Ciężar dowodu spoczywa w całości na przedsiębiorcy.

Ważne jest aby mieć na względzie zasadę podwyższonej staranności profesjonalisty. Zasada ta wprost wynika z normy art. 355 KC. Dla przedsiębiorstwa sieciowego, wykazanie należytej staranności dodatkowo jest wzmocnione przez zasady wnikające Ustawy Prawo Energetyczne – nieprzypadkowo ustawodawca wskazał, że działalności OSD – opiera się o konieczność uzyskania koncesji.

Szkoda jaka może być wyrządzona przez „ *ruch przedsiębiorstwa*” (w rozumieniu art. 43 KC) może dotyczyć mienia albo osób. Szkoda w zakresie mienia dzieli się na szkodę rzeczywistą i utracone korzyści. Szkoda rzeczywista to uszczerbek w aktywach. Utracone korzyści to np. brak możliwości zarobkowania na skutek zniszczenia maszyny. Poszkodowany musi jednak odliczyć do utraconych korzyści to, co może zaoszczędzić np. na surowcach – czyli utracone korzyści to utracony dochód, a nie przychód.

Sprawa jest o wiele bardziej skomplikowana w przypadku szkód na osobie. Do szkody osobowej zaliczymy śmierć człowieka, chorobę i rozstrój zdrowia, uszkodzenie ciała. Odszkodowanie za szkodę osobową to np. utracone zarobki, szkoda rzeczywista czyli np. rehabilitacja, zmieniona dieta. W ramach szkody osobowej czasem zachodzi konieczność wypłacania obok jednorazowego odszkodowania dożywotniej renty.

W przypadku szkody osobowej najbardziej istotna wydaje się być odpowiedzialność za doznaną krzywdę czyli zadośćuczynienie. Nie ma innego miernika wartość niż pieniądz. Zatem obok odszkodowania może zachodzić konieczność wypłaty zadośćuczynienia. Podstawę prawną stanowi norma art. 455 KC: „W wypadkach przewidzianych w artykule poprzedzającym sąd może przyznać poszkodowanemu odpowiednią sumę tytułem zadośćuczynienia pieniężnego za doznaną krzywdę.”

Jak wskazuje Sąd Najwyższy – Wyrok Sądu Najwyższego - Izba Cywilna z dnia 16 kwietnia 2002 r. V CKN 1010/00 teza: „Określenie "odpowiedniej" sumy zadośćuczynienia przyznawanego wymaga rozważenia wszystkich okoliczności sprawy, w szczególności rodzaju naruszonego dobra i rozmiaru doznanej krzywdy, intensywności naruszenia oraz stopnia winy sprawcy a także sytuacji majątkowej zobowiązanego (ewentualnie stopnia winy i sytuacji majątkowej zobowiązanego).

Przekładając to na praktykę sądową można spodziewać się znacznych kwot zasądzonych na rzecz pokrzywdzonych osób fizycznych od przedsiębiorstw.

## **Inne podstawy odpowiedzialności**

### **Odpowiedzialność za wypadki przy pracy**

OSD jako pracodawca odpowiada również za wypadki przy pracy. Jest to zdarzenie nagłe, nieprzewidywalne w trakcie lub w związku z wykonywaniem pracy. Co prawda część odpowiedzialności finansowej pracodawcy wobec pracownika przejmują ZUS a to w zamian za odpis wypadkowy składki ZUS, na podstawie ustawy o ubezpieczeniu społecznym z tytułu wypadków przy pracy i chorób zawodowych ale pracownik może domagać się do pracodawcy dodatkowego świadczenia – jest to tak zwane roszczenie uzupełniające. Znajdują wówczas

zastosowanie wszystkie wyżej wymienione normy KC z tym zastrzeżeniem, że kwoty wypłacone przez ZUS zalicza się na poczet wypłaconego odszkodowania.

### **Odpowiedzialności karna**

Wobec osób odpowiedzialnych za szkodę wyrządzoną przez ruch przedsiębiorstwa sieciowego może powodować powstanie odpowiedzialności karnej. Odpowiedzialność karna dotyczy konkretnych osób, ale za zaniedbanie mogą również odpowiadać osoby kierujące przedsiębiorstwem.

W grę może wchodzić cały szereg zarzutów – np. art. 155 KK [Nieumyślne spowodowanie śmierci], art. 156 KK [Ciężki uszczerbek na zdrowiu], art. 157 KK [Inny uszczerbek na zdrowiu], art. 165 KK [sprowadzenie niebezpieczeństwa].

Takie zarzuty mogą być stawiane wszystkim podmiotom odpowiedzialnym. Szczególne znaczenie na odpowiedzialność z art. 220 KK – jest to odpowiedzialność kierowników i menadżerów – za niedopełnienie obowiązków i narażenie pracowników na bezpośrednie niebezpieczeństwo utraty życia lub zdrowia.

### **Pełnomocnik OSD w postępowaniu**

Zapewnienie właściwej reprezentacji na etapie postępowania przedsądowego i następnie reprezentacji procesowej w postępowaniach o odszkodowanie jest kluczowe.

Szczególnie dużo błędów można popełnić na wstępnym etapie postępowania w zakresie składanych oświadczeń i udzielanych informacji. Tam, gdzie ciężar dowodu spoczywa na poszkodowanym, zakres udzielanych informacji powinien być szczególnie przemyślany.

Ważne jest, aby dostrzegać potencjalny konflikt interesów między OSD jako pracodawcą a sprawcą szkody (np. pracownikiem czy zleceniobiorcą OSD). Nie jest wskazane, o ile w sposób nieulegający podważeniu nie wyeliminuje się konfliktu interesów, korzystanie przez OSD jako osobę prawną i pracownika (np. jako bezpośredniego sprawcę szkody) z tych samych pełnomocników.

## WSPÓŁCZESNE PROBLEMY POWODUJĄCE WZROST ZAGROŻENIA POWODOWANEGO PRZEZ PRZEPIĘCIA

*dr inż. Jarosław Wiater  
(Politechnika Białostocka)*

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano współczesne problemy powodujące wzrost zagrożenia przepięciami. Bardzo często spotykamy się z określeniem „spaliło się zgodnie z normą”. Przyczyną omawianych problemów jest brak spójnych wymagań norm z zakresu ochrony przeciwprzebieciowej. W artykule zaprezentowane zostały również wyniki badań laboratoryjnych koordynacji energetycznej warystorowych ograniczników przepięć stosowanych w polskich instalacjach elektrycznych i sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia z docelowymi urządzeniami końcowymi, które powinny być dzięki nim chronione. Wyniki badań wykazały, iż przyjęte zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych [1,2] nie są spójne z zapisami norm PN-EN 62305-4:2011 [3], IEC 61643-12 [16] oraz PN-EN 61000-4-5 [4], co bezpośrednio może przełożyć się na uszkodzenia urządzeń końcowych posiadających deklarację zgodności CE dla przychodzących przepięć o wartości szczytowej 1 kV pomimo stosowania zalecanych ograniczników przepięć o  $U_{pl} \leq 2500$  V.

**Słowa kluczowe:** warystor, przepięcia, uszkodzenia, niedoskonałość norm.

### Wstęp

Urządzenia podłączane do sieci elektroenergetycznej w sposób naturalny narażone są na działanie przepięć mogących się pojawić w dowolnym momencie z losową wartością szczytową. Źródłem przepięć może być zarówno zwarcie, operacje łączeniowe, bezpośrednie lub pośrednie wyładowanie piorunowe itp.. Różnice potencjałów wywołane przez stany przejściowe powodują przepływ prądów udarowych w sieci jak i w urządzeniach do niej przyłączonych.

Stosownie do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [8] inwestorzy zobowiązani są do stosowania norm wymienionych w załączniku nr 1 w/w dokumentu. W zakresie ochrony przeciwprzebieciowej zastosowanie mają normy PN-HD 60364-1:2010 [5], PN-IEC 60364-4-443:2016 [6], PN-HD 60364-5-534:2016 [7], PN-EN 62305-4:2011 [3].

Z punktu widzenia energetyki zawodowej istotne są opracowane tzw. standardowe specyfikacje techniczne [1,2]. Znajdziemy w nich odwołania do obowiązującego w/w rozporządzenia w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie oraz do w/w norm wraz z uwzględnieniem specyfiki linii i stacji elektroenergetycznych oraz zagadnień związanych z koordynacją izolacji.

Mając powyższe na uwadze, stosownie do zapisów norm sieci i instalacje elektroenergetyczne wyposażane są w ograniczniki przepięć. Nie mniej jednak obserwowane są uszkodzenia sprzętu powstałe w wyniku przepięć pomimo zastosowania urządzeń do ich ograniczania. W praktyce inżyniera elektryka i elektronika można się spotkać z określeniem „spaliło się zgodnie z normą”. Część zdarzeń powodujących straty można wyjaśnić nieprzestrzeganiem opracowanych wytycznych i zaleceń. W pewnej liczbie przypadków rozbieżności w obowiązujących aktach

skutkują również stratami, które nie zawsze wiązane są z przepięciami choć to właśnie przepięcia są ich przyczyną.

W artykule przeanalizowano wymagania norm z zakresu ochrony przeciwprzepięciowej w powiązaniu z wymaganiami dyrektywy UE dotyczącej kompatybilności elektromagnetycznej [18] i wynikającymi z niej obowiązkami, które wpływają na skuteczność ochrony przed przepięciami (lub jej brak). Analizy uzupełniono badaniami laboratoryjnymi.

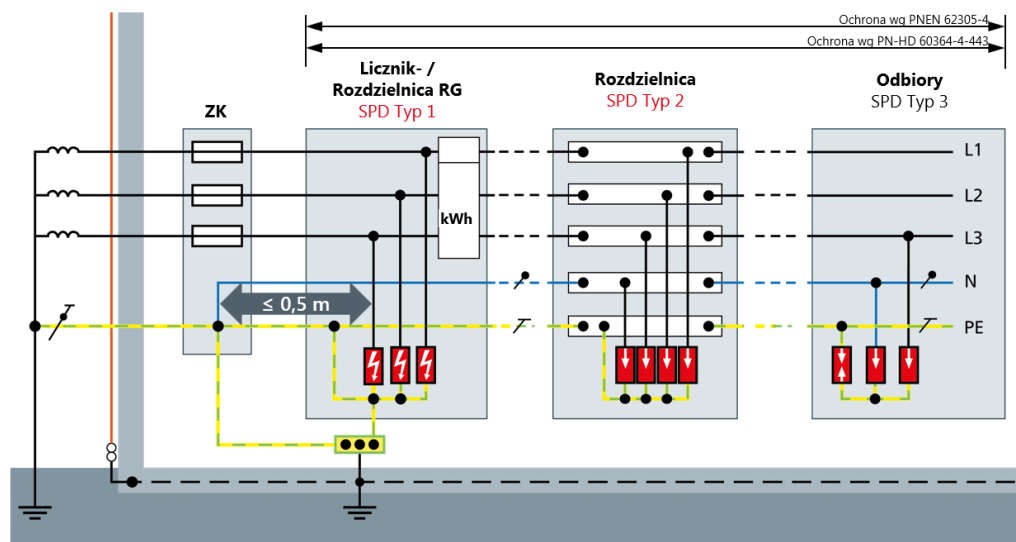
### **Wymagania w zakresie ochrony przeciwprzepięciowej**

Przystępując do samego procesu projektowania konkretnej instalacji w obiekcie budowlanym należy uwzględnić wymagania norm z serii PN-EN 62305 dotyczące ochrony odgromowej oraz norm z serii PN-HD 60364 odnoszące się do instalacji elektrycznych. W przypadku projektowania samych sieci elektroenergetycznych powyższe normy przywołane są pośrednio w dedykowanych opracowaniach (wytycznych) operatora sieci dystrybucyjnej (OSD) [1,2].

W procesie projektowania pierwszym krokiem powinna być analiza ryzyka pozwalająca określić czy jest potrzebna ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa - zgodnie z zapisami PN-EN 62305-2 [12]. Może się zdarzyć, iż ochrona odgromowa jest lub nie jest wymagana. W przypadku, gdy jest wymagana ochrona odgromowa automatycznie wymagana jest również ochrona przeciwprzepięciowa. Może również wystąpić przypadek, w którym nie jest wymagana ochrona odgromowa a jest wymagana ochrona przeciwprzepięciowa. Wariantów jest kilka. Typowe rozwiązanie systemowe ochrony przepięciowej w systemie TN-C-S wg. PN-EN 62305-4 [3] oraz PN-HD 60364-4-443 [6] przedstawiono na rysunku 1. Stosując te rozwiązanie należy zwrócić szczególną uwagę na prawidłowy dobór urządzeń do ograniczania przepięć tak, aby zachować koordynację energetyczną pomiędzy nimi – pkt. 534.4.4.5 normy PN-HD 60364-5-534 [7] i przywołanej w tym miejscu normy EN 61643-12 [16]. Niestety te zalecenia są powszechnie ignorowane w praktyce.

Pod pojęciem koordynacja energetyczna ograniczników przepięć należy rozumieć odpowiedni podział energii prądu udarowego (płynącego podczas stanów przejściowych powodujących pojawienie się przepięć) pomiędzy de facto „równolegle połączonymi” ogranicznikami (patrz rys.1), tak aby nie przekroczyć ich deklarowanej zdolności do przenoszenia energii (a nie tylko wytrzymywanego napięcia urządzenia podlegającego ochronie  $U_w$  i napięciowego poziomu ochrony  $U_p$  ograniczników przepięć, prądu znamionowego  $I_n$ , prądu impulsowego  $I_{imp}$ ). Szczególnie narażony na uszkodzenie spowodowane brakiem koordynacji energetycznej urządzeń do ograniczania przepięć jest docelowy odbiornik energii elektrycznej mogący zawierać w środku na przykład dodatkowy warystor (pkt. 524.1 normy PN-HD 60364-5-534 [7]). Niezachowanie koordynacji skutkuje uszkodzeniem urządzenia końcowego pomimo stosowania wcześniej innych ograniczników przepięć. Z tym problemem można sobie poradzić stosując normę IEC 61643-12:2020 [16], która zawiera wytyczne jak uzyskać i sprawdzić poprawność doboru ograniczników przepięć z punktu widzenia ich wzajemnego współdziałania (koordynacji energetycznej). Norma IEC 61643-12 jest przywołana kilkakrotnie w normach PN-HD 60364-5-534 pkt. 534.1, 534.4.4.1 [7], PN 62305-4:2011 pkt. C.3.4 [3]. W powszechnie przyjętej praktyce projektowania sieci elektroenergetycznych jak i instalacji elektrycznych nikt nie sprawdza koordynacji między ogranicznikami przepięć pomimo zapisów w/w norm. Problem można na dzień dzisiejszy tłumaczyć faktem, iż norma IEC 61643-12 [16] nie ma polskiego odpowiednika - nie została przetłumaczona na język polski. W chwili obecnej w kartach katalogowych urządzeń do ograniczania przepięć dostępnych w Polsce nie znajdziemy informacji jak zapewnić właściwą

koordynację energetyczną ograniczników przepięć w świetle wymagań i przywoływanej kilkakrotnie normy EN/IEC 61643-12 [16]. Wymaga się takich informacji stosownie do m.in. punktu C.3.4 normy PN-EN 62305-4:2011 [3].



Rys. 1. Typowe rozwiązanie systemowe ochrony przeciwprzebieciowej w systemie TN-C-S wg. PN-EN 62305-4 [3] oraz PN-HD 60364-4-443 [6]

## Analiza norm w zakresie ochrony przeciwprzebieciowej

Przystępując do analizy obowiązujących wytycznych z zakresu budowy instalacji elektrycznych pod kątem skuteczności ochrony przeciwprzebieciowej należy zacząć od normy PN-HD 60364-1 [5]. Zgodnie z w/w normą „planista i projektant instalacji elektrycznej powinien stosować rozwiązania i urządzenia spełniające wymagania kompatybilności elektromagnetycznej” (pkt. 33.2) [5], tak aby uzyskać odpowiedni poziom odporności na zakłócenia (pkt. 131.6.4) [5]. Ten zapis normy PN-HD 60364-1 [5] pośrednio przywołuje konieczność uwzględnienia zapisów Dyrektywy UE 2014/30/WE odnoszącej się do kompatybilności elektromagnetycznej [18].

Głównym celem wprowadzenia dyrektywy była poprawa szeroko rozumianego bezpieczeństwa użytkownika wyrobów. W zakresie badań związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną w Dyrektywie UE 2014/30/WE [18] jest przywołana m.in. norma PN-EN 61000-4-5:2014-10 [4] odnosząca się do badania odporności na udary (Surge). Wymagania przywołane w normie opracowano i przeznaczono do stosowania dla sprzętu elektrycznego/elektronicznego. Celem badań opisanych w w/w normie jest określenie reakcji badanego urządzenia na udary napięciowo-prądowe podczas jego normalnej pracy. W wyniku przeprowadzonych prób można spodziewać się czterech różnych rodzajów zachowania się sprzętu poddawanego badaniu tj. normalnej pracy, chwilowej utraty funkcjonalności urządzenia (która mija po ustaniu zakłócenia), chwilowej utraty funkcjonalności (lub uszkodzenia, które wymaga reakcji użytkownika), trwałej utraty założonej funkcjonalności. Celem nadrzędnym całego procesu jest wymuszenie oferowania urządzeń, dla których producent przeprowadził wymaganą ocenę odporności przeciwprzebieciowej sprzętu i stosownie do jej wyniku dobiera rozwiązania zapewniające zachowanie funkcjonalności urządzenia. Uzyskanie założonych w w/w normie poziomów odporności i wytrzymałości udarowej wymaga zastosowania elementów ograniczających przepięcia. Aby spełnić postawione progi odporności producenci sprzętu elektrycznego

i elektronicznego najczęściej stosują wariatory instalowane na wejściu urządzenia, które ma zadeklarowaną zgodność z PN-EN 61000-4-5 [4]. W tym miejscu wymagania stawiane producentowi sprzętu elektrycznego/elektronicznego są spełnione w zakresie ochrony przed udarami, co (tylko częściowo) upoważnia do oznaczenia towaru znakiem CE - co też jest niezbędnym warunkiem wprowadzenia do obrotu na terenie Unii Europejskiej.

Analizując wymagania stawiane instalacjom elektrycznym ochronę przed przepięciami przejściowymi należy zapewnić tam, gdzie skutek nim powodowany ma wpływ na życie ludzkie, usługi publiczne oraz szeroko rozumianą działalność gospodarczą (PN-HD 60364-4-443 pkt. 443.4) [6]. W przypadku zagrożenia pochodzenia atmosferycznego należy przeanalizować ryzyko stosownie do zapisów normy PN-EN 62305-2 [12]. Odpowiednio „zinterpretowana” norma PN-EN 62305-2 umożliwia pominięcie kwestii ochrony przeciwprzepięciowej. To samo dotyczy normy PN-HD 60364-4-443, w której w przypadku zasilania obiektu linią kablową podziemną (dla C<sub>RL</sub><1000, do 1 km) nie trzeba instalować ochrony przed przepięciami - realizowanej poprzez zastosowanie urządzeń do ograniczania przepięć (ang. SPD - surge protection devices). W przypadku domów jednorodzinnych (PN-HD 60364-4-443 pkt. 443.4): „ochrona przed przepięciem przejściowym nie jest wymagana jeżeli łączny koszt instalacji elektrycznej poddawanej ochronie jest mniejszy niż 5-krotny koszt SPD umieszczonego w złączu instalacji”. Powyższe zapisy stoją w sprzeczności ze zdrowym rozsądkiem. Punkt 443.4 w/w normy powinien odnosić się do kosztów wszystkich podłączonych do instalacji elektrycznej urządzeń, a nie tylko do wartości samej instalacji. Przy tak minimalistycznym i nisko kosztowym podejściu do problemu ochrony przeciwprzepięciowej możemy się spodziewać istnienia tylko od strony sieci elektroenergetycznej liniowych SPD zainstalowanych stosownie do załącznika B normy [6] oraz do wytycznych operatora sieci dystrybucyjnej (OSD) [1,2]. Wracając do zapisów PN-EN 61000-4-5 kolejne ograniczniki przepięć znajdziemy w sprzęcie oznaczonym znakiem CE. Tutaj po raz kolejny pojawia się zupełnie zmarginalizowany problem koordynacji energetycznej ograniczników przepięć – pomiędzy liniowym SPD a wariastorem wymaganym w świetle PN-EN 61000-4-5.

Sprawdzenie koordynacji energetycznej pomiędzy układami ograniczającymi przepięcia a badanym urządzeniem jest wymagane wg. PN-EN 61000-4-5 [4]. W miejscach, których złącze jest zawsze przeznaczone do użytku z określoną ochroną pierwotną (tą, która powinna być zainstalowana w sieci docelowo zasilającej badane urządzenie), przeprowadza się testowanie z tą właśnie dedykowaną pierwotną ochroną, aby zapewnić koordynację z elementami ograniczającymi przepięcia. Jeśli podstawowa ochrona jest wymagana, ale nie jest zapewniona przez producenta sprzętu, badanie koordynacji jest również przeprowadzane przy maksymalnym poziomie napięciowym i przy typowym ograniczniku przepięć dołączanym na czas testu [4]. Czy w kartach katalogowych urządzeń elektrycznych/elektronicznych znajdziemy informacje o rodzaju typowego SPD, który trzeba zainstalować, aby wymogi dyrektywy EMC i normy PN-EN 61000-4-5 były spełnione i zachowana była właściwa koordynacja ?

Norma PN-EN 62305-4:2011 [3] w załączniku C podaje informacje na temat instalowania skoordynowanego układu SPD. Informacje zawarte w tym załączniku odnoszą się do właściwego doboru m.in. napięciowego poziomu ochrony  $U_p$  z uwzględnieniem spadku napięcia na przewodach łączących, wartości napięcia wytrzymywanego przez urządzenie ( $U_w$ ), wartości prądu znamionowego  $I_n$  ogranicznika.

Należy zauważyć, iż wycofana norma PN-EN 62305-4:2006 [13] w załączniku C szczegółowo opisywała zasady prawidłowej koordynacji energetycznej SPD – łącznie 17 stron. W aktualnej wersji normy PN-EN 62305-4:2011 nie ma w/w opisanych zasad koordynacji. Znajdujemy odniesienie do normy IEC 61643-12 [16] i/lub IEC 61643-22 [17] z adnotacją: „Zaleca się, aby



w tym celu producent SPD podał odpowiednie informacje, w jaki sposób osiągnąć koordynację energetyczną między różnymi SPD". Analizując tą kwestię dalej w normie IEC 61643-12 w pkt. 6.2.6.3 znajdujemy informację, iż w momencie gdy zastosujemy SPD jednej firmy to najłatwiej jest zwrócić się do producenta SPD z zapytaniem jak uzyskać właściwą koordynację energetyczną. Jeśli nie uzyskamy takich informacji to należy przeprowadzić próby laboratoryjne, symulacje, porównanie charakterystyk U-I wykorzystanych SPD typu ograniczającego lub metodę LTE (ang. LTE, Let-through Energy method). Należy zadać sobie pytanie czemu w aktualnej edycji normy PN-EN 62305-4:2011 [3] znikły zasady prawidłowej koordynacji energetycznej SPD z wersji poprzedniej?

Bardzo ciekawe jest stwierdzenie zawarte w „Uwadze 2” (C.2.1, str. 76, PN-EN 62305-4:2011 [3]) : „*napięciowy poziom ochrony  $U_p$  należy porównać z udarowym napięciem wytrzymywanym  $U_w$  urządzenia w tych samych warunkach co SPD (kształt fali przepięcia i przetężenia, ich energia, zasilanie urządzenia itd.). Kwestia to jest w fazie rozpatrywania*”. Tak ważne postanowienia nie zostały rozstrzygnięte w okresie 5 lat przygotowywania. Należy w tym miejscu zadać pytanie: jak ma to zrobić projektant ? W tym miejscu pojawia się również problem rozbieżności w normach. Otóż norma PN-EN 61000-4-5 do badań przyjmuje udar napięciowo-prądowy 1,2/50  $\mu$ s i 8/20  $\mu$ s. Norma PN-EN 61643-11 [14] dotycząca badań SPD zaleca badania udarem 10/350  $\mu$ s (próba klasy 1), 8/20  $\mu$ s (próba klasy 2) jak również 1,2/50  $\mu$ s i 8/20  $\mu$ s (próba klasy 3). Norma PN-EN 60664-1 [15] przewiduje badania koordynacji izolacji (a nie koordynacji energetycznej) napięciem udarowym 1,2/50  $\mu$ s, do której odnosi się norma PN-EN 61000-4-5 wymagając testów udarem napięciowym 1,2/50  $\mu$ s i prądowym 8/20  $\mu$ s. Należy zadać pytanie: według której normy projektant miałby to sprawdzić, jakim kształtem ?

Znaczące jest również stwierdzenie zawarte w normie PN-EN 62305-4:2011 [3], pkt. C.2.1, iż: „*...układy wewnętrzne są chronione, jeżeli są one energetycznie skoordynowane z SPD od strony zasilania ...*”. Stwierdzenie podane w pkt. C.2.1 normy PN-EN 62305-4:2011 [3] powinno być zastąpione konkretnymi postanowieniami dotyczącymi koordynacji SPD, których brak. SPD od strony zasilania powinien być skoordynowany z chronionym urządzeniem energetycznie i napięciowo. Jeżeli urządzenie końcowe jest wyposażone SPD przez producenta, to kwestia koordynacji wymaga sprawdzenia. Należy tutaj zauważyć, że w kartach katalogowych SPD, sprzętu AGD itp. brak jest informacji na temat koordynacji ich układów wewnętrznych z SPD od strony zasilania. Bez takich informacji nie można uznać, że ochrona tych urządzeń jest zapewniona. W warunkach życia codziennego projektant instalacji nie jest w stanie przewidzieć, co użytkownik podłączy do gniazdka i jego odpowiedzialność za ochronę urządzeń instalowanych w przyszłości przez finalnego użytkownika tej instalacji jest z punktu widzenia technicznego wręcz nie możliwa do wykonania.

Stosując procedurę instalowania skoordynowanego układu SPD według normy PN-EN 62305-4:2011 [3] pkt. C.3.5 wymaga się odpowiedniej liczby SPD wzajemnie skoordynowanych od strony zasilania z zachowaniem właściwego sposobu doboru napięciowego poziomu ochrony  $U_p$  w zależności m.in. od napięcia wytrzymywanego przez urządzenie  $U_w$ . Nic nie wspomniano o koordynacji SPD 1,2,3 z układami wewnętrznymi pomimo, iż w pkt. C.2.1 w/w normy znajdujemy warunek ich właściwej ochrony. Stosowanie wskazanych w normie PN-EN 62305-4:2011 [3] SPD 1,2,3 jest nieporozumieniem bez prawidłowo skoordynowanego energetycznie SPD.

Wracając do problemu koordynacji energetycznej ograniczników przepięć i podsumowując analizy możliwe są dwa układy połączeń między ogranicznikami przepięć typu 1 lub typu 2 a wewnętrznym ogranicznikiem przepięć wynikającym z PN-EN 61000-4-5 [4]. Te dwa przypadki przebadano fizycznie w laboratorium.

## Badania laboratoryjne koordynacji ograniczników przepięć

Mając na uwadze przytoczone wcześniej rozważania podjęto próbę laboratoryjnej weryfikacji typowego układu, dla którego zastosowanie ma norma PN-EN 62305-4:2011 [3]. Postępując zgodnie z normą PN-EN 62305-4:2011 [3] ochronę przeciwprzebiegową można zrealizować za pomocą właściwie dobranej SPD zainstalowanego przy zaciskach chronionego urządzenia, dla którego napięciowym poziomem ochrony  $U_{P/F} < U_w$ .

Mając powyższe na uwadze przeprowadzono próby laboratoryjne układu składającego się z SPD typu ograniczającego napięcie, klasa probiercza T1, T2 – wg. deklaracji producenta SPD (warystor),  $I_{imp}=12,5$  kA,  $U_p=1500$  V,  $I_n=25$  kA) zainstalowanego bezpośrednio na zaciskach chronionego licznika energii elektrycznej posiadającego deklarację CE i badanego według PN-EN 61000-4-5 [4] o deklarowanym  $U_w=6$  kV (1,2/50  $\mu$ s). Wewnątrz licznika energii elektrycznej fabrycznie zastosowano warystor S20K275 ( $U_{V(1mA)}=430$  V – próg, przy którym warystor zaczyna działać,  $U_{max. clamp}=710$  V – maksymalne napięcie na zaciskach warystora podczas zadziałania) – wewnętrzny warystor jako układ ograniczający przepięcia, tak aby spełnić wymagania PN-EN 61000-4-5 [4]. Finalnie wyżej opisany układ posiada dwa równolegle połączone warystory. Łączna długość przewodów łączących SPD i licznik wynosiła 40 cm. Poniżej na rysunku 2 zamieszczono widok stanowiska pomiarowego.

Podczas badań skuteczności ochrony przeciwprzebiegowej powyższego układu wykorzystano wysokonapięciowy generator prądowy, który wytwarza udary prądowe o wartości szczytowej do 300 kA i różnych kształtach. Zmiana parametrów generowanych udarów dokonywana jest poprzez wymianę elementu rezystancyjno-indukcyjnego. Do pomiaru prądu na wyjściu generatora wykorzystano cewki Rogowskiego firmy PEM typu CWT150  $I_n=30$  kA, CWT30  $I_n=6$  kA o płaskiej charakterystyce przenoszenia w zakresie od 0,2 Hz do 16 MHz (pasmo 3dB). Do rejestracji przebiegów wykorzystano oscyloskop cyfrowy Tektronix DPO 7254 posiadający możliwość rejestracji otrzymanych przebiegów w formacie cyfrowym oraz prowadzenia zaawansowanych obliczeń na danych pomiarowych. W trakcie badań udar prądowy z wyjścia generatora doprowadzono do zacisków ogranicznika przepięć wraz z równolegle podłączonym licznikiem energii elektrycznej. Podczas każdej próby rejestrowano prąd wyjściowy z generatora, prąd SPD oraz prąd płynący przez licznik energii elektrycznej. Jako kryterium oceny skuteczności ochrony przeciwprzebiegowej przyjęto wytyczne normy PN-EN 61000-4-5 w zakresie zachowania się obiektu poddanego badaniu (EUT). Przebiegi zarejestrowanych prądów przedstawiono na rysunku 3. Podczas badań licznik energii elektrycznej zasilany był z dedykowanej, izolowanej galwanicznie sieci zasilającej.

Badania przeprowadzono dla prądu o wartości szczytowej 3,4 kA (10/350  $\mu$ s). Przez SPD popłynął prąd o wartości 2,82 kA, zaś przez licznik 0,6 kA. W wyniku przeprowadzonego badania doszło do eksplozji w liczniku energii elektrycznej. Zdjęcia poklatkowe zamieszczono na rysunku 4. Oględziny wykazały, iż mimo istnienia przed licznikiem ogranicznika przepięć (SPD) w liczniku uszkodzony został warystor S20K275 i doszło również do nieodwracalnego zniszczenia ścieżek na płytce PCB licznika.

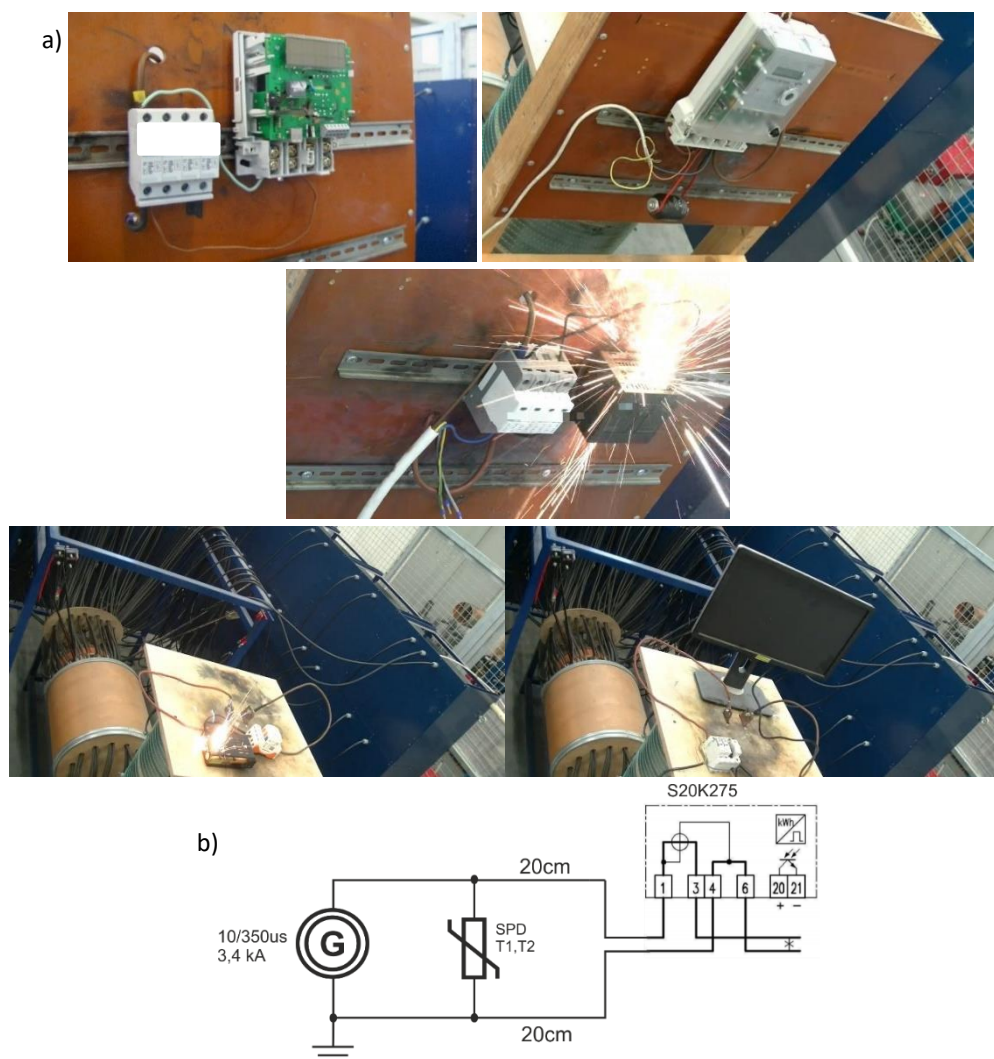
Na podstawie zarejestrowanych prądów wyznaczono całkowitą energię Joule'a dla każdego z elementów: całkowita dla udaru 23,76 kA<sup>2</sup>s, dla SPD 15,02 kA<sup>2</sup>s oraz dla licznika energii 8,74 kA<sup>2</sup>s (wartości wyznaczone dla czasu obserwacji wynoszącego ok. 4,2 ms uwzględniającego prąd rozładowania kondensatorów w generatorze po uszkodzeniu S20K275).

Analizując otrzymane wyniki należy zauważyć, iż różnica w napięciowych poziomach ochrony dwóch równolegle połączonych warystorów wynosi 790 V ( $U_p=1500$  V i  $U_{max. clamp}=710$  V) – proporcja 1,89:1 zachowująca wymagania normy PN-EN 62305-4:2011 [3] w zakresie doboru  $U_p$ . Proporcja podziału energii między elementami wynosi prawie 1,75:1 (SPD/licznik) – nie jest ona

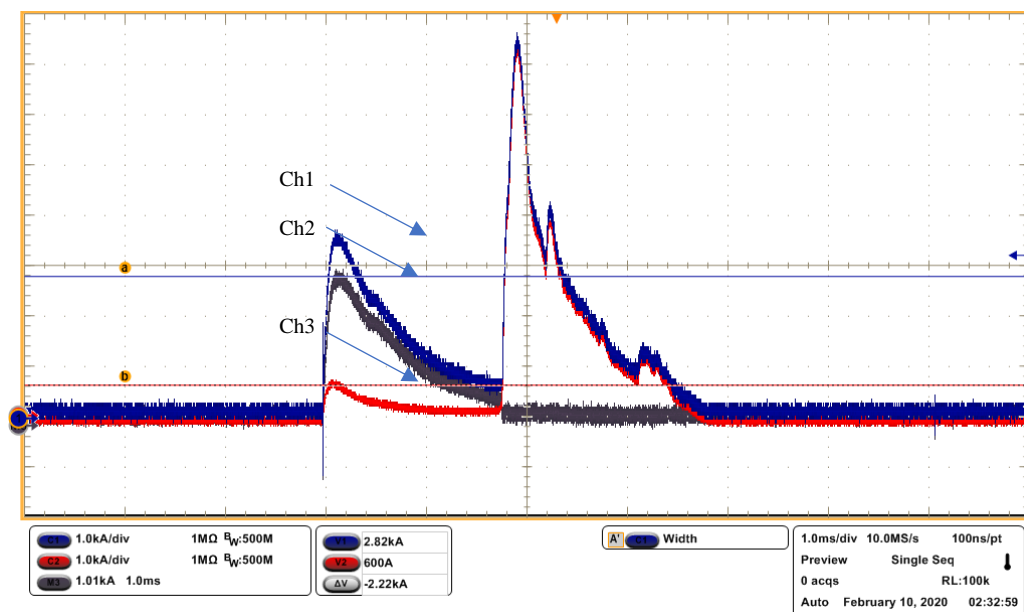
miarodajna ze względu na prąd rozładowania kondensatorów po uszkodzeniu S20K275. Proporcja wartości szczytowego prądu wynosi 4,7:1 (SPD/licznik) – a mimo to doszło do uszkodzenia licznika przy niedostatecznej ochronie zapewnianej przez SPD T1, T2.

Dodatkowo w celu oceny skuteczności koordynacji energetycznej poszczególnych stopni SPD wyznaczono charakterystyki U-I badanych elementów. Do tego celu wykorzystano generator udarów napięciowo-prądowych EM Test UCS 500 – 1,2/50  $\mu$ s; 8/20  $\mu$ s. Otrzymane charakterystyki przedstawiono na rysunku 5.

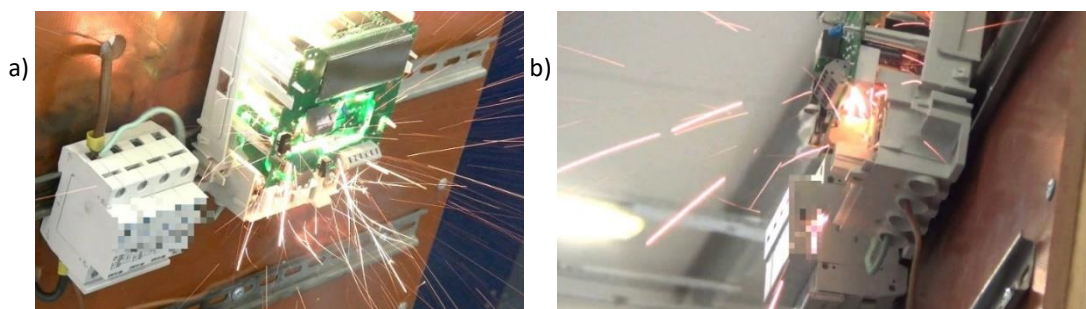
Analizując charakterystyki U-I na uwagę zasługuje położenie pętli dla SPD, która to znajduje się poniżej pętli dla S20K275 – pomimo, iż S20K275 wcześniej zaczyna przewodzić prąd ze względu na mniejszą wartość  $U_{1mA}$  (próg zadziałania warystora przyjęty przez producenta). Należy również zauważyć, iż w/w różnica może być przyczyną braku koordynacji SPD z urządzeniem końcowym. Znaczące jest, iż charakterystyk U-I nie można znaleźć w danych katalogowych SPD typu ograniczającego. Brakuje również danych  $U_{1mA}$  dla SPD typu ograniczającego. Wyznaczenie  $U_{1mA}$  wymaga posiadania specjalnego miernika SPD, zaś charakterystyki U-I nie można wyznaczyć bez wykorzystania specjalistycznych generatorów wysokiego napięcia oraz innych przyrządów pomiarowych. Trudno jest wymagać porównywania charakterystyk U-I przy doborze SPD przez projektanta.



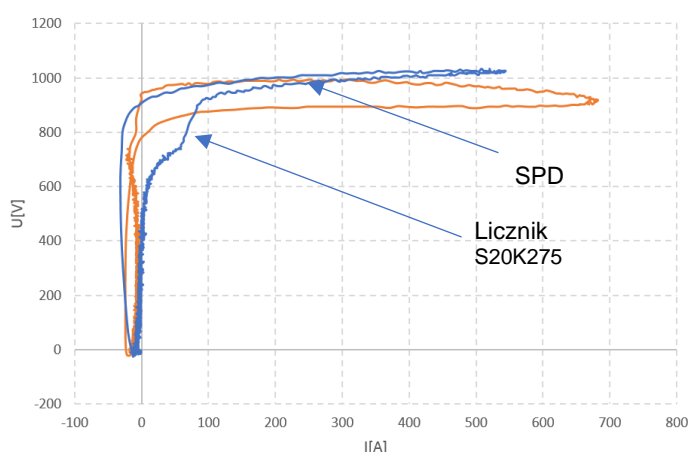
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do badania skuteczności ochrony urządzenia końcowego (a), układ połączeń (b)



**Rys. 3.** Zarejestrowane wartości prądu płynące w badanym układzie (1 kA/div, 1 ms/div). Prąd płynący przez cały układ – krzywa koloru niebieskiego (CH1). Prąd płynący przez SPD – krzywa koloru szarego (CH2). Prąd płynący przez licznik energii elektrycznej – krzywa koloru czerwonego (CH3)



**Rys. 4.** Zdjęcia poklatkowe wykonane podczas badań: a) widok z przodu, b) widok od dołu



**Rys. 5.** Charakterystyki U-I badanych urządzeń: SPD - krzywa koloru pomarańczowego; Licznik energii elektrycznej z S20K275 – krzywa koloru niebieskiego.

Badania powtórzono zmieniając SPD T1,T2 na typowy liniowy ogranicznik napięć stosowany w sieciach elektroenergetycznych o  $U_p \leq 2500$  V. Pozostałe parametry układu pozostały bez

zmian. W wyniku przeprowadzonej próby po raz kolejny doszło do uszkodzenia licznika energii elektrycznej przy braku uszkodzenia chroniącego go SPD. Podobne próby prowadzono również dla urządzenia końcowego w postaci dekodera telewizji naziemnej DVB-T chronionego przez ogranicznik przepięć SPD T1, T2 uzyskując taki sam efekt końcowy.

Podsumowując należy stwierdzić, iż wyposażenie instalacji elektrycznej w ogranicznik przepięć ma sens tylko wówczas, gdy zostanie sprawdzona koordynacja energetyczna SPD z urządzeniem poddawanych ochronie. Dyrektywa EMC winna wymagać podania w danych katalogowych każdego urządzenia informacji o zastosowanym wewnątrz ograniczniku przepięć, jak również informacji o sposobie uzyskania koordynacji energetycznej od strony zasilania.

## Wnioski

Uzyskanie koordynacji energetycznej pomiędzy SPD a urządzeniem końcowym jest złożonym problemem. Analiza koordynacji energetycznej jest niespotykana w projektach. Niestety wiele do życzenia zostawia tutaj sama norma PN-EN 62305-4:2011 [3], która zamiast rozwiązywać problemy spłaszcza je do lakonicznego stwierdzenia: „zaleca się, aby w tym celu producent SPD podał odpowiednie informacje, w jaki sposób osiągnąć koordynację energetyczną między różnymi SPD” – niestety takich informacji brak w kartach katalogowych i na stronach internetowych. Można też doszukiwać się przyczyn w wykreśleniu z normy PN-EN 62305-4:2011 [3] zasad i metod uzyskania koordynacji, jak i braku polskiego odpowiednika wielokrotnie przywoływanej normy IEC 61643-12 [16].

Wyniki zaprezentowanych badań jednoznacznie pokazują, iż skuteczność ochrony przeciwprzepięciowej bez uwzględnienia zagadnienia koordynacji energetycznej SPD z urządzeniem ochronionym jest niewystarczająca, ale sprzyja utrzymaniu produkcji w dobie nasycającego się rynku dóbr konsumpcyjnych.

Zasady ochrony od przepięć, w tym wymagania wynikające z przywołanych aktualnych norm krajowych i międzynarodowych nie zapewniają właściwego poziomu ochrony w przypadku przepięć o wartości szczytowej powyżej wytrzymałości udarowej urządzeń a poniżej progu zadziałania ogranicznika przepięć ( $U_p \leq 2500$  V) zalecanego dla polskich sieci elektroenergetycznych [1,2]. Obowiązujące zalecenia wynikające z norm PN-EN 62305-4 [3], PN-EN 61000-4-5 [4], IEC 61643-12 [16] są wzajemnie niespójne. Skutkiem powyższych problemów jest narażenie urządzeń końcowych na uszkodzenia przy zachowaniu minimalnego poziomu ochrony infrastruktury sieciowej. Wytyczne operatorów sieci dystrybucyjnych powielają mankamenty omawianych norm.

## Literatura

1. Polskie Sieci Elektroenergetyczne. Zasady ochrony od przepięć i koordynacja izolacji linii i stacji elektroenergetycznych PSE S.A. Konstancin-Jeziorna 2020.
2. Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD. PTPiREE 2020.
3. PN-EN 62305-4:2011. Ochrona odgromowa - Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
4. PN-EN 61000-4-5:2014-10. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 4-5: Metody badań i pomiarów - Badanie odporności na udary.

5. PN-HD 60364-1:2010. Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 1: Wymagania podstawowe, ustalanie ogólnych charakterystyk, definicje.
6. PN-IEC 60364-4-443:2016. Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część: 4-443: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa - Ochrona przed zaburzeniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi -- Ochrona przed przejściowymi przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi.
7. PN-HD 60364-5-534:2016. Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 5-534: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego -- Odłączanie izolacyjne, łączenie i sterowanie - Urządzenia do ochrony przed przejściowymi przepięciami.
8. Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie Dz.U. 2022 poz. 1225.
9. PN-HD 60364-4-444:2012. Instalacje elektryczne niskiego napięcia - Część 4-444: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa -- Ochrona przed zakłóceniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi
10. IEC 61643-12:2008. Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Selection and application principles.
11. PN-EN 62305-1:2011. Ochrona odgromowa - Część 1: Zasady ogólne
12. PN-EN 62305-2:2012. Ochrona odgromowa - Część 2: Zarządzanie ryzykiem
13. PN-EN 62305-4:2006. Ochrona odgromowa - Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych
14. PN-EN 61643-11:2013. Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia - Część 11: Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia - Wymagania i metody badań
15. PN-EN 60664-1:2011. Koordynacja izolacji urządzeń elektrycznych w układach niskiego napięcia - Część 1: Zasady, wymagania i badania
16. IEC 61643-12:2008. Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Selection and application principles
17. IEC 61643-22:2015. Low-voltage surge protective devices - Part 22: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks - Selection and application principles
18. Dyrektywa 2014/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej (wersja przekształcona)
19. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Planowane\\_postarzenie\\_produkty](https://pl.wikipedia.org/wiki/Planowane_postarzenie_produkty) - 2021.08.06.
20. <https://www.dziennikprawny.pl/pl/a/prawo-do-naprawy-w-unii-europejskiej-od-2021-roku> - data pozyskania 2020.12.13
21. Podstawowe charakterystyki niezawodności. Sem. 8. Niezawodność elementów i systemów. Komputerowe systemy pomiarowe. <https://eti.pg.edu.pl/documents/176568/e6999378-a5f4-4e4a-a700-432dcd973d2c> - 2021.09.10.

## WYBRANE ZAGADNIENIA Z ZASAD OCHRONY PRZED PRZEPIĘCIAMI

*dr inż. Dominik Duda  
(Politechnika Śląska)*

### **Wprowadzenie**

Opracowanie pt.: „Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD” stanowi zbiór wytycznych wg których należy zapewniać ochronę izolacji liniowej i stacyjnej będącej w gestii OSD.

Zasady ochrony przed przepięciami zostały oparte na obowiązujących aktach prawnych, wytycznych normatywnych i aktualnym stanie wiedzy technicznej. Istotną rolę w ostatecznym kształcie zasad ochrony przed przepięciami odegrali przedstawiciele OSD, aktywnie uczestniczący w procesie opracowywania tych zasad.

W większości przypadków zasady te są spójne z wytycznymi normalizacyjnymi i z ogólnie uznaną i stosowaną praktyką w spółkach OSD. Jednak wycofanie pewnych norm i brak wprowadzenia w ich miejsce innych, które precyzowałyby istotne zagadnienia z punktu widzenia ochrony przed przepięciami, czy trudności w ścisłym spełnieniu niektórych wymagań normatywnych w praktyce sprawiły, że w opracowanych zasadach ochrony przed przepięciami należało opracować wytyczne oparte na aktualnym stanie wiedzy technicznej, doświadczeniach z eksploatacji, ale nie mające ścisłego odniesienia do norm.

Niniejszy referat przedstawia wybrane, istotne zmiany i nowości w stosunku do wcześniejszej wersji zasad ochrony przed przepięciami oraz stanowi próbę wyjaśnienia wybranych zagadnień, które z racji braku jednoznacznych zapisów w normach, wymagały wypracowania określonych wytycznych na etapie opracowywania zasad ochrony przed przepięciami.

### **Ograniczniki przepięć**

Swoistą metodą ochrony systemu elektroenergetycznego przed przepięciami jest tzw. koordynacja izolacji czyli, zgodnie z definicją podaną w normie [1], „wybór wytrzymałości elektrycznej urządzeń w zależności od napięć roboczych i przepięć, jakie mogą pojawić się w sieci, do której urządzenia te są przeznaczone, z uwzględnieniem warunków środowiskowych w eksploatacji i charakterystyk zastosowanych urządzeń ochronnych”. Istotny wpływ na koordynację izolacji mają zatem urządzenia ochronne czyli m.in. ograniczniki przepięć. Ze względu na swoje zalety, w zasadach ochrony przed przepięciami wskazano, że nowo instalowane ograniczniki przepięć w sieciach wysokich, średnich oraz niskich napięć powinny być wyłącznie ogranicznikami beziskiernikowymi z warystorami tlenkowymi. Ograniczniki te wypierają inne rodzaje ograniczników (w tym odgromniki wydmuchowe i ograniczniki zaworowe iskiernikowe). Jest to istotne o tyle, że poziomy ochrony beziskiernikowych ograniczników przepięć często są niższe od poziomów ochrony tradycyjnych odgromników iskiernikowych. Dzięki temu uzyskuje się możliwość obniżenia poziomów izolacji w liniach i stacjach elektroenergetycznych bez ryzyka zmniejszenia jej niezawodności eksploatacyjnej. Nie można też pominąć faktu, że ograniczniki beziskiernikowe działają szybciej niż iskiernikowe.



Beziskiernikowe ograniczniki przepięć są najnowszą i ciągle udoskonalaną generacją ograniczników warystorowych, wyposażonych w warystory z tlenków metali (na bazie tlenku cynku) i niemających iskiernika, a więc również przerw iskrowych. Połączenie warystorów bezpośrednio z przewodem fazowym jest możliwe dzięki ich silnie nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej [2].

Beziskiernikowe ograniczniki przepięć nie są nowością. Wytyczne [1] podawały już wymagane parametry takich ograniczników. Wydana jednak w 2015 roku norma [10] w miejsce niektórych parametrów wprowadza inne (nowe) parametry ograniczników beziskiernikowych. Norma [11] dotycząca doboru i stosowania tych ograniczników wykorzystuje nowowprowadzone parametry do ich doboru. Powstała zatem konieczność aktualizacji wytycznych w zakresie parametrów i doboru beziskiernikowych ograniczników przepięć.

Wcześniej beziskiernikowe ograniczniki przepięć klasyfikowane były m.in. klasą rozładowania (linii). Był to jednak parametr trudny do zinterpretowania i jednoznacznego określenia jaka klasa rozładowania jest wymagana w konkretnym zastosowaniu ogranicznika. Norma [10] klasyfikuje obecnie ograniczniki na dwie klasy: stacyjną i dystrybucyjną. Każda z tych klas jest jeszcze podzielona pod względem możliwości energetycznych (możliwości akumulacji określonej ilości energii bez ryzyka utraty stabilności cieplnej i możliwość oddawania wydzielonej w ograniczniku energii) oraz odporności na przepływ określonego ładunku bez uszkodzeń mechanicznych i elektrycznych warystorów w ograniczniku. Nową klasyfikację ograniczników w zestawieniu do wcześniej stosowanej podano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Obecna i poprzednia klasyfikacja ograniczników wg [10]

Klasa ogranicznika	Stacyjne			Dystrybucyjne		
Oznaczenie	SH	SM	SL	DH	DM	DL
$I_n$ (kA)	20	10	10	10	5	2,5
$I_{sw}$ (kA)	2	1	0,5	–	–	–
$Q_{rs}$ (C)	<sup>3</sup> 2,4	<sup>3</sup> 1,6	<sup>3</sup> 1,0	<sup>3</sup> 0,4	<sup>3</sup> 0,2	<sup>3</sup> 0,1
$W_{th}$ (kJ/kV)	<sup>3</sup> 10	<sup>3</sup> 7	<sup>3</sup> 4	-	-	-
$Q_{th}$ (C)	-	-	-	<sup>3</sup> 1,1	<sup>3</sup> 0,7	<sup>3</sup> 0,45
Klasa rozładowania	4 i 5	3	2	1	–	–
$I_n$ (kA)	20	10	10	10	5	–
$I_{sw}$ (kA)	0,5 i 2	0,25 i 1	0,125 i 0,5	0,125 i 0,5	–	–
Uwaga: Literami „H”, „M”, „L” oznaczono typ ograniczników: „high”, „medium” i „low”						

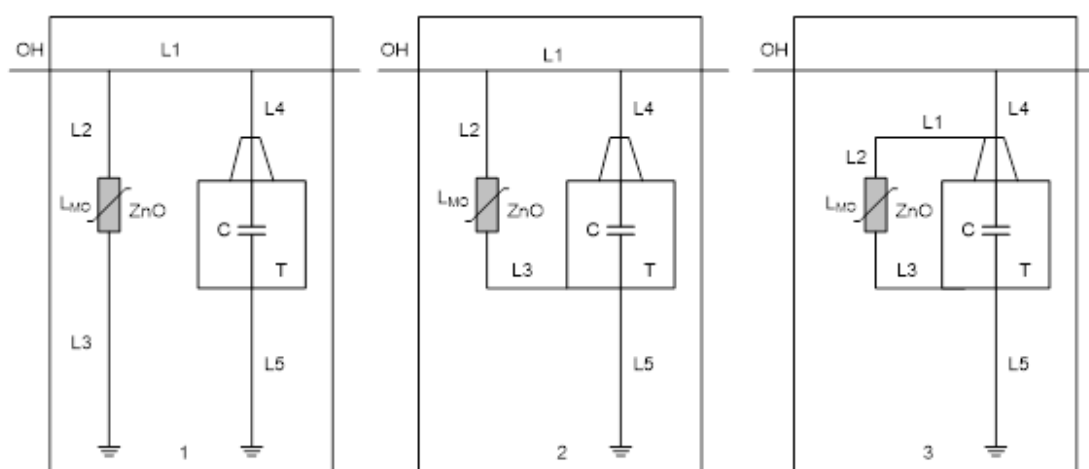
Jako ograniczniki przepięć chroniące urządzenia stacji WN stosuje się ograniczniki klasy stacyjnej o oznaczeniu SL, SM lub SH. W sieciach elektroenergetycznych SN (w rozumieniu postanowień normy [10] o napięciach  $U_m \leq 52$  kV) stosowane są ograniczniki klasy dystrybucyjnej o oznaczeniu DL, DM lub DH.

Pozostałe oznaczenia podane w tabeli 1 to:  $Q_{rs}$  (zdolność do powtarzalnego odprowadzania ładunku),  $W_{th}$  (znamionowa energia cieplna) i  $Q_{th}$  (ładunek dopuszczalny termicznie). Oznaczenia te zostały wprowadzone w [10]. Zastępują one dotychczas używane klasy rozładowania linii. Ogranicznikom klasy stacyjnej przypisuje się wartość  $W_{th}$ , natomiast ogranicznikom klasy dystrybucyjnej przypisuje się wartości ładunku dopuszczalnego termicznie  $Q_{th}$ .

Zdolność do powtarzalnego odprowadzania ładunku ( $Q_{rs}$ ) to maksymalna wartość ładunku odprowadzanego przez ogranicznik w postaci pojedynczego udaru lub grupy udarów bez

powodowania uszkodzenia mechanicznego lub niedopuszczalnej degradacji elektrycznej warystorów. Ładunek dopuszczalny termicznie ( $Q_{th}$ ) to maksymalny ładunek, który może przepłynąć przez ogranicznik lub sekcję ogranicznika w ciągu 3 minut, nie powodując niekontrolowanego wzrostu temperatury, natomiast znamionowa energia cieplna ( $W_{th}$ ) to maksymalna energia, podana w kJ/kV, która może zostać dostarczona do ogranicznika lub sekcji ogranicznika w ciągu 3 minut, nie powodująca niekontrolowanego wzrostu temperatury.

Oprócz samych ograniczników oraz ich właściwego doboru, o skuteczności ochrony jaką zapewniają decyduje ich lokalizacja względem chronionego obiektu. W aktualnych zasadach ochrony przed przepięciami [3] podano szczegóły dotyczące określania tzw. stref ochronnych tzn. dopuszczalnych długości przewodów łączących ograniczniki i chroniony obiekt. Jako ilustrację problemu na rys. 1. przedstawiono możliwości lokalizacji i sposobu połączenia ograniczników przepięć z chronionym obiektem (np. transformatorem SN/nn).



**Rys. 1.** Niezalecany (1) dopuszczalny (2) oraz optymalny (3) sposób montażu ograniczników przepięć SN chroniących stronę SN transformatorów; L1 ÷ L5 – długości przewodów łączących, LN – linia napowietrzna, C – wewnętrzna pojemność transformatora, T – transformator

Istotnymi czynnikami różnicującymi przedstawione na rys. 1 warianty połączenia ograniczników przepięć z chronionym obiektem są długości przewodów łączących ograniczniki z chronionym obiektem i sposób uziomienia. W przypadku wariantu niezalecanego (1) chroniony obiekt i ogranicznik przyłączone są do oddzielnych uziomów, dodatkowo występują długie przewody uziemiające zarówno sam obiekt chroniony jak i ogranicznik przepięć. Jest to szczególnie istotne dla stacji słupowych. W wariacie (2) znacznie skraca się długość połączenia L3, a długość połączenia kadzi transformatora z uziemieniem L5 nie ma wpływu skuteczności ochrony izolacji transformatora. Przez połączenie to odprowadzany jest co prawda do ziemi ładunek i występuje tam udarowy spadek napięcia, ale z punktu widzenia izolacji transformatora nie ma on znaczenia. W wariacie (3) – optymalnym pod względem skuteczności ochrony przed przepięciami – ogranicznik wpięty jest między izolator przepustowy i uziomioną kadź transformatora, przez co długości przewodów łączących L1, L2 i L3 są najkrótsze, a dodatkowo na skuteczność ochrony nie ma wpływu długość połączenia L4.

### Instalowanie ograniczników przepięć w liniach nn

Ochrona przed przepięciami w liniach nn jest istotnym elementem zapewnienia ochrony przed przepięciami instalacji odbiorczych, przy czym należy podkreślić, że obowiązkiem OSD nie jest

zapewnienie ochrony samych instalacji, ale ograniczenie wartości szczytowych przepięć pochodzących z sieci zasilającej instalacje odbiorcze. Instalowanie stosownych ograniczników przepięć (często określanych akronimem SPD od *Surge Protective Device*) pozwala również chronić izolację napowietrznych przewodów izolowanych czy linii kablowych nn.

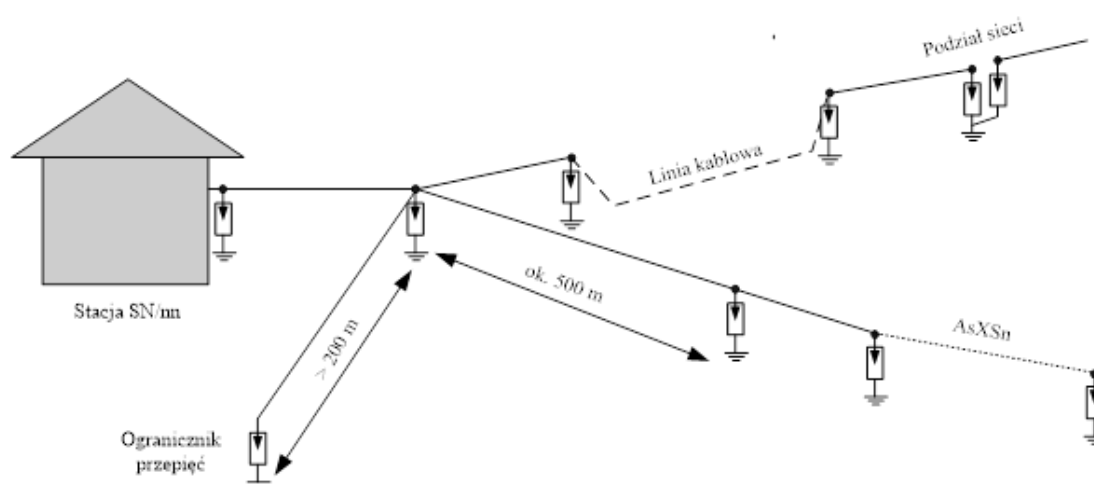
Urządzenia zasilane bezpośrednio z sieci niskiego napięcia podzielone są wg normy [5] na tzw. kategorie przepięć. Natomiast norma [6] podaje wartości wymaganych znamionowych napięć udarowych urządzeń. Wymagania obu norm są spójne. Znamionowe napięcia udarowe urządzeń zasilanych bezpośrednio z sieci niskiego napięcia (230/400 V) czyli urządzeń stosowanych w złączu instalacji, zaliczanych wg [5] do urządzeń IV kategorii przepięć wynosi 6000 V. Przykładami urządzeń IV kategorii przepięć są liczniki energii elektrycznej i główne zabezpieczenia nadprądowe. Zadaniem OSD w zakresie ochrony przed przepięciami w sieciach nn jest zatem ograniczenie przepięć o charakterze udarowym do poziomu niższego od 6000 V. Natomiast obowiązkiem producenta takich urządzeń jest zapewnienie wytrzymałości elektrycznej udarowej nie mniejszej 6000 V. Norma [5] definiuje również urządzenia niższych kategorii przepięć. Są to jednak urządzenia instalowane w głębi instalacji odbiorczych, zatem ochrona tych urządzeń od przepięć nie jest obowiązkiem OSD.

Aby zapewnić ochronę urządzeń IV kategorii przepięć, wg aktualnych zasad ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD, ograniczniki przepięć należy instalować:

- w stacjach zasilających sieć nn, za zabezpieczeniami (łącznikami) linii, po jednym komplecie ograniczników na odejściu każdej linii lub na jej pierwszym słupie.
- na końcu każdej linii napowietrznej i na końcu każdego odgałęzienia o długości większej niż 200 m,
- wzdłuż linii, tak aby na każde 500 m długości linii przypadał co najmniej jeden komplet ograniczników przepięć instalowany w miejscach uziemienia przewodu ochronno – neutralnego (PEN),
- na podziałach sieci (linii) z obu stron słupa,
- w miejscu połączeń linii kablowej z linią napowietrzną wykonaną przewodami gołymi lub zespołami napowietrznych przewodów izolowanych oraz linii napowietrznej wykonanej zespołami napowietrznych przewodów izolowanych z linią napowietrzną wykonaną przewodami gołymi (wymienione tu przypadki nie dotyczą przyłączy).

Ograniczniki instalowane w miejscach innych niż ww. wymienione i przedstawione na rys. 2 należy traktować jako nadmiarowe. W stosunku do nich nie formułuje się jakichkolwiek wymagań.

Należy podkreślić, że podane wyżej miejsca instalacji ograniczników są zgodnie z wcześniej obowiązującymi wytycznymi [1]. Wątpliwość może jednak budzić pominięcie przyłączy, co sugerowałoby nie obejmowanie ich (i tym samym instalacji odbiorczych) ochroną przed przepięciami. Należy tu jednak podkreślić, że same przyłącza są również objęte ochroną, pod warunkiem, że ograniczniki przepięć instalowane będą w ww. miejscach w liniach nn, a sama ochrona instalacji odbiorczych leży po stronie odbiorcy.



Rys. 2. Zalecane rozmieszczanie ograniczników przepięć w linii elektroenergetycznej nn

Wyraźnie wymieniona ochrona przyłączy istniała w starej, wycofanej już normie [7] (PN-E 05100-1 z 1998 r.). Według tej normy w przypadku wykonania dla budynku przyłącza napowietrznego z zastosowaniem izolatorów dościenne ograniczniki przepięć miały być umieszczane w pobliżu tych izolatorów na zewnątrz budynku. W przypadku innego wykonania przyłącza dla tych budynków, ograniczniki przepięć należało instalować na najbliższym słupie linii elektroenergetycznej.

Jednak już w wytycznych [1] z 2005 r. istniał zapis: „Linie napowietrzne z przewodami gołymi lub z przewodami pełnoizolowanymi, w tym przyłącza, należy chronić SPD, które powinny być zainstalowane na końcu każdej linii i na końcu każdego odgałęzienia o długości większej niż 200 m oraz w linii w odstępach nie większych niż 500 m. Zaleca się instalowanie SPD w miejscach uziemienia przewodu ochronno-neutralnego PEN”. Przyłącza były więc traktowane jako fragmenty linii z przewodami gołymi lub pełnoizolowanymi, którym należy zapewnić ochronę instalując ograniczniki przepięć (SPD) na końcu każdej linii i na końcu każdego odgałęzienia o długości większej niż 200 m oraz w linii w odstępach nie większych niż 500 m. Nie wskazywano już, że ograniczniki mają być instalowane na każdym przyłączy.

Dodatkowo rozporządzenie [9] w § 183. 1. podaje, że w instalacjach elektrycznych należy stosować m.in. urządzenia ochrony przeciwprzebieciowej. Przenosi ono zatem obowiązek ochrony przed przebieciami na właściciela instalacji. W rozporządzeniu tym przywołuje się również normę [6] dotyczącą ochrony przed przebieciami atmosferycznymi lub łączeniowymi. Zgodnie z zapisami tej normy, jeżeli instalacja jest zasilana linią napowietrzną lub ją obejmuje, a zgodnie z normą [6] wymagane byłoby stosowanie ochrony przeciwprzebieciowej, to „poziom ochrony przepięć można kontrolować poprzez zainstalowanie urządzeń do ograniczania przepięć albo bezpośrednio w instalacji blisko jej złącza, albo – za zgodą operatora sieci – w linii napowietrznej zasilającej sieci rozdzielczej. Na przykład można zastosować następujące środki:

- a) w przypadku zasilania z napowietrznych sieci rozdzielczych, urządzenia do ograniczania przepięć można montować w punktach węzłowych sieci, a zwłaszcza przy końcu każdego przyłącza dłuższego niż 0,5 km. Zaleca się, aby urządzenia do ograniczania przepięć były montowane co 0,5 km wzdłuż zasilających linii rozdzielczych i aby jednak w żadnym przypadku odległość między urządzeniami do ograniczenia przepięć nie była większa niż 1 km;

- b) jeżeli zasilająca sieć rozdzielcza jest częściowo napowietrzna, a częściowo podziemna, zaleca się, aby ochrona przeciwprzebiegowa w liniach napowietrznych była stosowana zgodnie z a) w każdym punkcie przejścia z linii napowietrznej do kabla podziemnego”.

Można zatem stwierdzić, że aktualne zasady ochrony przed przebiegami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD, w zakresie instalowania ograniczników w liniach napowietrznych, w pełni spełniają wymagania normy [6] i są nawet bardziej rygorystyczne od zapisów tej normy. Skoro zatem ww. rozmieszczenie ograniczników powinno zapewnić odpowiedni poziom ochrony instalacji przed przebiegami, to nie jest wymagane stosowanie dodatkowych ograniczników na przyłączach.

### Uziemienia urządzeń do ochrony przed przebiegami

Skuteczność urządzeń do ochrony przed przebiegami zależy nie tylko od poprawnego doboru i lokalizacji względem chronionego obiektu, ale zależy również od parametrów układu uziemiającego. Podstawowym parametrem uziemienia jest jego rezystancja. Zależy ona przede wszystkim od rezystywności gruntu oraz kształtu i wymiarów uziomu. Działanie ochronne uziemienia jest tym lepsze, im mniejszy jest spadek napięcia na jego rezystancji.

Specyfika uziemień służących do odprowadzania prądów o charakterze udarowym (towarzyszącym głównie przebiegom piorunowym) polega głównie na tym, że oprócz właściwości statycznych – ujawniających się podczas przepływu prądów wolnozmiennych – należy również uwzględniać ich właściwości dynamiczne (udarowe), ujawniające się podczas przepływu krótkotrwałych i na ogół dużych prądów piorunowych [2]. Procesy odprowadzania prądów piorunowych z uziomów do gruntu oraz ich rozptyłu w ziemi są zazwyczaj inne niż procesy towarzyszące przepływowi prądów stacjonarnych i zwarciovych. Prawie cała rezystancja uziemienia przypada na warstwy gruntu otaczające uziom, ponieważ instalacja uziemiająca (przewody uziemiające i zaciski) ma zazwyczaj pomijalnie małą rezystancję. Znaczny wpływ na właściwości elektryczne uziemień wywiera charakter przebiegu prądu oraz wartość jego gęstości przy powierzchni granicznej uziomu i gruntu. W przypadku przepływu przez uziemienie prądu udarowego zależność między napięciem na uziomie a gęstością przy powierzchni uziomu jest silnie nieliniowa. Wynika z tego między innymi przesunięcie w czasie wartości szczytowych napięcia i prądu. W warunkach udarowych należy więc w zasadzie posługiwać się impedancją chwilową uziemienia, definiowaną jako stosunek wartości chwilowych napięcia i prądu. Największe znaczenie praktyczne należy przypisywać tej wartości impedancji chwilowej uziomu, której odpowiada wartość szczytowa napięcia na uziomie. W obliczeniach przybliżonych dość często jest stosowana wielkość zwana rezystancją udarową uziemienia, definiowana jako stosunek największych wartości napięcia  $u_{zmax}$  na uziomie i prądu  $i_{zmax}$  w miejscu jego doprowadzenia.

$$R_{zu} = \frac{u_{zmax}}{i_{zmax}} = \alpha_u R_z,$$

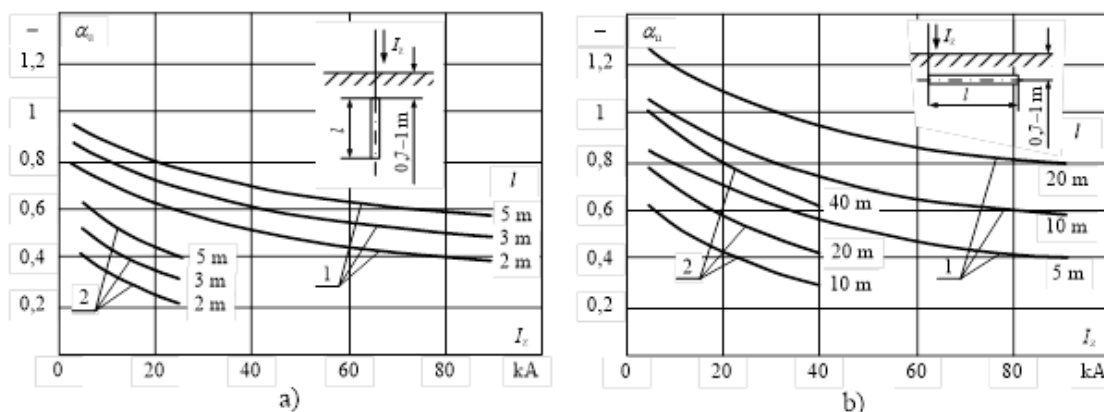
gdzie  $R_z$  jest rezystancją statyczną uziomu, a  $\alpha_u$  jest współczynnikiem udarowym uziomu o wartości zależnej od rezystywności gruntu oraz rodzaju, liczby i wymiarów uziomu, a także od wartości szczytowej udaru prądowego. Wartości współczynnika  $\alpha_u$  mieszczą się w przedziale od ok. 0,25 do 1,2.

Podane w zasadach [3], wymagane wartości rezystancji uziemienia powinny być zapewnione przy prądzie przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Są to zatem wartości rezystancji statycznej.

W zasadach [3] przyjęto ogólną zasadę, że przy rezystywnościach gruntu wynoszących mniej niż  $1000 \Omega \cdot m$ , rezystancja uziemienia nie powinna przekraczać  $10 \Omega$ , natomiast dla gruntów o rezystywnościach większych lub równych  $1000 \Omega \cdot m$ , rezystancja ta nie powinna przekraczać  $15 \Omega$ . W aktualnych zasadach ochrony przed przebiegami podano również pewne ograniczenia dotyczące zwiększania rezystancji uziomów do  $15 \Omega$ . W sieciach  $110 \text{ kV}$  niezależnie od rezystywności gruntu, zarówno na podejściach do stacji lub kabla na długości nie mniejszej niż  $500 \text{ m}$  jak i na słupach ograniczających pręśla specjalne rezystancja uziemienia nie powinna jednak przekraczać  $10 \Omega$ .

Podane dopuszczalne wartości rezystancji uziemień dla urządzeń ochrony przed przebiegami w sieciach WN i SN wynikają z zapisów w normie [12]. Niestety żadna norma nie precyzuje obecnie wymaganej rezystancji uziemień dla urządzeń ochrony przed przebiegami w sieciach nn. Wcześniejsze wytyczne w zakresie ochrony przed przebiegami [1] oraz wycofana norma [7] ograniczały się jedynie, w przypadku sieci nn, do dopuszczalnej wartości  $10 \Omega$ . W aktualnych zasadach [3] zdecydowano jednak o dopuszczeniu większej wartości ( $15 \Omega$  przy rezystywności gruntu większej lub równej  $1000 \Omega \cdot m$ ) uzasadniając to z jednej strony ograniczeniami technicznymi możliwości wykonania uziemienia (w szczególnych przypadkach utrudniony dostęp do gruntu, w którym można ułożyć lub wbić elementy uziomu), z drugiej strony korzystnymi wartościami współczynnika udarowego uziomu  $\alpha_u$  dla gruntów o rezystywnościach powyżej  $1000 \Omega \cdot m$ . Wartości współczynnika udarowego uziomu w zależności od rodzaju uziomu, rezystywności gruntu i wartości szczytowej udarowego prądu odprowadzanego do gruntu podano na rys. 3.

Dla gruntów o rezystywności gruntu  $1000 \Omega \cdot m$  wartości współczynnika  $\alpha_u$  są mniejsze od 1, szczególnie dla uziomów pionowych i krótkich uziomów poziomych. Zatem rezystancja udarowa jest w tych przypadkach mniejsza niż rezystancja statyczna. Jest to związane z półprzewodzącymi właściwościami gruntu, a więc nieliniowością jego rezystywności. Przy wzroście natężenia pola elektrycznego do wartości rzędu ( $0,5 \div 1$ )  $\text{kV/mm}$  wokół uziomu powstają wyładowania iskrowe, spowodowane intensywną jonizacją wewnątrz szczelin gazowych w gruncie. Prowadzi to do przebicia cząstek gruntu o większych rezystywnościach i zmniejszenia napięcia wokół uziomu.



**Rys. 3.** Współczynnik udarowy dla uziomów pojedynczych [2]: a) uziomy pionowe, b) uziomy poziome proste; 1 – dane dla rezystywności gruntu  $100 \Omega \cdot m$ , 2 – dane dla rezystywności gruntu  $1000 \Omega \cdot m$

Osiągnięcie rezystancji uziemienia o wartości (statycznej) poniżej  $10 \Omega$  przy wyższych rezystywnościach gruntu wymagałoby ułożenia długich uziomów pojedynczych lub wykonania uziomów złożonych. W długich uziomach poziomych istotną rolę odgrywają jednak indukcyjne spadki napięcia. Oznacza to, że uziomy poziome nie powinny przekraczać określonych długości

granicznych, powyżej których następuje wzrost rezystancji udarowej w porównaniu z rezystancją statyczną uziomów. Zmniejszanie rezystancji statycznej przez wydłużanie uziomów lub niewłaściwe wykonanie uziomów złożonych może nie poprawiać rezystancji w warunkach udarowych. Z tego względu w zasadach ochrony przed przepięciami [3] podano również długości uziomów sztucznych, których nie powinno się przekraczać.

## Podsumowanie

W referacie wykazano, że pominięcie stosowania ograniczników na przyłączach, z punktu widzenia postanowień norm, nie pogarsza ochrony przed przepięciami przenoszonymi przewodami napowietrznych linii nn. Podobnie zwiększenie dopuszczalnej wartości rezystancji uziemień w sieciach nn, przy niekorzystnych warunkach gruntowych (dużej rezystywności gruntu) nie musi oznaczać pogorszenia się skuteczności ochrony przed przepięciami o charakterze udarowym.

Niniejszy referat nie wyczerpuje wszystkich zmian czy nowości wprowadzonych w dokumencie „Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD” w stosunku do wersji z 2005 roku.

Założeniem zespołu autorskiego ww. zasad ochrony było formułowanie jednoznacznych wytycznych, bardzo często uzupełnianych komentarzami pozwalającymi na wyjaśnienie takiego a nie innego ich sformułowania. Ponieważ przyjęta konwencja komentarzy nie pozwalała na wyjaśnienie wszystkich ewentualnych wątpliwości, niniejszy referat może stanowić rozszerzenie takich komentarzy.

## Literatura

1. Anderson E., Jasiński E., Komorowska I., Kulikowski J., Piłatowicz A.: Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć; wskazówki wykonawcze. Wyd. PTPiREE, Poznań 2005.
2. Duda D., Gacek Z.: Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych i ochrona przed przepięciami. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2015.
3. Szadkowski M., Duda D., Kiełboń M., Maźniewski K., Gacek Z.: Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD. Gliwice 2020.
4. PN-EN 60071-1:2007 Koordynacja izolacji – Definicje, zasady i reguły.
5. PN-EN 60664-1: 2011. Koordynacja izolacji urządzeń elektrycznych w układach niskiego napięcia – Część 1: Zasady, wymagania i badania.
6. PN-HD 60364-4-443: 2016. Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-443: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa - Ochrona przed zaburzeniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi - Ochrona przed przejściowymi przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi.
7. PN-E 05100-1:1998 Elektroenergetyczne linie napowietrzne Projektowanie i budowa Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.
8. N SEP-E-003: 2006. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z zespołami napowietrznych przewodów izolowanych oraz z przewodami w osłonie.
9. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2022 poz. 1225) (tekst jednolity z 09 czerwca 2022 r.).

10. PN-EN 60099-4:2015. Ograniczniki przepięć - Część 4: Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego
11. PN-EN IEC 60099-5:2018. Ograniczniki przepięć - Część 5: Zalecenia wyboru i stosowania
12. PN-EN 50341-2-22: 2016-04. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV – Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN 50341-1: 2012).





## MONITOROWANIE STANU TECHNICZNEGO I OCENA JAKOŚCI OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ ZABUDOWANYCH W SPÓŁCE DYSTRYBUCYJNEJ ENEA OPERATOR

*dr hab. inż. Marek Olesz prof. PG (Politechnika Gdańska)  
Miroslaw Ciechański (Enea Operator Sp. z o.o.)*



**Enea**  
Operator

**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

Monitorowanie stanu technicznego  
i ocena jakości ograniczników przepięć  
zabudowywanych w spółce dystrybucyjnej  
Enea Operator

Wista, 30.11.2023 r.

Marek Olesz  
mirosław.olesz@pg.gda.pl  
Miroslaw Ciechański  
mirosław.ciechański@operator.enea.pl



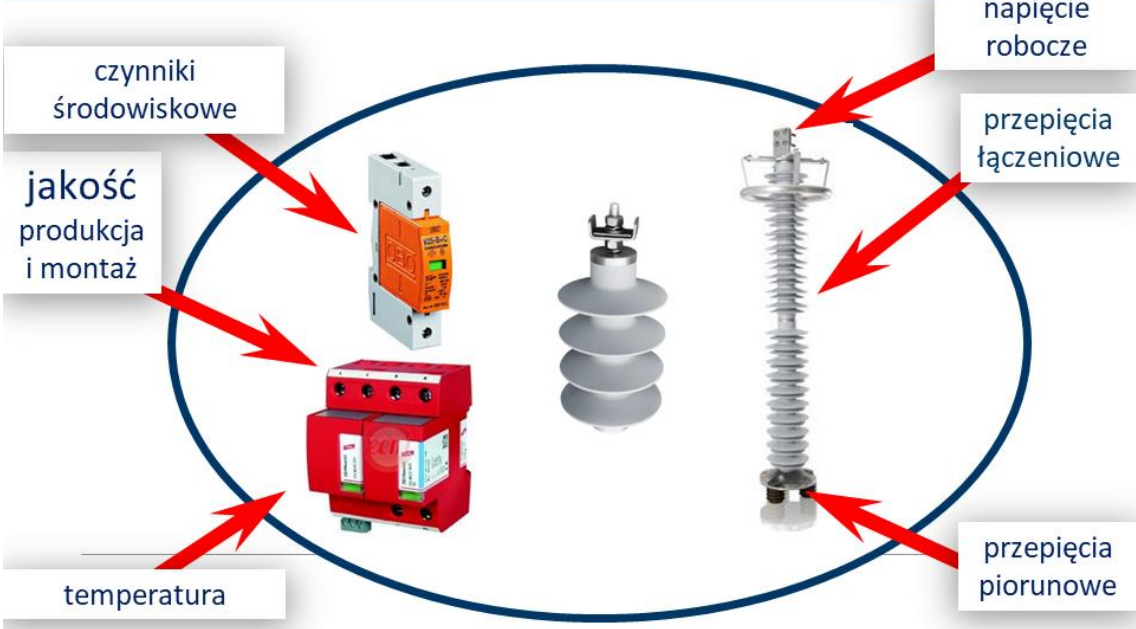
### Plan prezentacji

1. Podstawowe informacje o ogranicznikach przepięć
2. Metody diagnostyki eksploatacyjnej
3. Wymagania dla ograniczników przepięć dostarczanych do zabudowy w sieci dystrybucyjnej Enea Operator sp. z o.o.
4. Uszkodzenia ograniczników przepięć
5. Ocena gotowego produktu – studium badania 6 różnych ograniczników nn
6. Podsumowanie

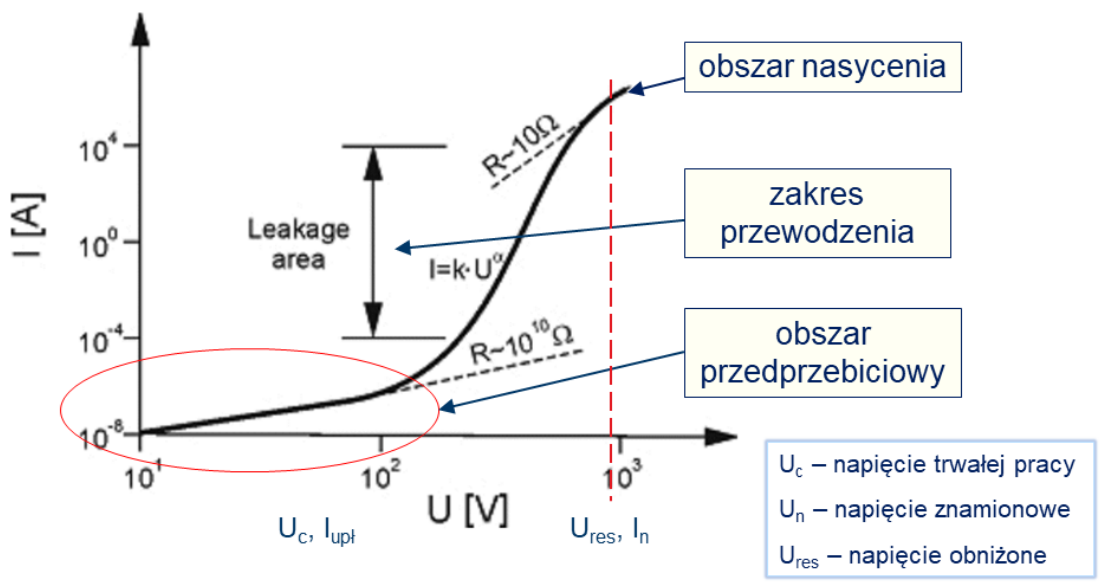




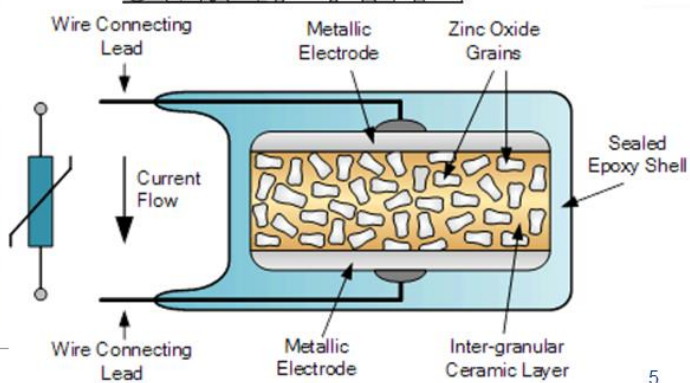
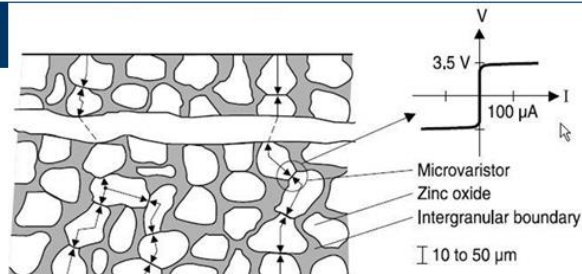
Ograniczniki przepięć. Jak określić dobry wyrób?



Charakterystyka prądowo-napięciowa



Budowa wewnętrzna



5

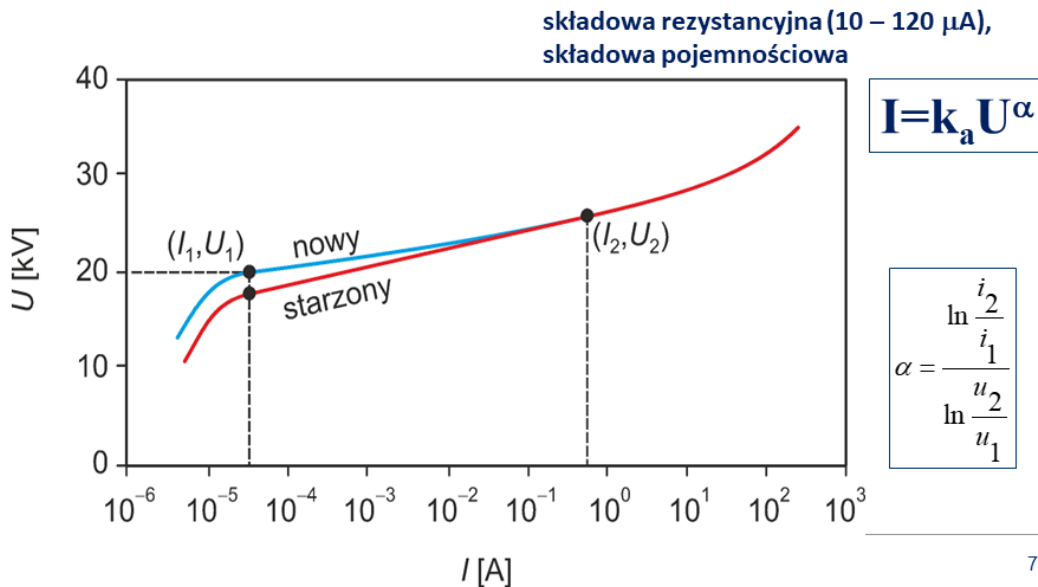
Efekty przebiegów piorunowych w ceramice ZnO

- ✓ maksimum współczynnika stratności
- ✓ wzrost temperatury, właściwości przewodzących ⇒ wzrost prądów upływu, polaryzacyjnych
- ✓ zmiana wielkości ziaren ⇒ przesunięcie charakterystyki  $U(I)$
- ✓ energetyka zawodowa – brak badań degradacji ograniczników SN i nn
- ✓ odłączniki



6

Prąd upływowy w diagnostyce



Diagnostyka ograniczników tlenkowych

PN-EN 60099-5:1999. Ograniczniki przepięć

Liczniki zadziałań, iskierniki wskaźnikowe, odczyt prądu ciągłego

PN-EN 60099-5:1999/A1:2004. Ograniczniki - Zalecenia wyboru i stosowania

Zastosowanie urządzeń sygnalizujących stan degradacji (odłączniki), analiza temperatury, harmonicznych prądu upływu, strat mocy czynnej



- rejestracja liczby, wartości prądu i czasu trwania prądu wyładowczego
- rejestracja prądu upływowego i jego parametrów (wartość skuteczna, amplituda,  $I_3$ , składowa czynna i jej 3 harmoniczna  $I_{3R}$ )



## Metody diagnostyki eksploatacyjnej

### Urządzenia wskaźnikowe

- wskaźniki uszkodzeń,
- odłączniki,
- liczniki zadziałań



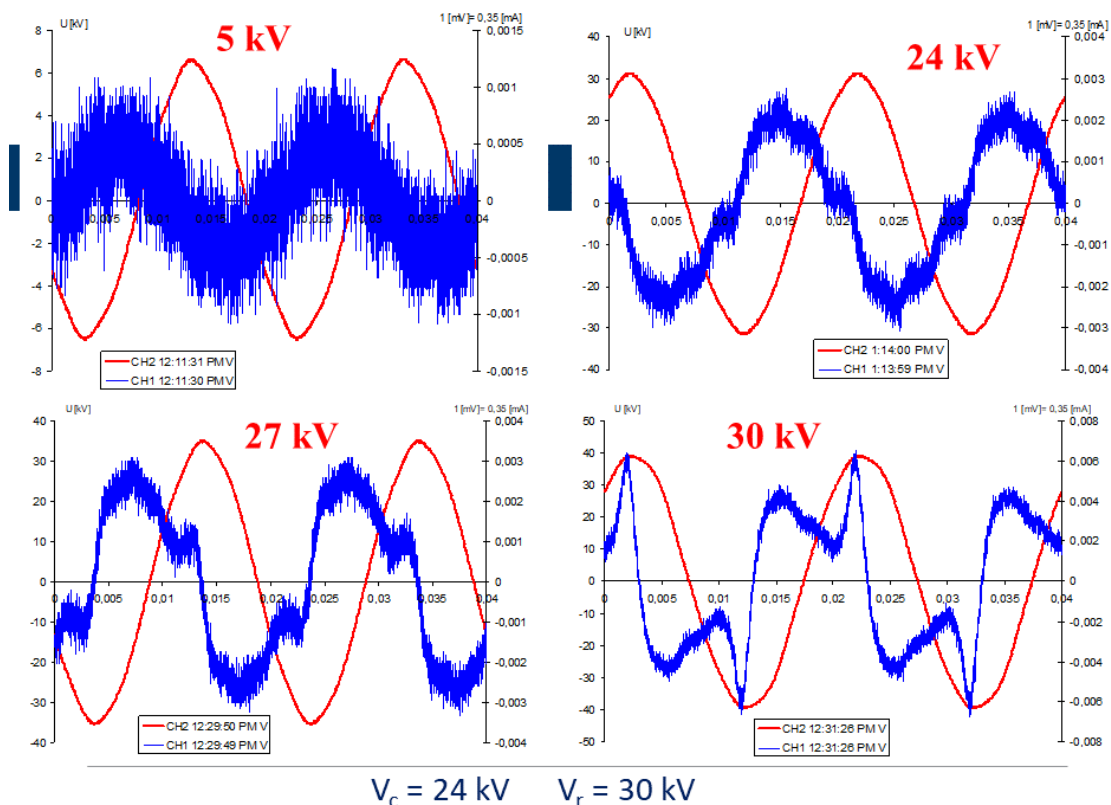
### Wykorzystanie kamery termowizyjnej

#### Metoda pomiaru prądu upływu

- Określenie składowej czynnej (EXCOUNT II, LCM1) lub mocy strat w ograniczniku



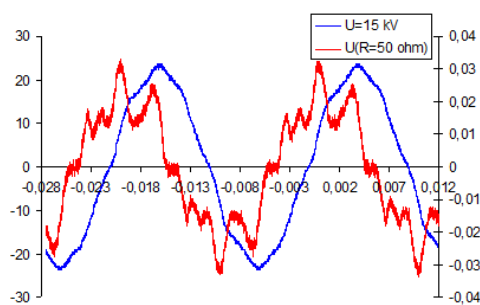
9





## Analiza składowej czynnej prądu upływowego

- metoda kompensacyjna polegająca na wygenerowaniu składowej pojemnościowej i odjęciu jej od sygnału prądu upływu,
- określenie wartości chwilowej prądu dla wartości szczytowej napięcia,
- metoda zmodyfikowanego przesunięcia prądu,
- algorytmy z przyrządów do pomiaru jakości energii elektrycznej.



$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = U \cdot I \cdot PF = U \cdot I_R$$

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \phi$$

11

## Sposoby określenia składowej czynnej bez pomiaru napięcia

- Kompensacja wpływu 3 harmonicznej napięcia (Lundquist 1990)
- Metoda przesunięcia prądu (Lee 2005, Abdul – Malek 2010)

**Metoda 1:** dodatkowa sonda pola elektrycznego umożliwiająca po rejestracji prądu upływowego wartość składowej  $I_{3R}$ . Otrzymany wynik jest przeliczany na wartość  $I_R$  z charakterystyki  $I_R/I_{3R} = f(U_c/U_r)$ , określonej przez producenta

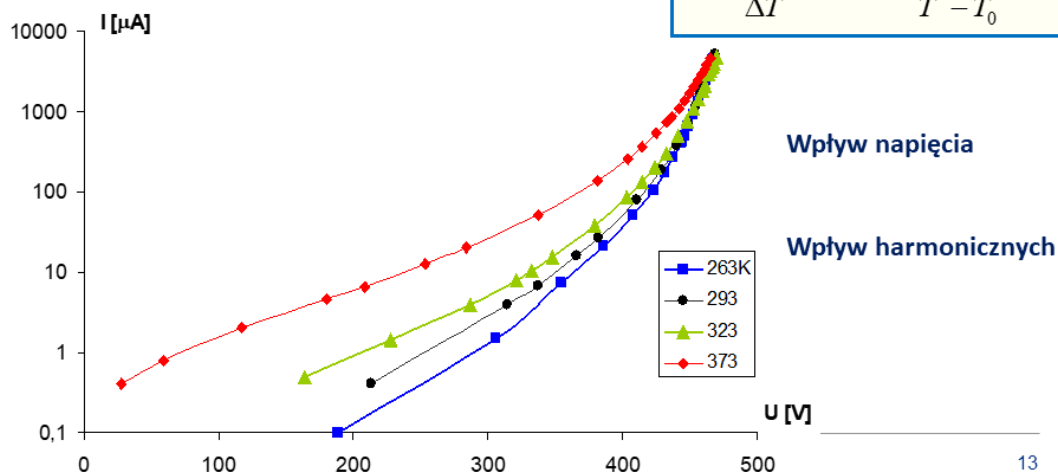
**Metoda 2:** moment przejścia przez zero, częstotliwość, przesunięcie przebiegu o 0,25 T, wyznaczenie czasu wystąpienia wartości maksymalnej dla dodanych przebiegów prądu (rzeczywistego i przesuniętego), czas  $t_n$  wyznacza składową  $i_r$ , generacja przebiegów  $i_c$  oraz  $i_r$

12

## Wpływ temperatury na wartość prądu upływowego

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

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



## Kontrola pojedynczych warystorów

Potwierdzenie zgodności partii produkcyjnej na podstawie weryfikacji populacji  
200 sztuk pobranych z partii produkcyjnej

Badania:

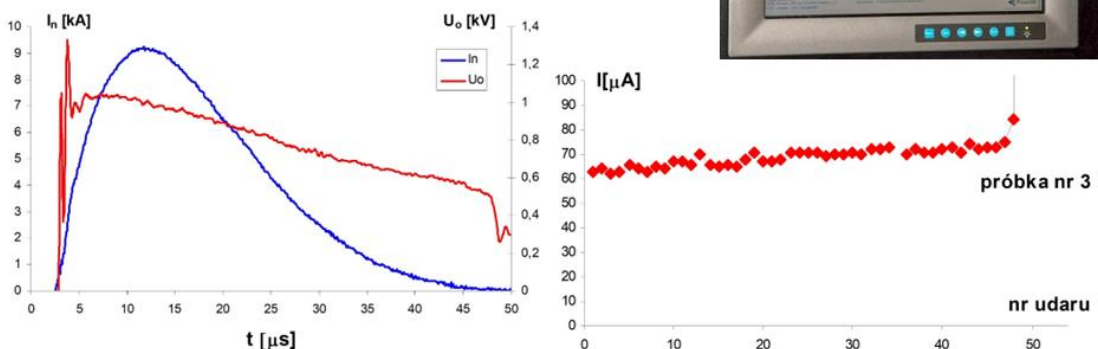
- napięcie referencyjne przy  $I_{ref} = 1 \text{ mA}$ ,
- napięcie obniżone przy znamionowym prądzie wyładowczym,
- próba przyspieszonego starzenia (1000 h, 115°C, 1,1  $U_c$  maksymalna dopuszczalna zmiana prądu upływu < 120%)





## Kontrola gotowego wyrobu

- każda sztuka wyrobu ( w normie  $N^{1/3}$ )
- napięcie trwałej pracy ogranicznika,
- przy przejściu napięcia przez zero - udar  $8/20 \mu s/\mu s$ ,  $I_n$
- pomiar napięcia obniżonego,



15

## Wymagania Standardu

### Elektroenergetyczne linie napowietrzne średniego napięcia

Ochrona linii SN od przepięć powinna spełniać wymagania stawiane [54] „Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD. PTPIREE 2020”. Do ochrony od przepięć i przeciwłukowej należy stosować **bezskiernikowe ograniczniki przepięć** o znamionowym **prądzie wyładowczym  $8/20 \mu s$  min. 10 kA**, dobrane odpowiednio do warunków elektrycznych panujących w poszczególnych typach sieci, jak i klimatycznych, ze wspornikiem oraz odłącznikiem. Ograniczniki przepięć należy mocować pod przewodami z zastosowaniem osłon na zaciskach. Do połączenia ogranicznika przepięć z przewodem PEN i uziemieniem słupa należy stosować przewód giętki miedziany izolowany H07V-K o przekroju  $25 \text{ mm}^2$  odrębnie dla każdego ogranicznika przepięć o kolorze zielono-żółtym. **Rezystancja uziemienia ograniczników przepięć nie powinna przekraczać  $10 \Omega$ .**

16



## Wymagania Standardu

Ochronę od przepięć należy stosować:

- a) w przypadku linii z przewodami w osłonie:
  - w miejscach gdzie występuje zmiana impedancji falowej tj.: połączenie linii napowietrznej wykonanej przewodami gołymi lub pełnoizolowanymi z przewodami w osłonie, na słupach z głowicami kablowymi,
  - na pierwszych słupach wykonanych z żerdzi przewodzących (stalowych lub żelbetonowych) w przypadku połączenia z linią, w której zastosowano poprzeczniki lub żerdzie nieprzewodzące,
- b) w przypadku linii z przewodami pełnoizolowanymi, w miejscach gdzie występuje zmiana impedancji falowej, tj.: połączenie linii napowietrznej wykonanej przewodami gołymi lub w osłonie z przewodami pełnoizolowanymi, przy stanowiskach z głowicami kablowymi oraz łącznikami,
- c) w przypadku linii dwutorowych SN stosować ochronę od przepięć dla poszczególnych torów na tym samym słupie,
- d) w przypadku linii dwunapięciowych stosując ochronę od przepięć na linii SN wykonać ochronę na linii nn na tym samym stanowisku słupowym.

17



## Wymagania Standardu

### Elektroenergetyczne linie napowietrzne niskiego napięcia

Ochrona linii nn od przepięć powinna spełniać wymagania stawiane [39] „Zasady ochrony przed przepięciami linii i stacji elektroenergetycznych WN, SN oraz nn w spółkach OSD. PTPIREE 2020”. Do ochrony od przepięć należy stosować beziskiernikowe ograniczniki przepięć o znamionowym **prądzie wyładowczym 8/20  $\mu$ s min. 5 kA, napięciu trwałej pracy  $U_c$  min. 440 V z odłącznikiem.**

Ograniczniki przepięć należy montować za pomocą zacisków izolowanych umożliwiających wymianę ogranicznika bez konieczności demontażu zacisku prądowego z przewodu. Do połączenia ogranicznika przepięć z przewodem PEN i uziemieniem słupa należy stosować przewód giętki miedziany izolowany H07V-K o przekroju 25 mm<sup>2</sup> odrębnie dla każdego ogranicznika przepięć.

18



## Wymagania Standardu

### Elektroenergetyczne linie napowietrzne niskiego napięcia

Rezystancja uziemienia ograniczników przepięć w miejscach gdzie rezystywność gruntu  $\rho$  nie przekracza  $1000 \Omega \cdot m$  nie powinna być większa niż  $10 \Omega$ . Jedynie w przypadku rezystywności gruntu o wartości  $1000 \Omega \cdot m$  lub większej, rezystancja uziemienia w miejscu instalacji ograniczników przepięć może być większa, nie powinna być jednak większa niż  $15 \Omega$ .

Ochronę od przepięć należy stosować:

- na krańcach linii i na końcu każdego odgałęzienia o długości większej niż 200 m oraz w linii w odstępach nie większych niż 500 m,
- w miejscach podłączenia do linii kabli lub linii napowietrznych nn z przewodami gołymi (wymaganie to nie dotyczy przyłączy),
- na podziałach sieci (linii) z obu stron słupa.

19



## Wymagania Przetargowe

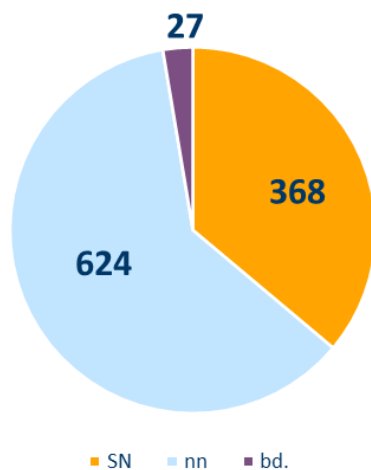
### Dostawa ograniczników przepięć

Wymaganie	Ograniczniki SN	Ograniczniki nn
Zgodność z normami	PN-EN 60099-4:2015	PN-EN 61643-11:2006 +A11:2007 lub nowsza
Napięcie trwałej pracy	dla sieci 15 kV Uc w przedziale 17,4 kV ÷ 18,0 kV  dla sieci 20 kV Uc w przedziale 22,4 kV ÷ 24,0 kV	Uc ≥ 440 V
Napięciowy poziom ochrony dla linii	Up ≤ 3,5Uc  Maksymalny poziom napięcia obniżonego: • dla sieci 15 kV ≤ 63 kV • dla sieci 20 kV ≤ 84 kV	Up ≤ 1500 V
Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 μs	In ≥ 10 kA	In ≥ 5 kA

20



### Uszkodzenia ograniczników - statystyka

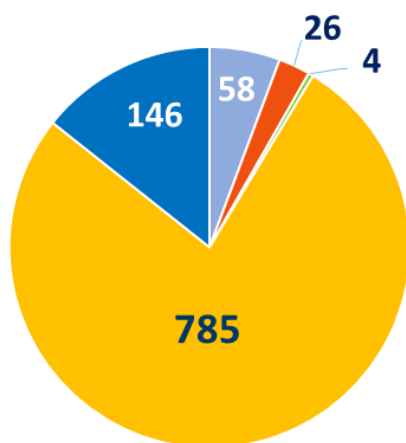


Liczba uszkodzonych ograniczników przepięć w liniach napowietrznych w okresie 02.2020 r. ÷ 08.2023 r.  
Na podstawie danych pochodzących z 15 RD

21



### Uszkodzenia ograniczników - statystyka



5,69%      2,55%      0,39%      77,04%      14,33%

■ Przepięcie atmosferyczne   ■ Przepięcie łączeniowe   ■ Nieprawidłowy montaż   ■ Wada fabryczna   ■ Przyczyna nieokreślona

22

## Uszkodzenia ograniczników

Wada fabryczna

Oznaczenie Producenta:	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
Poziom napięcia:	średnie						
Liczba uszkodzonych ograniczników [szt.]					151		57
Poziom napięcia:	niskie						
Liczba uszkodzonych ograniczników [szt.]	82				495		

23

## Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

24



Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Ogniska korozji w nowym ograniczniku wyjętym z pudełka

25

Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

26

Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

27

Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

28



Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

29

Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

30



## Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

31

## Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna



Uszkodzony ogranicznik – przyczyna: wada fabryczna

32

## Uszkodzenia ograniczników – dokumentacja fotograficzna

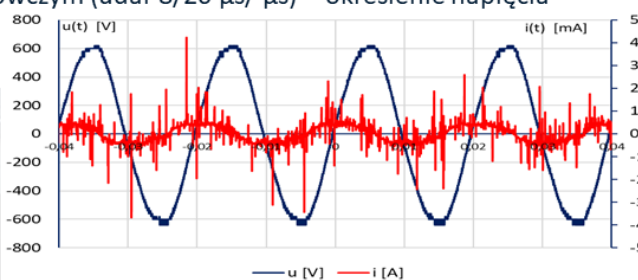


Uszkodzony ogranicznik (odłącznik) – przyczyna: nieprawidłowy montaż

33

## Metodyka badań ograniczników nn (A, B, C, C1, D, E)

- pomiar napięcia znamionowego (referencyjnego) - parametr określający zastosowanie ogranicznika obejmującym: w sieci 230/400 V, regulacja +10%, system pracy TN-C, napięcie referencyjne wynosi 255 V dla włączenia ogranicznika L-N(PEN), L-PE i 440 V przy włączeniu L-L., wg PN-EN 61643-11 można zmierzyć napięcie  $U_{1mA}$  na zaciskach warystora przy przepływie prądu stałego o wartości 1 mA
- **prąd upływow/rezystancyjny/dla** ograniczników nn (60 szt.) przy najwyższym napięciu trwałej pracy  $U_c$
- próba znamionowym prądem wyładowczym (udar 8/20  $\mu s / \mu s$ ) – określenie napięcia ograniczania,  $U_{res}(I_n)$



$U_c = 440 \text{ V (500 V)}$ ,  
 $I_n = 5 \text{ kA}$

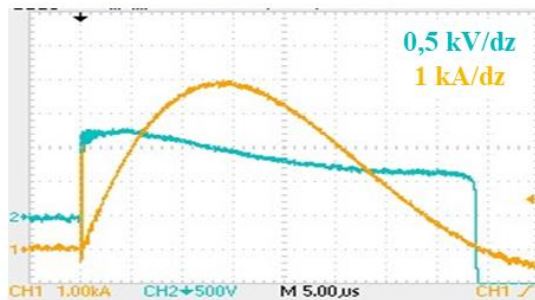
$U_p = 1400 \div 1700 \text{ V}$   
 $I_{max} = 30 \div 40 \text{ kA}$

34



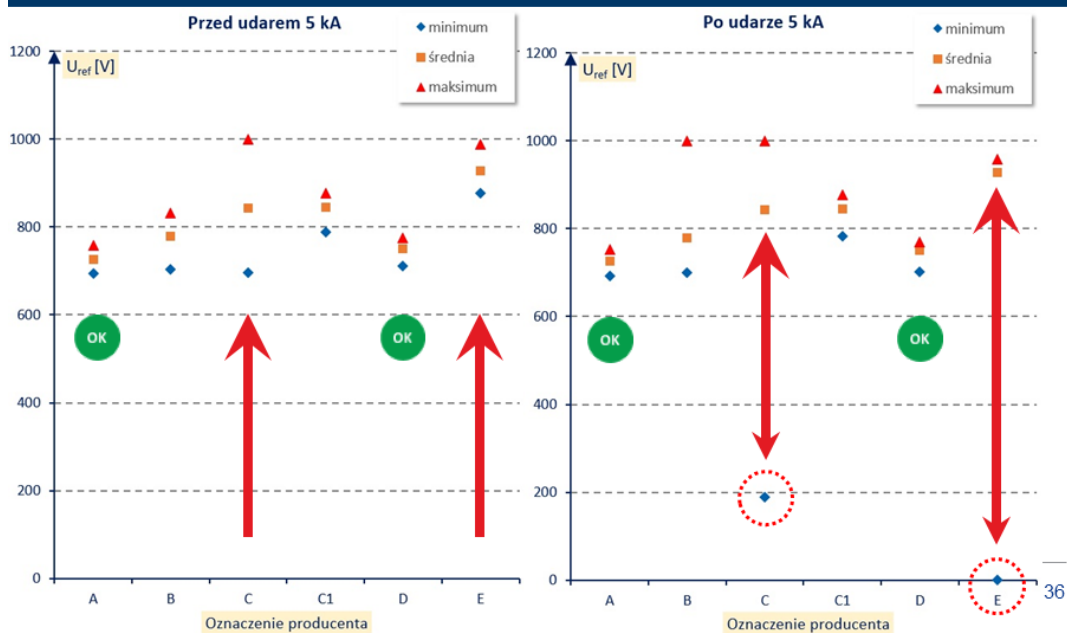
### Metodyka badań ograniczników nn (A, B, C, C1, D, E)

- pomiar napięcia ograniczania  $U_{res} (I_n)$  i prądu  $I_{up}/I_{upIR}$  dla ograniczników nn (60 szt.) przy najwyższym napięciu trwałej pracy  $U_c$
- wykonanie badania wpływu serii 50 uderów prądowych (5, 10, 15, 20) na zmianę napięcia ograniczania (10 szt. nn)



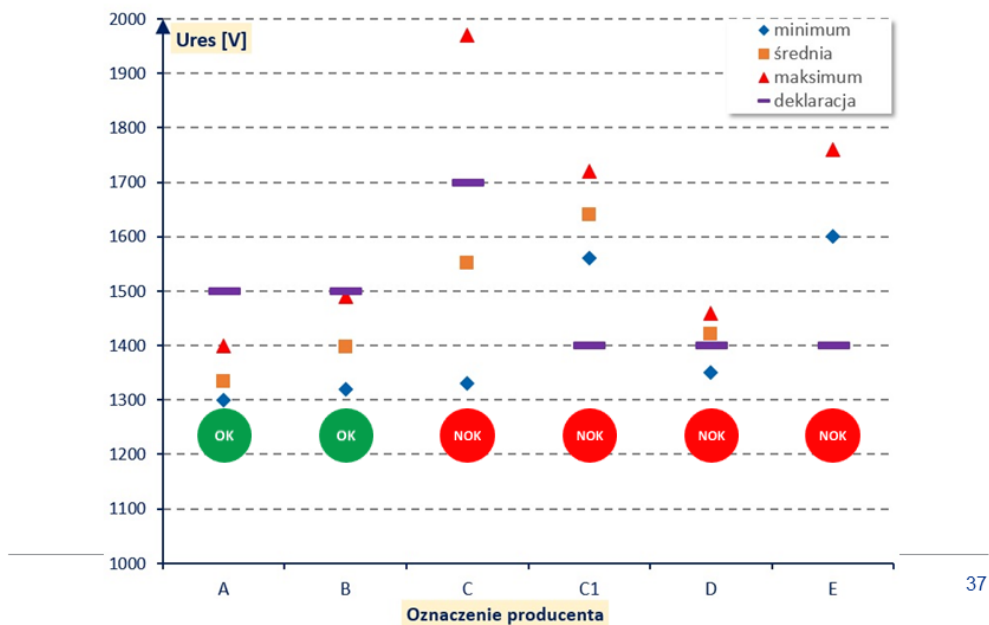
35

### Wartości statystyczne napięcia referencyjnego (populacja 10 szt.)

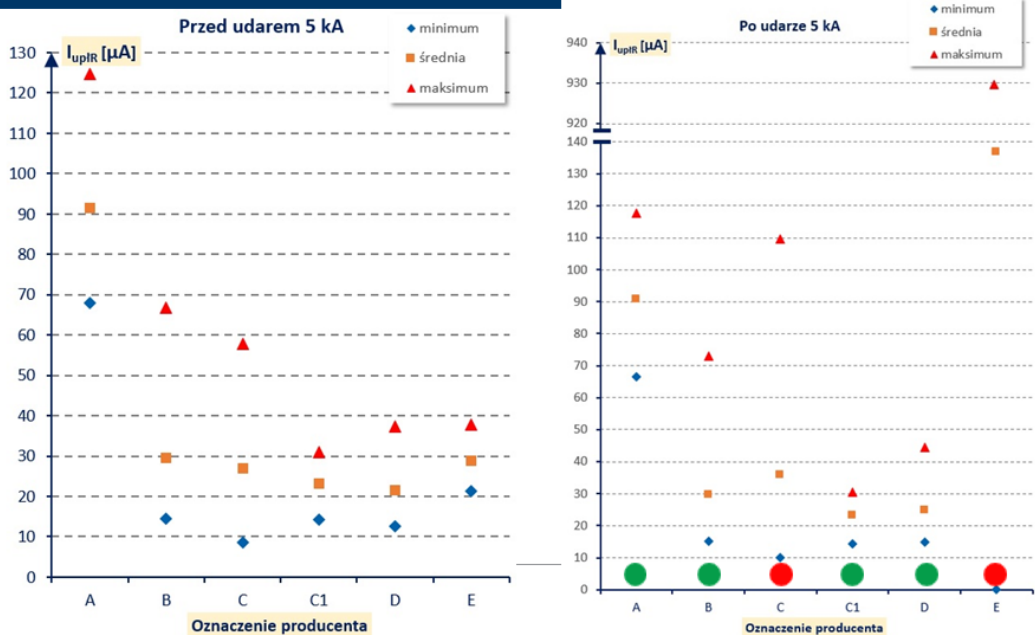


36

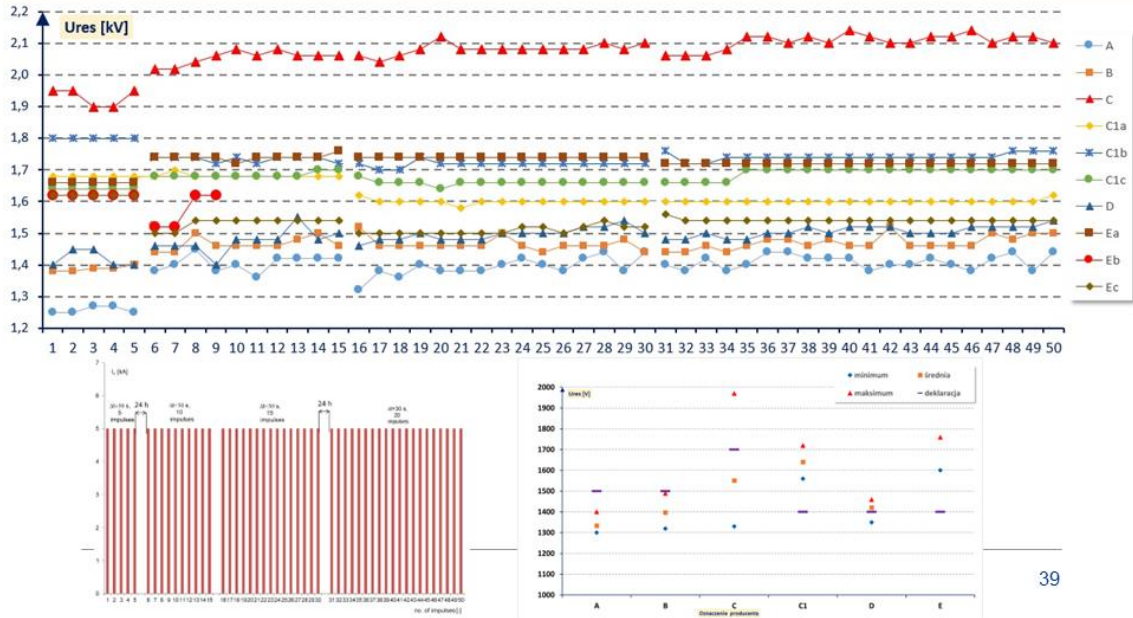
### Wartości statystyczne napięcia ograniczania (populacja 10 szt.)



### Wartości statystyczne składowej rezystancyjnej prądu upływowego



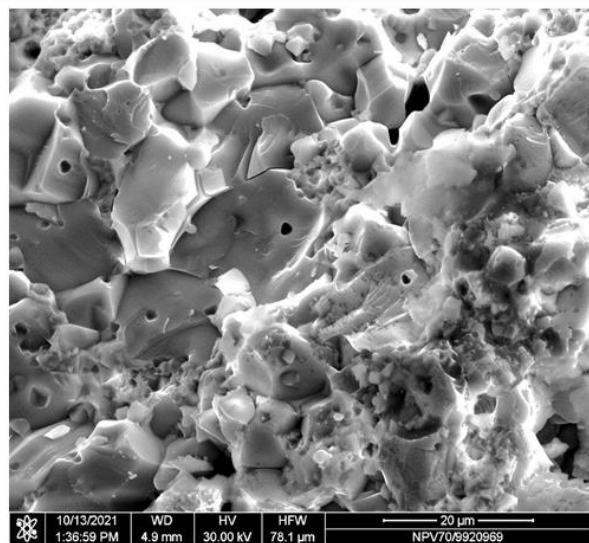
## Badanie wpływu uderów prądowych (5, 10, 15, 20)



39

## Badania strukturalne - cel

- Określenie struktury krystalicznej i składu chemicznego warystorów różnych producentów
- Ocena wpływu struktury i składu na własności elektryczne warystorów
- Analiza wpływu procesu starzenia na strukturę warystorów

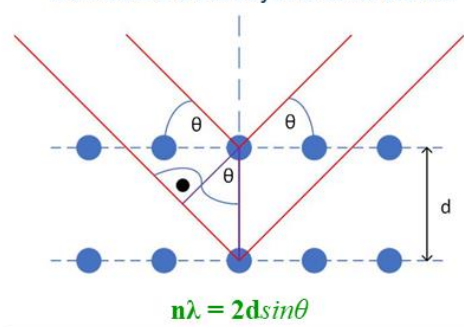


40

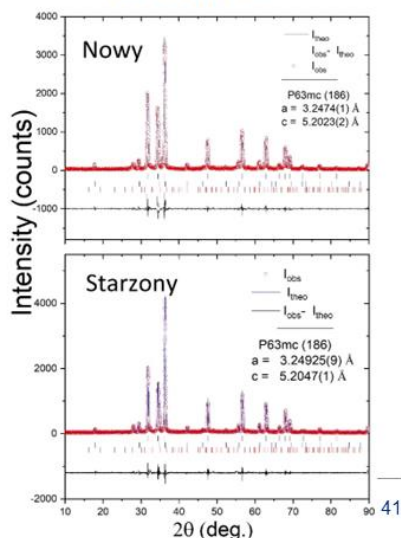


## Proszkowa dyfrakcja rentgenowska (pXRD)

- Identyfikacja głównych faz krystalicznych
- Heksagonalny ZnO
- Zmiana stałych sieci
- Obecność dodatkowych refleksów
- Obliczanie średniej wielkości ziaren

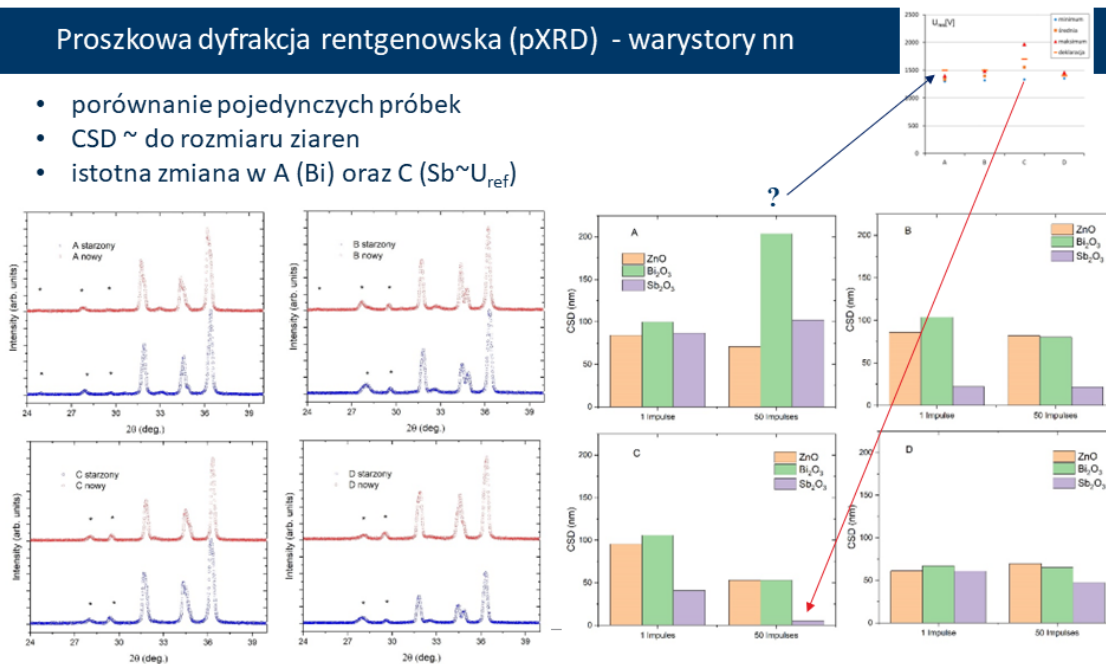


- rekrytalizacja
- nowe związki



## Proszkowa dyfrakcja rentgenowska (pXRD) - warystory nn

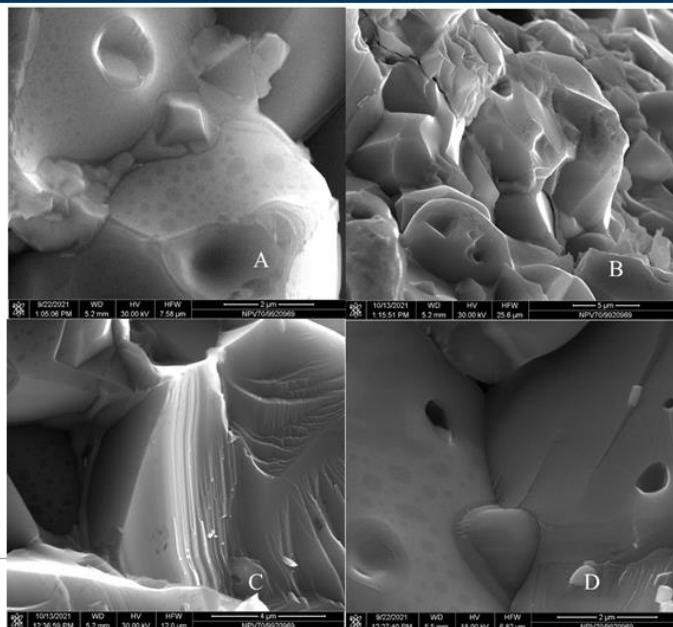
- porównanie pojedynczych próbek
- CSD ~ do rozmiaru ziaren
- istotna zmiana w A (Bi) oraz C (Sb ~  $U_{ref}$ )





## Obrazy SEM nn

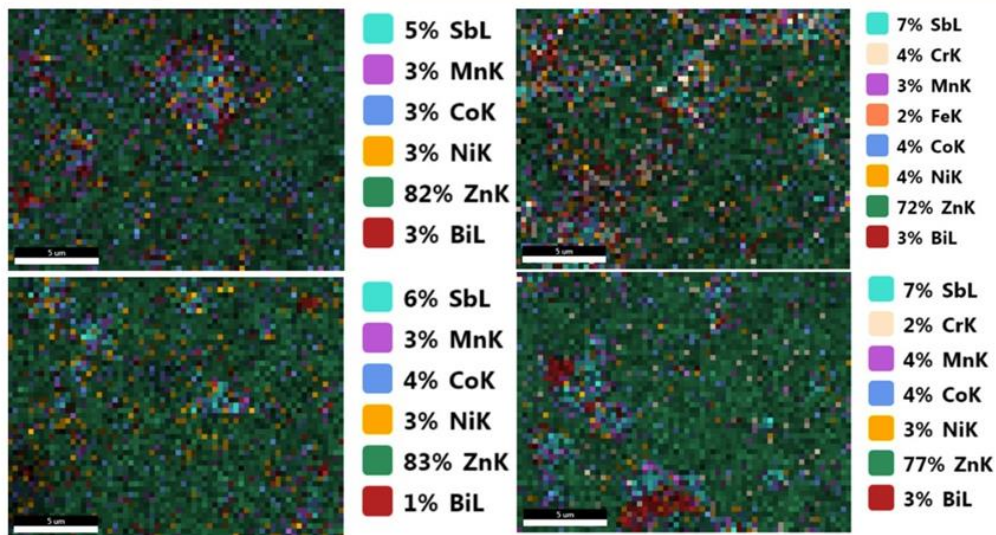
- bezpośredni wgląd w badany materiał
- warystory składają się z ziaren ZnO rozdzielonych fazą na bazie Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- obecność dużej liczby defektów
- porowata struktura typowa dla materiałów ceramicznych



## Analiza EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) nn

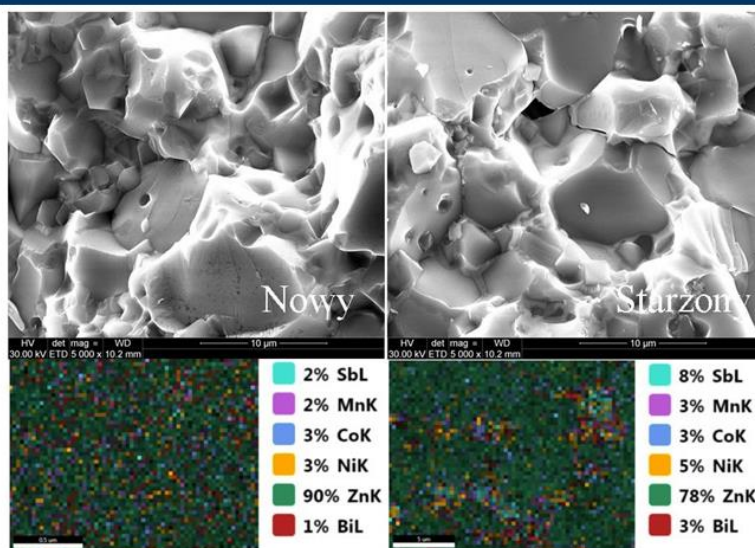
Pierwiastek	A starzony % at.	A nowy % at.	B starzony % at.	B nowy % at.	C starzony % at.	C nowy % at.	D starzony % at.	D nowy % at.
Sb	0.46	1.67	2.11	2.51	2.29	2.18	2.44	2.12
Cr	0	0	1.85	1.92	0	0	0	0
Mn	0.39	1.03	1.11	1.16	1.64	1.59	1.30	1.62
Fe	0	0	0.78	0.76	0	0	0.43	0
Co	0.45	1.30	2.24	2.29	2.25	2.16	1.74	2.20
Ni	0.33	1.06	1.84	1.87	1.21	1.15	0.79	1.24
Zn	97.93	92.35	87.21	86.30	90.79	91.22	91.75	91.07
Bi	0.44	2.61	2.86	3.20	1.81	1.71	1.55	1.74

### Analiza EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) - nn



45

### Wpływ starzenia na strukturę warystorów



46





## Podsumowanie

- Mieszanki warystorowe poszczególnych producentów różnią się od siebie składem chemicznym i strukturą krystaliczną
- W procesie starzenia na skutek oddziaływania ciepła doszło do istotnych zmian w składzie i strukturze próbki A-nn
- Warystor C-nn charakteryzuje się niską powtarzalnością składu, co przekłada się na duży rozrzut parametrów elektrycznych
- Proces starzenia powoduje rekrytalizację materiału i rozrost granic międzyziarnowych
- Wstępne badanie niewielkiej populacji (10 szt.) ograniczników wystarcza do określenia jakości produktu również w warunkach eksploatacyjnych.
- Prowadza przez Biuro Certyfikacji ENEA Operator weryfikacja jakości prac oraz parametrów przedmiotów materialnych przy budowie sieci elektroenergetycznej jest ważnym elementem poprawiającym niezawodność pracy systemu elektroenergetycznego.

47



**HISTORIA MĄDROŚCIĄ  
PRZYSZŁOŚĆ WYZWANIEM**

## OCHRONA PRZEPIĘCIOWA WIELKOSKALOWYCH SYSTEMÓW MAGAZYNOWANIA ENERGII

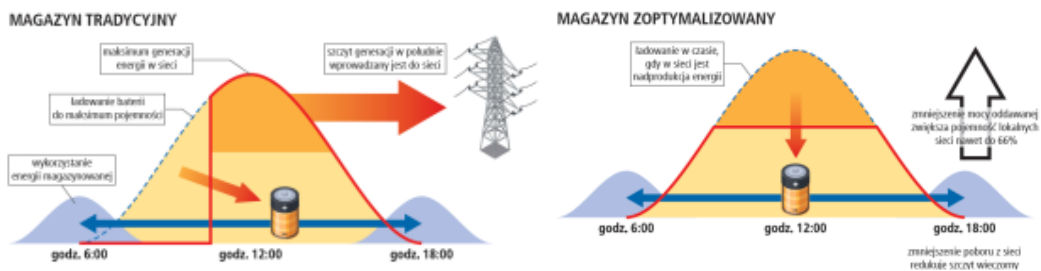
Krzysztof Wincencik  
(DEHN POLSKA Sp. z o.o.)

W referacie przedstawiono zagrożenia związane z oddziaływaniem wyładowań atmosferycznych na systemy magazynów energii. Na podstawie aktualnych norm z zakresu ochrony odgromowej i przepięciowej przedstawiono zasady doboru środków ochrony przed wyładowaniem bezpośrednim dla magazynów energii zlokalizowanych w metalowych kontenerach oraz budynkach murowanych. Zwrócono uwagę na konieczność kompleksowej ochrony przepięciowej linii zasilających i sygnałowych wprowadzanych do wnętrza obiektu. Podkreślono konieczność ochrony przepięciowej urządzeń elektrycznych i elektronicznych wewnątrz magazynu. Zaprezentowano specjalistyczne ograniczniki przepięć do ochrony obwodów prądu stałego.

### 1. Wprowadzenie

Magazyny energii można zdefiniować jako instalacje służące do przechowywania energii, przyłączone do sieci, mające zdolność do dostawy energii elektrycznej do sieci. Magazyny energii można podzielić ze względu na ich wielkość (przydomowe i przemysłowe) oraz zastosowane technologie. Jedną ze stosowanych technologii są technologie wykorzystujące baterie elektrochemiczne, tzw. magazyny energii bateryjne BESS (ang. *Battery Energy Storage System*), w których zmagazynowana energia chemiczna może być w razie potrzeby przekształcana w elektryczną. Rozwiązanie to ma najczęściej modułowy charakter (np. kontener), dzięki czemu można jest zastosować praktycznie każdym obszarze (na lądzie i na wodzie). Magazyny energii pozwalają na bezpieczne gromadzenie i magazynowanie energii elektrycznej w bateriach elektrochemicznych. Umożliwiają wykorzystanie na potrzeby własne energii wyprodukowanej przez OZE w godzinach zapotrzebowania lub oddanie jej do sieci w chwili, kiedy jest to najbardziej korzystne. Obecnie coraz częściej instalacje prosumenckie wyposażane są w magazyny energii. Pozwala to na lepsze wykorzystanie energii sieci zarówno wewnątrz instalacji odbiorczej, jak też lepsze bilansowanie energii w systemie energetycznym. Inteligentne systemy magazynowania pozwalają na zmniejszenie problemów ze zbyt dużym oddawaniem energii do sieci w porze południowej i pojawiającymi się przypadkami zakłóceń w pracy instalacji prosumenckich. W skrajnych przypadkach z uwagi na niskie zapotrzebowanie u odbiorców i wysoki poziom generacji z fotowoltaiki – może nawet dojść do wyłączania części domowych instalacji PV [3]. Dlatego „inteligentne” systemy magazynowania energii, współpracując z falownikami i siecią, potrafią zminimalizować ryzyko wystąpienia takich zjawisk.

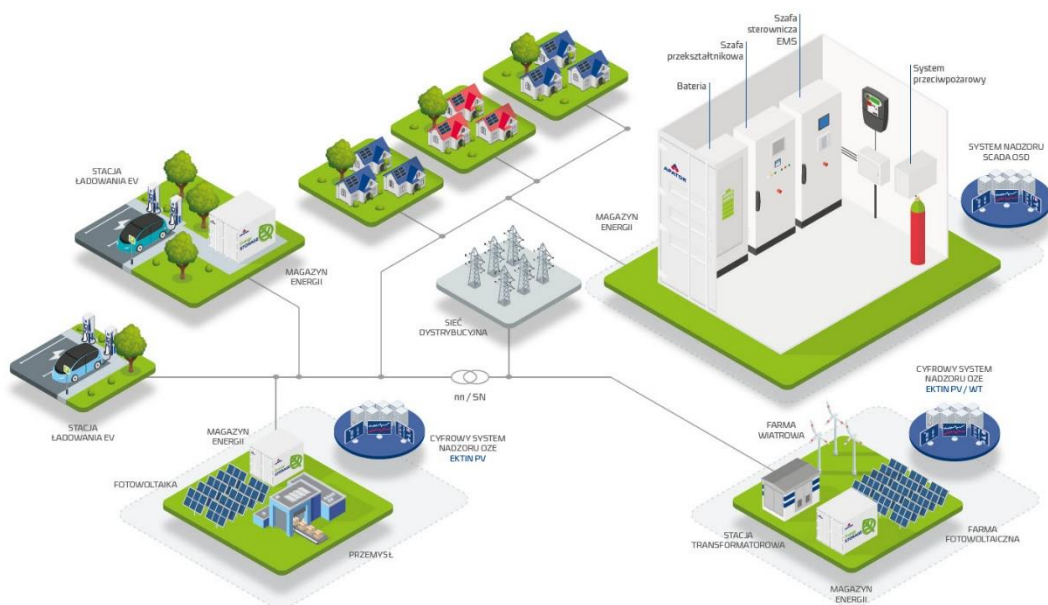
Magazyny energii znajdują zastosowanie w instalacjach przemysłowych, umożliwiając lokalne bilansowanie energii oraz efektywne jej wykorzystanie na własne potrzeby wg aktualnego zapotrzebowania. Korzyści wynikające z wykorzystania OZE w procesie produkcyjnym są znaczne – nie tylko przyczyniają się do redukcji kosztów energii, ale także pomagają w redukcji śladu węglowego produkowanych wyrobów.



Rys. 1. Współpraca „inteligentnego magazynu energii” z siecią energetyczną [3]

Duże magazyny energii mogą pełnić także ważną funkcję związaną ze stabilizacją parametrów sieci elektroenergetycznej, dla której dużym wyzwaniem są rozproszone źródła energii. Magazyny energii gwarantują większą elastyczność i balans w sieci zasilającej, zapewniając wsparcie dla nieciąglych (niestabilnych w stosunku do zapotrzebowania) źródeł odnawialnych. Wykorzystanie magazynów energii pozwala również na częściowe usuwanie problemów z mocą przyłączeniową i rozbudową infrastruktury przesyłowej:

- wspomaganie operatorów sieci ładowania pojazdów elektrycznych przy drogach szybkiego ruchu, w centrach miast itp.,
- możliwość przyłączenia większej liczby OZE bez konieczności inwestycji w infrastrukturę przesyłową,
- optymalizacje struktur zasilających – można zastosować magazyn energii elektrycznej zamiast przebudowywać dany odcinek sieci przesyłowej.



Rys. 2. Obszary zastosowań magazynów energii w sieci niskiego napięcia [2]

## 2. Zagrożenie magazynów energii spowodowane wyładowaniem piorunowym

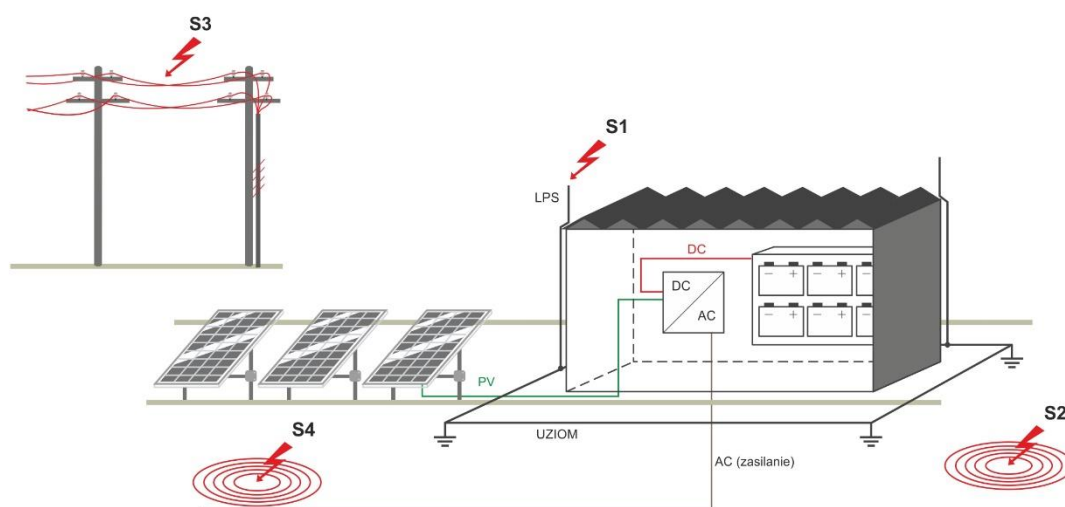
Źródłem uszkodzenia lub przyczyną wadliwego działania, a nawet zniszczenia elementów elektronicznych w obiekcie magazynu energii w wyniku przepięć mogą być:

- przepięcia atmosferyczne spowodowane przez bezpośrednie, jak i pobliskie wyładowania piorunowe,

- przepięcia łączeniowe – spowodowane operacjami przełączania (manewrowe), powstającymi podczas wyłączania prądów zwarciovych, małych prądów indukcyjnych i prądów pojemnościowych.

Źródło zagrożeń spowodowanych przez uderzenia pioruna można podzielić na cztery grupy w zależności od punktu uderzenia zgodnie z normą PN-EN 62305-2:

- S1 – bezpośrednie wyładowania w obiekt – np. kontener z magazynem energii,
- S2 – wyładowania w pobliżu obiektu,
- S3 – wyładowania w linię zasilającą wchodzącą do wnętrza obiektu,
- S4 – wyładowania w pobliżu linii wchodzącej do obiektu.



**Rys. 3.** Źródła zagrożenia obiektu spowodowane wyładowaniem atmosferycznym

Promień zagrożenia wokół miejsca uderzenia pioruna i związane z nim szkodliwe skutki mogą wynosić ponad dwa kilometry, w zależności od natężenia pioruna i charakterystyki uziemienia. Aby móc ocenić, czy do magazynu energii wymagany jest zewnętrzny system ochrony odgromowej, należy przeprowadzić analizę ryzyka zgodnie z PN-EN 62305-2. Analizę z uwzględnieniem sposobu użytkowania systemu, struktur systemu i regionalnych warunków lokalnych, można wykonać np. za pomocą specjalnego oprogramowania lub obliczyć w oparciu o wskazówki podane w normie. Analiza ryzyka pozwala ocenić wielkość ryzyka dla obiektów magazynów energii i podjąć konkretne działania w celu jego zmniejszenia. W ten sposób można dobrać uzasadnione ekonomicznie środki ochronne, które są dostosowane do właściwości konstrukcyjnych i sposobu użytkowania magazynu. Analiza ryzyka nie tylko pozwala określić klasę LPS, ale także opracować kompletną koncepcję ochrony, w tym wymagane środki ochrony przed LEMP (*Lightning Electromagnetic Pulse*, piorunowy impuls elektromagnetyczny).

Jeżeli wynik analizy ryzyka wykaże, że istnieje ryzyko bezpośredniego uderzenia pioruna w obiekt, należy również zapewnić zewnętrzny system ochrony odgromowej zgodnie z PN-EN 62305-3. Przy doborze środków ochrony przed przepięciami należy również wziąć pod uwagę normę PN-EN 62305-4 w zakresie wprowadzanie strefowej koncepcji ochrony (ochrona przed przepięciami aparatury elektronicznej wewnątrz magazynu).

### 3. Zewnętrzna ochrona odgromowa magazynów energii

System ochrony odgromowej zgodnie z PN-EN 62305-3 składa się z zewnętrznego i wewnętrznego urządzenia piorunochronnego. Zewnętrzne urządzenie piorunochronne ma za zadanie:

- przejmowanie bezpośrednich uderzeń pioruna za pomocą układu zwodów,
- bezpieczne odprowadzanie prądu pioruna do ziemi za pomocą przewodów odprowadzających,
- rozproszczenie prądu pioruna w ziemi przez instalację uziemiającą.

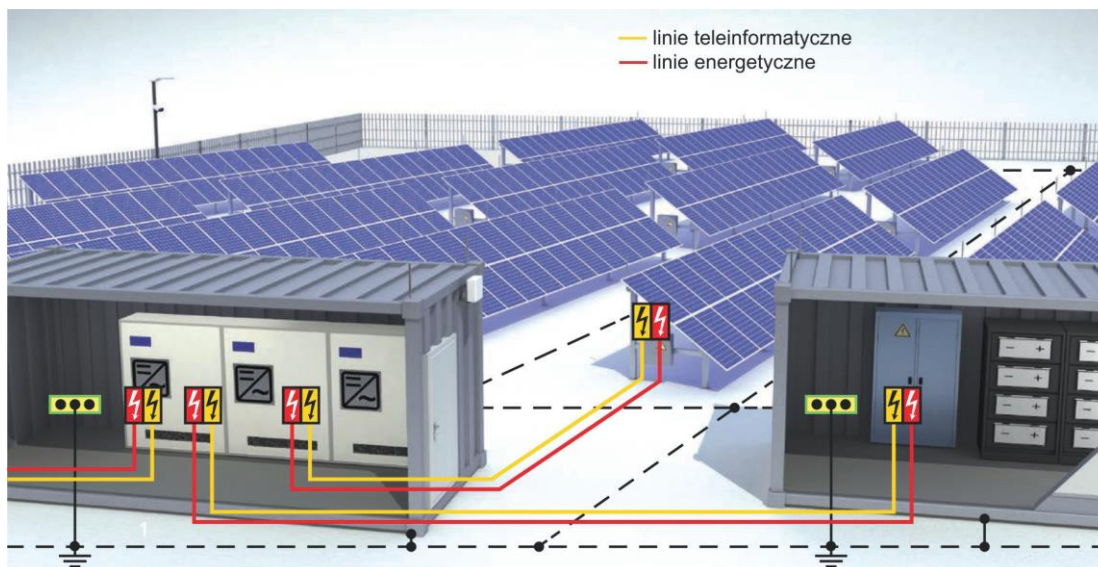
Powyższa norma zaleca, aby już w projekcie obiektu uwzględnić wykorzystanie jego części metalowych jako części zewnętrznego urządzenia piorunochronnego. Jeśli system magazynowania energii został zaprojektowany jako obiekt w postaci metalowego kontenera, to jego metalową powierzchnię ścian zewnętrznych można wykorzystać jako naturalne elementy urządzenia piorunochronnego. Warunkiem jest trwałe oraz ciągłe połączenie elementów kontenera zdolnych do odprowadzenia prądu pioruna do uziemienia. W przypadku bezpośredniego uderzenia w kontener prąd pioruna przepływa do ziemi przez metalową obudowę pojemnika. Należy brać pod uwagę rodzaj i grubość materiału, z którego wykonano kontener – należy upewnić się, że blacha nie ulegnie stopieniu w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna. Wytopienie otworu w ścianie kontenera mogłoby prowadzić do późniejszych uszkodzeń w systemie magazynowania, np. na skutek penetracji wody z opadów. W tabeli na rys.4 przedstawiono informacje, czy w zależności od grubości i materiału, może nastąpić wytopienie lub niedopuszczalne punktowe przegrzanie, czy też kontener powinien wytrzymać bez uszkodzeń uderzenie pioruna.



**Rys. 4.** Działanie piorunowego prądu udarowego na powierzchnię metalową oraz minimalna grubość blach metalowych

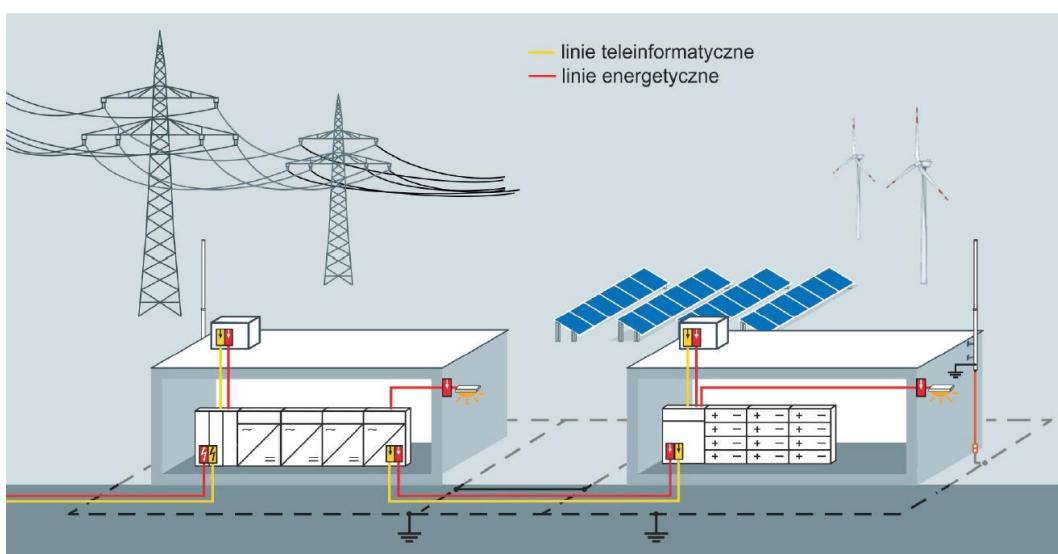
Jeśli np. podano, że kontener wykonano z blachy stalowej o grubości materiału > 4 mm, nie należy oczekiwać topnienia lub niedopuszczalnego rozgrzania w miejscu bezpośredniego uderzenia pioruna. W takim przypadku metalowy dach kontenera może służyć jako naturalny zwód. Należy przy tym pamiętać, że cienka powłoka z farby lub folia PVC o grubości 0,5 mm nie są uważane za izolację w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna. Jeśli grubość materiału kontenera jest mniejsza niż 4 mm, to należy zastosować układ zwodów chroniących powierzchnię dachu przed trafieniem bezpośrednim, aby zapobiec powstawaniu punktowego wytopienia lub przegrzania. Wysokość zwodów należy dobierać indywidualnie w zależności od wymiarów kontenera, tak aby cały obszar i przyległa aparatura znajdowały się w jego obszarze ochronnym (rys. 5).





**Rys. 5.** Schemat ochrony odgromowej i przepięciowej magazynu energii zlokalizowanego w metalowym kontenerze

Magazyny energii mogą być zlokalizowane również w obiektach murowanych lub żelbetowych. Na dachu takich budynków często możemy spotkać urządzenia takie jak: klimatyzatory, oświetlenie zewnętrzne, anteny itd. Aby zapobiec niebezpiecznym przeskokom między elementami zewnętrznego urządzenia piorunochronnego a zlokalizowaną wewnątrz aparaturą, konieczne jest zachowanie odstępu separacyjnego podczas projektowania i wykonywania urządzenia piorunochronnego. Brak zachowania bezpiecznego odstępu separującego może prowadzić do bezpośrednich przeskoków iskrowych i spowodować poważne uszkodzenia aparatury elektrycznej i elektronicznej. W takim przypadku zaleca się wykonanie odseparowanego urządzenia piorunochronnego metodami konwencjonalnymi lub z wykorzystaniem przewodów o izolacji wysokonapięciowej (np. przewodów HVI). Przykład ochrony magazynu energii zlokalizowanego w budynku betonowym za pomocą odseparowanego LPS pokazano na rys. 6. Aby zapewnić długowieczność i funkcjonalność systemu uziemienia, zaleca zastosować materiał trwale odporny na korozję, taki jak np. stal nierdzewna.



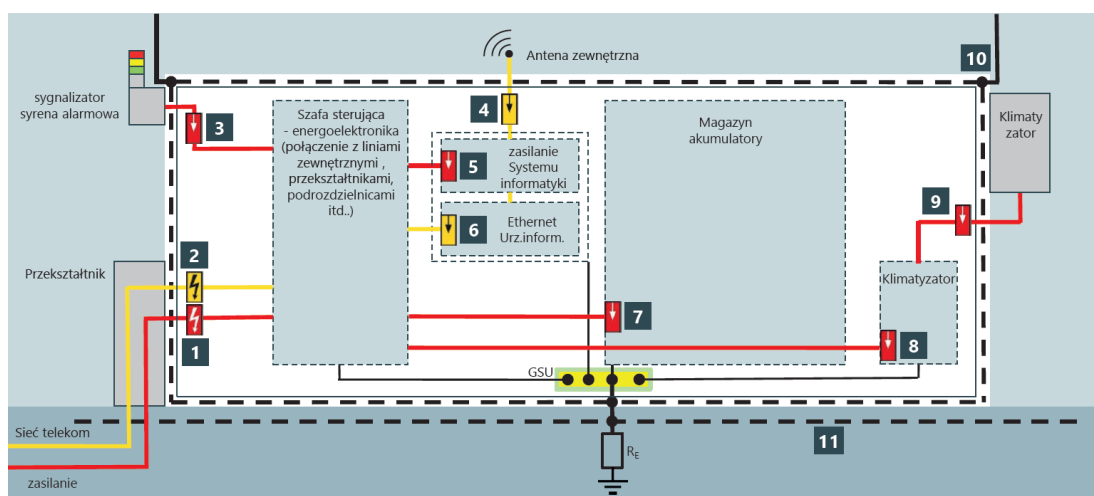
**Rys. 7.** Schemat ochrony odgromowej i przepięciowej magazynu energii zlokalizowanego w budynku betonowym

#### 4. Ochrona przeciwprzebieciowa urządzeń wewnątrz magazynu energii

Ochrona przebieciowa magazynów wymaga kompleksowego podejścia (zgodnie ze strefową koncepcją ochrony LPZ), czyli zapewnienia ochrony przed skutkami wyładowania bezpośredniego, jak również ochrony przed przebieciami atmosferycznymi i łączeniowymi. W normie [5] zwrócono uwagę na to, że przebiecia łączeniowe w PEI (*prosumer electrical installation*, prosumencka instalacja elektryczna) mogą występować częściej i mieć większe wartości niż w zwykłej instalacji (np. wskutek przełączania źródeł, zrzutu lub przenoszenia obciążenia). W celu ochrony instalacji i urządzeń przed przebieciami łączeniowymi zaleca się zwrócić szczególną uwagę na instalowanie urządzeń do ograniczania tych przebiec. Opracowania stowarzyszeń branżowych również zwracają uwagę na możliwe zagrożenia i przywołują zapisy odpowiednich norm z zakresu ochrony odgromowej, budowy instalacji elektrycznych i fotowoltaicznych. Wśród norm przywoływanych w zaleceniach można znaleźć również dosyć starą normę PN-EN 61173 dotyczącą ochrony przed przebieciami w systemach PV. Zawarte w normie wymagania dotyczące efektywności ochrony przed przebieciami pozostają jednak nadal aktualne. Efektywna ochrona przebieciowa dla systemu wytwarzania i magazynowania wymaga spełnienia przez SPD następujących kryteriów:

- ograniczniki przebiec nie powinny ulegać degradacji poniżej swoich minimalnych charakterystyk przed przewidzianym przez projektanta końcem żywotności, nawet w ekstremalnych warunkach pracy,
- SPD powinny ograniczać poziom przebiec chronionych obwodów do bezpiecznego poziomu,
- SPD nie powinny ulegać awariom w wyniku spodziewanych stanów nieustalonych, a w pewnych przypadkach powinny umożliwić bezpieczne odprowadzenie dużych prądów aż do zadziałania zabezpieczeń linii zasilania poprzedzających miejsce montażu SPD,
- SPD nie powinny schodzić poniżej zaprojektowanej żywotności, nawet w skrajnych warunkach eksploatacyjnych systemu,
- SPD nie powinny wpływać negatywnie na normalną pracę systemu przed przekroczeniem zaprojektowanego czasu żywotności i powinny wywierać minimalny wpływ na sprawność systemu.

Jak widać z powyższych zapisów, ograniczniki stosowane do ochrony instalacji w magazynach energii powinny mieć odpowiednie parametry techniczne i spełniać wymagania jakościowe, co pozwoli na zapewnienie pełnej dyspozycyjności chronionego systemu magazynowania energii. Przykład kompleksowej ochrony przebieciowej magazynu energii pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Ochrona przebieciowa magazynu energii

Odpowiednio dobrane ograniczniki przepięć muszą być zainstalowane jak najbliżej wejścia do kontenera, aby zapobiegać przedostawaniu się zakłóceń do wnętrza obiektu. W przypadku, gdy zagrożenie mogą stanowić częściowe prądy pioruna, należy zastosować ograniczniki przepięć typu 1, testowane prądem  $I_{imp}$  o kształcie 10/350  $\mu$ s. W przypadku, gdy dane linie nie są narażone na przewodzenie części prądu pioruna stosujemy SPD Typ 2 testowane prądami o kształcie 8/20  $\mu$ s. SPD powinny być zgodne z PN-EN 61643-11 i zapewnić poziom ochrony  $U_p$  niższy niż wytrzymywany poziom napięcia udarowego chronionych urządzeń. W przypadku linii mogących wprowadzić do wnętrza obiektu częściowe prądy piorunowe zastosowano ograniczniki przepięć typu T1 (element nr 1 i nr 2 na rys 8). Pozostałe obwody chronione są za pomocą ograniczników przepięć typu 2. Elementy na zewnątrz obiektu (klimatyzator, syrena alarmowa) znajdują się w strefie osłonowej, którą zapewniają zwody pionowe (element nr 10) i nie są tym samym narażone na bezpośrednie uderzenie pioruna. Jeśli istnieje ryzyko oddziaływania prądu piorunowego (w drodze galwanicznego lub indukcyjnego/pojemnościowego sprzężenia) na baterie akumulatorów po stronie prądu stałego (gdy np. akumulatory i falownik znajdują się w różnych obiektach), należy zapewnić dodatkowe odpowiednie środki ochrony odgromowej i zastosować ograniczniki przepięć. Ważne jest, aby były one specjalnie zaprojektowane do obwodów prądu stałego. W chwili obecnej trwają prace nad wprowadzeniem nowej normy dotyczącej wymagań i metod badań dla SPD instalacji stałoprądowych o napięciu do 1500 V. Norma dotyczyć będzie SPD obwodów stałoprądowych zasilanych ze źródeł o charakterystyce liniowej [6], czyli takich jak np. akumulatorowe magazyny energii. Niektórzy producenci ograniczników przepięć w swoich ulotkach deklarują że parametry produkowanych przez nich SPD już spełniają wymagania przyszłej normy.

## 5. Podsumowanie

W chwili obecnej jesteśmy świadkiem szybko następujących zmian klimatycznych i coraz częściej występujących burz z wyładowaniami atmosferycznymi. Z drugiej strony następuje szybka cyfryzacja przemysłu, a tym samym wzrost udziału wrażliwych elementów elektronicznych w obiektach energetycznych. Taka sytuacja znacznie zwiększa ryzyko uszkodzenia i awarii w wyniku przepięć spowodowanych m.in. wyładowaniami atmosferycznymi. To zagrożenie dotyczy także powstających magazynów energii. Tylko dzięki kompleksowemu podejściu do zagadnienia ochrony oraz stosowaniu strefowej koncepcji ochrony odgromowej można zagwarantować stałą funkcjonalność oraz uniknąć niepotrzebnych przerw na prace naprawcze oraz kosztów związanych z wymianą uszkodzonych elementów.

### Literatura

- [1] Chyła T.: Magazyny energii w systemie elektroenergetycznym, Portal „Energetyka Plus”, <https://www.energetyka.plus/magazyny-energii-w-systemie-elektroenergetycznym/>
- [2] Piasecki S.: Magazyny energii – ważny element transformacji energetycznej, Portal „Gram w Zielone”, <https://www.gramwzielone.pl/magazynowanie-energii/20145055/magazyny-energii-wazny-element-transformacji-energetycznej>
- [3] Wincencik K.: Ochrona przed przepięciami instalacji prosumenckich z magazynami energii, Wiadomości Elektrotechniczne nr 11/2022
- [4] Protection against surges and overvoltages in Battery Energy Storage Systems, materiały informacyjne firmy Raycap 2022
- [5] PN-HD 60364-8-2 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 8-2: Niskonapięciowe instalacje elektryczne prosumenta



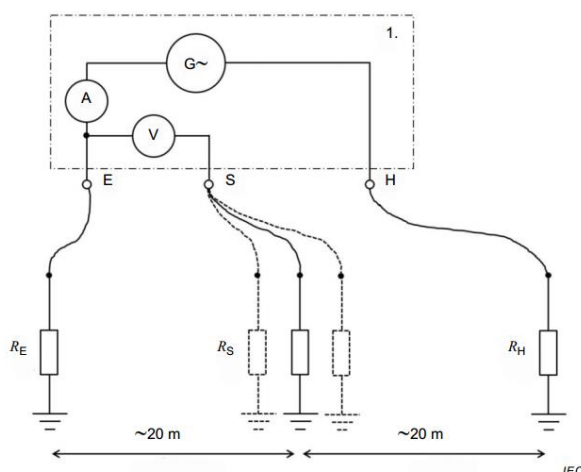
- [6] IEC 61643-41 ED1 Low-voltage surge protective devices – Part 41: Surge protective devices connected to DC low-voltage power systems – Requirements and test methods (draft)

## METODY POMIARU UZIEMIŃ ROZLEGŁYCH

Roman Domański  
(Sonel S.A.)

*Pomiary rezystancji uziemienia w znaczący sposób różnią się od innych pomiarów wykonywanych w celu oceny ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym. Nie wystarczy w tym przypadku dysponować dobrym miernikiem. Potrzebna jest wiedza na temat badanego uziemienia i znajomość zasad budowy układu pomiarowego.*

Największą trudność sprawia pomiarowcom wyznaczenie kierunku rozstawienia sond pomocniczych oraz określenie odległości od badanego uziemienia do pomocniczej sondy prądowej. Nader często zdarza się, iż sugerując się schematem z normy PN-HD 60364-6 i dostarczonymi w zestawie z miernikiem przewodami o określonej długości, sondy pomocnicze umieszczane są zbyt blisko badanego uziemienia zwłaszcza jeśli uziemienie jest rozległe.

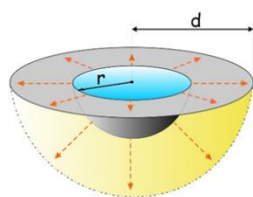


**Rysunek 1.** Schemat budowy układu pomiarowego do badania rezystancji uziemienia PN-HD 60364-6

Znacząca większość pomiarowców postępując zgodnie ze schematem na rysunku 1 dochodzi do wniosku, że prezentowane odległości pomiędzy sondami ułatwiają sprawę w każdej sytuacji. Niestety jest to błędne przekonanie i powoduje ono otrzymanie niepoprawnych wyników, które często nawet nie są weryfikowane. Należy zatem zacząć od opisanie wpływu odległości do sondy prądowej na wynik badania.

Ze względu na radialny rozkład prądu w trakcie jego przepływu w badanym uziemieniu oraz łatwość obliczeń, przykładem uziemienia będzie półsfera o promieniu  $r$  pogrążona w ziemi o rezystywności  $\rho$ .

Obliczenie teoretycznej rezystancji dla takiego uziemienia nie jest trudne i opisuje to wzór:



$$R_{\infty} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

gdzie:

$\rho$  – rezystywność gruntu

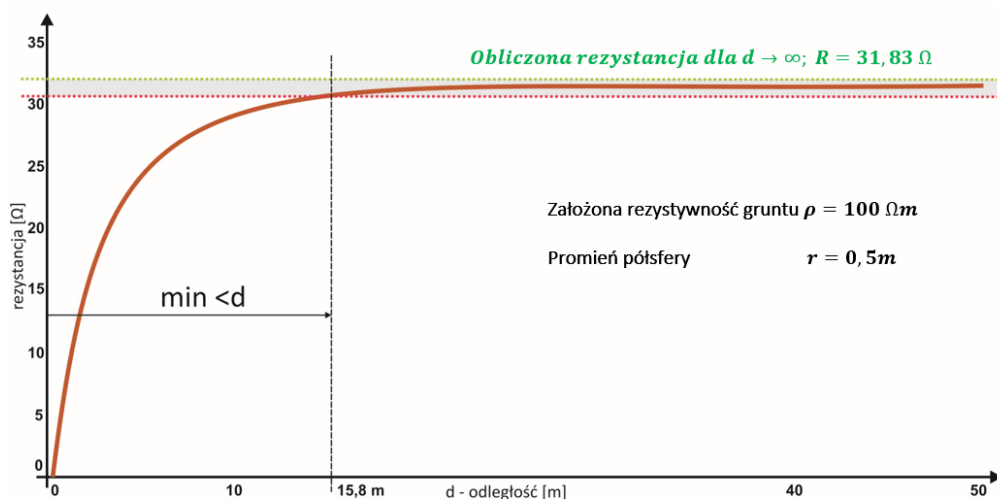
$r$  – promień półsfery

**Rys. 2.** Teoretyczne uziemienie w kształcie półsfery

$R_{\infty}$  to jednak rezystancja wyliczona dla punktu znajdującego się w nieskończoności w stosunku do naszego uziemienia. Nieskończoność to dość kłopotliwa miara odległości. Przyjmijmy zatem, że odległość od przykładowego uziemienia z rysunku 2 wynosić będzie jakąś mierzalną wartość  $d$ . Zakładać należy jednocześnie, że otrzymane wyniki obliczeń w odległości  $d$  powinny być takie same lub bardzo zbliżone jak dla nieskończoności. Wzór na rezystancję uziemienia wzbogaci się o zmienną  $d$  zamiast nieskończoności i przyjmie postać:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{d} \right)$$

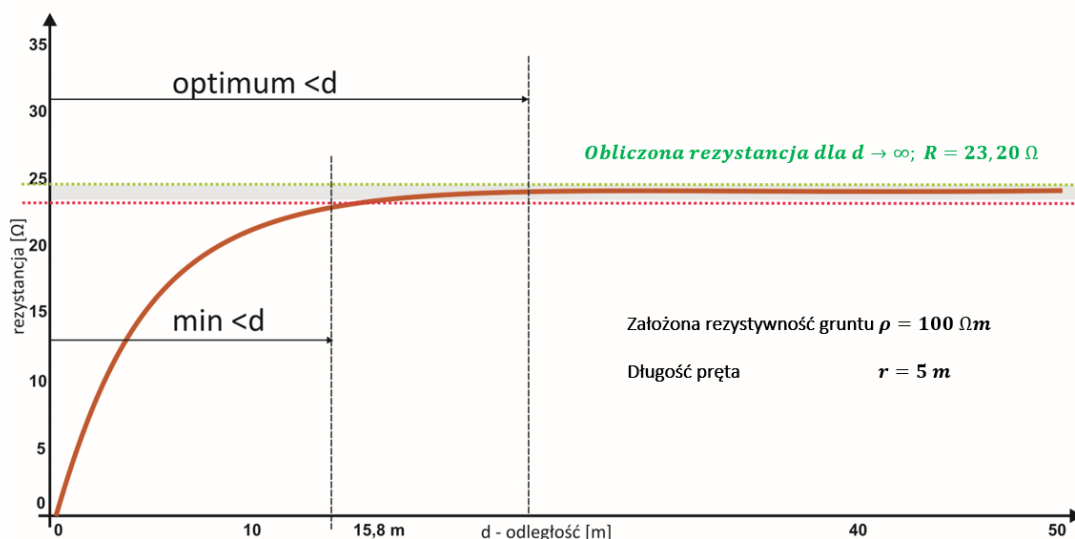
Prezentacja obliczonej rezystancji uziemienia w funkcji odległości  $d$  pokazuje wykres na rysunku 3.



**Rys. 2.** Rozkład obliczanej rezystancji uziemienia w funkcji odległości  $d$

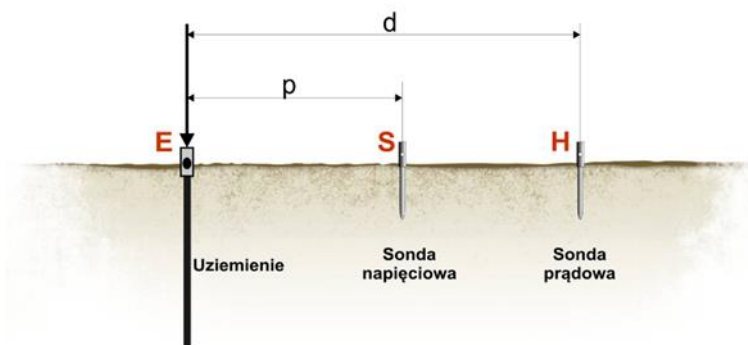
Dla założonych parametrów rezystywności  $\rho = 100 \Omega m$  i promienia półsfery  $r = 0,5m$  obliczona rezystancja uziemienia to  $R = 31,83\Omega$  zaznaczona na wykresie zieloną przerywaną linią. Linia przerywana w kolorze czerwonym to arbitralnie przyjęty błąd o wartości ok 5%. Linia brązowa to wartość rezystancji dla zmiennej odległości  $d$ . Dla tego przykładu otrzymane wyniki rezystancji wyliczane dla nieskończoności są zbieżne z tymi obliczonymi dla odległości od 15,8m. Odległości poniżej tej wartości spowodują powstanie niebezpiecznego błędu. Otrzymane wartości rezystancji będą mniejsze niż te, które występują rzeczywiście dla prezentowanego układu. Zawsze istnieje jakaś minimalna odległość od uziemienia do punktu obliczeniowego poniżej, której otrzymane wyniki będą zaniżone. Wyznaczenie tej odległości jest zależne od rozległości i geometrii uziemienia i trudno tu znaleźć jakąś żelazną zasadę. Dla każdego przypadku będzie to kwestia indywidualna z założeniem, że im dalej tym lepiej.

Każde uziemienie niezależnie od kształtu i rozległości będzie podlegało tym samym zasadom. Dla uziemienia w postaci pręta pionowego pograżonego na 5m w gruncie, rozkład rezystancji w funkcji odległości będzie bardzo zbliżony do prezentowanego wcześniej przykładu uziemienia półsferycznego. Różnice pojawią się w obliczonej wartości rezystancji i ewentualnych odległości krytycznych od przykładowego uziemienia. Interesujące dla przykładu z rysunku 4 jest, iż optymalna odległość dla wykonania pomiaru będzie znajdować się w okolicy ok. 30m od badanego uziemienia. Nie można zapomnieć, że pręt wbity w ziemię na głębokość 5m to najprostszy rodzaj uziemienia jaki można sobie wyobrazić a odległość do punktu obliczeniowego, która powinna być zachowana (do sondy prądowej w warunkach rzeczywistych) to jest aż ok. 30m!



Rys. 3. Rozkład rezystancji w funkcji odległości dla pręta o długości 5m

Należy przyjąć, że nawet dla najprostszych i nierozległych uziemień trzeba zwracać uwagę na kryteria konieczne do ustalenia właściwych odległości pomiędzy poszczególnymi punktami układu pomiarowego. Rozwijając układ pomiarowy, analogicznie do sytuacji rzeczywistej, w której do realizacji pomiaru konieczny będzie jeszcze obwód napięciowy należy przyjąć kolejną zmienną. Zmienna ta, to odległość  $p$  do pomocniczej sondy napięciowej, dzięki której możliwy będzie pomiar spadku napięcia na badanym uziemieniu.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia sond pomocniczych. Metoda spadku potencjału

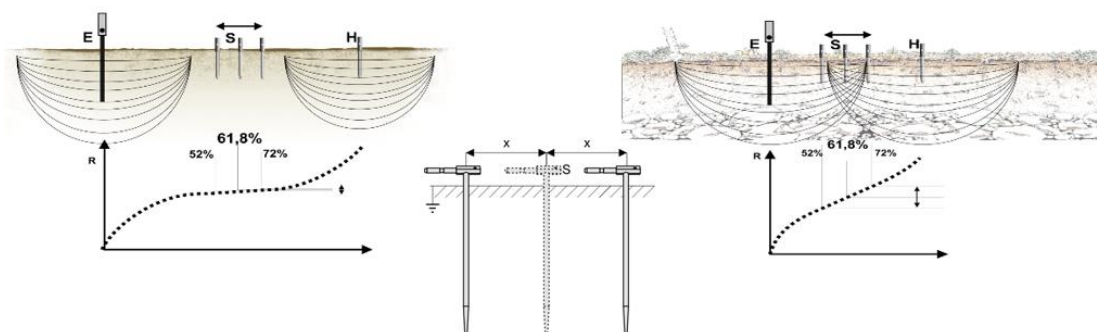
Wzór na rezystancję przyjmie następującą postać:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{d} - \frac{1}{p} + \frac{1}{d-p} \right)$$

Jeśli pomiędzy E i H pojawi się prąd pomiarowy to wystąpi również różnica potencjałów i z pewnością pomiędzy nimi znajdzie się miejsce o potencjale równym 0V. I to właśnie jest idealny punkt położenia dla pomocniczej sondy napięciowej. To idealne położenie w odległości **p** od uziemienia można ustalić ze wzoru:

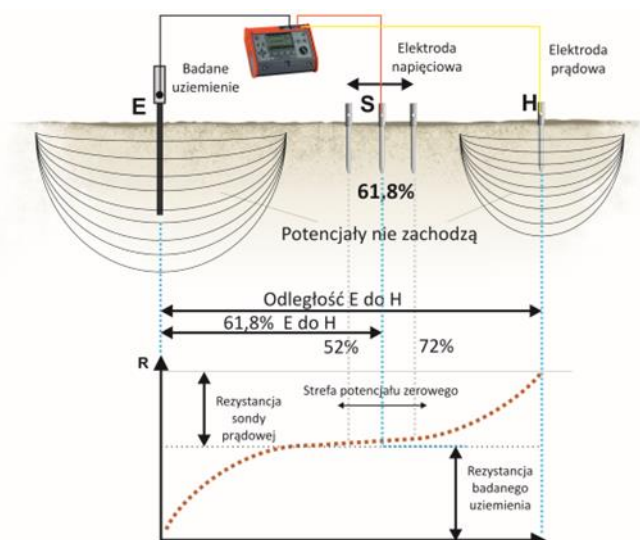
$$p = d \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \cong 0,628d$$

Idąc dalej w rozważaniach teoretycznych dla takiego układu można przyjąć tezę, że dla gruntu jednorodnego umieszczenie pomocniczej sondy napięciowej w odległości **p** od uziemienia, stanowiącej 61,8% odległości **d** do pomocniczej sondy prądowej, wynik będzie prawdziwy niezależnie od tego jaka będzie faktycznie odległość **d**. Tak wygląda najpowszechniej stosowana na świecie metoda 61,8% opisana przez dr Tagga. Naturalnie w warunkach rzeczywistych grunt całkowicie jednorodny nie występuje i w praktyce pomiar uziemienia należy zweryfikować poprzez wykonanie badań dla zmienionego położenia pomocniczej sondy napięciowej. Warto nadmienić, że miejsce potencjału zerowego nie jest punktem jak by się mogło wydawać. W warunkach rzeczywistych, im dalej odstawimy pomocniczą sondę prądową tym szerszy wystąpi obszar potencjału zerowego.



**Rys. 5.** Weryfikacja pomiaru rezystancji uziemienia poprzez przestawienie pomocniczej sondy napięciowej. Po lewej właściwa odległość do H. Po prawej zbyt blisko do H.

W przypadku kiedy zbyt blisko badanego uziemienia zostanie umieszczona pomocnicza sonda prądowa, obszar potencjału zerowego będzie nie do znalezienia, a kolejne pomiary z przestawianiem sondy napięciowej S dadzą diametralnie różne wyniki rezystancji uziemienia. Kiedy natomiast przestawiana sonda napięciowa będzie przemieszczana w obszarze potencjału zerowego wyniki będą bardzo zbliżone lub wręcz takie same. Na rysunku 7 pokazane są zależności, którymi można opisywać metodę techniczną spadku potencjału.



Rys. 6. Pomiar rezystancji uziemienia metodą spadku potencjału, 61,8%

Metoda ta jest powszechnie stosowana, jednak często zapomina się o weryfikacji pomiaru oraz znaczeniu odległości do pomocniczej sondy prądowej.

Zgodnie z prawami Murphy'ego, które sprowadzają się do obserwacji, że jeśli coś może pójść źle, to źle pójdzie na pewno to i w tym przypadku warto zastanowić się co może pójść niezgodnie z oczekiwaniami. Podstawą tych rozważań musi być oczywiście założenie, że mamy sprawny sprzęt pomiarowy z naładowanymi akumulatorami, nieszkodzone przewody i złącza i żaden z kolegów nie robi nam psikusów.

Przypadek, w którym trzy kolejne pomiary są różne

Możliwym powodem może być występowanie elementów przewodzących w gruncie pod linią wyznaczającą kierunek rozmieszczenia sond pomocniczych. Mogą to być rury wodociągowe, gazowe, uziemione instalacje telekomunikacyjne, bednarki uziemiające itp. Rozwiązaniem będzie przestawienie sond w innym kierunku i powtórzenie pomiaru. Możliwe jest również, chociaż dla omawianego przykładu bardzo mało prawdopodobne, że uziemienie z różnych powodów jest dużo większe fizycznie niż spodziewany kilkumetrowy pręt uziemiający. W takim przypadku konieczne będzie odstawienie sondy prądowej na odległość powyżej 50m.

Przypadek, w którym kolejne pomiary różnią się przy tym samym położeniu sond.

Często powodem jest zbyt duża rezystancja sond pomocniczych (wartości te są również pokazywane przez miernik) ze względu na dużą rezystywność gruntu. Trzeba spowodować zmniejszenie rezystancji sond przez zastosowanie dłuższych niż standardowe np. 80cm. Jeśli to nie przyniesie pożądanego rezultatu można obniżyć rezystancję sond pomocniczych przez podlanie ich wodą na czas pomiaru. Można też, jeśli jest taka możliwość, wykorzystać obiekty w terenie takie jak inne uziemienia, ogrodzenia czy niekiedy znaki drogowe lub latarnie. Mały prąd w obwodzie to również problem mogący bezpośrednio wynikać z konstrukcji miernika. W połączeniu z wysoką rezystywnością mała moc miernika to prosty przepis na kłopoty. Dla profesjonalistów należy rekomendować mierniki z prądem co najmniej 200mA. Powyższe zasady można stosować poprzez analogię również w innych przypadkach dla różnych rodzajów uziemień.



Opisane wyżej zasady niestety nie znajdują zastosowania przy pomiarach uziemień rozległych lub precyzyjniej są bardzo pracochłonne i nie zawsze skuteczne. Uziemienia rozległe takie jak hale produkcyjne czy GPZ itp. łatwiej i szybciej można zmierzyć wykorzystując metodę narastania zbrocza opisaną przez dr Tagga. Polega ona na tym, aby na podstawie trzech pomiarów wyznaczyć dla danego układu idealne miejsce dla sondy napięciowej o potencjale zerowym i dopiero wtedy wykonać pomiar ostateczny. Określenie zmiany rezystancji dla dowolnego punktu jest kłopotliwe. Z drugiej strony jednak dość łatwo określa się szybkość tych zmian. Można tego dokonać przez wykonanie pomiaru rezystancji dla trzech punktów położenia elektrody napięciowej - czyli trzech różnych odległości  $p$  (**0,2d, 0,4d i 0,6d**) - otrzymując wartości  $R_1, R_2$  i  $R_3$ . Prędkość zmian rezystancji  $\mu$  jest obliczana z poniższego wzoru.

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

Rezystancja dla poszczególnych odległości  $p$  (**0,2d, 0,4d i 0,6d**) będzie wynosić odpowiednio:

$$R_1 = R_\infty - K \left( \frac{1}{d + X} - \frac{1}{0,2 + X} + \frac{1}{0,8 - p} \right)$$

$$R_2 = R_\infty - K \left( \frac{1}{d + X} - \frac{1}{0,4 + X} + \frac{1}{0,6 - p} \right)$$

$$R_3 = R_\infty - K \left( \frac{1}{d + X} - \frac{1}{0,6 + X} + \frac{1}{0,4 - p} \right)$$

Rozwiązując układ trzech powyższych równań otrzymujemy:

$$\alpha^3(250 - 125\mu) + \alpha^2(300 - 150\mu) + \alpha(170 - 115\mu) + (24 - 42\mu) = 0$$

Tę zależność można rozwiązać dla  $\alpha$  dla dowolnej wartości  $\mu$ . Właściwa odległość do sondy prądowej  $d$  wynosić będzie  $d \cdot (1 + \alpha)$ , a odległość do sondy napięciowej  $p$ , biorąc pod uwagę ustaloną wcześniej regułę 61,8%, wyniesie  $0,6180d \cdot (1 + \alpha)$ .

Odległość od punktu początkowego dla pomiaru rzeczywistej rezystancji uziemienia  $p_T$  (pozycja sondy napięciowej) wynosić będzie:

$$p_T = 0,6180d \cdot (1 + \alpha) - \alpha \cdot d$$

$$p_T = d \cdot (0,6180 - 0,3820 \cdot \alpha)$$

dlatego:

$$p_T/d = 0,6180 - 0,3820 \cdot \alpha$$

Trzeba wyliczyć i umieścić w tabeli wartości  $p_T/d$  dla dowolnej wartości  $\mu$  korzystając ze wzoru:

$$\alpha^3(250 - 125\mu) + \alpha^2(300 - 150\mu) + \alpha(170 - 115\mu) + (24 - 42\mu) = 0$$

Tabele z obliczonymi danymi dostępne są w załączniku nr 1.

Metoda narastania zbocza. Postępowanie:

1. Wybrać dogodnie miejsce przyłączenia przyrządu do badanego uziemienia (punkt początkowy). Elektrode prądową umieścić w odpowiedniej odległości  $d$  od tego punktu.
2. Ustawić elektrodę napięciową. Wykonać pomiar w odległościach od badanego uziemienia:  $0,2d$ ,  $0,4d$  i  $0,6d$ .
3. Dla każdego z tych trzech położen otrzymamy wynik rezystancji  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ .
4. Obliczyć współczynnik z zależności  $\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$ .
5. Z tabeli (załącznik nr 1) odczytać wartość  $\rho_t/d$  dla wyliczonego  $\mu$ .
6. Obliczyć wartość  $\rho_T$  przez pomnożenie stosunku  $\rho_t/d$  przez  $d$ .
7. Umieścić elektrodę napięciową w wyliczonej odległości  $\rho_T$ .
8. Wykonać pomiar rezystancji. Otrzymany w ten sposób wynik powinien być prawdziwą wartością (która dąży  $R_\infty$ ) rezystancji badanego uziemienia.
9. W celu weryfikacji pomiaru powtórzyć procedurę dla innej odległości  $d$

### Przykład nr 1. Pomiar skuteczny bez nieprzewidzianych trudności

Obiektem, na którym przeprowadzono pomiary, była mała podstacja o wymiarach ok. 30,5 m x 24,5 m, otoczona ogrodzeniem przyłączonym do systemu uziemiającego. Uziemienie składa się z siatki uziemiającej, bednarek itp. Elektrode prądową umieszczono w odległości  $d=116$  m, następnie  $d=91$  m. Ostatni pomiar wykonano przy odległości  $d=61$  m. Miejsce przyłączenia miernika do uziemienia to ok. 30 cm od siatki z krótszego boku.

Odległość D	Rezystancja zmierzona dla			$\mu$	$\rho_t/d$	$\rho_T$	R
	$\rho=0,2d$	$\rho=0,4d$	$\rho=0,6d$				
M	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	-	-	m	$\Omega$
61	0,169	0,197	0,231	1,253	0,4788	29,21	0,209
91	0,190	0,204	0,221	1,178	0,4997	45,72	0,210
116	0,186	0,203	0,215	0,757	0,5877	68,17	0,214

Rys. 8. Tabela. Otrzymane dane do przykładu zastosowania metody narastania zbocza

Średnia rezystancja z trzech pomiarów wynosi  $0,211 \Omega$ , zatem ewentualny błąd względem średniej to ok. 1,4%. Wyniki pomiarów można uznać za poprawne.

Mmaksymalna możliwa wartość współczynnika  $\mu$  wynosi 2. Jeśli w wyniku pomiarów rezystancje dają  $\mu$  większe niż 2, to warunki nie odpowiadają tym, na których opiera się niniejsza metoda – konieczne jest zwiększenie odległości  $d$  do elektrody prądowej. Z praktyki wynika jednak, że współczynniki powinny się zawierać w zakresie ograniczonym do wartości  $\mu$ :  $0,4 < \mu < 1,6$ .

Metoda nachylenia (narastania) zbocza jest zatem zadowalająca. Z powodzeniem można ją stosować do sprawdzenia rezystancji uziemienia obiektów o rozległych systemach uziemiających. Wyniki spełniają oczekiwania również wtedy, gdy grunt jest niejednorodny. Sama metoda pozwoli na ustalenie, kiedy odległość  $d$  do elektrody prądowej jest wystarczająca.

Biorąc pod uwagę, że przy odległościach do sondy prądowej rzędu kilkuset metrów, przestawianie jej w celu sprawdzenia poprawności pomiaru wiąże się ze sporym zaangażowaniem, proponuje się aby w celu sprawdzenia, wykorzystać metodę bazującą na omówionych zależnościach lecz w wyniku obliczeń dającą od razu wartość rezystancji uziemienia.

Metoda na to pozwalająca jest opracowaniem powstałym w SONEL S.A. w wyniku chęci maksymalnego uproszczenia badań uziemień rozległych. Na podstawie analizy rozkładu rezystancji uziemienia wyliczono współczynniki, które po wykonaniu trzech pomiarów pozwalają na otrzymanie w efekcie poprawnej wartości rezystancji uziemienia badanego układu.

Procedura jest podobna do proponowanej przez dr Tagga z tą różnicą, że pomiary należy wykonać umieszczając sondę napięciową S w odległościach stanowiących odpowiednio 0,4d (R1) 0,6d (R2) i 0,8d (R3). Gdzie d to odległość do sondy prądowej H. Otrzymane wyniki podstawiamy do wzoru:

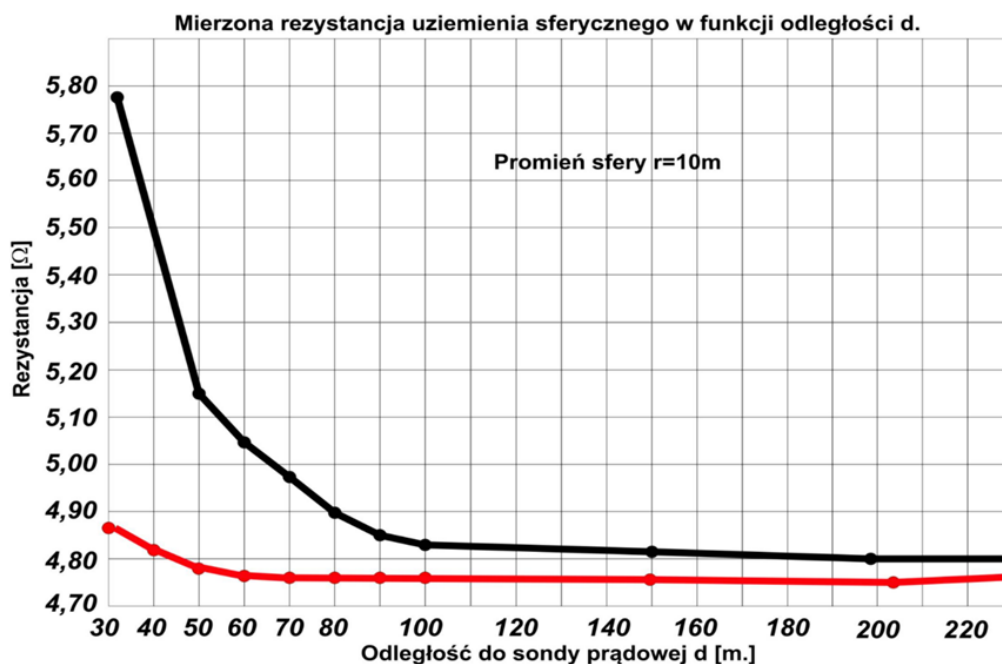
$$R_e = -1,335 \times R_1 + 3,041 \times R_2 - 0,7057 \times R_3$$

Trzeba zaznaczyć, że przy małej odległości d do sondy prądowej pozycje dla sondy napięciowej muszą być wyznaczone niezwykle dokładnie. Zwiększenie jej od razu zmniejszy tę niedogodność. Powyższe równanie jest prawdziwe wyłącznie dla współczynników z podanych proporcji:

$$40\% d - R_1 \quad \text{obliczony współczynnik} = -1,335$$

$$60\% d - R_2 \quad \text{obliczony współczynnik} = 3,041$$

$$80\% d - R_3 \quad \text{obliczony współczynnik} = -0,7057$$



*Rys. 9. Otrzymane wyniki w funkcji odległości do sondy prądowej, Czerwony metoda ze wzorem, czarny metoda z poszukiwaniem ziemi odniesienia*

Na wykresie prezentowane jest porównanie metody ze wzorem i metody z tradycyjnym poszukiwaniem miejsca potencjału zerowego (kolor czerwony metoda matematyczna). Przykład dla półsfery o promieniu 20m w gruncie o rezystywności 100 Ω. Z obserwacji tego badania wynika, że przy znacznie mniejszych odległościach niż by można oczekiwać pomiar jest możliwy do przeprowadzenia.

Dla sprawnego przeprowadzenia pomiarów uziemienia rozległego możemy oba opisane sposoby badania połączyć w jeden cykl pomiarowy otrzymując jednocześnie pomiar i jego sprawdzenie.

Sposób postępowania powinien być następujący:

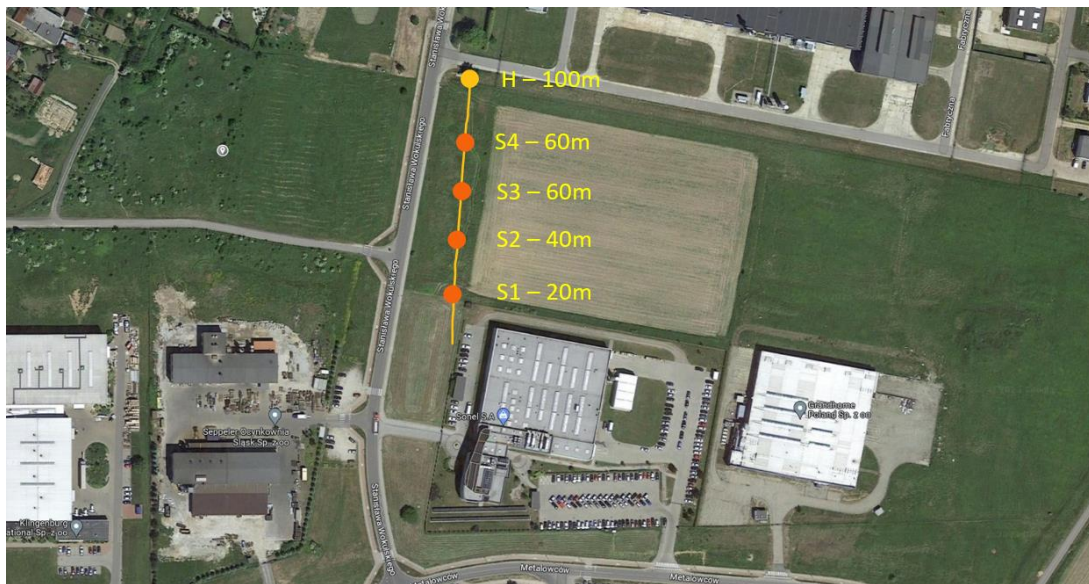
1. Na podstawie rozległości uziemienia wyznaczamy pozycję dla sondy prądowej H.
2. Umieszczamy w odpowiednich pozycjach sondy napięciowe S, który wynosić będą odpowiednio 02d, 04d, 0,6d oraz 0,8d.
3. Wykonujemy pomiary dla poszczególnych pozycji sondy S.
4. W rezultacie otrzymujemy 4 wyniki : R1 (dla S w pozycji 0,2), R2 (dla S w pozycji 0,4), R3 (dla S w pozycji 0,6) i R4 (dla S w pozycji 0,8).
5. Wartości R1, R2, R3 wykorzystujemy do wyznaczenie pozycji dla sondy S zgodnie z metodą narastania zbocza i umieszczamy w obliczonej pozycji sondę napięciową wykonując po tym pomiar. Otrzymujemy w ten sposób wartość rezystancji badanego uziemienia.
6. Następnie druga metoda posłuży do weryfikacji pomiaru. Podstawiamy do wzoru wartości R2, R3 i R4

$$R_e = -1,335 \times R_2 + 3,041 \times R_3 - 0,7057 \times R_4$$

Jeśli cała procedura została przeprowadzona poprawnie i odległości do sond były wyznaczone właściwie to wyniki powinny w rezultacie być w zasadzie takie same. Różnice, jeśli wystąpią, są z reguły wynikiem zbyt małej odległości do sondy prądowej H lub wysokiej rezystywności gruntu. W takim przypadku należy przeprowadzić badanie ponownie z większą odległością do sondy prądowej H i/lub zadbać o zmniejszenie rezystancji sond pomocniczych.

Próby badań łącznie ze sobą oba sposoby pomiaru były prowadzone w wielu miejsca w różnych warunkach i potwierdzają skuteczność takiego sposobu postępowania.

Jednym z miejsc prób był obiekt firmy SONEL S.A:



Rys. 10. Układ sond pomocniczych podczas pomiarów uziemienia w siedzibie firmy SONEL S.A.

Na zdjęciu zaznaczono położenie sond pomocniczych przy wykonywaniu badania rezystancji uziemienia fundamentowego z otokiem obiektu produkcyjnego SONEL S.A. Przeprowadzone pomiary i obliczenia (nie są to zamieszczone ze względu na objętość materiału) wykazały dla

metody narastania zbocza  $R=0,374\Omega$  a dla obliczeń ze wzorem  $R=0,382\Omega$ . Biorąc pod uwagę różnice na trzecim miejscu po przecinku wartość  $R=0,3\Omega$  można uznać za wiarygodną i w zupełności wystarczającą do oceny badanego uziemienia co za jedną procedurą zostało zmierzone i zweryfikowane.

Na zakończenie, nie można nie wspomnieć ku przestrodze, iż ekipa wykonująca pomiary chciała je ponowić kilka dni później dla takiego samego ustawienia sond pomocniczych. Jakież było zaskoczenie, kiedy okazało się, że współczynnik  $\mu$  obliczany do metody narastania zbocza dr Tagga jest poza tabelą z wyliczonymi danymi. Po kilkukrotnym sprawdzeniu połączeń i położenia sond pomocniczych pozostała do rozważenia tylko jeszcze jedna przyczyna. Okazuje się, że stabilna ciepła i lekko wietrzna pogoda wpłynęła na zwiększenie się rezystywności gruntu w jej wierzchniej warstwie, na mniej więcej głębokości pograżania sąd pomocniczych. Przy stosunkowo niewielkiej odległości do sondy prądowej H w stosunku do rozmiarów uziemienia był to element wystarczający aby uniemożliwić przeprowadzenie pomiaru. Ponowiono jednak procedurę przemieszczając sondę prądową na 120m co pozwoliło na uzyskanie współczynnika w końcowych liniach tabeli. Pomiary potwierdziły, a w zasadzie pokryły się z poprzednio otrzymanymi wynikami, co dało pewność poprawności badania. Należy zatem pamiętać o zmienności warunków jakim podlega ciągle grunt. Można sobie przy tego rodzaju pomiarach radzić zwiększając odległość do sondy prądowej lub w niektórych przypadkach obniżając rezystancję sond pomocniczych (stosując np. dłuższe sondy 80 cm). Co interesujące wartość rezystancji wyliczona ze wzoru była jedynie o kilka procent większa od wyliczonych za pierwszym razem. Można zatem przypuszczać, że opisany wzór ze współczynnikami dla proporcji 0,4 0,6 i 0,8 jest metodą prostszą jednak bez weryfikacji ciężko będzie orzec o poprawności badania.

#### **Bibliografia**

1. G. F. Tagg , Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems, PROC. IEE, Vol. 117, No. 11, NOVEMBER 1970.
2. G. F. Tagg, Earth resistances. New York, Pitman Pub. Corp. [1964]
3. Witaold Hoppel, Robert Marciniak - Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych – Wydawnictwo WNT
4. Roman Domański, Jacek Osiecki – Metoda techniczna pomiaru rezystancji uziemienia. Elektro Info nr. 11/2019 (179)
5. Materiały własne SONEL S.A
6. Modelowanie i symulacje w obliczeniach uziomów DR INŻ. KONRAD SOBOLEWSKI
7. Strona internetowa RST - <https://rst.pl/projektowanie-ukladu-uziemiajacego-obliczenia-teoretyczne-w-praktyce/>
8. An Introduction to Soil Resistivity - August 28, 2020 by Lorenzo Mari - <https://eepower.com/technical-articles/an-introduction-to-soil-resistivity/#>

Załącznik nr 1.

$\mu$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,40_	0,6432	0,6431	0,6429	0,6428	0,6426	0,6425	0,6423	0,6422	0,6420	0,6419
0,41_	0,6418	0,6416	0,6415	0,6413	0,6412	0,6410	0,6409	0,6408	0,6406	0,6405
0,42_	0,6403	0,6402	0,6400	0,6399	0,6397	0,6396	0,6395	0,6393	0,6392	0,6390
0,43_	0,6389	0,6387	0,6386	0,6384	0,6383	0,6382	0,6380	0,6379	0,6377	0,6376
0,44_	0,6374	0,6373	0,6372	0,6370	0,6369	0,6367	0,6366	0,6364	0,6363	0,6361
0,45_	0,6360	0,6359	0,6357	0,6356	0,6354	0,6353	0,6351	0,6350	0,6348	0,6347
0,46_	0,6346	0,6344	0,6343	0,6341	0,6340	0,6338	0,6337	0,6336	0,6334	0,6333
0,47_	0,6331	0,6330	0,6328	0,6327	0,6325	0,6324	0,6323	0,6321	0,6320	0,6318
0,48_	0,6317	0,6315	0,6314	0,6312	0,6311	0,6310	0,6308	0,6307	0,6305	0,6304
0,49_	0,6302	0,6301	0,6300	0,6298	0,6297	0,6295	0,6294	0,6292	0,6291	0,6289
0,50_	0,6288	0,6286	0,6285	0,6283	0,6282	0,6280	0,6279	0,6277	0,6276	0,6274
0,51_	0,6273	0,6271	0,6270	0,6268	0,6267	0,6265	0,6264	0,6262	0,6261	0,6259
0,52_	0,6258	0,6256	0,6255	0,6253	0,6252	0,6252	0,6248	0,6247	0,6245	0,6244
0,53_	0,6242	0,6241	0,6239	0,6238	0,6236	0,6235	0,6233	0,6232	0,6230	0,6229
0,54_	0,6227	0,6226	0,6224	0,6223	0,6221	0,6220	0,6218	0,6217	0,6215	0,6214
0,55_	0,6212	0,6210	0,6209	0,6207	0,6206	0,6204	0,6203	0,6201	0,6200	0,6198
0,56_	0,6197	0,6195	0,6194	0,6192	0,6191	0,6189	0,6188	0,6186	0,6185	0,6183
0,57_	0,6182	0,6180	0,6179	0,6177	0,6176	0,6174	0,6172	0,6171	0,6169	0,6168
0,58_	0,6166	0,6165	0,6163	0,6162	0,6160	0,6159	0,6157	0,6156	0,6154	0,6153
0,59_	0,6151	0,6150	0,6148	0,6147	0,6145	0,6144	0,6142	0,6141	0,6139	0,6138
0,60_	0,6136	0,6134	0,6133	0,6131	0,6130	0,6128	0,6126	0,6125	0,6123	0,6121
0,61_	0,6120	0,6118	0,6117	0,6115	0,6113	0,6112	0,6110	0,6108	0,6107	0,6105
0,62_	0,6104	0,6102	0,6100	0,6099	0,6097	0,6096	0,6094	0,6092	0,6091	0,6089
0,63_	0,6087	0,6086	0,6084	0,6083	0,6081	0,6079	0,6076	0,6076	0,6074	0,6073
0,64_	0,6071	0,6070	0,6068	0,6066	0,6065	0,6063	0,6061	0,6060	0,6058	0,6057
0,65_	0,6055	0,6053	0,6052	0,6050	0,6049	0,6047	0,6045	0,6044	0,6042	0,6040
0,66_	0,6039	0,6037	0,6036	0,6034	0,6032	0,6031	0,6029	0,6027	0,6026	0,6024
0,67_	0,6023	0,6021	0,6019	0,6018	0,6016	0,6015	0,6013	0,6011	0,6010	0,6008
0,68_	0,6006	0,6005	0,6003	0,6002	0,6000	0,5098	0,5997	0,5995	0,5993	0,5992
0,69_	0,5990	0,5989	0,5987	0,5985	0,5984	0,5982	0,5980	0,5979	0,5977	0,5976
0,70_	0,5974	0,5973	0,5971	0,5969	0,5967	0,5965	0,5964	0,5962	0,5960	0,5959
0,71_	0,5957	0,5955	0,5953	0,5952	0,5950	0,5948	0,5947	0,5945	0,5943	0,5942
0,72_	0,5940	0,5938	0,5936	0,5935	0,5933	0,5931	0,5930	0,5928	0,5926	0,5924
0,73_	0,5923	0,5921	0,5920	0,5918	0,5916	0,5914	0,5912	0,5911	0,5909	0,5907
0,74_	0,5906	0,5904	0,5902	0,5900	0,5899	0,5897	0,5895	0,5894	0,5892	0,5890
0,75_	0,5889	0,5887	0,5885	0,5883	0,5882	0,5880	0,5878	0,5877	0,5875	0,5873
0,76_	0,5871	0,5870	0,5868	0,5866	0,5865	0,5863	0,5861	0,5859	0,5858	0,5856
0,77_	0,5854	0,5853	0,5851	0,5849	0,5847	0,5846	0,5844	0,5842	0,5841	0,5839
0,78_	0,5837	0,5835	0,5834	0,5832	0,5830	0,5829	0,5827	0,5825	0,5824	0,5822
0,79_	0,5820	0,5818	0,5817	0,5815	0,5813	0,5812	0,5810	0,5808	0,5806	0,5805
0,80_	0,5803	0,5801	0,5799	0,5797	0,5796	0,5794	0,5792	0,5790	0,5788	0,5786
0,81_	0,5785	0,5783	0,5781	0,5779	0,5777	0,5775	0,5773	0,5772	0,5770	0,5768
0,82_	0,5766	0,5764	0,5762	0,5760	0,5759	0,5757	0,5755	0,5753	0,5751	0,5749
0,83_	0,5748	0,5746	0,5744	0,5742	0,5740	0,5738	0,5736	0,5735	0,5733	0,5731
0,84_	0,5729	0,5727	0,5725	0,5723	0,5722	0,5720	0,5718	0,5716	0,5714	0,5712
0,85_	0,5711	0,5709	0,5707	0,5705	0,5703	0,5701	0,5699	0,5698	0,5696	0,5694
0,86_	0,5692	0,5690	0,5688	0,5686	0,5685	0,5683	0,5681	0,5679	0,5677	0,5675
0,87_	0,5674	0,5672	0,5670	0,5668	0,5666	0,5664	0,5662	0,5661	0,5659	0,5657
0,88_	0,5655	0,5653	0,5651	0,5650	0,5648	0,5646	0,5644	0,5642	0,5640	0,5638
0,89_	0,5637	0,5635	0,5633	0,5631	0,5629	0,5627	0,5625	0,5624	0,5622	0,5620
0,90_	0,5618	0,5616	0,5614	0,5612	0,5610	0,5608	0,5606	0,5604	0,5602	0,5600
0,91_	0,5598	0,5596	0,5594	0,5592	0,5590	0,5588	0,5586	0,5584	0,5582	0,5580
0,92_	0,5578	0,5576	0,5574	0,5572	0,5570	0,5568	0,5565	0,5563	0,5561	0,5559
0,93_	0,5557	0,5555	0,5553	0,5551	0,5549	0,5547	0,5545	0,5543	0,5541	0,5539
0,94_	0,5537	0,5535	0,5533	0,5531	0,5529	0,5527	0,5525	0,5523	0,5521	0,5519
0,95_	0,5517	0,5515	0,5513	0,5511	0,5509	0,5507	0,5505	0,5503	0,5501	0,5499
0,96_	0,5497	0,5495	0,5493	0,5491	0,5489	0,5487	0,5485	0,5483	0,5481	0,5479
0,97_	0,5477	0,5475	0,5473	0,5471	0,5469	0,5467	0,5464	0,5462	0,5460	0,5458
0,98_	0,5456	0,5454	0,5452	0,5450	0,5448	0,5446	0,5444	0,5442	0,5440	0,5438
0,99_	0,5436	0,5434	0,5432	0,5430	0,5428	0,5426	0,5424	0,5422	0,5420	0,5418
1,00_	0,5416	0,5414	0,5412	0,5409	0,5407	0,5405	0,5403	0,5400	0,5398	0,5396
1,01_	0,5394	0,5391	0,5389	0,5387	0,5385	0,5383	0,5380	0,5378	0,5376	0,5374
1,02_	0,5371	0,5369	0,5367	0,5365	0,5362	0,5360	0,5358	0,5356	0,5354	0,5351



KONFERENCJA OCHRONA PRZED PORAŻENIEM I PRZED PRZEPIĘCIAMI W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

1,03_	0,5349	0,5347	0,5345	0,5344	0,5340	0,5338	0,5336	0,5333	0,5331	0,5329
1,04_	0,5327	0,5325	0,5322	0,5320	0,5318	0,5316	0,5313	0,5311	0,5309	0,5307
1,05_	0,5305	0,5302	0,5300	0,5298	0,5296	0,5293	0,5291	0,5289	0,5287	0,5284
1,06_	0,5282	0,5280	0,5278	0,5276	0,5273	0,5271	0,5269	0,5267	0,5264	0,5262
1,07_	0,5260	0,5258	0,5255	0,5253	0,5251	0,5249	0,5247	0,5244	0,5242	0,5240
1,08_	0,5238	0,5235	0,5233	0,5231	0,5229	0,5229	0,5224	0,5222	0,5219	0,5217
1,09_	0,5215	0,5213	0,5211	0,5209	0,5206	0,5204	0,5202	0,5200	0,5197	0,5195
1,10_	0,5193	0,5190	0,5188	0,5185	0,5183	0,5180	0,5178	0,5175	0,5173	0,5170
1,11_	0,5168	0,5165	0,5163	0,5160	0,5158	0,5155	0,5153	0,5150	0,5148	0,5145
1,12_	0,5143	0,5140	0,5137	0,5135	0,5132	0,5130	0,5127	0,5125	0,5122	0,5120
1,13_	0,5118	0,5115	0,5113	0,5110	0,5108	0,5105	0,5103	0,5100	0,5098	0,5095
1,14_	0,5093	0,5090	0,5088	0,5085	0,5083	0,5080	0,5078	0,5075	0,5073	0,5070
1,15_	0,5068	0,5065	0,5062	0,5060	0,5057	0,5055	0,5052	0,5050	0,5047	0,5045
1,16_	0,5042	0,5040	0,5037	0,5035	0,5032	0,5030	0,5027	0,5025	0,5022	0,5020
1,17_	0,5017	0,5015	0,5012	0,5010	0,5007	0,5005	0,5002	0,5000	0,5000	0,4995
1,18_	0,4992	0,4990	0,4987	0,4985	0,4982	0,4980	0,4977	0,4975	0,4972	0,4970
1,19_	0,4967	0,4965	0,4962	0,4960	0,4957	0,4955	0,4952	0,4950	0,4947	0,4945
1,20_	0,4942	0,4939	0,4936	0,4933	0,4930	0,4928	0,4925	0,4922	0,4919	0,4916
1,21_	0,4913	0,4910	0,4907	0,4904	0,4901	0,4899	0,4896	0,4893	0,4890	0,4887
1,22_	0,4884	0,4881	0,4878	0,4875	0,4872	0,4870	0,4867	0,4864	0,4861	0,4858
1,23_	0,4855	0,4852	0,4849	0,4846	0,4843	0,4841	0,4838	0,4835	0,4832	0,4829
1,24_	0,4826	0,4823	0,4820	0,4817	0,4814	0,4812	0,4809	0,4806	0,4803	0,4800
1,25_	0,4797	0,4794	0,4791	0,4788	0,4785	0,4783	0,4780	0,4777	0,4774	0,4771
1,26_	0,4768	0,4765	0,4762	0,4759	0,4756	0,4754	0,4751	0,4748	0,4745	0,4742
1,27_	0,4739	0,4736	0,4733	0,4730	0,4727	0,4725	0,4722	0,4719	0,4716	0,4713
1,28_	0,4710	0,4707	0,4704	0,4701	0,4698	0,4696	0,4693	0,4690	0,4687	0,4684
1,29_	0,4681	0,4678	0,4675	0,4672	0,4669	0,4667	0,4664	0,4661	0,4658	0,4655
1,30_	0,4652	0,4649	0,4645	0,4642	0,4638	0,4635	0,4631	0,4628	0,4625	0,4621
1,31_	0,4618	0,4614	0,4611	0,4607	0,4604	0,4601	0,4597	0,4594	0,4590	0,4586
1,32_	0,4583	0,4580	0,4577	0,4573	0,4570	0,4566	0,4563	0,4559	0,4556	0,4553
1,33_	0,4549	0,4546	0,4542	0,4539	0,4535	0,4532	0,4529	0,4525	0,4522	0,4518
1,34_	0,4515	0,4511	0,4508	0,4505	0,4501	0,4498	0,4494	0,4491	0,4487	0,4484
1,35_	0,4481	0,4477	0,4474	0,4470	0,4467	0,4463	0,4460	0,4457	0,4453	0,4450
1,36_	0,4446	0,4443	0,4439	0,4436	0,4432	0,4429	0,4426	0,4422	0,4419	0,4415
1,37_	0,4412	0,4408	0,4405	0,4402	0,4398	0,4395	0,5391	0,4388	0,4384	0,4381
1,38_	0,4378	0,4374	0,4371	0,4367	0,4364	0,4360	0,4357	0,4354	0,4350	0,4347
1,39_	0,4343	0,4340	0,4336	0,4333	0,4330	0,4326	0,4323	0,4319	0,4316	0,4312
1,40_	0,4309	0,4305	0,4301	0,4296	0,4292	0,4288	0,4284	0,4280	0,4275	0,4271
1,41_	0,4267	0,4263	0,4258	0,4254	0,4250	0,4246	0,4242	0,4237	0,4233	0,4229
1,42_	0,4225	0,4221	0,4216	0,4212	0,4208	0,4204	0,4200	0,4195	0,4191	0,4187
1,43_	0,4183	0,4178	0,4174	0,4170	0,4166	0,4162	0,4157	0,4153	0,4149	0,4145
1,44_	0,4141	0,4136	0,4132	0,4128	0,4124	0,4120	0,4115	0,4111	0,4107	0,4103
1,45_	0,4099	0,4094	0,4090	0,4086	0,4082	0,4077	0,4073	0,4069	0,4065	0,4061
1,46_	0,4056	0,4052	0,4048	0,4044	0,4040	0,4035	0,4031	0,4027	0,4023	0,4018
1,47_	0,4014	0,4010	0,4006	0,4001	0,3997	0,3993	0,3989	0,3985	0,3980	0,3976
1,48_	0,3972	0,3968	0,3964	0,3959	0,3955	0,3951	0,3947	0,3943	0,3938	0,3934
1,49_	0,3930	0,3926	0,3921	0,3917	0,3913	0,3909	0,3905	0,3900	0,3896	0,3892
1,50_	0,3888	0,3883	0,3878	0,3874	0,3869	0,3864	0,3859	0,3854	0,3850	0,3845
1,51_	0,3840	0,3835	0,3830	0,3825	0,3820	0,3816	0,3811	0,3806	0,3801	0,3796
1,52_	0,3791	0,3786	0,3781	0,3776	0,3771	0,3766	0,3760	0,3755	0,3750	0,3745
1,53_	0,3740	0,3735	0,3730	0,3724	0,3719	0,3714	0,3709	0,3704	0,3698	0,3693
1,54_	0,3688	0,3683	0,3677	0,3672	0,3667	0,3662	0,3656	0,3651	0,3646	0,3640
1,55_	0,3635	0,3630	0,3624	0,3619	0,3613	0,3608	0,3602	0,3597	0,3591	0,3586
1,56_	0,3580	0,3574	0,3569	0,3563	0,3557	0,3552	0,3546	0,3540	0,3534	0,3528
1,57_	0,3523	0,3517	0,4511	0,3506	0,3500	0,3494	0,3488	0,3482	0,3477	0,3471
1,58_	0,3465	0,3459	0,3453	0,3447	0,3441	0,3435	0,3429	0,3423	0,3417	0,3411
1,59_	0,3405	0,3399	0,3393	0,3386	0,3380	0,3374	0,3368	0,3362	0,3355	0,3349

## ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD POMIAROWYCH: ODWRACANIA BIEGUNOWOŚCI, DUDNIENIOWEJ I SELEKTYWNEJ CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ DO OCENY SYSTEMÓW UZIEMIENIA

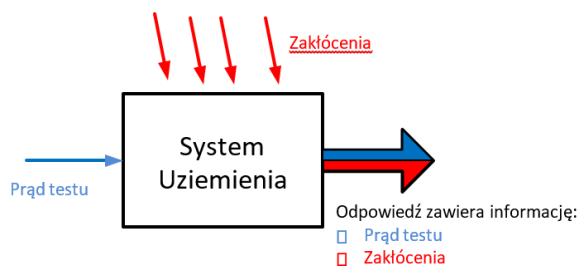
*Sirko Böhme (DNV GL Dresden)*  
*Prof. Gerd Valtin (HTWK Leipzig)*  
*Moritz Pikisch (OMICRON electronics Deutschland GmbH)*

### **Wprowadzenie**

Rozdzielnice wysokiego napięcia pełnią rolę węzłów w sieciach przesyłowych i dystrybucyjnych, dlatego są tak istotne dla zapewnienia wysokiej jakości zasilania. Większość tych urządzeń ma konstrukcję izolowaną powietrzem zgodnie z normą DIN VDE 0101. Od ponad 40 lat możliwe jest również wykonywanie rozdzielnic WN w izolacji gazowej w zakniętych obudowach metalowych zgodnie z normą DIN VDE 62271 - część 203 (konstrukcja kompaktowa) oraz produkcja rozdzielnic o konstrukcji modułowej znanych jako rozdzielnice w technologii mieszanej (MTS) zgodnie z normą DIN VDE 62271 - część 205 (konstrukcja kombinowana lub hybrydowa - hybrid IS). Niezależnie od stosowanej konstrukcji rozdzielnic, podstacje elektroenergetyczne mają stosunkowo duże rozmiary. Dotyczy to również systemów uziemienia, które z reguły projektowane są jako siatki uziemiające o szerokości „oczek” około 10 m x 10 m. Po wykonaniu systemu uziemienia należy zgodnie z normą DIN VDE 0101 udowodnić, że jego projekt był zarówno właściwy, jak i prawidłowo wykonany. Dowody te opierają się na pomiarach i mogą obejmować określenie impedancji uziemienia, napięcia dotykowego rażeniowego i krokowego w istotnych punktach stacji.

Pierwszym krokiem podczas badania rozległych systemów uziemienia jest określenie impedancji uziemienia za pomocą dostępnych technik pomiarowych, przy czym metoda prądowo-napięciowa jest najczęściej stosowana. Polega ona na przyłożeniu elektrod źródła napięcia zmiennego pomiędzy badanym systemem uziemienia, a przeciwległym elementem uziemiającym oddalonym o co najmniej 5 km, wskutek czego, następuje wymuszenie w mierzonym systemie uziemienia przepływu prądu probierczego. Powoduje, to że na badanym systemie uziemiń dochodzi do pojawienia się mierzalnej straty napięcia. Zgodnie z normą DIN VDE 0101 wybrany prąd probierczy powinien być w miarę możliwości na tyle duży, aby mierzone napięcia (napięcia uziemienia i dotykowe w stosunku do prądu probierczego) były wyższe niż obecne napięcia zewnętrzne lub zakłócające. Z reguły można to zagwarantować przy prądach probierczych o wartości 50 A i więcej.

Podczas prób wyznaczania napięć uziomowych mierzone wartości mogą być niedokładne z powodu występowania napięć zakłócających, na przykład oddziaływanie pola elektromagnetycznego na obwód prądu probierczego (rys. 1).



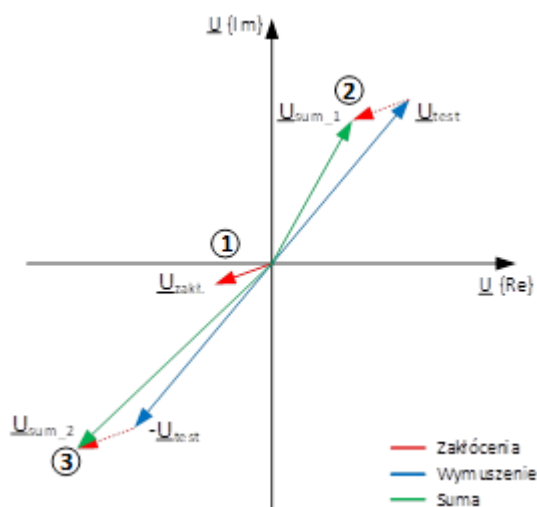
Rys. 1. Wpływ zakłóceń na pomiary system uziemień

Zakłócenia te muszą zostać wyeliminowane, aby zapewnić, że jedyną wielkością mierzoną jest sygnał odpowiadający zadanemu sygnałowi probierczemu (wymuszany prądu testu). Norma [3] opisuje m.in. dwa możliwe sposoby eliminacji zakłóceń tj.: metoda odwracania biegunowości (*ang. Polarity Reversal Method*) i metoda dudnieniowa (*ang. Beat Method*), które wykorzystują prądy testowe identyczne lub zbliżone do częstotliwości sieci. Alternatywną metodą eliminacji zakłóceń jest zastosowanie metody selektywnej częstotliwościowo (*ang. Frequency Selective Measurement*). W niniejszym artykule porównano proces pomiarowy z dwoma tradycyjnymi metodami zarówno z perspektywy metody pomiarowej, jak i pod względem ich praktycznego zastosowania.

### Metoda odwracania biegunowości (PRM)

Ogólna zasada działania metody PRM opiera się o wykonanie dwóch wymuszeń / pomiarów (rys.2):

- 1) mierzone jest wyłącznie napięcie zakłóceń  $U_{zakł.}$ .
- 2) Za pomocą transformatora probierczego wymuszany jest prąd testowy  $I_{test}$  o częstotliwości znamionowej 50 Hz. Ten prąd jest następnie nakładany na zakłócenia. Podczas pomiaru wymuszanego prądu i wynikającego z niego napięcia  $U_{test}$ , mierzona jest również superpozycja obejmująca wstrzykiwany prąd i zakłócenia.
- 3) Wymuszenie prądu probierczego o wartości amplitudy takiej samej jak w pkt. 2, lecz z odwróconą polaryzacją  $-I_{tes}$ . Następnie prąd i wynikające  $(-U_{test})$  z niego napięcie są ponownie określane jak przy pomiarze 2.



Rys. 2. Eliminacja zakłóceń za pomocą metody odwrotnej polaryzacji

Na podstawie otrzymanych wielkości wektorowych dla trzech opisanych przypadków (rys.2) wyznaczana jest wartość szukanego napięcia  $U_{uz.}$  z wyeliminowanym sygnałem zakłóceń, które jest spowodowane wyłącznie wymuszonym prądem, a nie sprzężeniem od zakłóceń  $U_{zakł.}$ .

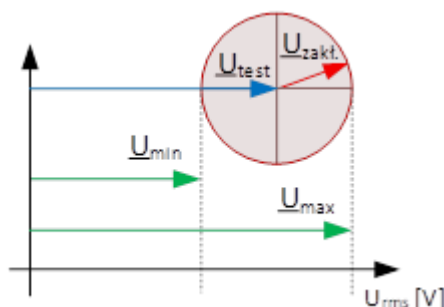
$$U_{uz.} = \sqrt{\frac{|U_{sum.1}^2| + |U_{sum.2}^2|}{2}} - |U_{zakł.}| \quad (1)$$

Przy tej metodzie można stosować konwencjonalne multimetry do pomiaru wartości skutecznej (RMS) napięcia i prądu bez związku z kątami.

### Metoda dudnieniowa (BM)

Podobnie jak w przypadku metody PRM, w pierwszej kolejności dokonywany jest pomiar napięcia zakłócenia  $U_{zakł.}$ . Następnie za pomocą agregatu prądotwórczego wymusza się przepływ prądu testowego o częstotliwości nieco innej niż częstotliwość znamionowa (50 Hz). Przy stałym wymuszeniu sygnału, superpozycja zakłóceń  $U_{zakł.}$  i straty napięcia  $U_{test}$  (powodowanej wymuszonym prądem testu) umożliwia określenie napięcia pomiarowego, uwzględniając eliminację zakłóceń (rys.3).

Napięcie i prąd mierzone są za pomocą konwencjonalnych multimetrów, tak jak w przypadku metody odwrócenia polaryzacji. "Dudnienie" powoduje, że wartości napięcia i prądu wahają się między wartością minimalną  $U_{min}$ , a maksymalną  $U_{max}$  (rys.3).



Rys. 3. Przykład eliminacja napięcia zakłóceń z pomiarów dla metody dudnieniowe

Ponieważ mierzona jest wartość dla zakłóceń i wymuszonego prądu, obie zmienne poddawane są dodawaniu wektorów zgodnie z metodą PRM. Wektor zakłóceń  $U_{zakł.}$  jest przedstawiany jako okrąg, ponieważ odchylenie częstotliwości powoduje stałe zmiany kąta. W ten sposób powstaje wartość minimalna  $U_{min}$  i maksymalna  $U_{max}$ . Napięcie  $U_{uz.}$ , wywołane przez prąd probierczy, jest równoważne średniej z  $U_{min}$  i  $U_{max}$ :

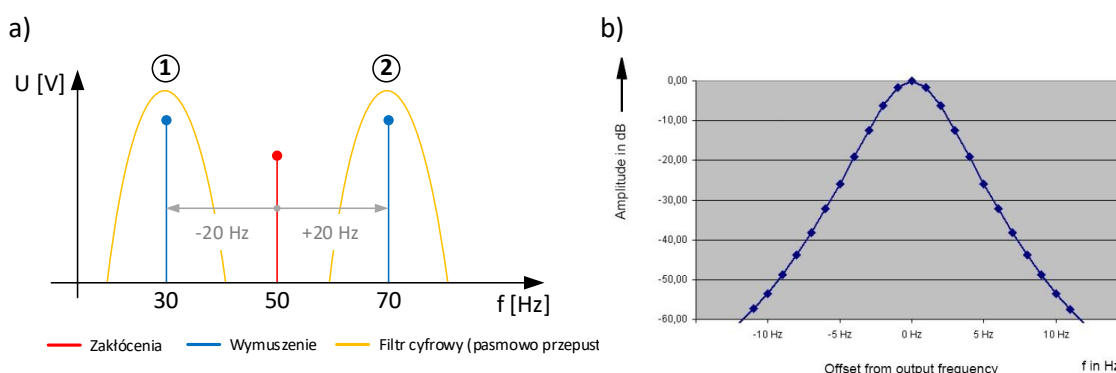
$$U_{uz.} = \frac{|U_{min}| + |U_{max}|}{2} \text{ dla } U_{max} > 2U_{zakł.}$$

$$U_{uz.} = \frac{|U_{min}| - |U_{max}|}{2} \text{ dla } U_{max} < 2U_{zakł.} \quad (1)$$

## Metoda selektywna częstotliwościowo (FSM)

W przypadku metody FSM, prąd testowy jest wymuszony za pomocą statycznej przetwornicy częstotliwości z częstotliwością inną ( $\pm 20$  Hz) niż częstotliwość znamionowa (50 Hz). W pierwszej kolejności wymuszony jest sygnał prądowy o częstotliwości 30 Hz, kolejno powtórne wymuszenie dla 70 Hz (rys. 4a). Napięcie i prąd są rejestrowane przy częstotliwości próbkowania 1 kHz, a następnie filtrowane cyfrowo przy częstotliwości wymuszanego sygnału.

Na rysunku 3b przedstawiono charakterystykę rzeczywistego filtra cyfrowego w urządzeniu CPC 100. Przy odchyleniu zaledwie 10 Hz od częstotliwości nominalnej, związana z tym składowa zakłóceń jest tłumiona o współczynnik  $-54$  dB = 0,002. W rezultacie, zakłócenia poniżej i powyżej częstotliwości testowej są skutecznie tłumione i dlatego nie mają znaczącego wpływu na pomiar, nawet jeśli stosowane prądy są mniejsze niż te związane z konwencjonalnymi metodami testowymi.

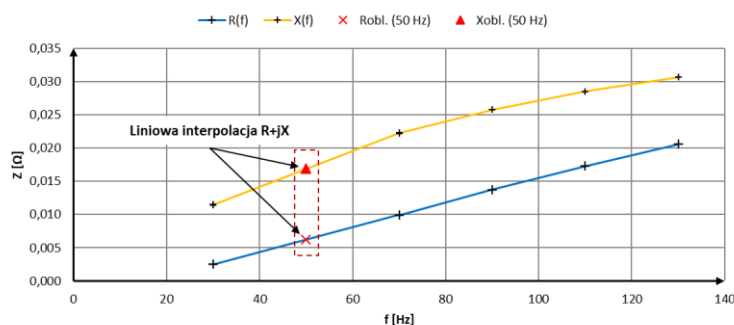


Rys. 4. a) Eliminacja zakłóceń z metodą selektywną częstotliwościowo, b) charakterystyka filtra pasmowo przepustowego urządzenia CPC 100

Na rysunku 5 przedstawiono przykład wyników pomiarów impedancji uziemienia dla danego punktu pomiarowego przy częstotliwościach 30, 70, 90, 110 i 130 Hz. Wyznaczona impedancja podzielona jest na składową rzeczywistą ( $R$  – rezystancja) i urojoną ( $jX$  – reaktancja).

Wartości rezystancji i reaktancji dla danego zakresu częstotliwości wykazują zależność liniową (rys.5), szczególnie w wąskim zakresie zmian częstotliwości tj.: 20 Hz. W związku z tym wartości wyznaczone przy częstotliwości innej niż nominalna (50 Hz) nie mogą być traktowane jako ostateczne wyniki.

Jednak wykorzystując zależność matematyczną interpolacji liniowej do wyników cząstkowych przy częstotliwości 30 i 70 Hz możliwe jest precyzyjne przybliżenie wartości szukanych dla częstotliwości 50 Hz (rys.5).



Rys. 5. Interpolacja liniowa składowych impedancji  $R+jX$  dla częstotliwości 50 Hz

Dokonując pomiarów wielkości zespolonych napięcia i prądu, wyznaczana jest impedancja zespolona dla każdej częstotliwości z osobna ( $n = 30, 70, 90, 10, 130$  Hz):

$$\underline{Z}_{n\_Hz} = \frac{U_{pom\_n\_Hz}}{I_{pom\_n\_Hz}} = R_{n\_Hz} + jX_{n\_Hz} \quad (1)$$

Następnie na bazie wyników pomiarów  $R_n + jX_n$  (dla  $n = 30$  i  $70$  Hz) oblicza się wartość  $\underline{Z}_{uz,50Hz}$ :

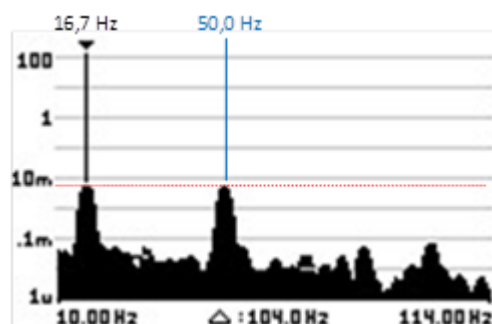
$$R_{50\_Hz} = \frac{R_{30\_Hz} + R_{70\_Hz}}{2}$$

$$X_{50\_Hz} = \frac{X_{30\_Hz} + X_{70\_Hz}}{2} \quad (1)$$

## Teoretyczne porównanie metod pomiarowych

### Zakłócenia przy częstotliwościach innych niż częstotliwość sieciowa

Widmo częstotliwości na rysunku 6 odpowiada napięciu pomiędzy dwoma sondami pomiarowymi wbitymi w glebę w odległości 2 m od siebie w bezpośrednim sąsiedztwie mierzonego uziemienia. Można zauważyć, że składowe zakłócenia występują nie tylko przy częstotliwości 50 Hz. Zakłócenia o podobnej amplitudzie występują również przy częstotliwości 16,7 Hz, która jest spowodowana przez system kolejowy.

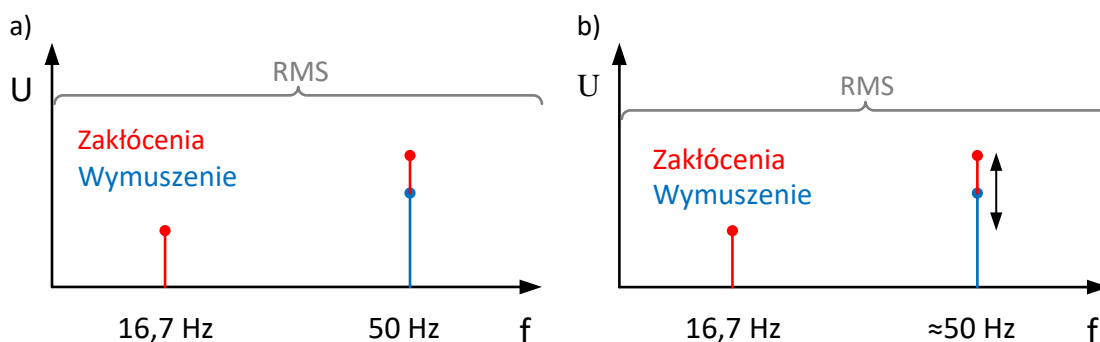


Rys. 6. Relevant frequency components for voltage in soil

Na rysunku 7a przedstawiono widmo częstotliwości dla metody odwracania biegunowości w warunkach zakłóceń (rys.6). Pomiar wartości skutecznej sygnału RMS uwzględnia sygnały o innej częstotliwości, w tym również 16,7 Hz. Jednak wykres wektorowy na rysunku 2 dotyczy tylko częstotliwości nominalnej 50 Hz. W związku z tym teoretycznie niemożliwe jest stłumienie składowych przy 16,7 Hz. Metoda odwrócenia polaryzacji wymaga zatem prądów probierczych o wartości od 50 A do 150 A, aby zagwarantować odpowiedni stosunek sygnału do zakłóceń.

Na rysunku 7b przedstawiono widmo częstotliwości dla metody odwrócenia polaryzacji w tych warunkach. Pomiar RMS uwzględnia również zakłócenia przy 16,7 Hz. Z teorii metody PRM wykres wektorowy na rysunku 2 dotyczy tylko częstotliwości nominalnej 50 Hz. W związku z tym teoretycznie niemożliwe jest stłumienie składowych przy 16,7 Hz. Metoda PRM wymaga zatem prądów probierczych o znaczących wartościach w zakresie od 50 A do 150 A, aby zagwarantować odpowiedni stosunek sygnału do zakłóceń.

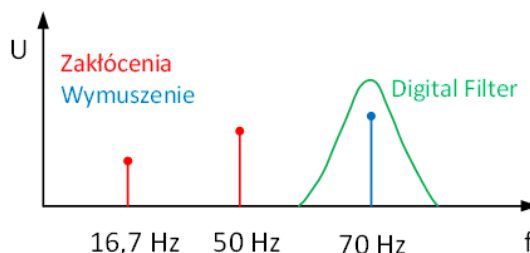




Rys. 7. Widmo częstotliwości sygnału pomiarowego dla metody a) PRM, b) BM

Podobnie jak w przypadku metody PRM, również dla BM teoretycznie niemożliwe jest stłumienie zakłóceń przy 16,7 Hz. Widoczne na multimetrze “dudnienie” odnosi się tylko do częstotliwości nominalnej. Zakłócenia przy 16,7 Hz będą więc stale zwiększać mierzoną wartość. Z tego powodu, podobnie jak w przypadku metody odwrócenia biegunowości, metoda BM wymaga również stosunkowo dużych prądów testowych dla skutecznego tłumienia zakłóceń.

Możliwe jest, przy użyciu filtrów cyfrowych stosowanych w metodzie FSM - i przy założeniu, że wybrano odpowiednią częstotliwość testową - tłumienie zakłóceń o częstotliwościach innych niż częstotliwość sieciowa (rys.8). Nawet przy częstotliwości testowej 30 Hz możliwe jest uzyskanie skutecznego tłumienia źródeł zakłóceń o częstotliwości 16,7 Hz.



Rys. 8. Widmo częstotliwości sygnału pomiarowego dla metody FSM

### Zakłócenia sporadyczne (zmienne)

Metoda PRM i BM wymagają, aby napięcia zewnętrzne i zakłócające pozostawały stałe. Wymóg ten nie dotyczy metody FSM, ponieważ zmienna zakłócenia jest eliminowana poprzez proces pomiarowy, a nie obliczeniowy. Zakłócenia przy 16,7 Hz mogą się zmieniać w ciągu sekundy w pobliżu linii kolejowych wykorzystujących tę częstotliwość.

### Częstotliwość sygnału pobierczego

Metody PRM i BM wykorzystują prąd testowy identyczny lub zbliżony do częstotliwości sieciowej. Dzięki temu wymagane wartości są pobierane bezpośrednio z danych pomiarowych i nie muszą być już przeliczane.

W przypadku metody FSM, typowo stosowane częstotliwości odbiegają od częstotliwości sieciowej o  $\pm 20$  Hz. Rysunek 5 ilustruje, jak impedancja dla punktu pomiarowego zmienia się wraz z częstotliwością. Pewien rodzaj zależności od częstotliwości wyraźnie istnieje, co oznacza, że wartość oparta na częstotliwości sieciowej może być określona poprzez interpolację liniową.

Można bezpiecznie założyć, że interpolacja liniowa ma zastosowanie w tym zakresie częstotliwości, ponieważ impedancja wykazuje liniowy wzór w stosunku do częstotliwości.

### **Dokumenty normatywne**

Załącznik L.4 do normy DIN EN 50522 (VDE 01012):2011-11 opisuje metody eliminacji sygnału zakłóceń z pomiarów. W przykładach użytych do zilustrowania tego zagadnienia zastosowano metody PRM i BM. Metoda FSM w obecnej wersji normy nie jest ujęta. Należy podkreślić, że metoda selektywna częstotliwościowo jest dopuszczalna; nie ma wymogu pokazywania wszystkich dopuszczalnych metod dla celów ilustracyjnych. Zalecany minimalny prąd testowy 50 A.

### **Zależności kątowe w wynikach pomiarów**

Ponieważ konwencjonalne multimetry są stosowane w metodach PRM i BM do pomiaru prądu i napięcia, niemożliwe jest w tym kontekście ustalenie zależności kątowej między napięciem i prądem. Można to jednak zrobić przy metodzie FSM z urządzeniem CPC 100 firmy OMICRON electronics GmbH.

### **Analiza porównawcza wyników pomiarów różnych metod**

W celu wykazania równoważności metod PRM, BM i FSM wykonano szereg pomiarów mających na celu porównanie uzyskanych wyników. W szczególności zmierzono i porównano w każdym przypadku spadek potencjału wokół systemu uziemienia oraz napięcia dotykowe w wyznaczonych punktach wewnątrz i na zewnątrz systemu.

Dołożono wszelkich starań, aby pomiary były wykonywane w tych samych warunkach dla ułatwienia odniesienia:

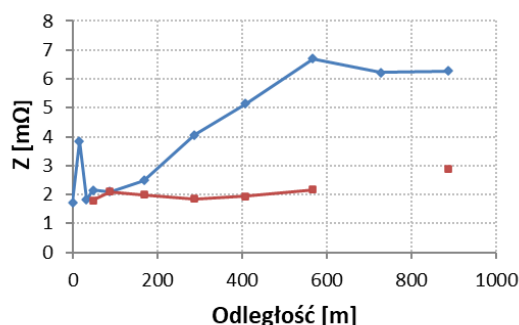
- Pomiary wykonano różnymi metodami, kolejno po sobie w tym samym dniu.
- Lokalizacja sondy prądowej niezmienna dla wszystkich metod.
- The probes used to measure the fall-of-potential were not removed between measurements.
- Uwzględniono taką samą wartość współczynnika redukcji.
- Pomiary napięć dotykowych (rażeńiowych) były dokonywane dla każdej metody z osobna. Lokalizacja płyty nożnej i sondy do pomiaru napięcia mogą się od siebie nieznacznie różnić.
- Napięcie dotykowe (rażeńiowe) jest odniesione do tego samego prądu zwarcia i współczynnika redukcji.

### **Studium przypadku 1: pomiar uziemienia w terenie zabudowanym (PRM - FSM)**

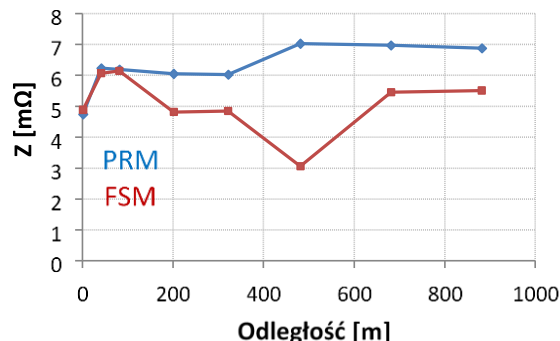
Na rysunkach 9a i 9b przedstawiono rozkład spadku napięcia dla dwóch różnych systemów uziemienia w obszarze zabudowanym. Wartości impedancji uziemienia, co jest typowe dla systemów zlokalizowanych w terenie zabudowanym, mieszczą się w zakresie jednocyfrowych wartości mΩ. Na wykresie 9a zaobserwowano niemalże identyczne wyniki dla punktów pomiarowych znajdujących się blisko systemu uziemienia. Wraz ze wzrostem odległości wyniki dla metody PRM stają się większe w porównaniu z wynikami metody FSM. Wyniki dla impedancji uziemienia (ostatni punkt) różnią się o współczynnik 2,18.

Podobnie niewielkie odchylenia między dwoma pomiarami dla punktów położonych blisko siebie zaobserwowano dla system uziemienia 2 (rys.9b). Punkt pomiarowy "500 m" z nieznanymi przyczynami nie zachowuje tego wzorca. Wyniki dla impedancji gruntu (ostatni punkt) różnią się o współczynnik 1,25

System 1



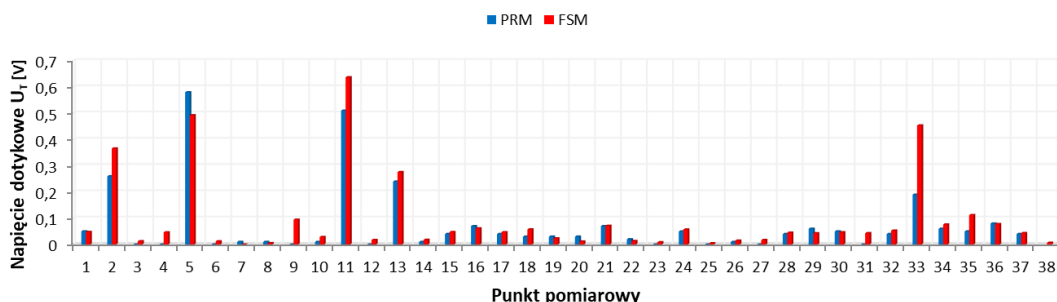
System 2



Rys. 9. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia  $Z=f(L)$  metodami PRM i FSM dla dwóch różnych systemów: a) system 1 i b) system 2 w obszarze zabudowanym.

Wykonano również porównawcze pomiary napięcia dotykowego (razeniowego) w układzie związanym z rysunkiem 8a. Wartości napięć dotykowych (rys.10) odnoszą się do maksymalnego prądu zwarcia doziemnego 436 A. Dopuszczalne napięcie dotykowe w tym przypadku wynosi 80 V.

Wyniki są bardzo podobne, biorąc pod uwagę, że oba sprawdzenia napięcia dotykowego zostały wykonane niezależnie od siebie.



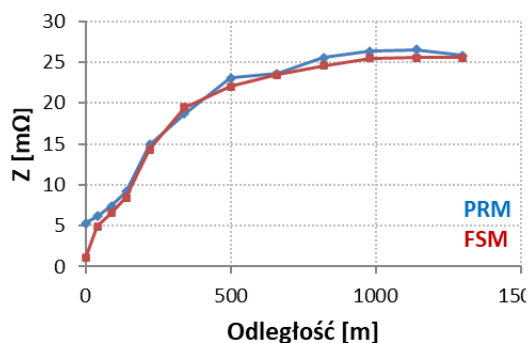
Rys. 10. Wyniki pomiarów napięcia dotykowego (razeniowego) metodami PRM i FSM dla dwóch różnych system uziemienia nr 1 w obszarze zabudowanym.

### Studium przypadku 2: pomiar uziemienia w obszarze otwartym

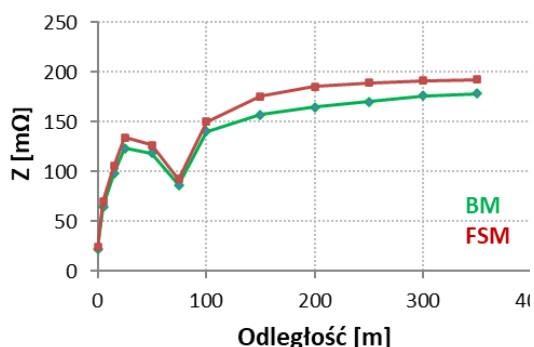
Na rysunku 11a przedstawiono rozkład impedancji system uziemienia 3 systemu zlokalizowanego na obszarze wiejskim (otwartym). Wyniki pomiarów metod PRM i FSM są ze sobą zbierne i wskazują na wartość impedancja uziemienia dla PRM = 25,7 mΩ oraz FSM = 25,6 mΩ.

W przypadku system uziemienia 4 (rys.11b) poziomy impedancji uziemienia wyznaczone dla metody BM i FSM różnią się o współczynnik 1,08 na odległości 350 m. Gwałtowne obniżenie impedancji na odcinku 75 m można przypisać wpływowi znacząco różnej rezystywności gruntu w tym miejscu zlokalizowanego wzdłuż odcinka pomiarowego.

System 3



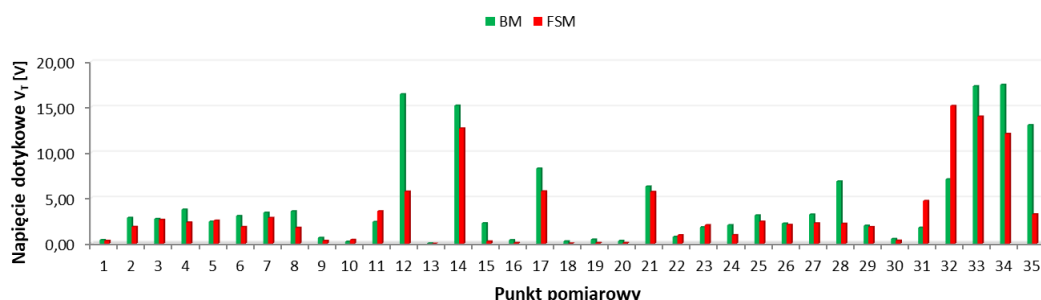
System 4



Rys. 11. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia  $Z=f(L)$  metodami PRM i BM dla dwóch różnych systemów: a) system 3 i b) system 4 w obszarze wiejskim.

Wykonano również porównawcze pomiary napięcia dotykowego (razeniowego) w układzie związanym z rysunkiem 11b. Wartości napięć dotykowych (rys.12) odnoszą się do maksymalnego prądu zwarcia doziemnego 1 061 A. Dopuszczalne napięcie dotykowe w tym przypadku wynosi 80 V.

Wyniki są bardzo podobne, biorąc pod uwagę, że oba sprawdzenia napięcia dotykowego zostały wykonane niezależnie od siebie.



Rys. 12. Wyniki pomiarów napięcia dotykowego (razeniowego) metodami PRM i BM dla dwóch różnych systemów: a) system 3 i b) system 4 w obszarze wiejskim.

## Podsumowanie

Przedstawione przypadki pomiarowe dla 4 różnych systemów uziemień z wykorzystaniem różnych metod wskazują na różnice wyników pomiarów impedancji uziemienia:

- największe dla systemów zlokalizowanych w obszarach zabudowanych,
- najmniejsze dla systemów w obszarach otwartych jak np. Wiejskich.

Wyniki pomiarów napięcia dotykowego razeniowego dla obu przedstawionych przypadków (rys.10 i 12) są ze sobą zbieżne w przypadku metod PRM, BM i FSM.

Pomiary z wykorzystaniem CPC 100 i CP CU1 stanowią wiarygodną alternatywę dla konwencjonalnych metod badawczych tj. PRM i BM. Niewielka masa całkowita wynosząca około

70 kg zapewnia dużą elastyczność. Zautomatyzowane przetwarzanie danych i możliwość tworzenia raportów z badań znacząco ułatwiają przeprowadzanie testów.

Na rysunku 6 składowa zakłóceń przy częstotliwości 16,7 Hz jest bardzo zbliżona do składowej 50 Hz. Należy przyjąć, że wpływ zakłóceń przy 16,7 Hz jest jeszcze bardziej wyraźny w bezpośrednim sąsiedztwie urządzeń kolejowych. Interesujące byłoby zatem wykonanie pomiarów w tym właśnie środowisku porównujących metodę FSM z metodami konwencjonalnymi (PRM i BM).

Szczególne podziękowania należą się DNV GL oraz firmom AMW Anlagen-Montagen Werder i E.dis za przygotowanie danych pomiarowych; bez nich niniejsza praca nie byłaby możliwa.

#### **Literatura**

- [1] Bräunlich, R.: Messtechnische Untersuchung von Erdungsanlagen in Hochspannungsschaltanlagen [A Measurement-based Investigation into Grounding Systems in Highvoltage Switchgear]. OMICRON User Meeting 2005; Friedrichshafen
- [2] EN 61936-1:2011: "Power Installations with a Rated AC Voltage above 1 kV"
- [3] EN 50522:2011: "Grounding of Power Installations with a Rated A Voltage above 1 kV"

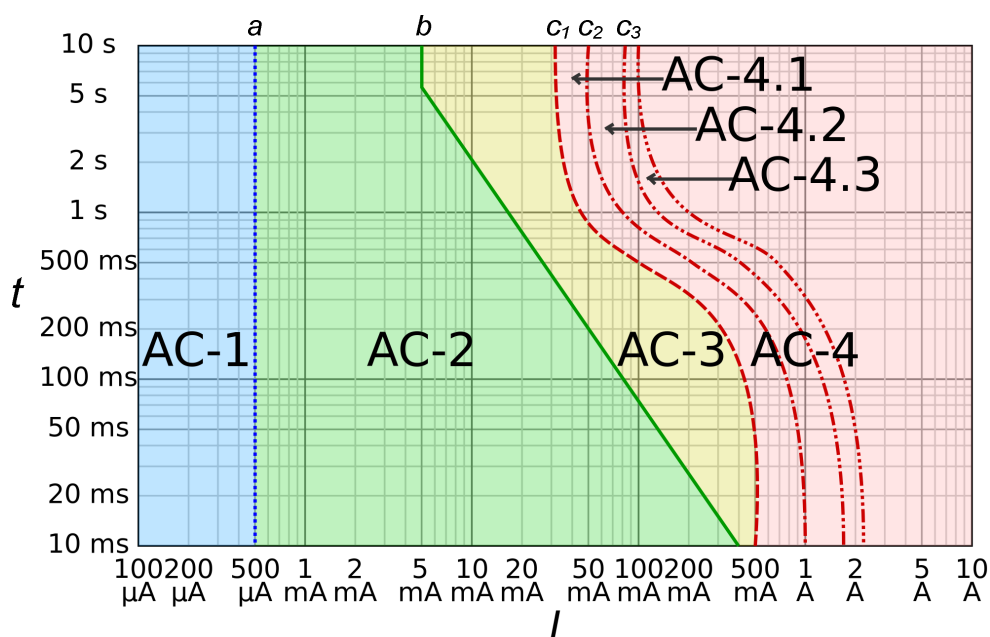
WYBRANE POMIARY SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZED PORAŻENIEM  
W SIECIACH I OBIEKTACH ELEKTROENERGETYCZNYCH W UJĘCIU PRAKTYCZNYM

Mirosław Kiełboń  
(Politechnika Śląska)

1. Wstęp

Problem ochrony przed porażeniem jest jednym z podstawowych problemów zapewnienia należytego bezpieczeństwa w ogólnie pojętej elektroenergetyce. Zagrożenia wynikłe z potencjalnych możliwości porażenia są bardzo niebezpieczne, ze względu na to, że nie mogą być w porę wykryte za pomocą zmysłów – przepływ prądu o wartości już kilkudziesięciu miliamperów przez organizm ludzki ma prawie zawsze skutki związane z bezpośrednim zagrożeniem życia lub zdrowia. Oczywiście istnieją przypadki przepływu prądu przez ciało ludzkie, które można uznać, jako „bezpieczne”, ale w praktyce takie przypadki nie występują w instalacjach i sieciach elektrycznych mających powszechne wykorzystanie, z wyjątkiem specjalnych instalacji o bardzo niskim napięciu SELV i PELV.

Korzystając z ogólnej zasady zapewnienia bezpieczeństwa („Część niebezpieczna nie powinna być dostępna a część dostępna nie powinna być niebezpieczna”), sformułowano zasady podstawowej ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym i wskazano środki do ich realizacji. Środki te są jednak niewystarczające ze względu na utrudnione wykrywanie potencjalnych zagrożeń porażeniem przy uszkodzeniu środków ochrony podstawowej, dlatego w elektroenergetyce istnieją również środki ochrony przy uszkodzeniu oraz środki ochrony uzupełniającej. Przy opracowywaniu środków ochrony kierowano się przy tym udowodnionymi medycznie skutkami przepływu prądu przez organizm ludzki (rys.1 i tab. 1)[6]



Rys. 1. Strefy czasowo-prądowe określające oddziaływanie prądu przemiennego 50 Hz na organizm człowieka wg [6]



**Tabela 1.** Strefy czasowo-prądowe wg rys. 1

Strefa	Granice strefy	Reakcja fizjologiczna
AC-1	do 0,5 mA (linia a)	– możliwe odczuwanie prądu, bez strachu
AC-2	powyżej 0,5 mA (między a i b)	– odczuwanie przepływu, – niekontrolowane skurcze mięśni, bez szkodliwych działań fizjologicznych
AC-3	między b i $c_1$	– silne niekontrolowane skurcze mięśni, – trudności w oddychaniu, – odwracalne zakłócenia pracy serca, – oddziaływania narastające wraz z czasem przepływu prądu, – nie występują jeszcze uszkodzenia w organizmie
AC-4	poza linią $c_1$	mogą wystąpić oddziaływania fizjologiczne, jak: – zatrzymanie pracy serca, – zatrzymanie oddechu lub inne uszkodzenia; prawdopodobieństwo fibrylacji (migotania) serca narasta wraz z natężeniem prądu i czasem przepływu
	$c_1 - c_2$	AC – 4.1 wzrost prawdopodobieństwa do 5% (linia $c_2$ )
	$c_2 - c_3$	AC – 4.2 wzrost prawdopodobieństwa do 50% (linia $c_3$ )
	poza $c_3$	AC – 4.3 prawdopodobieństwo fibrylacji powyżej 50%
Przy czasach przepływu prądu poniżej 200 ms migotanie komórek występuje tylko wtedy, gdy moment rozpoczęcia przepływu prądu trafi w szczególną fazę wrażliwą cyklu pracy serca.		

Jak widać z rys. 1 i tab. 1, skutki działania prądu na organizm ludzki zależą od wartości prądu i czasu jego przepływu przez człowieka. O ile, ze względu na stosowane zabezpieczenia, czas przepływu prądu jest możliwy do przewidzenia, o tyle rzeczywistą wartość prądu rażeniowego trudno jest obliczyć lub oszacować, a tym bardziej zmierzyć. Wynika to z indywidualnych właściwości ciała ludzkiego i często bardzo różnych warunków środowiskowych, w jakich może nastąpić porażenie. Dlatego zamiast prądowego kryterium oceny stopnia zagrożenia porażeniem, stosuje się kryteria napięciowe lub inne, jako bardziej praktyczne przy pomiarach skuteczności ochrony.

Zatem przy pomiarach sprawdzających skuteczność działania ochrony przed porażeniem sprawdza się następujące wielkości elektryczne:

- napięcia (mogą to być napięcia dotykowe lub napięcia uziomowe);
- rezystancje lub impedancje (w zależności od rodzaju ochrony mogą to być rezystancje lub impedancje uziemień, przewodów ochronnych, pętli zwarcia, ale także izolacji);
- w niektórych przypadkach prądy (np. próba działania wyłącznika różnicowoprądowego).

W niniejszym referacie przedstawiono podejście do pomiarów w ujęciu praktycznym, nierzadko pomijanym przy opisach pomiarów. Skupiono się na:

- pomiarach rezystancji uziemień;
- pomiarach napięć dotykowych.

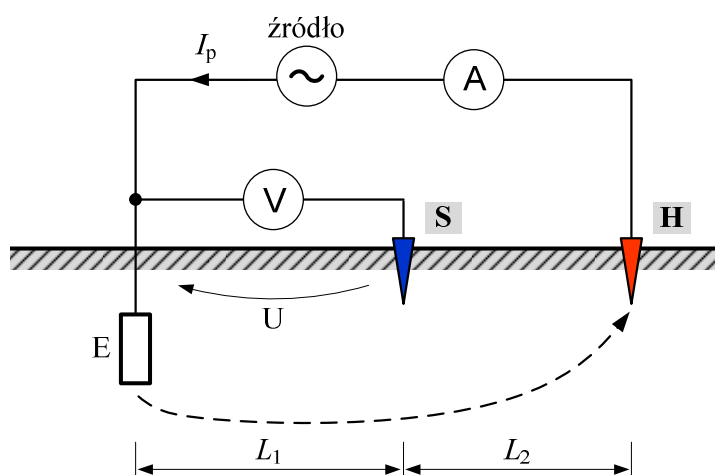
Inne pomiary, jako powszechnie znane i nie wymagające dużych modyfikacji przy przeprowadzaniu ich w obiektach elektroenergetycznych, nie są przedmiotem rozważań, aczkolwiek należy o nich wspomnieć jako o części kompleksowych badań środków ochrony przed porażeniem.

## 2. Metody pomiarowe przydatne przy sprawdzaniu skuteczności ochrony przed porażeniem – wiadomości ogólne

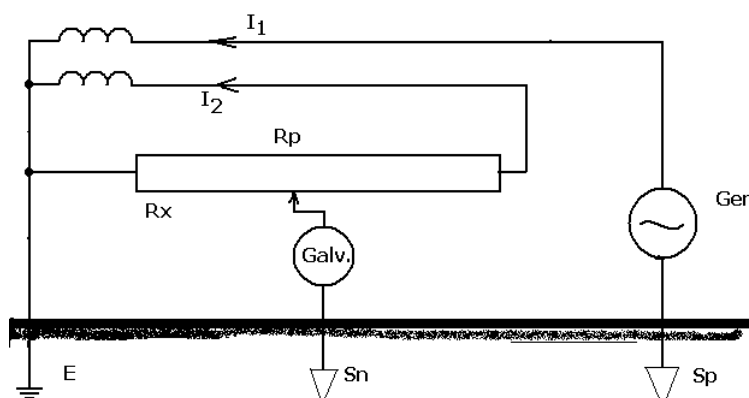
### 2.1. Metody bazujące na pomiarach rezystancji i rezystywności

Wśród metod pomiarowych służących sprawdzaniu skuteczności ochrony przed porażeniem, najwięcej uwagi w literaturze poświęca się metodom **pomiaru rezystancji uziemień**. Jest to spowodowane tym, że pomiar ma zastosowanie w obiektach o praktycznie każdym rodzaju napięcia (oczywiście w różnych obiektach jest stosowany do oceny różnych właściwości elementów ochrony przed porażeniem, niekoniecznie do ostatecznej oceny jej skuteczności).

Główną ideą metody pomiaru jest wywołanie sztucznego przepływu prądu pomiarowego przez badany układ uziemiający, a następnie zbadanie, jaki spadek napięcia występuje pomiędzy układem uziemiającym a tzw. ziemią odniesienia. Napięcie to można zmierzyć bezpośrednio lub metodą kompensacyjną. Ideę obu pomiarów przedstawiają rysunki 2 i 3.



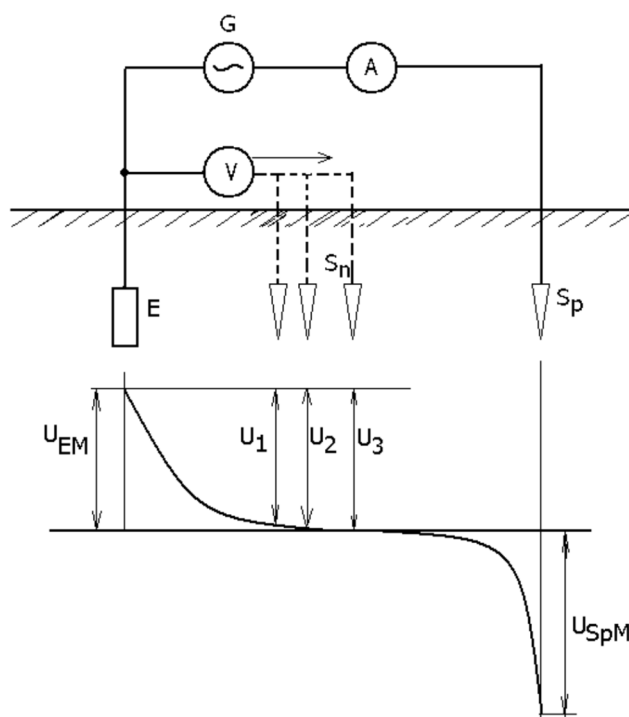
**Rys. 2.** Zasada pomiaru rezystancji uziemienia metodą techniczną: E – badany uziom, S – sonda napięciowa, H – sonda prądowa, A – amperomierz, V – woltomierz,  $I_p$  – prąd pomiarowy



**Rys. 3.** Zasada pomiaru rezystancji uziemienia metodą kompensacyjną: E – badany uziom, Sn – sonda napięciowa (S), Sp – sonda prądowa (H), Galv – galwanometr, Gen – źródło prądu,  $I_1, I_2$  – prądy pomiarowe,  $R_p$  – rezystor pomocniczy

Popularne dedykowane przyrządy pomiarowe obecnej generacji wykorzystują metodę techniczną. Ważną kwestią jest wartość wymuszanego prądu oraz rezystancja wewnętrzna woltomierza do pomiaru napięcia lub ustroju wewnątrz dedykowanego miernika służącego do tego pomiaru.

Równie ważną kwestią (o ile nawet nie ważniejszą) jest prawidłowe umieszczenie elektrod w gruncie oraz prawidłowa odległość pomiędzy elektrodami tak, aby mierzony był rzeczywisty spadek napięcia na rezystancji uziemienia. Nastąpi to, kiedy sonda (elektroda) napięciowa umieszczona jest w tzw. strefie zerowego potencjału, którą przed pomiarem należy znaleźć doświadczalnie. Im większa odległość pomiędzy badanym uziemieniem, a sondą (elektrodą) prądową, tym znalezienie strefy zerowego potencjału jest łatwiejsze. Ilustruje to rys. 4. Poprawny pomiar wymaga, aby elektrody napięciowa i prądowa, a także przewody pomiarowe posiadały odpowiednie parametry (odpowiednio niska rezystancja własna uziomu pomiarowego tworzonego przez elektrodę, rezystancja przewodów pomiarowych pomijalnie mała w stosunku do rezystancji badanego uziomu, odpowiednia izolacja wzajemna i doziemna przewodów pomiarowych), a także aby zachowane były odpowiednich odległości  $L_1$  i  $L_2$  elektrod względem badanego uziemienia oraz względem siebie. Przy pomiarach specjalistycznymi przyrządami odległość sondy napięciowej od uziomu badanego ( $L_1$ ) powinna być co najmniej 2,5 razy większa od największego wymiaru terenu zajętego przez układ uziomowy (odniesiona do kierunku pomiaru), ale nie mniejsza niż 20 m, zaś odległość sondy prądowej ( $L_1+L_2$ ) – co najmniej czterokrotnie większa od największego wymiaru terenu zajętego przez uziom, ale nie mniejsza niż 40 m. Zatem dystanse 20m i 40m mogą być standardem przy układach uziemiających o niewielkich wymiarach, natomiast dla uziemień rozległych każdorazowo wymaga się indywidualnego podejścia do rozstawienia elektrod.



**Rys. 4.** Przykładowy rozkład napięcia na powierzchni gruntu i ilustracja poszukiwania strefy potencjału zerowego (ziemi odniesienia)

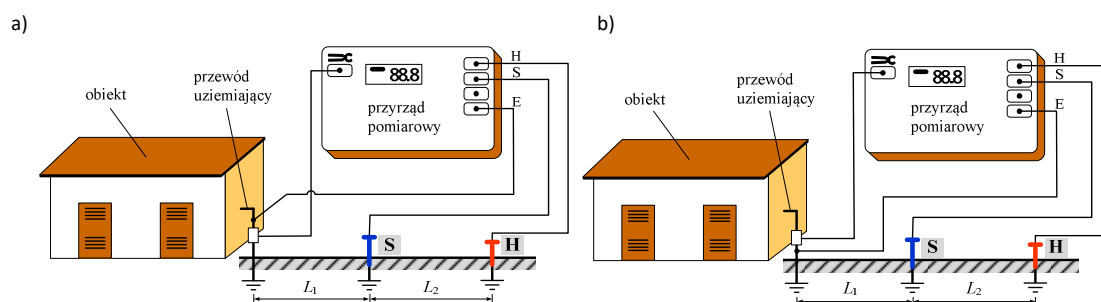
$S_p$  – sonda (elektroda) prądowa,  $S_n$  – sonda napięciowa,  $U_{EM}$  – napięcie uziomowe,  $U_{SpM}$  – spadek napięcia na elektrodzie prądowej

Metoda z użyciem elektrody (sondy) prądowej i napięciowej często nazywana jest „metodą 3p”. W zależności od zadania, jakie trzeba zrealizować przy ocenie ochrony, istnieją też inne odmiany tej metody:

- metoda „4p” (z wykorzystaniem czterech zacisków przyrządu w celu ograniczenia błędu spowodowanego spadkiem napięcia na przewodach pomiarowych, często nazwę tą stosuje się również do metody pomiaru rezystywności gruntu, choć idea wykonania tego pomiaru jest inna);
- metody z wykorzystaniem indukcyjnego pomiaru prądu lub indukcyjnego wymuszenia i pomiaru prądu(prądów), zwane „metodami cęgowymi”.

Podczas pomiarów wybór metody jest bardzo istotny zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

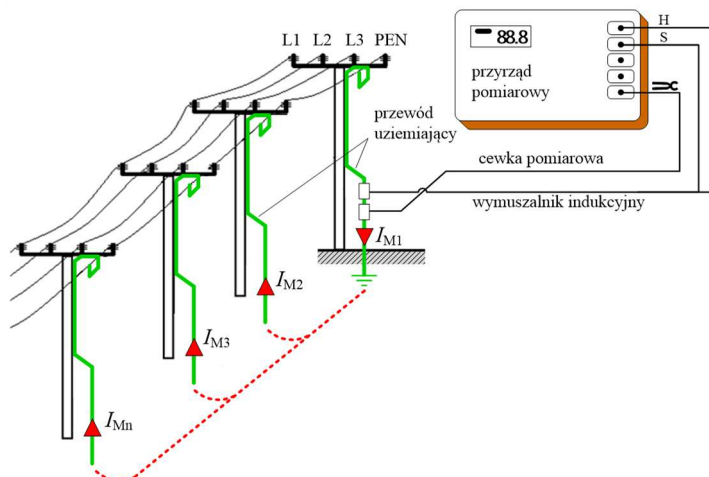
Metody z użyciem z użyciem indukcyjnego pomiaru prądu lub indukcyjnego wymuszenia i pomiaru wymagają dodatkowego omówienia. Wśród nich można wyróżnić tzw. metodę „jednocęgową”, „wielocęgową” oraz „dwucęgową”. Ideę stosowania tych metod przedstawiają rysunki 5, 6 i 7.



Rys. 5. Metoda pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem indukcyjnego pomiaru prądu „jednocęgową”

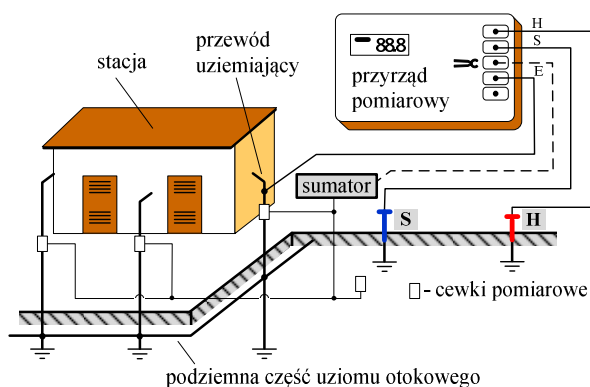
Metoda „jednocęgową” oparta jest o taki sam obwód pomiarowy (układ: wymuszenie, elektroda prądowa, elektroda napięciowa), jak metoda techniczna. Ze względu jednak na dodatkowe wyposażenie miernika w przystawkę do indukcyjnego pomiaru prądu („cęgi”) możliwy jest pomiar prądu w wybranej gałęzi obwodu pomiarowego. Na rys. 5. widoczna jest sytuacja pomiaru rezystancji uziemienia obiektu elektroenergetycznego przy założeniu, że jego uziom jest połączony z uziomami innych obiektów np. za pośrednictwem przewodów PEN linii nn. W takiej sytuacji prąd pomiarowy, wymuszony przez przyrząd, wpływa do układu uziemiającego obiektu i rozptywa się w kierunku ziemi i w kierunku innych obiektów uziemionych (za pośrednictwem np. przewodu PEN). Wyselekcjonowanie części prądu pomiarowego przepływającego wyłącznie przez badany uziom i ziemię, pozwala na pomiar rezystancji właśnie tego uziomu. Można również mierzyć rezystancję wypadkową wszystkich pozostałych uziomów w innych obiektach, odpowiednio umieszczając cewkę pomiarową („cęgi”, rys 5b)).

Metoda „dwucęgową” wykorzystuje również metodę techniczną, za jej pośrednictwem da się jednak mierzyć wyłącznie rezystancje pętli, zarówno zawierających uziomy, jak i metalicznych. Metoda (rys. 6) może być używana jedynie w przypadku, gdy takie pętle w układzie istnieją. Dodatkowo, aby uzyskać wyniki pomiarowe obarczone odpowiednio małym błędem, musi być zapewniona prawidłowa konfiguracja i liczba uziemień – jeśli uziemień w mierzonym układzie jest mało, rośnie błąd pomiarowy.



**Rys. 6.** Metoda pomiaru rezystancji uziemienia wykorzystująca indukcyjny pomiar i indukcyjne wymuszenie prądu:  $I_{M1}$  – prąd pomiarowy wymuszony na drodze indukcyjnej, płynący przez badany układ uziemiający,  $I_{M2}$ –  $I_{Mn}$  – prądy powrotne przepływające przez układy uziemiające obiektów sąsiadujących z badanym

Metoda „wielocęgowa” jest podobna do metody „jednocęgowej”, tzn. korzysta z bezpośredniego (nie indukowanego) wymuszenia oraz większej ilości cewek pomiarowych jednocześnie. Przeład ponadto zapewnia geometryczne sumowanie sygnałów z cewek. Zapewnia to otrzymywanie informacji o części prądu pomiarowego, który sływa do ziemi wieloma drogami (wieloma gałęziami układu uziemiającego) jednocześnie. A to z kolei powoduje możliwość pomiaru rezystancji takiego skomplikowanego układu uziemiającego bez rozłączania jego zacisków kontrolnych, co stanowi największą zaletę tej metody.



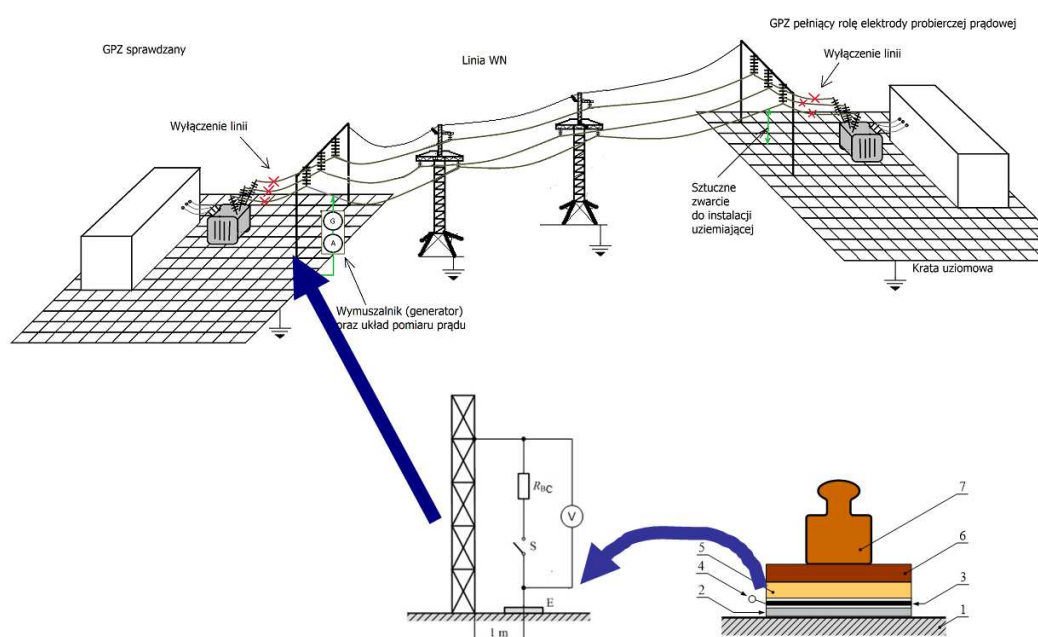
**Rys. 7.** Ilustracja metody „wielocęgowej” pomiaru rezystancji uziemienia niewielkiego obiektu elektroenergetycznego

Uzupełniającymi i pomocniczymi metodami pomiarowymi stosowanymi przy badaniach ochrony przed porażeniem, bazującymi na wielkościach rezystancyjnych, są metody pomiaru rezystywności gruntu, rezystancji izolacji, rezystancji lub impedancji pętli zwarcia oraz pomiar ciągłości różnego rodzaju przewodów i elementów składających się na system ochrony przed porażeniem w obiekcie (np. ciągłość profili stalowych układanych w gruncie dla wyrównania potencjału). Metody pomiarowe stosowane przy tych pomiarach są typowe i dlatego nie będą omawiane w artykule, z wyjątkiem pomiaru ciągłości przewodów uziemiających w konkretnych, wybranych przypadkach.

## 2.2. Metody bazujące na pomiarach napięć

Metody bazujące na pomiarach napięć stosuje się głównie przy badaniu ochrony przed porażeniem w obiektach o bardzo rozległych układach uziemiających. Mogą to być zarówno pomiary w obiektach wysokiego napięcia, jak i pomiary kontrolne specjalne, np. potwierdzenie istnienia obszaru zespolonej instalacji uziemiającej. Metody te mogą służyć zarówno do określania napięć dotykowych (spodziewanych i rażeniowych), jak i napięć uziomowych (co z kolei czyni je przydatnymi do określania impedancji lub rezystancji rozległych układów uziemiających).

Pomiary napięć dotykowych – spodziewanych, rażeniowych i uziomowych mogą opierać się na wykorzystaniu metody technicznej oraz dedykowanych przyrządów. Ideę takiej metody pomiaru na przykładzie pomiaru napięć dotykowych rażeniowych w stacji wysokiego napięcia, przedstawiono na rys. 8.



**Rys. 8.** Pomiar napięć dotykowych na stacji wysokiego napięcia z wykorzystaniem wieloprądowej metody technicznej i elektrody odwzorowującej zestaw stopy człowieka z ziemią: 1 – stanowisko, 2 – guma przewodząca, 3 – folia metalowa, 4 – zacisk elektrody, 5 – filc, 6 – płyta izolacyjna, 7 – obciążenie

Ze względu na stosowanie metody do pomiarów sprawdzających przy uziomach o bardzo dużych wymiarach, odległość elektrody prądowej od badanego układu uziemiającego powinna być możliwie duża (normy zalecają odległości 1-5km). Ponadto wymaga się wymuszenia dużego prądu probierczego (wg normy [3] prąd probierczy powinien mieć wartość co najmniej 50 A i często uzyskanie tej wartości jest trudne). Zarówno duża odległość elektrod, jak i wymóg stosowania dużego prądu pomiarowego wymuszają stosowanie do pomiarów wymuszalników znacznej mocy oraz bardzo długich przewodów pomiarowych, dlatego w praktyce można wykorzystywać wyłączoną na czas pomiaru linię WN lub SN. Rodzi to oczywiście określone problemy organizacyjne.

Proporcjonalnie do odległości sondy prądowej od badanego uziemienia, należy umieścić – w przypadku chęci pomiaru napięcia uziomowego – sondę napięciową i znaleźć strefę potencjału



zerowego. Jest to organizacyjnie bardzo trudne, dlatego częściej wykonuje się pomiary napięć dotykowych, które w stosunku do układu pomiarowego stawiają łagodniejsze wymagania.

### 3. Trudności występujące przy praktycznej realizacji pomiarów

#### 3.1. Klasyfikacja pomiarów w zależności od sprawdzanego obiektu elektroenergetycznego

Opisując w rozdziale 2 metody pomiarowe, przydatne do sprawdzania ochrony przed porażeniem, przy opisie niektórych z nich podano informację o bezpośrednim ich przeznaczeniu. Kontynuując to zagadnienie, można stworzyć zestawienie, w jakim obiekcie dana metoda pomiarowa jest przydatna i w jakim celu. Zestawienie takie przedstawia tabela 2.

**Tabela 2.** Zestawienie wybranych rodzajów pomiarów i trudności przy ich realizacji w obiektach elektroenergetycznych

Typ obiektu	Pomiary wykonywane w celu sprawdzania ochrony przed porażeniem	Metody pomiarowe	Przewidywane trudności w realizacji	
Stacja SN/nn*	Pomiar rezystancji izolacji w obwodach potrzeb własnych	Bezpośrednio dedykowanym przyrządem	Trudność przygotowania stanowisk (wyłączenie i możliwy częściowy demontaż instalacji potrz.wł.)	
	Pomiar impedancji pętli zwarcia	Bezpośrednio dedykowanym przyrządem	-	
	Pomiar rezystancji uziemienia	Małoprądowa metoda techniczna „3p” – Wynik - $R_B$ ( $R_s$ , jeśli zaciski kontrolne uziemienia rozpięte)		Trudność znalezienia strefy potencjału zerowego, możliwe problemy z wbijaniem sond (utwardzony lub niedostępny teren)
		Małoprądowa metoda „wielocęgowa” lub z miękka cewką Rogowskiego – wynik - $R_s$		Jak wyżej
	Pomiar napięć dotykowych	Metoda techniczna lub przyrząd dedykowany z linią pomiarową ze szpuli		Trudność uzyskania odpowiedniej wartości prądu pomiarowego, problemy ze znalezieniem miejsca na sondę prądową
	Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających	Małoprądowa „jednocęgowa” metoda pomiaru R		W zależności od konfiguracji uziomu prąd pomiarowy może powodować przekroczenia limitu błędu miernika (fałszywa nieciągłość)
Małoprądowa „dwucęgowa” metoda pomiaru R			Konieczność upewnienia się o istnieniu naturalnej pętli pomiarowej (metalicznej lub złożonej z kilku układów uziemiających)	
Słup nn (linia nn)*	Pomiar impedancji pętli zwarcia	Bezpośrednio dedykowanym przyrządem, przyrządem uniwersalnym lub metodą techniczna	-	
	Pomiar rezystancji uziemienia	Pomiar $R_B$ – dedykowany przyrząd realizujący metodę „3p”	Jak dla stacji SN/nn	
		Pomiar $R_{Bi}$ – dedykowany przyrząd realizujący metodę jednocęgową lub dwucęgową	Duży błąd pomiarowy w metodzie jednocęgowej, możliwość istnienia pętli metalicznych fałszujących pomiar metodą „dwucęgową”	
	Pomiar lub obliczenie rezystancji grupy uziemień	Pomiar $R_{BK}$ metodą jednocęgową	Duży błąd pomiarowy, jeśli rezystancja uziemienia stacji transformatorowej jest mała w stosunku do $R_{BK}$	
Słup nn (linia nn)*	Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających	Małoprądowa „jednocęgowa” metoda pomiaru R	W zależności od konfiguracji uziomu prąd pomiarowy może powodować przekroczenia limitu błędu miernika (fałszywa nieciągłość)	

		Małoprądowa „dwucęgowa” metoda pomiaru R lub metoda „3p”	W niektórych przypadkach metoda dwucęgowa niemożliwa do stosowania
Słup SN* lub dwunapięciowy SN/nn	Pomiar rezystancji uziemienia	Pomiar $R_E$ – dedykowany przyrząd realizujący metodę „3p” lub „wielocęgową”	Jak dla stacji SN/nn i/lub słupa nn
Obiekty SN/nn na obszarze zespolonej instalacji uziemiającej	Pomiar ciągłości przewodów uziemiających	Pomiary R metodami „cęgowymi”	Trudności z wbijaniem elektrod
Obiekty stacyjne WN	Pomiar napięć dotykowych	Metoda techniczna lub przyrząd dedykowany z wykorzystaniem linii przesyłowej jako linii pomiarowej	Trudność uzyskania odpowiedniej wartości prądu pomiarowego, konieczność znajomości współczynników redukcyjnych linii
	Pomiar impedancji lub rezystancji układu uziemiającego	Jak wyżej	Jak wyżej, dodatkowy problem z długością linii pomiarowej do sondy napięciowej
	Pomiar ciągłości przewodów uziemiających i sprawdzenie spójności kraty uziomowej	Metody małoprądowe pomiaru R z wykorzystaniem cęgów lub metody pomiaru rezystancji pomiędzy parą punktów pomiarowych z użyciem np. mostka	Rozpoznawanie pętli metalicznych i właściwa interpretacja wyników
Słup WN	Pomiar napięć dotykowych	Metoda techniczna lub przyrząd dedykowany z wykorzystaniem linii pomiarowej rozwijanej ze szpuli	Trudność uzyskania odpowiedniej wartości prądu pomiarowego, odpowiednio długa linia pomiarowa, trudności z wbijaniem elektrod
	Pomiar rezystancji uziemienia słupa	Metoda techniczna lub przyrząd dedykowany z wykorzystaniem linii pomiarowej rozwijanej ze szpuli	Trudności z umieszczaniem elektrod pomiarowych ze względu na dostępność terenu
	Pomiar ciągłości przewodów uziemiających	Pomiary R metodami „cęgowymi”	Jak wyżej
Wszystkie	Pomiar rezystywności gruntu	Pomiar dedykowanym przyrządem	W zależności od użytych elektrod, problem z uzyskaniem miejsca pod układ pomiarowy lub problem związany z uzyskaniem należytej dokładności

\*) na obszarach poza zespoloną instalacją uziemiającą

Z tabeli wynika, że najczęściej występujące problemy podczas pomiarów wiążą się z znalezieniem odpowiedniego terenu, nadającego się do rozwinięcia układu pomiarowego, z wyznaczeniem strefy zerowego potencjału oraz z poprawnie zidentyfikowanym i zmierzonym prądem pomiarowym w skomplikowanych układach uziemiających posiadających wiele przewodów uziemiających. Niektóre z tych problemów można w praktyce skutecznie eliminować.

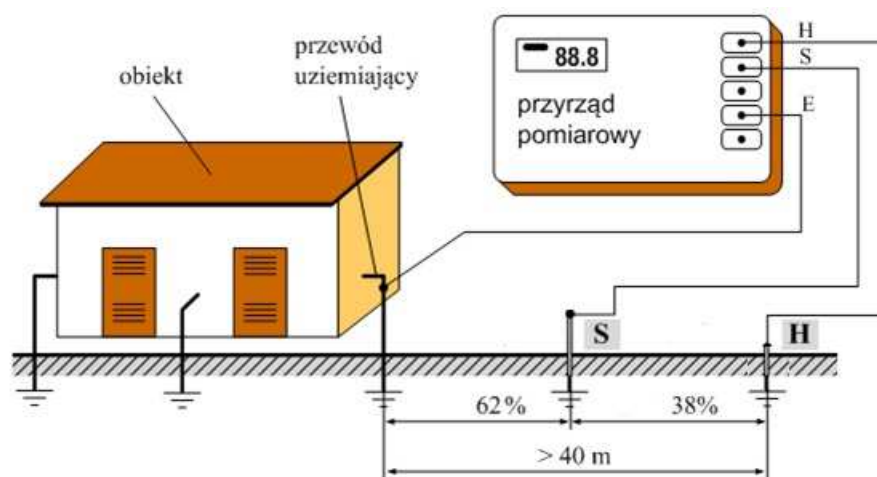
### 3.2. Wybrane przykłady praktycznej realizacji pomiarów w przypadkach wystąpienia organizacyjnych trudności pomiarowych

W przypadkach, w których pomiar wykonywany ściśle według zapisów normatywnych jest niemożliwy, można podjąć próbę zastąpienia takiego pomiaru innym, np. mniej dokładnym, pod warunkiem jednak, że uzyskane w ten sposób wyniki są równoważne wynikom uzyskiwanym na drodze pomiaru podstawowego. Nie oznacza to oczywiście, że wartości uzyskanych w ten sposób wyników muszą być identyczne jak przy pomiarze podstawowym, jednakże należy uzyskać pewność, że błąd pomiarowy popełniony przy użyciu metody zastępczej, jest błędem

„w bezpiecznym kierunku”, to znaczy, jeżeli przy pomiarze z tym błędem skuteczność ochrony przed porażeniem zostaje osiągnięta, to jednocześnie istnieje pewność, że w normatywnych warunkach pomiarowych tym bardziej ta skuteczność będzie osiągnięta. Przykładem może być pomiar rezystancji uziemienia bez wyznaczania strefy zerowego potencjału. Przy odpowiednio dużym oddaleniu sondy napięciowej od badanego uziomu uzyskany wynik będzie na pewno większy niż rzeczywista rezystancja uziemienia badanego, zatem jeśli wynik ten wykaże skuteczność działania ochrony przed porażeniem, to rzeczywista wartość rezystancji tym bardziej będzie wystarczająca, aby zapewnić tą skuteczność.

Stąd w wielu poradnikach dotyczących pomiarów rezystancji uziemień funkcjonuje pojęcie „reguła 62%”, według którego, umieszczenie elektrody napięciowej w odległości 62% całkowitej odległości pomiędzy elektrodą prądową, a badanym uziomem, daje już wystarczającą dozę pewności, że pomiar jest pomiarem poprawnym lub na tyle zawyżonym, że nie ma obaw, co do fałszywego wniosku dotyczącego skuteczności ochrony przed porażeniem (rys. 9.).

W dokumencie [6] nie zaleca się jednak stosowania tej reguły powszechnie, ponieważ traci się w ten sposób informacje o ew. obecności przedmiotów metalowych w ziemi, a także nie optymalizuje się dokładności pomiaru. Można ją natomiast wykorzystać wtedy, kiedy umieszczenie dedykowanych elektrod pomiarowych w ziemi w ściśle wyznaczonych miejscach jest niemożliwe.

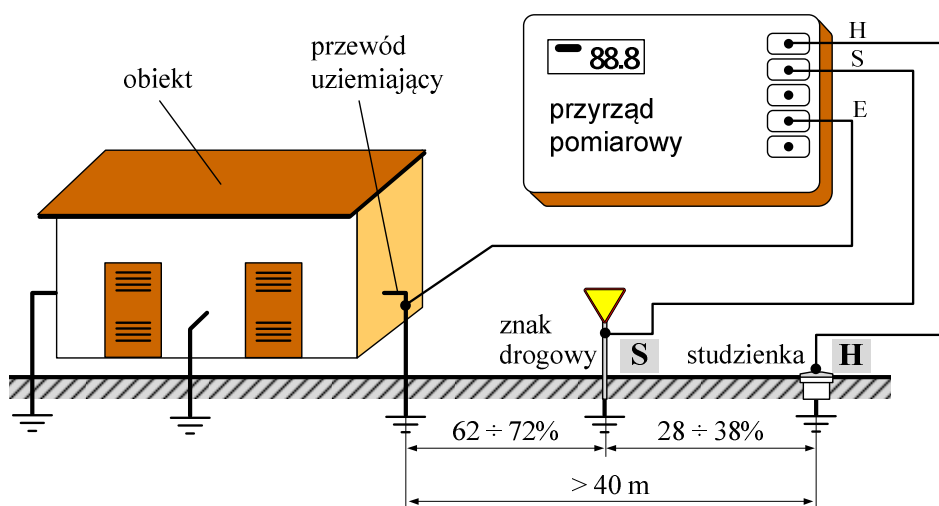


Rys. 9. Reguła 62%

### 3.2.1. Pomiary rezystancji uziemienia w przypadku braku możliwości wyznaczenia strefy zerowego potencjału

Przypadek braku możliwości wyznaczania strefy zerowego potencjału przy pomiarach rezystancji uziemień może występować dość powszechnie. Obecnie obiekty elektroenergetyczne mogą być lokalizowane w obszarach, w których otoczenie tego typu obiektów jest wyasfaltowane lub wybetonowane, a wbicie sond pomiarowych wiąże się ze zniszczeniem podłoża. Pomiar rezystancji uziemienia daje się wówczas przeprowadzić przy wykorzystaniu metody pomiarowej „dwucęgowej” lub reguły 62%, opisanej w p. 3.2. Metoda „dwucęgowa” nie wymaga wyznaczania strefy zerowego potencjału, natomiast jest możliwa do zastosowania tylko w określonych przypadkach (rys. 6).

Badany uziom musi być częścią układu, w skład którego wchodzi dodatkowe uziomy włączone do układu równolegle. Pomiar obarczony jest błędem tym większym, im większa jest zastępcza rezystancja uziomów, wykorzystywanych jako pętla zwrotna prądu pomiarowego. Wykorzystanie reguły 62% natomiast, umożliwia pomiar metodą „3p” przy użyciu zastępczych elektrod, np. słupków znaków drogowych, metalowych włazów lub pokryw studzienek kanalizacyjnych i podobnych naturalnych części metalowych. Istotne jest, aby części te były odizolowane od innych części przewodzących dostępnych tak, aby pełniły rolę skupionych elektrod. Przedstawia to rys. 10.

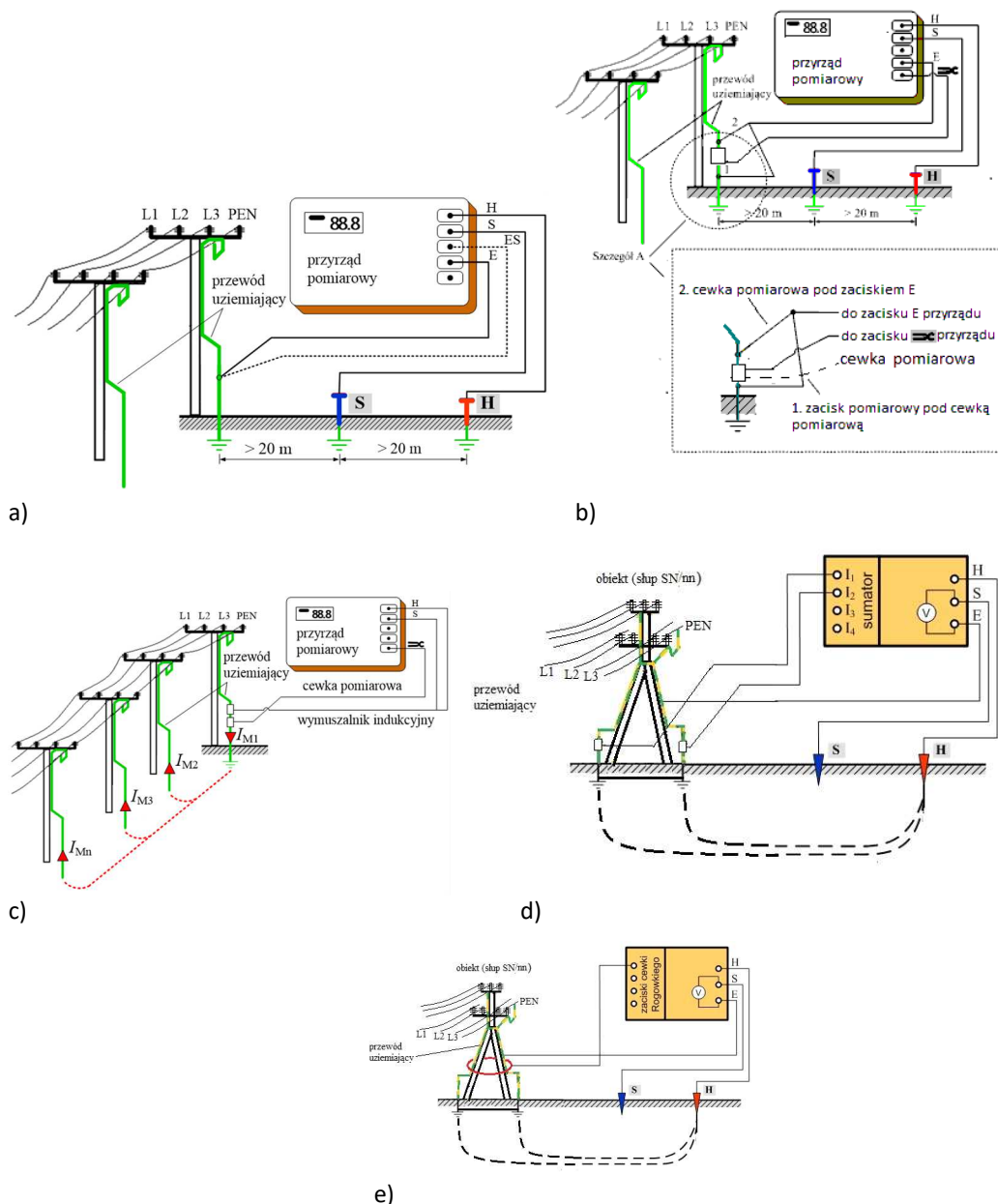


**Rys. 10.** Wykorzystanie naturalnych uziomów (w tym przypadku studzienki i znaku drogowego) jako elektrod pomiarowych przy jednoczesnym wykorzystaniu reguły 62%

W przypadku obiektów położonych w obszarze uznanym za obszar zespolonej instalacji uziemiającej, pomiar rezystancji uziemienia nie jest w ogóle możliwy i dlatego nie jest wymagany, w związku z tym metody z cęgami pomiarowymi, o ile tylko są możliwe do realizacji, powinny być preferowane.

### 3.2.2. Pomiary rezystancji uziemień w przypadku trudności z uzyskaniem odpowiednio dużego prądu pomiarowego

W przypadku pomiaru rezystancji uziemień może się zdarzyć sytuacja, w której prąd pomiarowy lub jego część osiąga zbyt małe wartości, aby wynik pomiaru mieścił się w granicach błędu pomiarowego przyrządu. W przypadku klasycznego pomiaru z użyciem metody pomiarowej „3p” taka sytuacja zdarza się, gdy badany uziom albo sonda prądowa posiadają bardzo dużą rezystancję własną. W takim przypadku rezystancję sondy można zmniejszyć poprzez zwiększenie ilości elektrod sondy wbitych w grunt, zwilżenie terenu wokół tych elektrod, zmianę miejsca umieszczenia sondy lub zmianę mocy wymuszalnika (choć w przypadku używania mierników małoprądowych to ostatnie nie jest możliwe). W ostateczności można użyć innego zestawu pomiarowego. Problem wygląda nieco inaczej w przypadku wykorzystania metod „cęgowych”. Na rys. 11 przedstawiono przykładowo pomiar rezystancji uziemienia słupów nn lub SN/nn różnymi metodami.



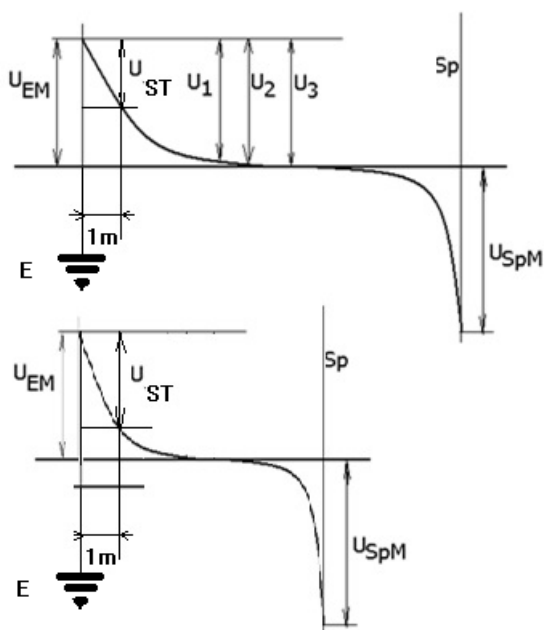
**Rys. 11.** Pomiar rezystancji uziemienia słupów nn lub SN/nn różnymi metodami (małoprądowymi)  
 a) – pomiar metodą „3p”, b) pomiar metodą „jednocęgową”, c) – pomiar metoda „dwucęgową”,  
 d) – pomiar metodą „wielocęgową”, e) – pomiar metodą „jednocęgową” z miękką cewką Rogowskiego

Na rys. 11 a) pomiaru dokonano metodą „3p”. Przy prawidłowym znalezieniu strefy zerowego potencjału wynik pomiaru będzie poprawny, ale będzie reprezentował rezystancję wypadkową wszystkich uziemień w sieci nn ( $R_B$ ). W celu pomiaru rezystancji samego słupa  $R_{B_i}$  konieczny jest pomiar napięcia uziomowego oraz prądu płynącego wyłącznie przez uziemienie tego słupa. Stosując cewkę pomiarową (metoda „jednocęgową”) można to osiągnąć (rys. 11 b)), jednakże w tym przypadku prąd pomiarowy rozdziela się i mierzona jest tylko jego niewielka część. To może spowodować, że miernik pracuje na granicy czułości i będzie podawał wyniki z bardzo dużym błędem, zależnie od tego, w jakiej proporcji podzieli się prąd pomiarowy. Im więcej „obcych” uziemień w sieci, tym podział będzie bardziej niesymetryczny. Zastosowanie metody „dwucęgowej” (rys. 11 c)) powoduje efekt odwrotny – błąd pomiarowy będzie tym większy, im mniej jest uziemień „obcych”.

Gdy słup jest wielokrotny, pojawia się dodatkowy problem – metaliczna pętla utworzona z przewodów uziemiających, która wyklucza z użycia metodę dwucęgową. W tym wypadku uzyskanie informacji o wartości rezystancji uziemienia umożliwia tylko użycie metody „wielocęgowej” (lub alternatywnie „jednocęgowej” z miękką cewką Rogowskiego oplatającą wszystkie przewody uziemiające jednocześnie – rys. 11e)). Niestety, wiąże się to ze zwiększeniem błędów pomiarowych podobnie jak w klasycznej metodzie „jednocęgowej” i często trzeba zdecydować się na rozwiązanie polegające na rozpięciu złącz kontrolnych i pomiarze rezystancji uziemienia metodą „3p”.

### 3.2.3. Pomiary napięć dotykowych w praktyce

Pomiary napięć dotykowych można przeprowadzać zarówno przy obiektach średnich, jak i wysokich napięć. W przypadku takich pomiarów tworzy się dwa obwody: obwód wymuszenia prądowego oraz obwód pomiaru napięcia. Obwód wymuszenia prądowego jest podobny do analogicznego obwodu stosowanego do pomiaru rezystancji uziemienia, jednak posiada w stosunku do niego pewną zaletę: odległość położenia elektrody prądowej od badanego uziomu nie jest tak bardzo ściśle określona, jak w przypadku pomiaru rezystancji uziemień. Wiąże się to z krzywą rozkładu potencjału na powierzchni gruntu, której „nachylenie” zależy od miejsca umieszczenia sondy prądowej. Umieszczenie sondy prądowej zbyt blisko badanego układu uziemiającego spowoduje, że pomiary napięć dotykowych będą zawyżone (rys. 12). Jeśli dla zawyżonych w ten sposób wyników pomiarów ochrona przed porażeniem okazuje się skuteczna, to dla wartości rzeczywistych jest również skuteczna.

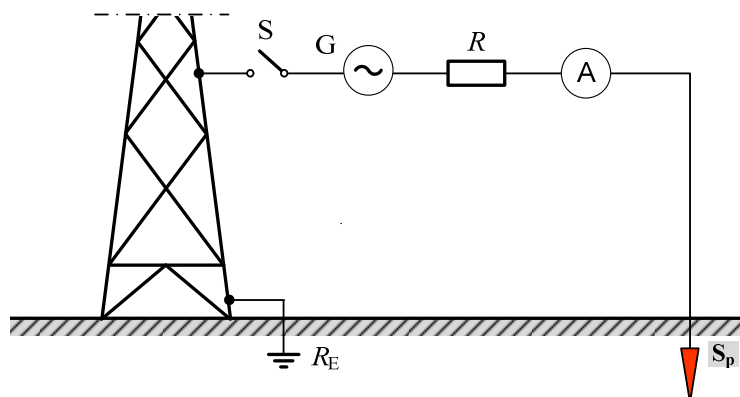


**Rys. 12.** Wzrost wartości zmierzonego napięcia  $U_{ST}$  spowodowany zbliżeniem sondy prądowej do badanego obiektu; pomiar jest zawyżony ( $S_p$  – sonda prądowa,  $E$  – badane uziemienie)

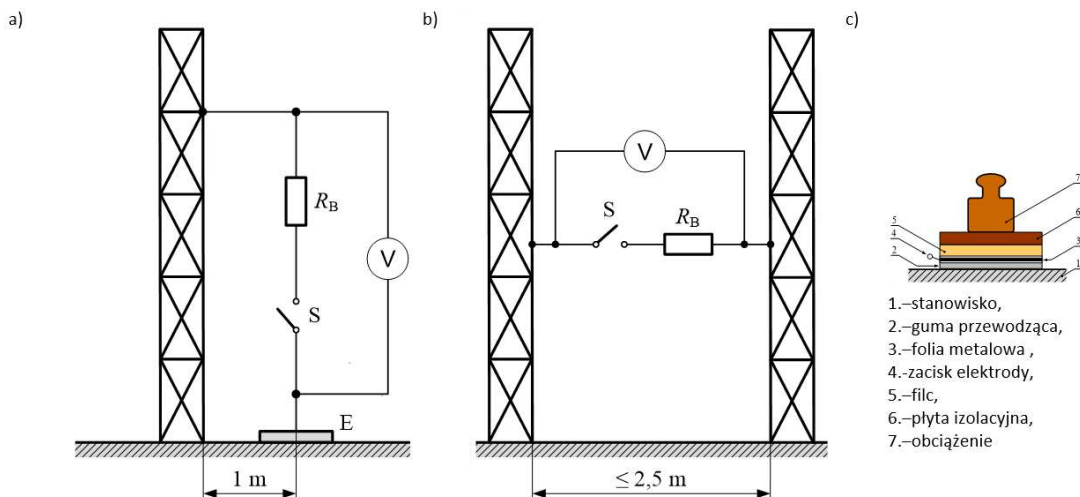
Obwody wymuszenia i pomiarowy w przypadku pomiaru napięć dotykowych w obiektach SN przedstawiono na rys. 13 i 14. Analogiczne obwody dla obiektu stacyjnego pokazano na rys. 8. Różnica polega głównie na odległościach rozstawienia sond oraz na możliwości zestawienia obwodu wymuszenia prądowego, jako sondy i przewodu rozwijanego ze szpuli (w przypadku pomiarów w obiektach SN i przy słupach WN) w przeciwieństwie do używania obwodu wymuszenia zestawionego z wyłączoną linią SN lub WN i elektrody prądowej w postaci np.



uziomu sąsiedniej stacji transformatorowo- rozdzielczej (w przypadku pomiarów w obiektach stacyjnych WN).



**Rys. 13.** Przykładowy obwód wymuszania prądu probierczego przy badaniach napięć dotykowych rażeniowych w obiektach elektroenergetycznych, w których układ uziemiający ma niewielkie rozmiary (stacje SN/nn lub obiekty liniowe WN)



**Rys. 14.** Obwody pomiarowe do pomiaru napięć dotykowych spodziewanych ( $U_{STM}$  – łącznie otwarty) i rażeniowych ( $U_{TM}$  – łącznie zamknięty) w stacjach elektroenergetycznych:

- a) obwód stosowany w przypadku odosobnionej, uziemionej części przewodzącej dostępnej;
- b) obwód dodatkowy, stosowany gdy w pobliżu badanej części przewodzącej dostępnej znajduje się część przewodząca obca, na którą może wydostać się potencjał;
- c) szczegóły konstrukcji elektrody modelującej zestyk stopu z ziemią

Elektroda modelująca zestyk stóp człowieka z ziemią posiada dość skomplikowaną budowę. W zależności jednak od badanego stanowiska można użyć elektrody zastępczej w postaci blachy z obciążeniem lub dedykowanych stalowych obciążników. Takie rozwiązanie jest poprawne w przypadku stanowisk o podłożu ziemnym (należy ze stanowiska usunąć roślinność przed pomiarem) lub o równych powierzchniach typu beton lub asfalt (istotne jest umieszczenie pod elektrodą zwilżonej tkaniny). Na pozostałych stanowiskach (żwirowych) należy używać elektrody jak na rysunku 14 lub też zdecydować się na pomiar napięć dotykowych spodziewanych zamiast rażeniowych. Wówczas można użyć innej elektrody (np. niewielkiego pręta), ale każdorazowo użycie takie musi być poprzedzone dogłębną analizą wstępną w celu wyeliminowania sytuacji sztucznego skrócenia odległości pomiędzy badanym obiektem a elektrodą prętową. Szczególnie ostrożnie należy postępować przy obiektach WN, ponieważ ew. bezmyślne użycie elektrody

prętowej może spowodować jej nadmierne zbliżenie do podziemnej części układu uziemiającego lub nawet jego dotknięcie, a to z kolei prowadzi do fałszywie zaniżonych wyników pomiarów (niebezpieczne – może być przyczyna fałszywej, pozytywnej oceny ochrony przed porażeniem).

#### 4. Obliczenia i interpretacja wyników

Wyniki pomiaru rezystancji uziemień oraz napięć dotykowych należy przed oceną ochrony przed porażeniem przeliczyć na wartości, które wystąpiłyby w najgorszych z punktu widzenia tej ochrony warunkach. Takie warunki pojawią się przy możliwie największym prądzie uziomowym oraz przy możliwie największej rezystywności gruntu. Rezystywność ta zależy od wilgotności gleby, dlatego pomiary wykonane w porze, gdy grunt jest wilgotny lub mokry, dają w efekcie nieco zaniżone wyniki pomiaru rezystancji lub napięć dotykowych i uziomowych. Oczywiście na te wyniki ma również wpływ głębokość pograżenia uziomu w gruncie oraz jego kształt, dlatego w literaturze [1] spotyka się współczynniki poprawkowe do przeliczeń uzyskanych wyników na warunki „referencyjne”.

Wzory przeliczeniowe są następujące:

##### dla badań w obiektach napięć niskich i średnich:

- wzór do przeliczeń rezystancji uziemiaenia:

$$R_E = k_R R_{EM}, \quad (1)$$

gdzie:

$R_E$  – rezystancja rzeczywista uziemiaenia w najgorszych warunkach wilgotnościowych;

$R_{EM}$  – rezystancja zmierzona;

$k_R$  – współczynnik poprawkowy.

- wzór do przeliczeń napięć dotykowych:

$$U_T = k_R U_{TM} \frac{I_E}{I_{EM}}, \quad (2)$$

gdzie:

$k_R$  – współczynnik korekcyjny (tab. 2)

$I_E$  – rzeczywisty prąd uziomowy

$I_{EM}$  – pomiarowy prąd uziomowy

$U_{TM}$  – napięcie dotykowe odczytane podczas pomiaru

##### dla badań w obiektach napięć wysokich:

- wzór do przeliczeń napięcia uziomowego (lub impedancji uziemiaenia – rzadko wykorzystywane w praktyce):

w przypadku badań odbiorczych:

$$U_E = k_R U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}, \quad (3)$$

w przypadku badań eksploatacyjnych:

$$U_E = k_Z U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}, \quad (4)$$

gdzie:

$k_R$  – współczynnik korekcyjny - **w obiektach WN uwzględnia się go tylko podczas badań odbiorczych**, kiedy układy uziomowe różnych obiektów nie są ze sobą połączone metalicznie za pośrednictwem np. linek odgromowych; podczas badań eksploatacyjnych

(połączone układy uziomowe) zamiast współczynnika  $k_R$  trzeba przyjąć współczynnik  $k_Z$  (tabela 4),

$I_E$  – rzeczywisty prąd uziomowy,

$I_{EM}$  – pomiarowy prąd uziomowy,

$U_{EM}$  – napięcie uziomowe odczytane podczas pomiaru.

- wzór do przeliczania napięć dotykowych:

$$U_T = k_Z U_{TM} \frac{I_E}{I_{EM}} \quad (5)$$

gdzie:

$k_Z$  – współczynnik, uwzględniający sezonowe zmiany rezystywności gruntu, współczynnik ten stosuje się w przypadku przeprowadzania pomiarów bez rozłączania złącz kontrolnych uziemień (pomiaru eksploatacyjne).

$U_{TM}$  – zmierzone napięcie dotykowe rażeniowe

$I_E$  – rzeczywisty (czyli płynący przy rzeczywistym doziemieniu) prąd uziomowy,

$I_{EM}$  – probierczy (czyli płynący podczas pomiaru) prąd uziomowy (w razie wykorzystania jako przewodu pomiarowego łączącego sondę prądową z układem pomiarowym linii WN należy uwzględnić jej współczynnik redukcyjny przy wyznaczaniu prądu  $I_{EM}$ ).

Współczynniki przeliczeniowe, służące do wyznaczania maksymalnych (w najbardziej niekorzystnych warunkach pogodowych – suche lato) wartości napięć uziomowych, rezystancji uziemień (nie impedancji!) w zależności od warunków pogodowych i konfiguracji uziomu zestawiono w tabeli 3. W tabeli tej nie uwzględniono uziomów poziomych umieszczonych w gruncie na głębokości poniżej 1 m. Dlatego też proponuje się dla takich uziomów przyjmować współczynniki  $k_R$  jak na rys.15.

**Tabela 3. Wartości współczynnika  $k_R$**

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Rezystywność gruntu ( $\Omega \cdot m$ )	Współczynnik $k_R$		
			grunt w czasie pomiarów		
			suchy <sup>1)</sup>	wilgotny <sup>2)</sup>	mokry <sup>3)</sup>
Uziom poziomy 0,6 ÷ 1 m <sup>4)</sup>	$l < 30$ m	dowolna	1,4	2,2	3,0
Uziom poziomy > 1 m <sup>5)</sup>	$l < 30$ m	dowolna	rys. 15		
Uziom kratowy	$S_E < 900$ m <sup>2</sup>	$\rho \leq 200$	1,3	1,8	2,4
		$\rho > 200$	1,4	2,2	3,0
	$S_E \geq 900$ m <sup>2</sup>	$\rho \leq 200$	1,1	1,3	1,4
		$\rho > 200$	1,2	1,6	2,0
Uziom pionowy	$l = 2,5 \div 5$ m	dowolna	1,2	1,6	2,0
	$l > 5$ m	dowolna	1,1	1,2	1,3

<sup>1)</sup> W okresie od czerwca do września włącznie, z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach. Dotyczy to również sytuacji w każdym miesiącu, jeśli wilgotność podłoża wokół uziomu jest stała w ciągu całego roku i niezależna od pogody, np. dla uziomów w sąsiedztwie cieków wodnych o trwałym przepływie (nie wysychających), na bagnach itp.

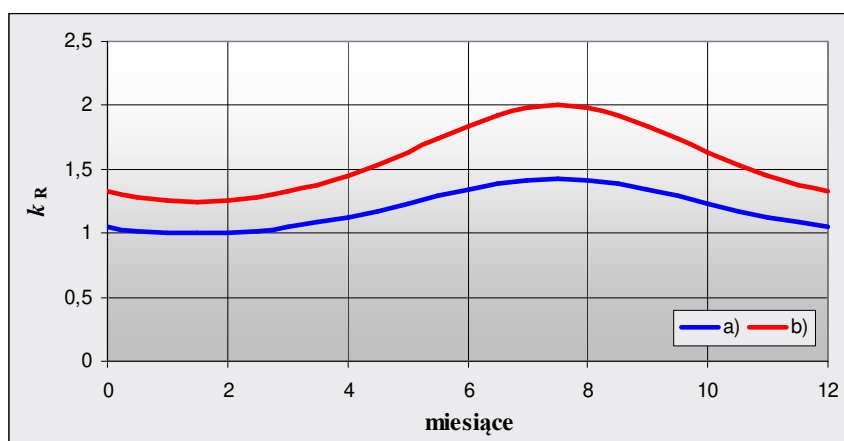
<sup>2)</sup> Poza okresem zaliczanym do <sup>1)</sup> z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.

<sup>3)</sup> W okresie trzech dni po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.

<sup>4)</sup> Głębokość ułożenia uziomu od 0,6 do 1 m.

<sup>5)</sup> Głębokość ułożenia uziomu głębiej niż 1 m.

Dla uziomów poziomych umieszczonych w gruncie na głębokości co najmniej 1 m, można posługiwać się współczynnikami  $k_R$ , opracowanymi na podstawie danych szwajcarskich. Współczynniki te przedstawiane są w formie graficznej (rys. 15)



**Rys. 15.** Współczynniki  $k_R$  dla uziomów poziomych położonych na głębokości co najmniej 1 m, wyznaczone na podstawie danych szwajcarskich [6]: a) dla okresów długotrwałej suszy lub dla uziomu umieszczonego w obszarze wód gruntowych, b) dla okresów po opadach deszczu

**Tabela 4.** Proponowane wartości współczynników  $k_z$  uwzględniających sezonowe zmiany rezystywności gruntu, stosowanych podczas badań eksploatacyjnych rozległych układów uziemiających w sieciach WN

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Rezystywność gruntu ( $\Omega \cdot m$ )	Współczynnik $k_z$		
			grunt w czasie pomiarów		
			suchy <sup>1)</sup>	wilgotny <sup>2)</sup>	mokry <sup>3)</sup>
Uziom poziomy $0,6 \div 1 m$ <sup>4)</sup>	$l < 30 m$	dowolna	1,2	1,4	1,7
Uziom kratowy	$S_E < 900 m^2$	$\rho \leq 200$	1,1	1,3	1,5
		$\rho > 200$	1,2	1,4	1,7
	$S_E \geq 900 m^2$	$\rho \leq 200$	1,1	1,1	1,2
		$\rho > 200$	1,1	1,2	1,4
Uziom pionowy	$l = 2,5 \div 5 m$	dowolna	1,1	1,2	1,4
	$l > 5 m$	dowolna	1,1	1,1	1,1

<sup>1)</sup> W okresie od czerwca do września włącznie, z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach. Dotyczy to również sytuacji w każdym miesiącu, jeśli wilgotność podłoża wokół uziomu jest stała w ciągu całego roku i niezależna od pogody, np. dla uziomów w sąsiedztwie cieków wodnych o trwałym przepływie (nie wysychających), na bagnach itp.

<sup>2)</sup> Poza okresem zaliczanym do <sup>1)</sup> z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.

<sup>3)</sup> W okresie trzech dni po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.

<sup>4)</sup> Głębokość ułożenia uziomu od 0,6 do 1 m.

<sup>5)</sup> Głębokość ułożenia uziomu głębiej niż 1 m.

W przypadku badań eksploatacyjnych (najczęściej przeprowadzanych), wykonywanych na obiektach będących częścią rozległej sieci WN przy połączonych (poprzez np. linki odgromowe lub ekrany kabli) układach uziemiających, jako wynik pomiaru uzyskuje się wartość impedancji uziemienia  $Z_E$ . Składowa bierna tej impedancji jest znaczna i najczęściej to ona decyduje o wartości modułu impedancji (zależy to od rozległości wypadkowego układu uziemiającego, a na charakter indukcyjno-rezystancyjny tej impedancji składają się indukcyjność linii odgromowych, ekranów kabli, indukcyjność załamań bednarek uziomów itp.). W takim przypadku wpływ warunków zewnętrznych (pogoda, wilgotność sezonowa gruntu) na sezonową zmianę wartości impedancji wypadkowej uziemienia  $Z_E$  jest niewielki. Dodatkowo kształt krzywej gradientu potencjału może ulegać zmianie wraz ze zmianą wilgotności gruntu.

Proponuje się zatem, aby w przypadku badań eksploatacyjnych przy połączonych układach uziemiających poszczególnych obiektów WN zamiast współczynników przeliczeniowych  $k_R$  stosować złączone wartości współczynników oznaczone  $k_z$ , uwzględniające z jednej strony istnienie składowej biernej impedancji  $Z_E$ , (o wartości znacznie przekraczającej wartość składowej czynnej), z drugiej zaś stanowiące pewien margines bezpieczeństwa w wypadku, kiedy badany fragment sieci WN posiada na tyle małe wymiary, że część czynna wypadkowej impedancji uziemienia jest nie do pominięcia. Proponowane wartości współczynników  $k_z$  przedstawiono w tabeli 4.

## 5. Podsumowanie i wnioski

W referacie przedstawiono wybrane aspekty pomiarów związanych z szeroko pojętą ochroną przed porażeniem w obiektach elektroenergetycznych z punktu widzenia praktyki ich wykonywania. Znaczna ilość pomiarów, wykonywana ściśle według zaleceń normatywnych może okazać się niemożliwa do zrealizowania ze względu na ograniczony teren przeznaczony na rozwinięcie układu pomiarowego, ograniczoną moc przyrządów pomiarowych lub też błędy pomiarowe wynikające z konfiguracji układów pomiarowych. Istnieją jednak metody pomiarów, które, choć nieopisane w normach przy odpowiednim wykorzystaniu dają wyniki obarczone błędem, jednak takim, który zaostrza wymagania, co do ochrony przed porażeniem, to znaczy, jeżeli wynik uzyskany za pomocą takiej metody jest poprawny, to rzeczywiste wartości zmierzonych parametrów są lepsze, aniżeli wynikałoby to z surowego pomiaru.

Stosowanie tego typu metod, a także dodatkowych lub odmiennych niż zwyczajowe sposobów przeliczeń lub interpretacji wyników, wymaga jednak od zespołu pomiarowego indywidualnego podejścia do każdej niestandardowej procedury oraz analizy, czy jej zastosowanie jest możliwe przy konkretnym stanowisku pomiarowym.

### BIBLIOGRAFIA:

- [1] Wołkowiński K.: Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1967
- [2] Jabłoński W.: *Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych niskiego i wysokiego napięcia*. WNT, Warszawa 2006
- [3] PN-EN 50522: 2011. Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
- [4] N SEP-E-001: 2013. Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
- [5] PN-HD 60364-6: 2016-07. Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzenie.
- [6] Opracowanie PTPiREE „Zasady ochrony przed porażeniem w spółkach osd w zakresie projektowania, budowy i eksploatacji” – etapy III, IV, V – pliki dostępne pod adresem: <http://www.ptpiree.pl/opracowania/ochrona-przed-porazeniem> - dostęp 20 listopad 2023











**PTPiREE**

**Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej**  
**ul. Wołyńska 22, 60-637 Poznań**  
**tel. +48 61 846-02-00, fax: +48 61 846-02-09, [www.ptpiree.pl](http://www.ptpiree.pl), [ptpiree@ptpiree.pl](mailto:ptpiree@ptpiree.pl)**  
**NIP: 777-00-04-090, REGON: 004845964**  
**SANTANDER Bank Polska 30 1090 1362 0000 0000 3601 8167**