

DOBEZPIECZANIE OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ

1. Wprowadzenie

Dla poprawnego funkcjonowania sieci, instalacji i urządzeń elektrycznych ważne jest skoordynowanie rozmaitych systemów zabezpieczeń i ochron. Dotyczy to również koordynacji między urządzeniami zabezpieczającymi i ochronnymi działającymi na różnej zasadzie i wykorzystującymi odmienne kryteria działania, w tym współdziałania zabezpieczeń nadprądowych z zabezpieczeniami podnapięciowymi i z zabezpieczeniami różnicowoprądowymi oraz z ogranicznikami przepięć. Ograniczniki przepięć, zwłaszcza klasy I (odgromniki), mogą wymagać dobezpieczenia za pomocą bezpieczników, wyłączników bądź innych urządzeń zabezpieczających, w tym termicznych i nadciśnieniowych. Dobór tych zabezpieczeń i ich usytuowania powinien uwzględniać nie tylko skuteczność dobezpieczenia, ale również eliminację niepożądanych przerw w zasilaniu w razie ich zbędnej interwencji. Gdzie stawia się wysokie wymagania co do ciągłości zasilania, tam wypada zapewnić koordynację całkowitą zabezpieczeń nadprądowych z odgromnikami, aż do przepisowej granicy spodziewanych obciążeń o rozkładzie losowym. W innych wypadkach można poprzestać na koordynacji częściowej, tylko przy narażeniach o znaczącym prawdopodobieństwie występowania. Jest to podejście analogiczne do usankcjonowanego w normach rozróżnienia między przetężeniową wybiórczością całkowitą i wybiórczością częściową między zabezpieczeniami nadprądowymi.

Termin *dobezpieczenie*, wprowadzony pół wieku temu przez prof. Jana Piaseckiego, oznacza dodatkowe, uzupełniające zabezpieczenie, logistyczne wzmocnienie przyrządu zabezpieczającego lub ochronnego, którego skuteczność była niepełna, niewystarczająca w niektórych sytuacjach ruchowych. *Dobezpieczenie* jest jedynym poprawnym polskim odpowiednikiem angielskiego *back-up protection* i niemieckiego *Vorsicherung*, terminów przez wielu dziwacznie tłumaczonych sylaba po sylabie. Dobezpiecza się urządzenie zabezpieczające (wyłącznik nadprądowy, bezpiecznik, wyłącznik różnicowoprądowy, stycznik i przekaźnik termobimetalowy) bądź urządzenie ochronne (ogranicznik przepięć), a nie obiekt zabezpieczany (linię, silnik, transformator lub prądnicę).

W dziedzinie ochrony instalacji i sieci elektrycznych niskiego napięcia od przepięć atmosferycznych i łączeniowych nastąpił w ciągu ostatnich kilkunastu lat znaczny postęp w teoretycznym rozpoznaniu narażeń, w opracowywaniu różnych koncepcji układów ochrony i w konstrukcji urządzeń ochronnych. Towarzyszyły temu na poziomie międzynarodowym (IEC) i regionalnym (CENELEC) wielokrotne nowelizacje dawniejszych dokumentów normalizacyjnych i wprowadzanie do nich nowych tematów, przedtem pozostających poza zakresem właściwości norm. Proces ten trwa nadal, wiele tematów czeka na głębsze opracowanie bądź na zgrabniejsze ujęcie.

Racjonalnym bodźcem tego postępu jest rosnące upowszechnienie wrażliwego na przepięcia sprzętu elektronicznego, zwłaszcza komputerów i sieci komputerowych oraz cyfrowego sprzętu automatyki, pomiarów, zabezpieczeń i łączności. Trudno jednak oprzeć się wrażeniu, że są też powody irracjonalne: zawodowy astygmatyzm (niezborna widzenia) ekspertów skłonnych do przesady w eksponowaniu rangi problemów własnej dyscypliny oraz lobbing producentów natarczywie kreujących zwiększony popyt na sprzęt ochronny. Efektem są niektóre podejrzane postanowienia norm oraz przebiegłe sformułowania w rozporządzeniu Min. Infrastruktury [24], mające sugerować wymóg powszechnego stosowania ograniczników przepięć (§ 183.1.10), a pomijające naturalne, bezinwestycyjne środki ochrony. Pomija się milczeniem albo wspomina półgębkiem te postanowienia norm IEC, które przeszkadzają w wydłużaniu pieniędzy.

Podstawowa norma dotycząca ochrony przeciwprzepięciowej w instalacjach, PN-IEC 60364-4-443 [15], ma niewygodny dla astygmatyków i autorów rozporządzenia [24] rozdział 443.3.1 **Ograniczanie naturalne przepięć**. Stanowi on, że nie jest potrzebna ochrona od przepięć atmosferycznych, jeśli obiekt jest zasilany z sieci kablowej albo napowietrznymi przewodami izolowanymi

i ekranowanymi. Nie jest też wymagana taka ochrona przy zasilaniu z sieci napowietrznej na terenach o rocznej liczbie dni burzowych nieprzekraczającej 25, czyli na przeważającym obszarze Polski.

Zasada SEP **Single-Entry-Point** jest wyraźnie zapisana aż w dwóch normach: w punkcie 444.3.14 normy PN-IEC 60364-4-444:2001 [16] oraz w punkcie 5.3 normy PN-IEC/TS 61312-3:2004 [21]. Aż w dwóch normach, bo jest tak ważna! Zaleca ona wprowadzanie do budynku wszelkich przewodzących przyłączy (rurociągów i kabli) w tym samym miejscu. Przestrzeganie jej daje korzyści [12, 13] w każdej sytuacji (krótkie połączenia wyrównawcze, brak metalowych pętli, w których mogą indukować się niebezpieczne napięcia), a nabiera szczególnej wagi w budynkach, których konstrukcja nie daje wyraźnego ekranowania (brak metalowych konstrukcji nośnych i/lub zbrojenia, brak metalowych osłon). Dlaczego nie ma o tym ani słowa w miejscu najważniejszym, w rozporządzeniu Min. Infrastruktury [24], adresowanym również do architektów, inżynierów budownictwa i techniki sanitarnej? Ten sam ośrodek szerzenia ignorancji wśród elektryków, który zdominował Komitet Techniczny nr 55 ds. Instalacji Elektrycznych i Ochrony Odgromowej Obiektów Budowlanych manipulował przy redagowaniu postanowień z zakresu elektryki w rozporządzeniu Min. Infrastruktury [24]. Dlaczego wzorem innych krajów nie wprowadzono wymagania pomieszczenia przyłączeniowego [6], co załatwiłoby definitywnie tę sprawę? Dlaczego wzorem innych krajów nie wprowadzono wymagania sztucznego uziomu fundamentowego? Czyżby dlatego, że wprowadzenie takich wymagań nie napędza popytu na żadne kosztowne aparaty i urządzenia?

„Osoby wykonujące samodzielne funkcje techniczne w budownictwie są odpowiedzialne za wykonywanie tych funkcji zgodnie z przepisami, obowiązującymi Polskimi Normami i **zasadami wiedzy technicznej** oraz za **należyłą staranność** w wykonywaniu pracy...” (ustawa Prawo Budowlane, art. 12.6). Podobnie, jak nie należy używać słów powszechnie uważanych za nieprzyzwoite, tak nie wolno wsłuchiwać się w porady techniczne osób powszechnie uważanych za nieprzyzwoicie nierozumne. I to niezależnie od formalnych stopni, tytułów i uprawnień, jakimi się legitymują.

Ujednolicanie norm w skali światowej i regionalnej bynajmniej nie oznacza upowszechniania jednakowych rozwiązań układów ochrony instalacji niskonapięciowych od przepięć atmosferycznych. Nawet zaprojektowane w oparciu o te same normy, będą one rozmaite w różnych krajach, a nawet w różnych regionach większych krajów, chociażby ze względu na inny poziom keraamiczny, czyli inną roczną liczbę dni burzowych (w większości zamieszkałych regionów świata od niespełna 10 do nawet ponad 200). W dodatku poza normami do dobrowolnego stosowania są w niektórych krajach obligatoryjne przepisy prawa precyzujące wymagania uwzględniające specyficzne warunki lokalne. Wymagania są łagodniejsze przy zasilaniu instalacji z sieci rozdzielczej TN, zwłaszcza kablowej, a surowsze przy zasilaniu z sieci rozdzielczej TT, zwłaszcza napowietrznej. Układ TN ma tę wyższość, że uziemienia przewodów ochronnych PEN i PE całej sieci są liczne i są ze sobą równolegle połączone. Można wskazać tytułem przykładu [11] trzy dominujące koncepcje ochrony w instalacjach budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej bez piorunochronu:

1) Koncepcja północnoamerykańska. Sieci wysoko- i niskonapięciowe mają punkty neutralne uziemione, sieć rozdzielcza niskonapięciowa o układzie TN ma linie o bardzo małej długości, na przykład od transformatora słupowego małej mocy do pobliskich budynków. Uważa się, że małe jest prawdopodobieństwo przepięć, którym towarzyszy duży prąd. Stosuje się ograniczniki przepięć w odbiornikach i w gniazdach wtyczkowych, a ograniczniki przy złączu tylko w instalacjach bardziej wrażliwych bądź szczególnie narażonych.

2) Koncepcja niemiecka. Sieci rozdzielcze o układzie TN przy małym udziale linii napowietrznych. Odgromniki instaluje się przede wszystkim w obrębie sieci rozdzielczych, natomiast w instalacjach tylko w rejonach o rocznej liczbie dni burzowych zbliżonej do 30 (zwłaszcza w Bawarii) i/lub w obiektach szczególnie wrażliwych. Stosuje się odgromniki o większym znamionowym prądzie wyładowczym niż w wielu innych krajach.

3) Koncepcja francuska. Sieci rozdzielcze o układzie TT z dużym udziałem linii napowietrznych. Przy złączu ogranicznik (o znamionowym prądzie wyładowczym 5 kA) jest wymagany, jeżeli

budynek jest zasilany linią napowietrzną na terenie o poziomie keraucicznym wyższym niż 25, a jest zalecany, jeśli budynek jest zasilany przewodami napowietrznymi prowadzonymi po fasadach budynków, a instalacja zasila odbiorniki wrażliwe na przepięcia. Z takiego ogranicznika rezygnuje się, jeśli budynek jest zasilany z sieci w całości wykonanej jako kablowa.

Piszący te słowa spędził lata 1974-1978 na wzgórzu Mont Amba w Kinshasie, w strefie równikowej z roczną liczbą dni burzowych bliską 100, w jednym z około stu parterowych domów części mieszkalnej kampusu uniwersyteckiego. Instalacje domowe zasilane z sieci kablowej o układzie TT nie miały żadnych ograniczników przepięć. Wszyscy przeżyli te cztery lata i nie odnotowali żadnych materialnych szkód piorunowych; co prawda komputerów osobistych wtedy nie było. Nie było też doniesień o takich uszkodzeniach w zaopatrzonych w piorunochrony kilkupiętrowych budynkach administracyjnych i dydaktycznych oraz w klinikach uniwersyteckich dysponujących różnorodnym sprzętem elektromedycznym ówczesnej generacji. Te wspomnienia sprzed lat szefa departamentu elektrycznego uniwersytetu, do którego dochodziły informacje o poważniejszych uszkodzeniach, skłaniają do traktowania z rezerwą rozrzutnej taktyki tworzenia reguł technicznych poprzez przejmowanie z każdego obszaru kultury technicznej wymagań najostrożniejszych. I to w Polsce, kraju nienajbogatszym, którego ponad 90% powierzchni ma roczną liczbę dni burzowych nieprzekraczającą 25. Inna sprawa, że publikowanie takich obrazoburczych stwierdzeń może wywołać replikę sprawiającą wrażenie dodatkowych dni burzowych.

Zanim zacznie ktoś w Polsce historycznie straszyć piorunami, niech się zastanowi i odpowie, jak sobie z nimi radzą w krajach o rocznej liczbie dni burzowych kilkakrotnie większej. I niech nie wydyma pogardliwie ust, że najwyższe wskaźniki kerauciczne dotyczą biednych rejonów Afryki i Azji, pozbawionych elektroniki. Nic bardziej błędnego. Wszędzie tam są komputery, jest automatyka, jest łączność, w tym telefonia komórkowa, są wieże kontroli lotów i są bazy wojskowe naszpikowane elektroniką.

2. Odgromniki – ograniczniki przepięć klasy I pierwszego stopnia ochrony

W instalacjach narażonych na wnikanie prądu piorunowego z zasilającej sieci napowietrznej i/lub z piorunochronu, pierwszy stopień ochrony, na granicy stref ochronnych 0 i 1, wymaga odgromników, czyli ograniczników przepięć klasy I. Są to ograniczniki iskiernikowe o nieciągłej charakterystyce napięciowo-prądowej, ucinające przepięcie, zdolne odprowadzać prądy piorunowe o kształcie udaru 10/350 μ s. Instaluje się je w złączu lub w głównej rozdzielnicy i zarazem w pobliżu głównej szyny wyrównawczej obiektu, co jest możliwe, jeśli przestrzega się wspomnianej wyżej zasady SEP. Ze względu na skuteczność ochrony powinny być instalowane jak najbliżej miejsca wprowadzenia przewodów do budynku [1], nawet przed rozliczeniowym pomiarem energii. Można wyróżnić trzy stany ich działania:

1. **Stan izolowania** przy napięciu roboczym, nieprzekraczającym największego dopuszczalnego napięcia pracy ciągłej odgromnika U_c , kiedy rezystancja między jego zaciskami jest rzędu giga-oma ($10^9 \Omega$). W instalacjach o napięciu fazowym U_o odgromniki włączone pomiędzy fazę a ziemię (L-E, L-PE) powinny mieć największe dopuszczalne napięcie pracy ciągłej U_c co najmniej $1,5 \cdot U_o$ w układzie TN i TT oraz $\sqrt{3} \cdot U_o$ w układzie IT. Natomiast odgromniki włączone pomiędzy przewód fazowy a przewód neutralny (L-N) w układzie TT i TN-S – napięcie co najmniej $1,1 \cdot U_o$.

2. **Przewodzenie prądu wyładowczego** po zapłonie odgromnika. Między zaciskami odgromnika przepięcie narasta do poziomu udarowego napięcia zapłonu, wywołuje zapłon, po czym napięcie maleje do wartości napięcia obniżonego U_{res} (spadku napięcia na łuku, na ogół 10÷50 V). Odprowadzany przez odgromnik prąd piorunowy pochodzi z fikcyjnego źródła o właściwościach zbliżonych do idealnego źródła prądu. Jest zatem wymuszeniem prądowym, którego wartość szczytowa i przebieg w czasie nie zależą od zjawisk zachodzących w odgromniku, w bezpieczniku, wyłączniku i w innych elementach znajdujących się na drodze jego przepływu. Co najwyżej, stwarzając równoległe drogi przepływu i odpowiednio dobierając ich impedancje (impedancje udarowe, impedancje falowe) można wpływać na wartość cząstkowego prądu płynącego określonym torem. Zdol-

ność przewodzenia przez odgromnik określoną liczbę razy prądu wyładowczego charakteryzuje znamionowy prąd wyładowczy I_n oraz maksymalny prąd wyładowczy I_{max} o umownym kształcie udaru T_1/T_2 (czas czoła/czas grzbietu). W instalacjach narażonych na wnikanie prądu piorunowego wymaga się odgromników o prądzie $I_n \geq 5$ kA, a odgromniki $I_n = 25$ kA praktycznie wystarczają nawet w warunkach największych narażeń [1].

3. **Wyłączanie prądu następczego**, który w przestrzeni międzyelektrodowej, uprzednio zjonizowanej przez prąd wyładowczy, płynie pod działaniem napięcia roboczego. Prąd następczy jest w przybliżeniu równy spodziewanemu prądowi zwarciovemu w miejscu zainstalowania zwykłego odgromnika (przy rodzaju zwarcia odpowiadającym zwarciu biegunów, między którymi są włączone pobudzone odgromniki). Prąd następczy powinien być wyłączony przez sam odgromnik najpóźniej przy pierwszym naturalnym przejściu przez zero, zatem czas jego przepływu w sieci 50 Hz nie powinien przekraczać 10 ms. Zdolność wyłączania prądu następczego I_f jest związana z określonym przebiegiem spodziewanego napięcia powrotnego TRV, podobnie jak to jest w łącznikach przy wyłączaniu prądów roboczych i zwarciovych.

Zwykle odgromniki, nieograniczające prądu następczego, wtrącając do obwodu rezystancję łuku w niewielkim stopniu zmniejszają wartość prądu następczego i jego skutek cieplny I^2t w porównaniu z wartościami spodziewanymi. Ich zdolność wyłączania prądu następczego I_f jest nieduża, wynosi od 1,5 kA do 4 kA. Jeśli spodziewany prąd następczy jest od niej większy, to odgromnik wymaga dobezpieczenia, a tę rolę zwykle spełnia bezpiecznik klasy gG. Jego rolą jest przetrzymać prąd następczy przynajmniej do chwili pierwszego naturalnego przejścia przez zero, by mógł go wyłączyć odgromnik, a gdyby to się nie stało – samemu go wyłączyć. W tym celu bezpiecznik powinien przetrzymać bez nadwężenia topika sumaryczną całość Joule'a (sumaryczny skutek cieplny) najpierw prądu piorunowego, a zaraz potem – prądu następczego I_f przepuszczaną przez odgromnik w przeciągu 10 ms. Sumowanie obu całości Joule'a (skutków cieplnych prądu) wynika z założenia adiabatycznego nagrzewania topika, tzn. bez wymiany ciepła z otoczeniem. Wytwórca odgromników podaje największy dopuszczalny prąd znamionowy I_{nmax} bezpiecznika klasy gG, który jest w stanie dobezpieczyć odgromnik i zarazem podaje prąd zwarciovym wytrzymywany przez odgromnik wspólnie z tym bezpiecznikiem. Odgromniki nie mają wbudowanych bezpieczników, zatem rolę dobezpieczenia spełnia bezpiecznik zewnętrzny, poprzedzający w instalacji odgromnik, najbliższy od strony zasilania. Zatem pierwszym zadaniem bezpiecznika poprzedzającego odgromnik może być wyłączenie prądu następczego przekraczającego zdolność wyłączania odgromnika, aby nie dopuścić do jego zniszczenia, do trwałego zwarcia elektrod i/lub rozerwania obudowy.

Tuż przed rokiem 2000 pojawiły się nowe konstrukcje odgromników coraz silniej ograniczających prąd następczy oraz jego skutek cieplny i wykazujące tak dużą zdolność wyłączania spodziewanego prądu następczego $I_f = 25 \div 50$ kA, że ich dobezpieczenie nie jest potrzebne (rozdz. 6).

Tablica 1. Obliczeniowe parametry pierwszego udaru prądu piorunowego 10/350 μ s w zależności od poziomu ochrony [19, 21]

Poziom ochrony		I	II	III i IV
Wartość szczytowa prądu I_G	kA	200	150	100
Całka Joule'a W_G	kA ² s	10000	5600	2500

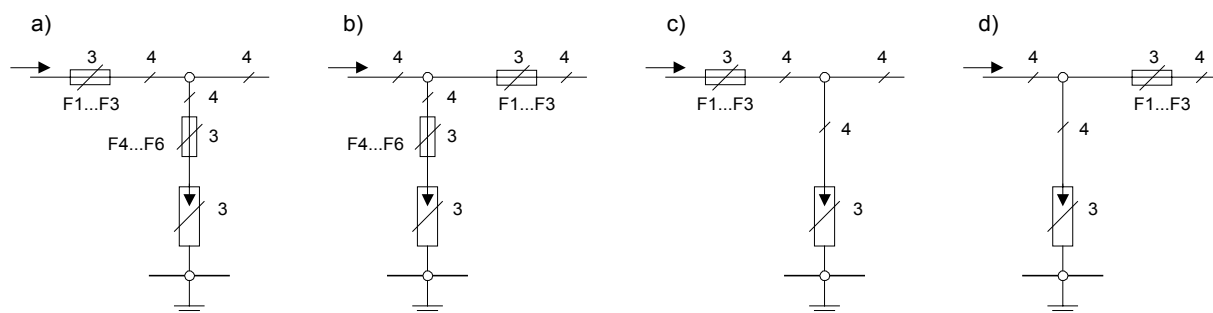
Znamionowy i maksymalny prąd wyładowczy odgromnika tak się dobiera, zależnie od poziomu ochrony (tabl. 1), aby prawdopodobieństwo ich przekroczenia było dostatecznie małe. Jednak ze względu na losowy rozkład parametrów piorunów i znikome, ale niezerowe prawdopodobieństwo wystąpienia wartości większych, ryzyka przekroczenia wykluczyć nie można. Trzeba się liczyć z możliwością uszkodzenia odgromnika, również ze zwarcieniem elektrod, co zresztą może się zdarzyć również w następstwie stopniowego ich zużywania się po wielokrotnym przepływie prądu wyładowczego o wartości zbliżonej do znamionowej. Zwarcie elektrod odgromnika jest zwarcieniem

L-PE, uszkodzeniem izolacji doziemnej instalacji, w następstwie którego w układach TN i TT poprzedzające zabezpieczenie (nadprądowe lub różnicowoprądowe) powinno dokonać samoczynnego wyłączenia zasilania ze względu na zagrożenie porażeniowe. Zatem drugim zadaniem bezpiecznika poprzedzającego odgromnik może być samoczynne wyłączenie zasilania w razie trwałego zwarcia w odgromniku lub w innym miejscu poprzecznej gałęzi ochrony.

3. Wzajemne usytuowanie odgromników i bezpieczników

Na rys. 1 przedstawiono klasyczne przypadki usytuowania bezpieczników względem odgromników włączonych w wyodrębnionej poprzecznej gałęzi ochrony. Jeśli bezpiecznik dobezpieczający jest wymagany, nie musi być on umieszczony w gałęzi ochrony (rys. 1a, b); równie dobrze rolę dobezpieczenia może pełnić bezpiecznik w torze zasilania (rys. 1c), np. bezpiecznik w złączu, jeśli jego prąd znamionowy nie jest większy niż wskazana przez producenta największa dopuszczalna wartość I_{nmax} . Zdziałanie bezpiecznika w gałęzi ochrony (rys. 1a, b) odcina odgromnik od chronionej instalacji, a bezpiecznika w torze zasilania (rys. 1c) – zakłóca zasilanie instalacji. Obydwa zdarzenia są niepożądane i dlatego bezpiecznik powinien zadziałać tylko w razie konieczności, jeśli odgromnik nie jest w stanie sam poprawnie wyłączyć prądu następczego. Zatem bezpiecznik powinien z zasady mieć prąd znamionowy równy największemu dopuszczalnemu I_{nmax} , podanemu przez wytwórcę. Jest to sytuacja szczególna, odmienna niż w wielu innych przypadkach doboru bezpieczników, kiedy zastosowanie bezpiecznika o prądzie mniejszym niż największy dopuszczalny poprawia skuteczność zabezpieczenia, a nie powoduje żadnych następstw niepożądanych.

Bywa, że poprzedzający bezpiecznik w gałęzi wzdłużnej (rys. 1c) ma prąd znamionowy większy niż dopuszczalny i wtedy trzeba odgromnik dobrać do bezpiecznika, trzeba przewymiarować odgromnik. Zdarzyć się to może zwłaszcza wtedy, gdy bezpiecznikiem poprzedzającym jest zabezpieczenie na początku przyłącza (rys. 1d).



Rys. 1. Usytuowanie odgromników względem bezpieczników złącza (F1...F3) i ewentualnych bezpieczników gałęzi poprzecznej (F4...F6) przy zasilaniu z sieci o układzie TN: a) gałąź odgromników z bezpiecznikami przyłączona za bezpiecznikami złącza; b) gałąź odgromników z bezpiecznikami przyłączona przed bezpiecznikami złącza; c) gałąź odgromników bez bezpieczników przyłączona za bezpiecznikami złącza; d) gałąź odgromników bez bezpieczników przyłączona przed bezpiecznikami złącza

Rozważając zalety i wady czterech przedstawionych układów zauważa się, co następuje. Bezpieczniki w gałęzi poprzecznej (rys. 1a, b) są niepożądane, jeżeli podstawowym imperatywem jest niezawodność ochrony przeciwprzepięciowej, bo zadziałanie bezpiecznika i odłączenie odgromnika mogą pozostać niezauważone, a jeżeli nie działa pierwszy stopień ochrony, to nieskuteczne są dalsze stopnie. Są zaś pożądane, jeżeli ciągłości zasilania instalacji przypisuje się większe znaczenie niż niezawodności ochrony przeciwprzepięciowej.

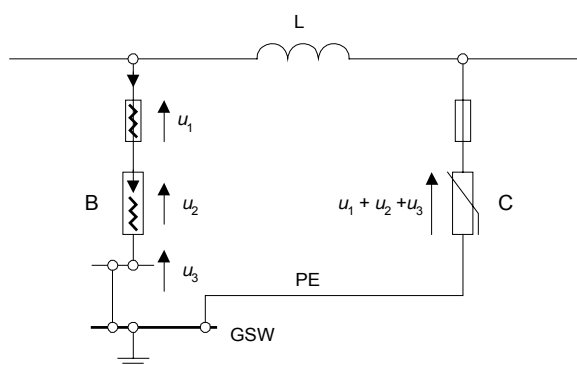
Umiejscowienie odgromników w instalacji obiektu budowlanego bywa przedmiotem kontrowersji przy uzgadnianiu dokumentacji technicznej. Dostawca energii nie chce ich widzieć po swojej

stronie granicy eksploatacji, przed rozliczeniowym pomiarem energii, aby uniknąć jakiegokolwiek odpowiedzialności za ich stan techniczny, problemów eksploatacyjnych i ryzyka trwałego przepływu prądu upływowego, które zresztą jest znikome w przypadku odgromników (ograniczników iskiernikowych), a mogłoby być istotne w przypadku ograniczników warystorowych. Jako zasadę ogólną takie rozumowanie można przyjąć, jako zasadę bez wyjątków – trudniej.

W Polsce nie ma na ten temat jednoznacznych przepisów, a postanowienia normy [17] są ogólnikowe i niejasne: odgromniki powinny być zainstalowane w pobliżu złącza instalacji lub w głównej rozdzielnicy, możliwie najbliżej złącza, a jeśli są zainstalowane w (?) złączu instalacji elektrycznej, zasilanej z publicznej sieci rozdzielczej, to powinny mieć znamionowy prąd wyładowczy niemniejszy niż 5 kA.

Warto przytoczyć ważniejsze postanowienia przepisów energetyki niemieckiej [25] na omawiany temat. Przyłączanie odgromników, czyli ograniczników przepięć klasy I (B), przed rozliczeniowym pomiarem energii jest dopuszczalne tylko w przypadkach, kiedy jest to nieodzownie potrzebne dla wprowadzenia strefowej koncepcji ochrony, na przykład w instalacjach typu przemysłowego z wrażliwym na przepięcia sprzętem informatyki i/lub automatyki oraz w wielopiętrowych biurowcach ze zdecentralizowanym (na piętrach) pomiarem rozliczeniowym. Obowiązują wszakże następujące wymagania:

- W razie zwarcia wewnętrznego odgromnik powinien być samoczynnie i trwale odłączony od sieci.
- Znamionowy prąd wyładowczy powinien być dobrany do warunków zainstalowania. Jeśli nie są one określone, powinien być dobrany do poziomu ochrony I.
- Dopuszczalne są tylko ograniczniki iskiernikowe. Nie dopuszcza się równolegle przyłączonych ograniczników beziskiernikowych (warystorowych).
- Wynikająca z technicznych warunków przyłączenia wymagana obciążalność zwarciova odgromnika (zdolność wyłączania prądu następczego) jest gwarantowana przez wytwórcę.
- Odgromnik razem z zabezpieczeniem nadprądowym powinien być zainstalowany w osobnej, przystosowanej do tego celu i plombowanej obudowie o izolacji ochronnej i stopniu ochrony co najmniej IP 54.
- Stan techniczny odgromnika powinien być sprawdzany w odstępach czasu nie większych niż cztery lata. Na żądanie dostawca energii powinien otrzymać protokół badania.

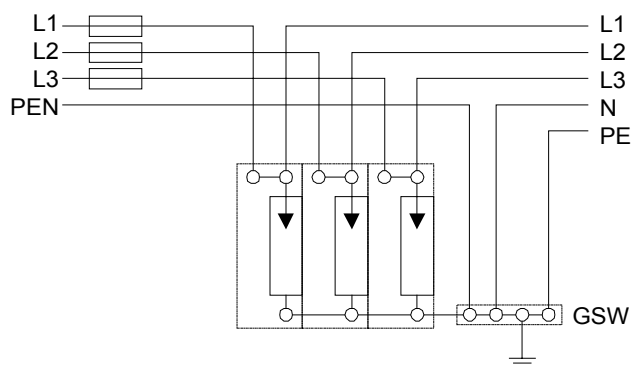


Rys. 2. Narażenie napięciowe ogranicznika warystorowego klasy C na drugim stopniu ochrony podczas wyłączenia prądu następczego przez bezpiecznik przy ograniczniku iskiernikowym klasy B na pierwszym stopniu

L – indukcyjność odsprężająca przy przebiegach udarowych, GSW – główna szyna wyrównawcza

Niezależnie od podobnych wymagań i zaleceń dokładnie trzeba rozważyć nie tylko usytuowanie odgromnika na schemacie instalacji, ale również sposób jego mocowania i przyłączenia w urządzeniu, łącznie ze szczegółami montażowymi: wystarczający przekrój przewodów, jak najmniejsza długość przewodów poprzecznej gałęzi ochrony (w zasadzie nieprzekraczająca 0,5 m

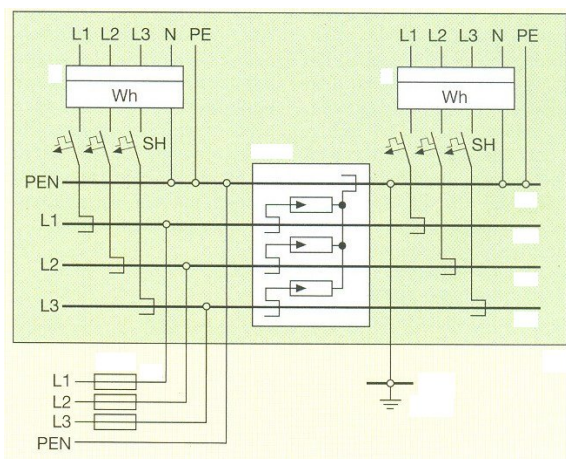
z każdej strony), unikanie pętli i ostrych łuków [10]. Przewody uziemiające nie powinny być układane w osłonach metalowych, chyba że są z nimi połączone na obu końcach. Pamiętać też należy o narażeniach cieplnych przewodów w razie zwarcia, o unikaniu konfiguracji połączeń sprzyjających dużym siłom elektrodynamicznym i o sumarycznym spadku napięcia w całej gałęzi poprzecznej, stanowiącym narażenie napięciowe izolacji urządzeń i kolejnego ogranicznika przepięć znajdujące się głębiej w instalacji. Na rys. 2 przedstawiono taką sytuację, przy czym nienajlepiej wykonane połączenia przewodów ochronnych PE niepotrzebnie zwiększają narażenia napięciowe warystora. Można mu ująć składową u_3 spadku napięcia łącząc bezpośrednio dolne zaciski odgromnika i ogranicznika warystorowego.



Rys. 3. Układ V przyłączenia odgromników (trzy odgromniki jednobiegunowe lub zespół trzybiegunowy)

Wspomniane problemy, a zwłaszcza dążenie do ograniczenia narażeń napięciowych instalacji, spowodowały stopniową ewolucję klasycznych układów połączeń bez bezpieczników w poprzecznej gałęzi ochrony (rys. 1c, d). Pierwszym krokiem był układ V eliminujący spadek napięcia na przewodach poprzecznej gałęzi ochrony (rys. 3), bo właściwie eliminuje on tę gałąź. Od strony przewodów czynnych w każdym biegunie przyłącza się dwa przewody, a zatem są potrzebne podwójne zaciski i to zaciski do przewodów o przekroju na ogół znacznie większym niż w przypadku przyłączania odgromników w wyodrębnionej gałęzi poprzecznej. Chodzi o główne przewody zasilające instalację, w stanie normalnej pracy przewodzące prąd roboczy i wymagające zabezpieczenia nie tylko od skutków zwarcć, ale i od przeciążeń. Tymczasem przewody gałęzi poprzecznej w stanie normalnej pracy nie przewodzą żadnego prądu, a wymagają zabezpieczenia tylko od skutków zwarcć. Podobnie można ograniczyć bądź wyeliminować spadek napięcia w przewodach uziemiających między odgromnikami a uziemieniem wprowadzając układ V i po tej stronie oraz dodatkową szynę wyrównawczą [10] do bezpośredniego wyprowadzenia przewodu ochronnego PE instalacji. Odgromniki o podwójnych zaciskach, przeznaczone do układu V, pozwalają przyłączać przewody o przekroju nieprzekraczającym 35 lub 50 mm², co może wystarczać za bezpiecznikami o prądzie znamionowym nie większym niż 125 A. Przyłączanie przewodów o przekroju większym, do 120 mm² (za bezpiecznikami o prądzie znamionowym do 250 A), jest możliwe za pośrednictwem przejściowej listwy zaciskowej (niem. *Vorbau-Klemmenleiste*).

Kolejnym krokiem w tym samym kierunku jest blok odgromnikowy nakładany na szyny rozdzielnic (niem. *Aufrasten auf die Sammelschienen*), przedstawiony na rys. 4. Z punktu widzenia układu połączeń sytuacja jest analogiczna, jak w układzie V, ale żaden element bloku odgromnikowego nie jest narażony na przewodzenie prądu roboczego, odpada problem zacisków przejściowych, zdemontowanie odgromników nie przerywa zasilania, zakładanie i zdejmowanie może odbywać się pod napięciem. Są dostępne wykonania dla dowolnego układu instalacji, również układ 3+1 odgromników do instalacji TT.



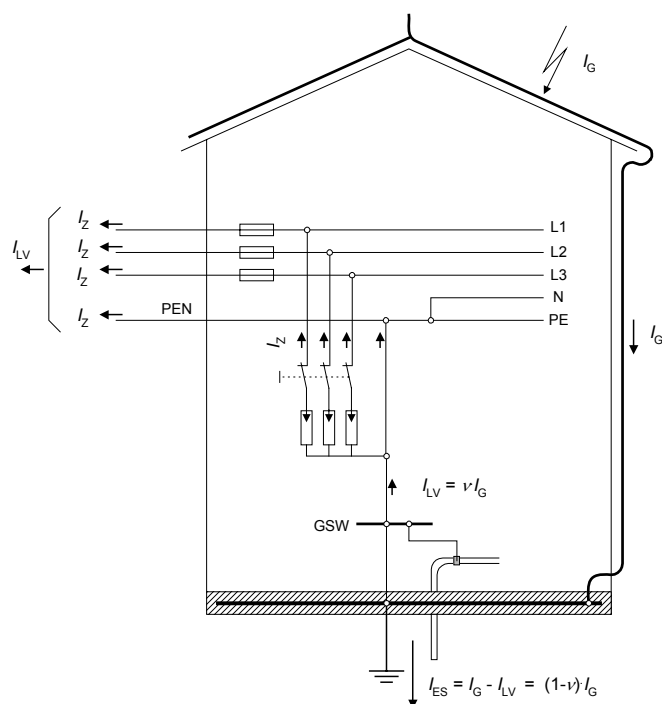
Rys. 4. Sposób przyłączenia bloku odgromnikowego nakładanego na szyny rozdzielnic głównej
SH – wyłącznik selektywny przedlicznikowy

4. Rozpływ prądu piorunowego

Największe narażenia odgromników w budowlach z piorunochronem występują przy bezpośrednim uderzeniu pioruna (rys. 5), ale trafna ich ocena nie jest łatwa i akceptuje się duże uproszczenia. Od chwili zapoczątkowania wyładowania narastający (na czole udaru) prąd piorunowy odpływa przez uziemienie piorunochronu i, powiązane z nim połączeniami wyrównawczymi bezpośrednimi, inne uziemienia sztuczne i naturalne, jeśli występują, oraz przewód PEN zasilającej linii elektroenergetycznej wchodzącej w skład sieci rozdzielczej o układzie TN. Jednocześnie narasta udarowe napięcie uziomowe układu uziemień rozpatrywanego obiektu względem ziemi odniesienia oraz względem wszelkich wprowadzonych z zewnątrz przewodów (elektroenergetycznych, informatycznych) nieobjętych w obiekcie połączeniami wyrównawczymi bezpośrednimi. Kiedy to napięcie przekracza napięcie zapłonu odgromników, następuje ich zapłon, powstają chwilowe połączenia wyrównawcze wspomnianych przewodów z główną szyną wyrównawczą (GSW) i prąd piorunowy zaczyna odpływać również tymi przewodami poza rozpatrywany obiekt.

Na ogół brakuje danych o impedancji udarowej bądź impedancji falowej poszczególnych równoległych dróg przepływu prądu piorunowego i dokładna ocena rozpływu prądu nie jest możliwa. Wobec tego norma PN-IEC 61312-1:2001 [20] dopuszcza następujące założenie: połowa całkowitego prądu pioruna I_G wpływa do uziomu urządzenia piorunochronnego rozpatrywanego obiektu (I_{ES}), a druga połowa rozkłada się równomiernie na metalowe instalacje wchodzące do obiektu (rozległe uziomy naturalne, przewody linii elektroenergetycznych, metalowe osłony bądź żyły zewnętrzne przewodów telekomunikacyjnych itp.). Takie założenie, wywodzące się ze znanej od dawna w teorii podejmowania decyzji *zasady braku dostatecznej racji* (kryterium Bayesa-Laplace'a), jest przejawem bezradności. Wykpiwając tę zasadę przypomina się czasem, że kierował się nią osiołek, któremu w żłobie dano w jednym owies, w drugim siano, i wiadomo, jak się to skończyło.

Najtrudniej obronić założenie, że akurat połowa całkowitego prądu pioruna I_G wpływa do miejscowego uziomu urządzenia piorunochronnego niezależnie od parametrów tego uziomu i niezależnie od liczby i rodzaju uziemionych metalowych instalacji wprowadzonych do obiektu. Można też wątpić, czy słusznie cząstkowy prąd piorunowy I_{LV} odpływający zasilającą linią elektroenergetyczną dzieli się na wszystkie m przewodów przyłącza. W przypadku napowietrznych sieci i przyłączy o przewodach gołych wszystkie przewody przyłącza i linii są sprawne, nieprzerwane w normalnych warunkach pracy, ale jeszcze przed uderzeniem pioruna w obiekt burza może zerwać niektóre przewody w jego pobliżu.



Rys. 5. Rozpływ prądu piorunowego przy bezpośrednim uderzeniu pioruna w chroniony budynek z instalacją o układzie TN, zasilaną z sieci kablowej, z piorunochronem i uziomem fundamentowym, bez przyłączonych rozległych uziomów naturalnych

Prosty przykład rozptyłu prądu piorunowego przy uderzeniu pioruna w rozpatrywany obiekt przedstawiono na rys. 5. Prąd piorunowy I_G dzieli się na część $I_{ES} = (1-v) \cdot I_G$ odpływającą bezpośrednio do ziemi przez miejscowe uziemienie piorunochronu i część $I_{LV} = v \cdot I_G$ odprowadzaną przewodami przyłącza i zasilającej sieci elektroenergetycznej. Do obiektu nie wchodzi inne przyłącza zdolne odprowadzać prąd piorunowy, wobec czego $I_{ES} + I_{LV} = I_G$. Według zasady braku dostatecznej racji współczynnik podziału prądu piorunowego $v = 0,5$. Wartość inną, z przedziału $0,35 \div 0,65$, projektant może uzasadnić [4] wartością rezystancji udarowej uziemienia piorunochronu, liczbą i właściwościami wprowadzonych do obiektu części przewodzących obcych oraz rodzajem zasilającej sieci elektroenergetycznej (kablowa czy napowietrzna), liczbą przewodów przyłącza (jedno- czy trójfazowe) i rozkładem uziemień przewodu ochronnego (PEN, PE) sieci.

Zakłada się, że wszystkie przewody doprowadzone do złącza w liczbie m w jednakowym stopniu uczestniczą w odprowadzaniu prądu, a więc każdy przewodzi cząstkowy prąd piorunowy:

$$I_z = \frac{I_{LV}}{m} = \frac{v}{m} \cdot I_G$$

Jego wartość jest na ogół zawarta w przedziale $I_z = 10 \div 25$ kA. Jest to zarazem największy obliczeniowy prąd piorunowy, jaki może przepływać przez pojedynczy odgromnik i pojedynczy bezpiecznik. Widać tu dodatkowy argument za stosowaniem przyłączy trójfazowych ($m = 4$). Korzystna jest też mała wartość współczynnika podziału prądu piorunowego ($v < 0,5$), czemu sprzyja mała udarowa rezystancja uziemienia uziomu piorunochronnego.

W taki bądź podobny sposób rozpływ prądu piorunowego wyjaśnia się i uwzględnia się w normach międzynarodowych IEC oraz europejskich EN, a także w innych dokumentach normatywnych bądź zaleceniach projektowych we wszystkich krajach świata. We wszystkich z wyjątkiem Polski, gdzie dla uzasadnienia kretyńskiego pomysłu obejmowania połączeniami wyrównawczymi metalowej armatury instalacji wodociągowych z tworzyw sztucznych [24] wymyślono, że znaczny prąd piorunowy płynie również przez słup wody w izolacyjnych rurociągach. Urojenie załęgłe w paru ptasich mózdzkach zyskało wsparcie przewodniczącego Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej, warszawskiego profesora, i jest lansowane przez Biuro Zarządu Głównego branżowego

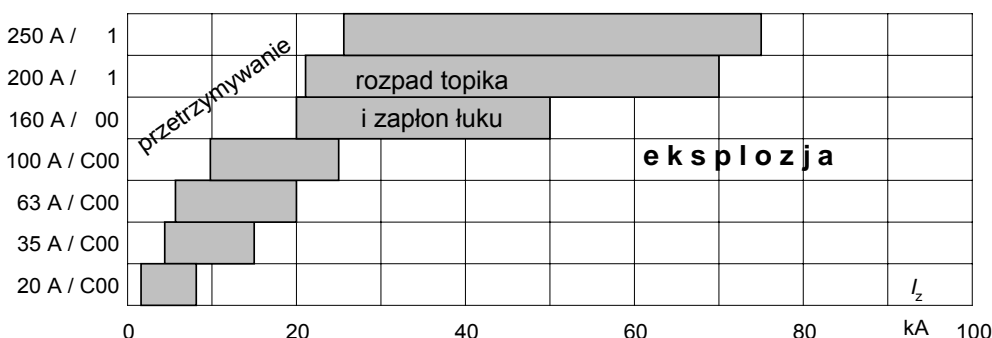
stowarzyszenia uchodzącego za naukowo-techniczne. Nie tylko w Polsce rodzą się absurdalne pomysły, ale polski klimat sprzyja ich rozkwitaniu.

Każdy projektant, wykonawca lub inspektor nadzoru, który wprowadza w życie rozwiązania nedorzeczne, w sposób oczywisty sprzeczne z zasadami wiedzy technicznej, łamie art. 12.6 ustawy Prawo Budowlane i czyni to na własną odpowiedzialność. Jeżeli stanie za to przed sądem i przedstawi uprawnienia do wykonywania samodzielnych funkcji technicznych w budownictwie, będzie przez sąd – zgodnie z terminologią prawniczą – traktowany jako *osoba posiadająca wystarczające używanie rozumu*. A taka osoba, nawet w warunkach wojskowej dyscypliny, odpowiada za to, co czyni, a zwłaszcza za podejmowane decyzje i działania, od których zależy bezpieczeństwo ludzi, mienia i środowiska, i nie może się usprawiedliwiać poleceniem przełożonego albo przepisem ewidentnie nonsensownym. Dowiódł tego wyrok sędziego Puczyłowskiego w sprawie trzech oficerów lotnictwa po katastrofie *Iskry* w związku z defiladą 11 listopada 1998 r.

Jak pisze prof. Hanna Świda-Ziemia (GW, 29.03.2005): *W funkcjonalnym społeczeństwie ogromną rolę odgrywa zasada, którą pamiętam z dzieciństwa, a także z książek – osoby, które sprzeciwiają się etosowi zawodowemu, są potępiane przez własne środowisko. Obawa przed marginalizacją w najbliższym środowisku, przed odrzuceniem przez swoich, powodowała, że wojskowy albo lekarz, albo adwokat bał się z wyprzedzeniem. Nie przychodziło mu do głowy postąpić niehonorowo, bo pojawiał mu się przed oczyma obraz zniewag, których dozna w swoim otoczeniu. A nie ma większej hańby dla honoru specjalisty niż schlebianie zawodowemu debilizmowi.*

5. Zachowanie się bezpieczników przy przepływie prądu piorunowego

Wcześniejsze doniesienia o skutkach przepływu prądu piorunowego przez bezpieczniki były fragmentaryczne i nieściśle, bo pochodziły z powierzchniowych obserwacji powypadkowych. Obszerne badania na ten temat podjęto dość późno, dopiero w latach 90. ubiegłego wieku, a były one motywowane potrzebami techniki ochrony przeciwprzebieciowej instalacji niskonapięciowych. Badania przyniosły nie tylko pogłębione rozpoznanie zjawisk, ale również liczne użyteczne wyniki pomiarów. Stwierdzono przy okazji duże rozbieżności „parametrów udarowych” między na pozór jednakowymi wkładkami różnych wytwórców [9], co można usprawiedliwić tym, że do tej pory normalizacja nie stawia żadnych wymagań odnośnie do zachowania się wkładek bezpiecznikowych poddanych przepływowi prądów udarowych o dużej stromości, w tym prądów piorunowych. Najwyraźniej oczekuje się zaawansowania badań w stopniu dającym jednoznaczne wnioski dla normalizacji.



Rys. 6. Zachowanie się wkładek bezpiecznikowych gG o napięciu znamionowym 500 V poddanych przepływowi prądu piorunowego 10/350 μ s o różnej wartości [2]

Zachowanie się wkładek bezpiecznikowych klasy gG, przez które przepływa prąd piorunowy 10/350 μ s, przedstawiono na rys. 6. Wkładka przetrzymuje prądy mniejsze niż udarowy prąd zadziałania (tabl. 2). Jego wartości podane na rysunku w oparciu o wstępne oszacowania są nieco zawyżone. Uwzględniają one wprawdzie, że przy dużej stromości prądu piorunowego efekt naskórkowości wyraźnie zmniejsza całkę Joule’a przedłukową $I^2 t_p$ (w porównaniu z wartością przy prą-

dzie 50 Hz, przepisana w normie i przytoczona w tabl. 2), ale nie uwzględniają marginesu na wielokrotne przetrzymywanie impulsów prądowych. Nie uwzględniają też skutku cieplnego prądu następczego [9] zależnego od wartości spodziewanego prądu zwarciovego w miejscu zainstalowania odgromników. Komu zależy na wyeliminowaniu zbędnych interwencji bezpieczników, ten być może upewni się złudnie, że przy spodziewanym cząstkowym prądzie piorunowym 20 kA wkładki gG 200A nie zadziałają (rys. 6). Nie znaczy to jednak, że nie zadziałają niepotrzebnie chwilę później przy przepływie prądu następczego.

Tablica 2. Udarowy prąd zadziałania wkładek bezpiecznikowych klasy gG [7]

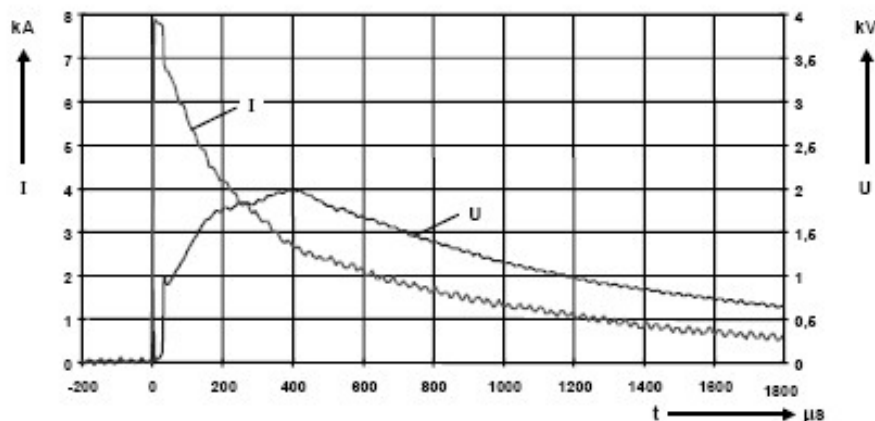
Prąd znamionowy wkładki I_n	Całka Joule'a przedłukowa $I^2 t_p$ przy prądzie 50 Hz	Prąd zadziałania [kA] przy udarze o kształcie	
		10/350 μ s	8/20 μ s
A	A ² s	kA	kA
25	1210	2,2	9,3
32	2500	3,2	13,4
40	4000	4,0	16,9
50	5750	4,8	20,3
63	9000	6,0	25,4
80	13700	7,5	31,3
100	21200	9,3	38,9
125	36000	12,1	50,7
160	64000	16,1	67,6
200	104000	20,6	86,2
250	185000	27,5	115,0

Kiedy wyeliminowanie zbędnych zdarzeń jest sprawą ważną, wtedy bardziej miarodajną informacją jest podana w tabl. 3 całka Joule'a wielokrotnie przetrzymywana przez wkładki bezpiecznikowe, którą należy porównywać z łączną całką Joule'a (skutkiem cieplnym) prądu piorunowego i prądu następczego płynącego przez pół okresu. Wartości te odnoszą się do wkładek usytuowanych w poprzecznej gałęzi ochrony, które przed pojawieniem się prądu piorunowego były nienagrzane. W przypadku bezpieczników w torze głównym (rys. 1c, d, rys. 3, rys. 4) można by uwzględnić nieznaczne zmniejszenie ich piorunowej całki Joule'a w następstwie wstępnego nagrzania prądem roboczym.

Tablica 3. Całka Joule'a prądu piorunowego wielokrotnie przetrzymywana przez zabezpieczenia nadprądowe o różnym prądzie znamionowym [3, 5]

Prąd znamionowy	A	40	50	63	80	100	125	160	200	250
$I^2 t$ bezpiecznika	kA ² s	1,3	2,0	3,2	5	8	12	22	39	69
$I^2 t$ wyłącznika SHU	kA ² s	33	38	50	50	55				

W razie przekroczenia udarowego prądu zadziałania dochodzi do rozpadu topika i zapłonu łuku, co jednak nie wpływa na przebieg prądu piorunowego (rys. 7), wymuszenia prądowego pochodzącego z fikcyjnego idealnego źródła prądu. Bezpiecznik nie jest w stanie przerwać przepływu tego prądu ani ograniczyć jego wartości szczytowej; zresztą topik na ogół rozpada się już po jej przeminięciu, nie na czole, lecz na grzbiecie udaru prądu piorunowego.



Rys. 7. Przebieg prądu i napięcia między zaciskami bezpiecznika gG 25 A poddanego przepływowi prądu piorunowego [7]

Nie ma mowy o wybiórczym działaniu bezpieczników poddanych przepływowi prądu piorunowego, skoro bezpiecznik takiego prądu nie wyłącza. Wymaga się wprowadzić, aby bezpieczniki poprzedzające w torze zasilania F1...F3 (rys. 1a) miały prąd znamionowy co najmniej 1,6-krotnie większy niż bezpieczniki F4...F6 w gałęzi poprzecznej odgromników, ale chodzi tylko o wybiórczość podczas przepływu prądu następczego, gdyby bezpieczniki miały go wyłączać lub w razie trwałego zwarcia w gałęzi poprzecznej.

Przy poziomie ochrony I przez wkładki bezpiecznikowe może popłynąć prąd piorunowy nieco większy niż 20 kA sprawiający, że wkładki gG o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 200 A mogą zadziałać, a wkładki o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 100 A mogą nawet eksplodować. Mianowicie przy prądzie piorunowym kilkakrotnie większym niż udarowy prąd zadziałania wkładki dochodzi do wybuchowego rozpadu topika i wzrostu ciśnienia we wkładce powodującego pęknięcie korpusu, a nawet jego eksplozyjne rozerwanie. Progowa wartość prądu piorunowego zagrażającego eksplozją wkładki bezpiecznikowej jest tym większa, im większy jest jej prąd znamionowy (rys. 6). To kolejny powód, aby odgromniki dobezpieczać bezpiecznikami o prądzie znamionowym równym największemu dopuszczalnemu przez wytwórcę I_{nmax} [1].

Zadziałania bezpieczników przy przepływie prądu piorunowego, a tym bardziej ich eksplozja, są zdarzeniami szkodliwymi. Niepożądane są też zadziałania bezpieczników – zwłaszcza bezpieczników w torze głównym (rys. 1a, b, rys. 3, rys. 4) – przy przepływie prądu następczego. Jeżeli na etapie projektowania zarysowuje się ich wyraźne ryzyko, to wchodzi w rachubę następujące środki zapobiegawcze:

- zmniejszenie współczynnika podziału prądu ν przez zmniejszenie wypadkowej rezystancji układu uziomowego piorunochronu,
- zastąpienie bezpieczników selektywnym odskokowym wyłącznikiem przyłączowym o nieporównanie większej przetrzymywanej całej Joule'a (tabl. 3),
- zastosowanie odgromników o silnym ograniczaniu prądu następczego.

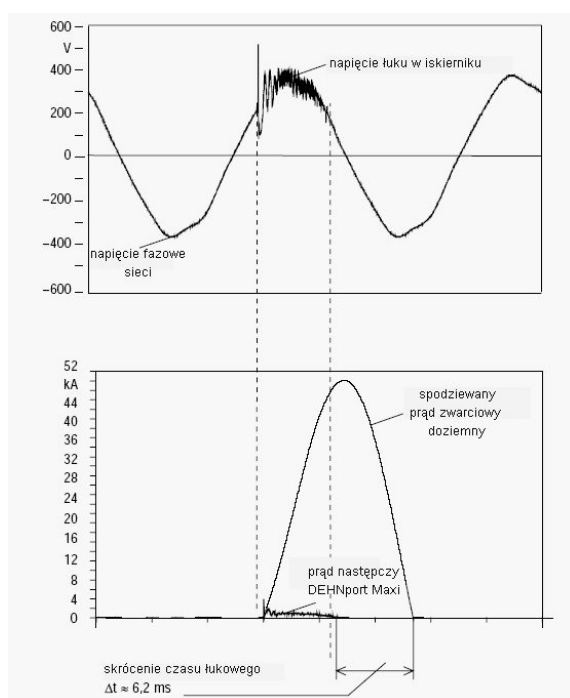
6. Odgromniki ograniczające prąd następczy

Nie można wyeliminować obciążeń cieplnych, jakim odgromniki i bezpieczniki podlegają przy przepływie prądów piorunowych ani znacznie ich zmniejszyć, ale można zmniejszać równie ważne obciążenia, które są wynikiem przepływu prądów następczych. Umożliwiają to odgromniki wewnętrzne, przeznaczone do instalacji elektrycznych, ograniczające prąd następczy, wykorzystujące technikę wymuszonego gaszenia łuku stosowaną w wyłącznikach ograniczających, co pozwala uzyskać silny efekt ograniczający i dużą zdolność wyłączenia (rys. 8, 9, 10).



Rys. 8. DEHNport® Maxi – odgromnik o napięciu trwałej pracy 255 V, o znamionowym prądzie wyładowczym 50 kA (10/350 μs), silnie ograniczający prąd następczy (cena netto 484 PLN)

Odgromniki o łuku dzielnym wyłączają samodzielnie prądy następcze o wartości do 25 kA, a odgromniki samowydmuchowe o łuku chłodzonym promieniowo i osiowo – do 50 kA. Jeżeli spodziewany prąd zwarciový w miejscu ich zainstalowania nie przekracza podanej wartości, a prawie nigdy nie przekracza 50 kA, to nie wymagają dobezpieczenia.

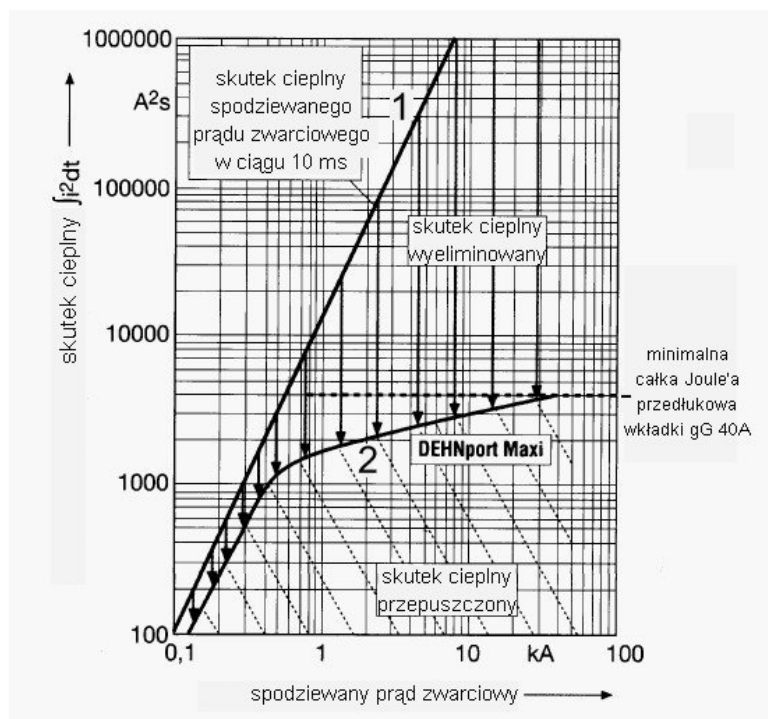


Rys. 9. Oscylogramy wyłączenia prądu następczego przez odgromnik ograniczający DEHNport® Maxi [8]

Jak skuteczne jest ograniczanie prądu następczego przez odgromniki samowydmuchowe wiadać na rys. 9 i 10. Wartość szczytowa prądu następczego zostaje ograniczona 25-krotnie (50 kA → 2 kA), a czas jego przepływu – niemal 3-krotnie (10 ms → 3,8 ms), wyłączenie następuje na długo ($\Delta t = 6,2$ ms) przed naturalnym przejściem prądu przez zero. Dzięki temu cała Joule'a (skutek cieplny) prądu następczego zostaje ograniczona ponad 3000-krotnie, od spodziewanej wartości

$$\left(\frac{50000}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 0,01 = 12\,500\,000 \text{ A}^2\text{s}$$

do poziomu 4000 A²s (rys. 10). Wytwórca zapewnia, że przetrzymuje ją bez zbędnego zadziałania już wkładka gG 40 A. Zapomina dodać, że tak byłoby, gdyby nie to, że tuż przedtem wkładka pochłonęła całą Joule'a cząstkowego prądu piorunowego. Korzystając z rys. 10 i oceniając stopień ograniczania skutku cieplnego prądu następczego, trzeba pamiętać, że na obu osiach podziałka jest logarytmiczna.



Rys. 10. Całka Joule'a (skutek cieplny) jednej półfali spodziewanego prądu następczego (prosta 1) oraz prądu następczego ograniczonego przez odgromnik DEHNport® Maxi w funkcji spodziewanego prądu zwarciaowego) [8]

Reasumując, odgromniki tak silnie ograniczające prąd następczy prawie nigdy nie wymagają dobezpieczenia, co więcej – bezpieczników poprzedzających, nawet o niedużym prądzie znamionowym (≥ 40 A gG), nie narażają na zbędne zadziałania w wyniku przepływu prądu następczego. Poprzedzające bezpieczniki bądź równoważne wyłączniki oczywiście będą, bo są potrzebne z innych powodów. W wariancie najoszczędniejszym wystarczy je tak dobierać, aby nie eksplodowały przy spodziewanym cząstkowym prądzie piorunowym I_{zs} , a następnie – stosownie do ich całki Joule'a wyłączenia – sprawdzić, czy obciążalność zwarciaowa zabezpieczanych przewodów jest wystarczająca. Odgromniki silnie ograniczające prąd następczy przydają się zwłaszcza w miejscach, gdzie spodziewany prąd zwarciaowy jest bardzo duży, na przykład przy złączach instalacji odbiorczych zasilanych bezpośrednio ze stacji o dużej mocy.

7. Warystorowe ograniczniki przepięć – problemy koordynacji

Wnętrzone ograniczniki warystorowe są wykorzystywane przede wszystkim jako ograniczniki klasy II (C) na drugim stopniu ochrony, a w obiektach bez instalacji piorunochronnej, zasilanych z sieci kablowej – również na pierwszym stopniu ochrony. Elementy warystorowe mogą też wchodzić w skład ograniczników klasy III (D) na trzecim stopniu ochrony. Zdolność odprowadzania prądu wyładowczego przez ograniczniki warystorowe określa się dla udarów 8/20 μ s. Przy udarach 10/350 μ s jest mała, zależnie od średnicy krążków warystorowych (32÷80 mm) wynosi na ogół 1÷5 kA.

W stanie nieuszkodzonym krążki warystorowe wykazują pewien prąd upływowy, który z biegiem czasu narasta wskutek procesów starzeniowych i naruszenia struktury spieku w następstwie powtarzających się przepięć. Zwiększa się strata mocy i temperatura krążków, aż tracą one stabilność termiczną¹, proces nabiera charakteru lawinowego i zagraża nie tylko zniszczeniem

¹ Moc długotrwale wydzielana w ograniczniku pod wpływem przyłożonego napięcia przewyższa zdolność odprowadzania ciepła przez obudowę i połączenia; takiemu stanowi w jednej normie (PN-IEC 99-4:1993) przypisano nazwę *termiczna niestabilność ogranicznika*, a w innej (PN-IEC 61643-1:2001) - *rozbieganie ciepłe*.

ogranicznika, ale i pożarem, wtórnymi uszkodzeniami sąsiednich urządzeń. Zapobiega temu wbudowany ogranicznik temperatury odłączający ogranicznik warystorowy spod napięcia (niem. *thermische Abtrennvorrichtung*).

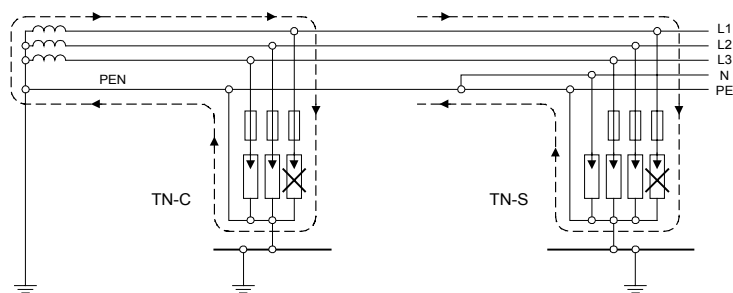
Zabezpieczenie temperaturowe nie w każdej sytuacji jest skuteczne. Już po jednorazowym przekroczeniu maksymalnego dopuszczalnego prądu wyładowczego I_{\max} może nastąpić nieodwracalna degradacja własności spieku i może nastąpić zwarcie krążków warystorowych. Będą one bezpowrotnie zniszczone, ale nie powinno dojść do uszkodzenia podstawy bądź obudowy ogranicznika ani sąsiednich urządzeń. Powinno temu zapobiec zabezpieczenie zwarciowe: bezpiecznik wbudowany albo bezpiecznik w gałęzi poprzecznej ogranicznika. W razie ich braku ta rola przypadłaby zabezpieczeniu we wzdluznej gałęzi zasilania (rys. 1c), którego interwencja przerywałaby działanie instalacji lub jej części.

Wytwórca podaje „wytrzymałość zwarciową” ograniczników warystorowych, na ogół 25 kA lub 50 kA, którą należy porównywać ze spodziewanym prądem zwarciowym w miejscu zainstalowania. Jest ona gwarantowana pod warunkiem, że poprzedzający bezpiecznik klasy gG ma prąd znamionowy nie większy niż określony przez wytwórcę największy dopuszczalny prąd znamionowy I_{nmax} . Informacja ta brzmi podobnie, jak w przypadku ograniczników iskiernikowych (odgromników), ale ma inny sens fizyczny. Nie chodzi tu o wspomaganie wyłączenia prądu następczego, bo ten problem w ogóle nie występuje, lecz o wyeliminowanie zagrożenia dla obsługi i sąsiednich urządzeń ze strony ogranicznika, który utracił stabilność termiczną. W przypadku konstrukcji zespolonych ograniczników z wbudowanym bezpiecznikiem nie ma żadnych wymagań co do zabezpieczenia poprzedzającego ogranicznik warystorowy w instalacji.

Ograniczniki przepięć pierwszego i drugiego stopnia ochrony są ze sobą połączone równolegle, ale – poza konstrukcjami specjalnymi – oddzielone odsprzęgającą indukcyjnością odcinka instalacji lub specjalnego dławika, jeśli muszą być usytuowane blisko siebie (rys. 2). Warunki koordynacji poszczególnych stopni ochrony wymagają m.in., aby napięcie występujące na całej gałęzi poprzecznej ogranicznika pierwszego stopnia (odgromnik, przewody i ew. bezpiecznik) nie zagrażało przeciążeniem ogranicznika warystorowego na drugim stopniu ochrony. Obawiać się tego należy nie tyle przy przepływie prądu wyładowczego, co przy przepływie prądu następczego, a ściślej – przy jego ewentualnym wyłączeniu przez bezpiecznik. Przepięcie wyłączeniowe bezpiecznika łącznie ze spadkiem napięcia na odgromniku i przewodach gałęzi poprzecznej jest raczej mniejsze niż nieco wcześniej występujące napięcie zapłonowe odgromnika. Jednak przebiegi napięciowe przy wyłączeniu prądu następczego mają tak małą częstotliwość i stromość, że indukcyjność odsprzęgająca nie odgrywa większej roli i przenoszą się one na ogranicznik warystorowy (rys. 2), bardzo wrażliwy na przepięcia o czasie trwania przekraczającym dziesiątki mikrosekund. Można temu zapobiec usuwając bezpieczniki z gałęzi poprzecznej odgromników albo jeszcze skuteczniej – decydując się na układ V (rys. 3). Jeśli to niemożliwe, można te narażenia złagodzić stosując bezpieczniki o jak największym prądzie znamionowym, tzn. równym największemu dopuszczalnemu przez wytwórcę I_{nmax} . To kolejny powód, by tak właśnie dobierać bezpieczniki dobezpieczające odgromniki.

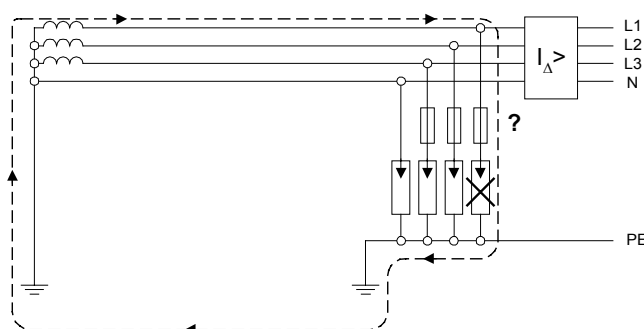
8. Ograniczniki przepięć w instalacji a ochrona przeciwporażeniowa

Problem zwarciowego zabezpieczenia poprzecznej gałęzi ochrony z ogranicznikami przepięć jest też istotny z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej niezależnie od tego, czy są to ograniczniki iskiernikowe, czy beziskiernikowe. Zwarcie w ograniczniku, bez względu na jego przyczynę, oznacza uszkodzenie izolacji podstawowej i tym samym – zagrożenie porażeniowe. Poprzedzające zabezpieczenie powinno dokonać samoczynnego wyłączenia zasilania przed upływem 5 s, bo taki graniczny czas wyłączenia jest wymagany w obwodach rozdzielczych, w których są instalowane ograniczniki klasy I i II. Zatem dochodzi kolejne wymaganie ($I_n \leq \dots$), jakie powinny spełniać bezpieczniki poprzedzające ograniczniki przepięć.



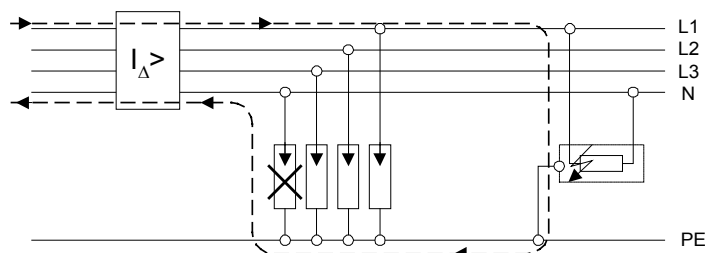
Rys. 11. Małoporowa pętla prądu zwarciego w razie zwarcia w ograniczniku przepięć przyłączonym w instalacji o układzie TN-C (układ ograniczników 3+0) lub TN-S (układ ograniczników 4+0)

Wymaganie to nie wnosi niczego nowego w instalacjach o układzie TN, bo i tak musi być spełnione z innych powodów. W układzie TN zwarcie w ograniczniku L-PE tworzy małoporową pętlę zwarciovą złożoną wyłącznie z przewodów (rys. 11), prąd zwarciový ma dużą wartość i łatwo zapewnić samoczynne wyłączenie zasilania w wymaganym czasie.



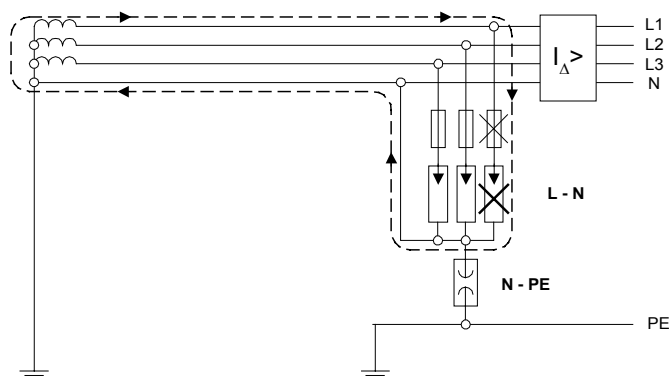
Rys. 12. Ograniczniki przepięć w układzie 4+0 w złączu instalacji o układzie TT; bezpiecznik nie wyłącza uszkodzonego ogranicznika, występuje niebezpieczne napięcie na przewodzie ochronnym PE

Inaczej jest w instalacjach o układzie TT. Aby usunąć ryzyko wyłączenia instalacji spod napięcia po każdym zadziałaniu ograniczników przepięć, najchętniej przyłącza się je przed głównym wyłącznikiem różnicowoprądowym (rys. 12). Odcinek instalacji przed tym wyłącznikiem powinien być w wykonaniu odpornym na zwarcia doziemne (L-E, L-PE), bo pętla przy takim zwarciu zamyka się przez ziemię i prąd jest za mały, by pobudzić zabezpieczenia nadprądowe. Zatem paradoksalnie na odcinku, który ma być uodporniony na zwarcia doziemne, instaluje się urządzenia, które mają wywoływać takie zwarcia krótkotrwałe (przy odprowadzaniu prądu wyładowczego), ale w razie niesprawności – mogą wywołać zwarcie trwałe. Ograniczniki przepięć w układzie 4+0 przyłączone do instalacji TT w sposób przedstawiony na rys. 12 mogą więc stwarzać zagrożenie porażeniowe.



Rys. 13. Zakłócenie działania wyłącznika różnicowoprądowego w instalacji TT w następstwie uszkodzenia ogranicznika przepięć (linią przerywaną zaznaczono drogę przepływu tej części prądu zwarcia doziemnego, która nie jest prądem różnicowym w miejscu zainstalowania wyłącznika)

Zainstalowanie ograniczników w układzie 4+0 za niskoczułym zwłocznym wyłącznikiem różnicowoprądowym, odpornym na prądy udarowe co najmniej 3 kA 8/20 μ s (534.2..6 [17]), tylko pozornie rozwiązuje problem. W razie zwarcia w ograniczniku N-PE wraca przezeń do źródła przeważająca część prądu zwarcia doziemnego chronionej instalacji, prąd różnicowy jest niewielki i może nie wystarczyć do pobudzenia wyłącznika różnicowoprądowego (rys. 13). Zachodzi swoiste odczulenie wyłącznika różnicowoprądowego, które zresztą zawsze towarzyszy zwarciu z ziemią przewodu neutralnego obwodu chronionego wyłącznikiem różnicowoprądowym.



Rys. 14. Ograniczniki przepięć w układzie 3+1 w złączu instalacji o układzie TT; bezpiecznik wyłącza uszkodzony ogranicznik, nie ma zagrożenia porażeniowego

Właściwym rozwiązaniem jest układ 3+1 ograniczników przepięć (rys. 14), o trzech ogranicznikach włączonych między każdy z przewodów fazowych a przewód neutralny oraz czwartym włączonym między przewód neutralny N i przewód ochronny PE. Przy zwarciu w ograniczniku L-N płynie duży prąd w pętli złożonej z przewodów, wystarczający do pobudzenia zabezpieczenia zwarciovego. Zwarcie L-PE w układzie 3+1, bez jednoczesnego zwarcia L-N, nie jest możliwe. Ogranicznik N-PE specjalnej konstrukcji zapewnia niezawodne oddzielenie przewodów N i PE w każdej sytuacji ruchowej. Ma największe dopuszczalne napięcie pracy ciągłej takie, jak pozostałe ograniczniki ($U_c = 1,1 \cdot U_0 = 250$ V w instalacji 230/400 V), a znamionowy prąd wyładowczy większy niż one (100, 75 lub 50 kA zależnie od poziomu ochrony), bo może przewodzić sumę prądów wyładowczych płynących przez dwa, a nawet trzy ograniczniki. Największe jego narażenie występuje przy uderzeniu pioruna w budynek i zwrotnym przepływie prądu piorunowego przez szynę wyrównawczą i ograniczniki do sieci elektroenergetycznej, tzn. w sytuacji podobnej do przedstawionej na rys. 5. Natomiast ogranicznik N-PE w zasadzie nie jest narażony na przepływ prądu następczego i wobec tego ma niewielką zdolność wyłączenia prądu następczego (np. 100 A).

9. Zabezpieczenie przewodów przyłączowych ograniczników

Problem dotyczy przede wszystkim przewodów wyodrębnionej poprzecznej gałęzi ochrony (rys. 1) po obu stronach ograniczników, a w ogóle nie dotyczy bloku odgromnikowego nakładanego na szynę (rys. 4).

Przez przewody poprzecznej gałęzi ochrony z ogranicznikami iskiernikowymi podczas normalnej pracy nie płynie żaden prąd i nie są one narażone na przeciążenia. Wymagają tylko zabezpieczenia od skutków zwarc na zwykłych zasadach. To zadanie przypada poprzedzającemu, najbliższemu od strony zasilania, zabezpieczeniu zwarciovemu (bezpiecznikowi bądź wyłącznikowi), znajdującemu się w samej gałęzi ochrony (rys. 1a, b) bądź w torze głównym (rys. 1c, d). W identycznej sytuacji są przewody uziemiające [18] ograniczników w układzie V (rys. 3). Natomiast z drugiej strony przyłącza się do tych ograniczników przewody czynne torów głównych o obciążalności długotrwałej dobranej do szczytowego obciążenia obwodu i do warunków zabezpieczenia od przeciążeń oraz od skutków zwarc.

Tablica 4. Przyrost temperatury przewodów miedzianych wywołany prądem piorunowym

Prąd piorunowy 10/350 μ s		Przyrost temperatury przewodu miedzianego o przekroju			
Wartość szczytowa	Całka Joule'a	4 mm ²	6 mm ²	10 mm ²	16 mm ²
kA	kA ² s	K	K	K	K
5	6,25	2,5	1	0,5	0,2
10	25	10	4	2	1
15	56	22	10	4	1,5
25	156	62	27	10	4
50	625	248	110	40	15
75	1406	(560)	247	89	35
100	2500	?	(440)	158	62

W tablicach 4 i 5 zestawiono przyrosty temperatury osiągnięte przez przewody miedziane izolowane polwinitem, którym przypisano największą dopuszczalną jednosekundową gęstość prądu $k = 146 \text{ A/mm}^2 \cdot \text{s}$ (nagrzewanie od 25°C do 160°C), w następstwie przepływu przez nie odpowiednio prądu piorunowego 10/350 μ s oraz prądu następczego w ciągu 10 ms. Są to minimalne narażenia, jakie przewody poprzecznej gałęzi ochrony muszą wytrzymać. Oba narażenia cieplne występują bezpośrednio po sobie i razem trwają niewiele ponad 10 ms, wobec czego proces nagrzewania można uważać za adiabatyczny i przyrosty temperatury odczytane z obu tablic można dodawać. Jeżeli na przykład przewody miedziane o przekroju 10 mm² są przy odgromniku nieograniczającym narażonym na obliczeniowy cząstkowy prąd piorunowy 10 kA (2 K z tabl. 4) przy złączu o spodziewanym prądzie zwarcia z ziemią również 10 kA (63 K z tabl. 5), to ich całkowity przyrost temperatury nie przekroczy 65 K. Może być znacznie mniejszy, jeżeli prąd piorunowy przemienie, a prąd następczy się pojawi na krótko przed spodziewanym pierwszym przejściem przez zero.

Tablica 4. Przyrost temperatury przewodów miedzianych wywołany w ciągu jednego półokresu (10 ms) przepływem prądu następczego poprawnie wyłączanego przez odgromnik nieograniczający

Prąd następczy		Przyrost temperatury przewodu miedzianego o przekroju			
Wartość skuteczna	Całka Joule'a	4 mm ²	6 mm ²	10 mm ²	16 mm ²
kA	kA ² s	K	K	K	K
1	10	4	2	0,6	0,3
2,5	62,5	25	11	4	1,5
4	160	63	28	10	4
6	360	142	63	22	9
10	1000	(396)	176	63	25
16	2560	?	(450)	162	63
25	6250	?	?	(396)	155

Porównanie wyników z tablic 4 i 5 wskazuje, że na ogół nie prąd piorunowy, lecz raczej prąd następczy wywołuje większy przyrost temperatury przewodów. Jeszcze gorzej będzie w razie zwarcia w gałęzi poprzecznej, co odpowiada przepływowi prądu o wartości zbliżonej do wartości spodziewanego prądu następczego do chwili zadziałania poprzedzającego zabezpieczenia nadprądowego. Oznacza to, że przekrój przewodów gałęzi poprzecznej musi być dobrany na ogólnych zasadach do spodziewanych zwarciovych narażeń cieplnych i jest to najostrzejsze kryterium doboru tych przewodów [18]. Zatem jeżeli przewody gałęzi poprzecznej są – na ogólnych zasadach – poprawnie zabezpieczone od skutków zwarcia bezpiecznikami, które nie eksplodują przy przepływie prądu piorunowego (rys. 6), to przewody te bezpiecznie znoszą skutek cieplny prądu piorunowego i poprawnie wyłączanego prądu następczego.

Jako wymagania minimalne dla poprzecznej gałęzi ochrony można uważać przekrój przewodów miedzianych 16 mm^2 przy nieograniczających odgromnikach (ogranicznikach przepięć klasy I pierwszego stopnia ochrony) i 4 mm^2 przy innych ogranicznikach na I i II stopniu ochrony).

10. Dobezpieczanie ograniczników w liniach napowietrznych

Linie napowietrzne wymagają ochrony od przepięć ze względu na bezpośrednie narażenia izolacji (zwłaszcza przewodów izolowanych) na przepięcia atmosferyczne. Ochrona jest również niezbędna po to, aby ograniczyć poziom przepięć wnikających z linii napowietrznych do połączonych z nimi instalacji i urządzeń, bardziej wrażliwych na przepięcia niż same linie napowietrzne: do instalacji odbiorców, do sterownic oświetlenia ulicznego lub aparatury alarmowej bądź sygnalizacyjnej.

Kompletne układy ograniczników przepięć powinny się znaleźć przy stacji zasilającej, na trasie linii w odstępach nieprzekraczających 500 m i na końcach linii. Są to zarazem miejsca, w których wymaga się [23] uziemienia przewodu PEN (PE) sieci o układzie TN, a więc miejsca, w których uziemienia i tak być muszą, a co najwyżej wypadnie je poprawić, aby uzyskać rezystancję uziemienia $R \leq 10 \Omega$ wymaganą dla ograniczników przepięć. Ograniczniki są też pożądane w miejscach odgałęzień linii i w miejscach przyłączenia kabla do linii napowietrznej. Pozostaje ważna sprawa ochrony od przepięć przyłączy instalacji odbiorczych, ale to wymaga indywidualnego podejścia, uwzględniającego wrażliwość odbiorcy, sposób wykonania oraz długość przyłącza i rozwiązanie ochrony przeciwprzebieciowej przy złączu instalacji.

W razie uderzenia pioruna na trasie niskonapięciowej linii napowietrznej wskutek przeskoków między przewodami i/lub przeskoków powierzchniowych na izolatorach prąd piorunowy rozplywa się wszystkimi m przewodami w obu kierunkach. Wartość prądu piorunowego podzielona przez podwojoną liczbę przewodów, zazwyczaj $2 \cdot m = 8$, jest prądem płynącym pojedynczym przewodem. Ocenia się, że w 95% przypadków prąd piorunowy nie przekracza 80 kA, wobec czego pojedynczym przewodem płynie prąd nie większy niż około $80/8 = 10 \text{ kA}$. Podobnie w 75% przypadków prąd piorunowy nie przekracza 30 kA, a w pojedynczym przewodzie $30/8 \approx 4 \text{ kA}$. Prąd płynący pojedynczym przewodem (przy założonym poziomie ufności zależnym od oczekiwanej niezawodności ochrony) charakteryzuje narażenia pojedynczych ograniczników przepięć i należałoby go porównywać ze znamionowym prądem wyładowczym I_n . W razie jego przekroczenia pozostaje pewien margines bezpieczeństwa wyznaczony przez maksymalny prąd wyładowczy I_{\max} .

Tablica 5. Ważniejsze dane techniczne napowietrznych ograniczników warystorowych ASA-A firmy Apator

Typ ogranicznika	Napięcie trwałej pracy	Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 μ s	Maksymalny prąd wyładowczy 8/20 μ s	Napięciowy poziom ochrony U_p	U_p/U_c
	U_c	I_n	I_{\max}	V_{peak}	
	V_{rms}	kA	kA		–
ASA-A280-5	280	5	30	1110	4,0
ASA-A440-5	440			1750	4,0
ASA-A660-5	660			2650	4,0
ASA-A280-10	280	10	40	1110	4,0
ASA-A440-10	440			1750	4,0
ASA-A660-10	660			2650	4,0

Za przykład mogą służyć (tabl. 5) dwa wykonania napowietrznych ograniczników warystorowych ASA-A (Apator): standardowe ($I_n = 5 \text{ kA}$, $I_{\max} = 30 \text{ kA}$) oraz wzmacnione ($I_n = 10 \text{ kA}$, $I_{\max} = 40 \text{ kA}$). Skuteczność ochrony jest tym lepsza im mniejszą wartość ma podany w ostatniej kolumnie tabl. 5 stosunek dwóch najważniejszych parametrów napięciowych ogranicznika:

- napięciowego poziomu ochrony U_p , czyli największej możliwej **wartości szczytowej** napięcia na

- zaciskach ogranicznika przy przepływie znamionowego prądu wyladowczego I_n oraz
- napięcia trwałej pracy U_c , czyli największej dopuszczalnej **wartości skutecznej** napięcia o częstotliwości sieciowej, która może być trwale przyłożona między zaciski ogranicznika.

Beziskiernikowe ograniczniki przepięć na ogół charakteryzują się wartością stosunku U_p/U_c w granicach 4,0÷5,0.



Rys. 15. Warystorowy ogranicznik przepięć ASA-A (firmy APATOR) zainstalowany w linii napowietrznej

Ogranicznikom przepięć napowietrznym w liniach, podobnie jak ogranicznikom wewnątrzowym w instalacjach, grozi zniszczenie w razie niewyłączenia prądu następczego (przez ograniczniki iskiernikowe) albo utraty stabilności termicznej (przez ograniczniki beziskiernikowe). Zdarzenia takie na szczęście nie zagrażają wywołaniem pożaru (rys. 15), jak w budynkach, ale nie powinny też zagrażać otoczeniu w inny sposób, na przykład w następstwie wybuchowego rozerwania obudowy ogranicznika. Ponadto jest pożądana łatwa identyfikacja uszkodzonego ogranicznika bez wchodzenia na słup.

Te postulaty pozwalają spełnić wbudowane w ograniczniki przepięć zabezpieczenia działające na różnych zasadach, na ogół na zasadzie nadciśnieniowej lub cieplnej (rys. 16, 17). Można je uważać za rodzaj zabezpieczenia ograniczników.

Tablica 6. Wymagania dla prób wytrzymałości zwarciowej iskiernikowych ograniczników przepięć wyposażonych w zabezpieczenie nadciśnieniowe

Klasa zwarciowa ogranicznika	Minimalna wartość składowej okresowej spodziewanego prądu zwarciowego kA_{rms}
80	80
63	63
50	50
40 (A)	40
20 (B)	20
10 (C)	10
16 (D)	16
5 (E)	5

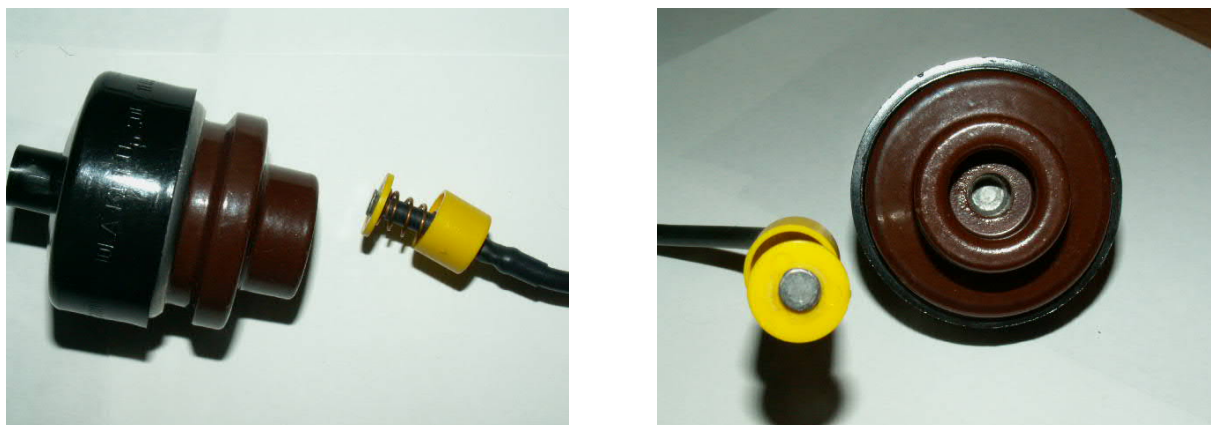
Iskiernikowe ograniczniki przepięć wyposaża się w **zabezpieczenia nadciśnieniowe**, które chronią je przed nadmiernym wzrostem ciśnienia we wnętrzu i zapobiegają wybuchowemu rozerwaniu obudowy w następstwie przedłużającego się przepływu prądu następczego lub w razie wewnętrznego przeskoku w ograniczniku. Ogranicznikom wyposażonym w zabezpieczenie nadciśnie-

niowe przypisuje się [14] tzw. **klasę zwarciovą** określającą najmniejszy gwarantowany przez wytwórcę prąd zwarciový okresowy, który płynąc przez uszkodzony ogranicznik nie spowoduje gwałtownego rozerwania jego obudowy (tabl. 6). Parametr ten nie powinien być mniejszy niż spodziewany prąd zwarciový początkowy w miejscu zainstalowania ogranicznika. Wprowadzenie zabezpieczenia nadciśnieniowego pozwala wykonywać ograniczniki o wysokiej klasie zwarciovej.



Rys. 16. Ograniczniki warystorowe ASA-A ($I_n = 5$ kA oraz 10 kA) firmy APATOR po zadziałaniu odłącznika odłączającego przewód uziemiający; sygnalizatorem jest spodnia pokrywa niebieska po jednej i czerwona po drugiej stronie

Badania ograniczników z zabezpieczeniem nadciśnieniowym wykonuje się zarówno dużym prądem zwarciovým, odpowiadającym klasie zwarciovej (z możliwością przepływu prądu w czasie co najmniej 0,2 s), jak i małym prądem zwarciovým (800 A, do chwili zadziałania zabezpieczenia). Pozwala to zweryfikować skuteczność zabezpieczenia w warunkach skrajnych: duży prąd w krótkim czasie oraz mały prąd w długim czasie. Wynik prób uważa się za pozytywny, jeżeli obudowa pozostanie nienaruszona lub rozpadnie się w sposób niewybuchowy i jeżeli wszystkie jej części pozostaną w obrębie przepisane go kolistego ogrodzenia.



Rys. 17. Ogranicznik warystorowy ONA ($I_n = 5$ kA) firmy EFEN po zadziałaniu odłącznika odrzucającego przewód uziemiający zakończony żółtymi sygnalizatorami (tuleją i pierścieniem)

Odłącznik ogranicznika jest urządzeniem służącym do odłączania ogranicznika od sieci w razie jego uszkodzenia [22]. Likwiduje to zwarcie w miejscu zainstalowania ogranicznika i sygnalizuje jego uszkodzenie. Sam odłącznik może jednak nie zapobiec wybuchowemu rozerwaniu obudowy.

Odłącznik powinien wytrzymywać bez zadziałania próbę maksymalnym prądem wyładowczym, próbę udarem prądowym długotrwałym i próbę działania (przepływu prądu następczego). Powinien natomiast zadziałać przy prądzie wyładowczym większym niż maksymalny prąd wyła-

dowczy, a także w razie przedłużającego się przepływu prądu następczego w ograniczniku iskiernikowym lub w razie utraty stabilności termicznej przez ogranicznik warystorowy.

Większość odłączników działa na zasadzie cieplnej. Przegrzewający się element roboczy ogranicznika (np. warystor) topi połączenie lutowane, a napięta sprężyna odrzuca powiązaną z nią część przerywającą obwód ogranicznika (rys. 16, 17). W przypadku ograniczników napowietrznych odłącznik jest zewnętrzny, odrzucony zostaje na przykład zacisk przewodu uziemiającego albo sam ogranicznik, a odrzucona część ma barwę jaskrawą, zwykle żółtą lub czerwoną, i takie wymiary, aby z daleka była widoczna.

11. Przykład koordynacji (wariant 1)

W sytuacji, jak na rys. 5, w trójfazowym czteroprzewodowym złączu instalacji TN-C o napięciu 230/400 V z bezpiecznikami gG 160 A spodziewany prąd zwarcia jednofazowego wynosi $I_{kl}'' = 2 \text{ kA}$. Do głównej szyny wyrównawczej budynku z piorunochronem i kratowym uziomem fundamentowym jest też przyłączony uziom otokowy. Obowiązuje poziom ochrony odgromowej III. Przewiduje się zainstalowanie trzech odgromników $I_n = 25 \text{ kA}$ o zdolności wyłączenia prądu następczego 3 kA, które w razie przekroczenia tej wartości wymagają dobezpieczenia bezpiecznikami gG o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 160 A. Odgromniki mają być zainstalowane w gałęzi poprzecznej (rys. 1a) szeregowo z bezpiecznikami gG 100 A. Należy sprawdzić warunki koordynacji odgromników z bezpiecznikami i dobrać przekrój przewodów poprzecznej gałęzi ochrony.

Przy poziomie ochrony III i IV należy liczyć się z całkowitym prądem piorunowym o wartości do $I_G = 100 \text{ kA}$ (tabl. 1). Uziom fundamentowy został wzmocniony uziomem otokowym, co pozwoliło uzyskać rezystancję uziemienia nieprzekraczającą 15Ω . Można szacować, że zespolony układ uziomowy piorunochronu odprowadzi ponad połowę (60%) prądu piorunowego, a do przewodów elektroenergetycznych przedostanie się prąd I_{LV} nie większy niż 40 % ($\nu = 0,4$) podanej wartości

$$I_{LV} = \nu I_G = 0,4 \cdot 100 = 40 \text{ kA}.$$

Przyłącze jest czteroprzewodowe ($m = 4$), wobec czego pojedynczym przewodem popłynie cząstkowy prąd piorunowy o wartości nieprzekraczającej

$$I_Z = \frac{I_{LV}}{m} = \frac{40}{4} = 10 \text{ kA}.$$

Jak wynika z rys. 6 i tabl. 2 prąd piorunowy 10 kA nie spowoduje eksplozji wkładek bezpiecznikowych gG 160 A w złączu ani wkładek gG 100 A w gałęzi poprzecznej, ale przekracza udarowy prąd zadziałania tych ostatnich (9,3 kA). Nowsze dane liczbowe dotyczące koordynacji odgromników z bezpiecznikami pozwalają sprawdzić dokładniej, jakie należałoby zastosować bezpieczniki, aby uniknąć ich zbędnych zadziałań. Prądowi piorunowemu 100 kA $10/350 \mu\text{s}$ przypisuje się całkę Joule'a $W_G = 2500 \text{ kA}^2\text{s}$ (tabl. 1), wobec czego prądowi cząstkowemu odpowiada całka Joule'a W_Z mniejsza, proporcjonalnie do kwadratu stosunku wartości prądów

$$W_Z = W_G \cdot \left(\frac{I_Z}{I_G}\right)^2 = 2500 \cdot \left(\frac{10}{100}\right)^2 = 25 \text{ kA}^2\text{s}$$

Natychmiast po przeminięciu prądu piorunowego wkładki bezpiecznikowe i przewody są narażone na skutek cieplny przepływu spodziewanego prądu następczego 2 kA do chwili jego wyłączenia przez odgromnik przy pierwszym naturalnym przejściu przez zero (średnio 5 ms, maksymalnie 10 ms). Wstępnie dobrane odgromniki mają małą zdolność wyłączenia spodziewanego prądu następczego (3 kA), co świadczy, że nie są to odgromniki ograniczające prąd następczy. Tym niemniej przy zwarciu łukowym prąd zwarciovowy nie przekroczy około 80% podanej wartości oblicze-

niowej przy zwarciu metalicznym: $I_f = 0,8 \cdot 2 = 1,6$ kA. Największy spodziewany skutek cieplny (całkę Joule'a) prądu następczego można zatem obliczyć jako

$$W_f = 1600^2 \cdot 0,010 = 25\,600 \text{ A}^2\text{s} = 25,6 \text{ kA}^2\text{s}.$$

Łączna całka Joule'a prądu piorunowego i prądu następczego przepuszczona przez odgromnik wynosi

$$W_{Zf} = W_Z + W_f = 25 + 25,6 = 50,6 \text{ kA}^2\text{s}$$

Te dwa skutki cieplne występują jeden tuż po drugim, w łącznym czasie rzędu 10 ms, wobec czego nagrzewanie ma charakter adiabatyczny i skutki cieplne obu obciążeń można bez zastrzeżeń dodawać.

Przystępując do oceny konsekwencji tych wyników obliczeń trzeba pamiętać o ich losowym charakterze. Są to wartości obliczeniowe największe możliwe, przyjmowane za podstawę, jeżeli urządzenia projektuje się na najgorszy możliwy przypadek obciążeń (ang. *worst-case analysis*). Prawdopodobieństwo wystąpienia wartości W_Z zbliżonej do obliczonej (25 kA²s) lub większej można uznać za równe prawdopodobieństwu uderzenia w budynek pioruna o prądzie, którego wartość jest zbliżona do 100 kA lub większa. Zdarza się to raz na dziesięć do kilkunastu uderzeń pioruna, czyli raz na co najmniej sto lat, jeżeli ten budynek nie jest wysokościowcem górującym nad otoczeniem i stoi w Polsce, a nie nad Jeziorem Wiktorii, w Kampali, Bukoba lub Kisumu, gdzie roczna liczba dni burzowych przekracza 200 i w miarę postępowania globalnych zmian klimatycznych ma tendencję rosnącą. Prawdopodobieństwo wystąpienia wartości W_f bliskiej obliczonej, na przykład przekraczającej 80% tej wartości (32÷40 kA²s) wynosi mniej niż 20%. Oba zdarzenia można uznać za wzajemnie niezależne i prawdopodobieństwo jednoczesnego ich wystąpienia jest równe iloczynowi prawdopodobieństw: w przybliżeniu raz na pięćset lat. Kto ma do czynienia z zagrożeniem choćby poważnym, ale o tak małym prawdopodobieństwie, ten się ubezpiecza od jego skutków zamiast topić pieniądze w techniczne środki ochrony, które też przecież działają poprawnie z określonym prawdopodobieństwem. Przedstawione rozumowanie można by wielokrotnie powtarzać dla mniejszych obciążeń o większym prawdopodobieństwie wystąpienia dochodząc do wniosków, jak racjonalnie rozwiązać ochronę przy podejściu probabilistycznym.

W rozważanym przypadku na wyniki obliczeń można spojrzeć następująco wykorzystując dane z rys. 6 oraz tablic 2 i 3. Nie byłoby zagrożenia eksplozją wkładek i to jest bardzo ważne. Nie jest potrzebne wspomaganie wyłączania prądu następczego przez bezpieczniki, bo odgromniki mają wystarczającą zdolność wyłączania. Częstkowy prąd piorunowy 10 kA wkładki gG 100 A w gałęzi poprzecznej przetrzymałyby z trudem, natomiast wkładki gG 160 A w złączu przetrzymałyby wielokrotnie. Znaczne jest prawdopodobieństwo, że prąd następczy przepalałby wkładki gG 100 A, jeżeli uprzednio przepuściły one szczególnie duży cząstkowy prąd piorunowy (ponad 6 kA). Najrozsądniej byłoby zrezygnować z wkładek gG 100 A w gałęzi poprzecznej, godząc się na sporadyczne, raz na wiele lat, zadziałania wkładek gG 160 A w złączu w wypadku zwarcia w gałęzi poprzecznej, np. z powodu uszkodzenia odgromnika.

Bezpiecznikom gG 160 A w złączu przypadłaby wtedy dodatkowa rola zabezpieczenia przewodów gałęzi poprzecznej od skutków zwarcia; zabezpieczenia od przeciążeń te przewody nie wymagają. Do sprawdzenia obciążalności zwarciorowej cieplnej przewodów jest potrzebna wartość największej dopuszczalnej jednosekundowej gęstości prądu k . Zależy ona od temperatury początkowej nagrzewania adiabatycznego, która dla przewodów poprzecznej gałęzi ochrony jest po prostu temperaturą otoczenia θ_0 (w polskich warunkach klimatycznych 25°C bez oddziaływań cieplnych ze strony sąsiadującego wyposażenia, coraz wyższe wartości w miarę nasilania się takich oddziaływań). Dla przewodów miedzianych o izolacji polwinitowej (dopuszczalne nagrzewanie do 160°C) największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu wynosi:

$$k = 146 \text{ A/mm}^2\cdot\text{s} \quad \text{przy } \theta_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$k = 143 \text{ A/mm}^2\cdot\text{s} \quad \text{przy } \theta_0 = 30^\circ\text{C}$$

$$k = 136 \text{ A/mm}^2\cdot\text{s} \quad \text{przy } \theta_0 = 40^\circ\text{C}$$

Do dalszych obliczeń przyjęto $k = 143 \text{ A/mm}^2\cdot\text{s}$, co odpowiada sytuacji, kiedy przedział roz-

dzielniczy lub osobna obudowa z elementami poprzecznej gałęzi ochrony sąsiaduje z innymi umiarkowanie nagrzewającymi się przedziałami rozdzielniczy.

Przewody muszą wytrzymać obliczony wyżej łączny skutek cieplny $W_{zf} = 50,6 \text{ kA}^2\text{s}$ prądu piorunowego, a potem prądu następczego przy poprawnym jego wyłączeniu przez odgromnik. Gdyby tylko o to chodziło wystarczyłyby śmiesznie mały przekrój przewodów:

$$s \geq \frac{\sqrt{W_{zf}}}{k} = \frac{\sqrt{50\,600}}{143} = 1,57 \text{ mm}^2, \text{ tzn. przekrój } 2,5 \text{ mm}^2.$$

Gdyby jednak odgromnik nie wyłączył prądu następczego $I_f = 1600 \text{ A}$, wtedy bezpiecznik gG 160 A wyłączyłby ten prąd przed upływem 0,5 s, co wynika z pasm czasowo-prądowych wymaganych przez normę IEC 60269-2. Skutek cieplny prądu następczego wyniósłby wtedy:

$$W_{0,5s} = 1600^2 \cdot 0,5 = 1\,280\,000 \text{ A}^2\text{s}.$$

Biorąc go za podstawę, otrzymuje się wymagany przekrój przewodów:

$$s \geq \frac{\sqrt{W_z + W_{0,5s}}}{k} = \frac{\sqrt{25000 + 1\,280\,000}}{143} = 8,0 \text{ mm}^2, \text{ tzn. przekrój } 10 \text{ mm}^2.$$

Jest to w rozpatrywanym wypadku absolutne minimum wynikające z cieplnych narażeń przewodów. Warto podkreślić, jak zwodniczy byłby wynik obliczenia przyjmującego za podstawę całkę Joule'a wyłączenia (w czasie $t \ll 0,1 \text{ s}$) wkładki bezpiecznikowych podawaną dla celów wybiorności zwarciowej ($185\,000 \text{ A}^2\text{s}$ dla wkładki gG 160 A):

$$s \geq \frac{\sqrt{W_{sel}}}{k} = \frac{\sqrt{185\,000}}{143} = 3,0 \text{ mm}^2, \text{ tzn. przekrój } 4 \text{ mm}^2.$$

Kolejny krok w kierunku bezpieczeństwa wynika z następującego rozumowania. Skoro dopuszcza się w obwodach rozdzielczych samoczynne wyłączanie zasilania dla celów ochrony przeciwporażeniowej w czasie nieprzekraczającym 5 s, to przewody niezabezpieczone od przeciążeń powinny to wytrzymać cieplnie. Wkładki bezpiecznikowe gG 160 A mają dla czasu 5 s prąd wyłączający 915 A, co odpowiada skutkowi cieplnemu:

$$W_{5s} = 915^2 \cdot 5 = 4\,186\,000 \text{ A}^2\text{s}.$$

Ostatecznie przekrój przewodów uwzględniający wszelkie obliczeniowe narażenia cieplne zwarciowe wynosi:

$$s \geq \frac{\sqrt{W_{5s}}}{k} = \frac{\sqrt{4\,186\,000}}{143} = 14,3 \text{ mm}^2, \text{ tzn. przekrój } 16 \text{ mm}^2.$$

12. Przykład koordynacji (wariant 2)

Sytuacja, jak w wariantcie 1 z jednym wyjątkiem: spodziewany prąd zwarcia jednofazowego w złączu wynosi $I''_{kl} = 5 \text{ kA}$, czyli jest większy niż zdolność wyłączenia prądu następczego przez odgromniki. Jakie byłyby konsekwencje takiej zmiany?

Odgromniki wymagają dobezpieczenia, muszą być poprzedzone wkładkami bezpiecznikowymi gG 160 A, które praktycznie biorąc będą przepalały się po każdym zapłonie odgromników niezdolnych do samodzielnego wyłączenia prądu następczego. Należałoby rozważyć, czy z punktu widzenia ciągłości zasilania instalacji można to akceptować, gdyby wkładki gG 160 A miały pozostać w złączu, a w poprzecznej gałęzi ochrony nie byłoby żadnych wkładek. W razie twierdzącej odpowiedzi na to pytanie, w toku obliczeń zaszyłyby następujące niewielkie zmiany.

Prąd następczy $I_f = 0,8 \cdot 5 = 4 \text{ kA}$ wkładka bezpiecznikowa gG 160 A wyłączyłaby w czasie mniejszym niż 0,02 s, co wynika z wartości jej zwarciowej całki Joule'a wyłączenia ($185\,000 \text{ A}^2\text{s}$).

Ze względu na skutek cieplny prądu wyladowczego i prądu następczego paradoksalnie wystarczyłby przekrój przewodów gałęzi poprzecznej mniejszy niż obliczony w wariancie 1:

$$s \geq \frac{\sqrt{W_z + W_{0,02s}}}{k} = \frac{\sqrt{25000 + 185000}}{143} = 3,2 \text{ mm}^2, \text{ tzn. przekrój } 4 \text{ mm}^2.$$

Nie ulega natomiast zmianie ostatnie kryterium doboru związane ze skutkiem cieplnym prądu wyłączającego 5-sekundowego i jego wynik: wymagany przekrój przewodów 16 mm².

Gdyby natomiast na postawione wyżej pytanie o dopuszczalność przepalania się wkładek w złączu po każdorazowym zapłonie odgromników padła odpowiedź zdecydowanie negatywna, to należałoby szukać innego rozwiązania:

- Zainstalowanie wkładek gG 160 A w poprzecznej gałęzi ochrony i – ze względu na wybiórczość – zwiększenie prądu znamionowego wkładek złącza do gG 250 A, jeżeli jest to możliwe.
- Zainstalowanie odgromników ograniczających prąd następczy.

13. Wnioski

Zabezpieczenia nadprądowe – bezpieczniki oraz rzadko w Polsce stosowane przyłączowe wyłączniki ograniczające – poprzedzające ograniczniki przepięć mogą spełniać różnorodne funkcje:

- wspomagają wyłączenie prądu następczego, jeżeli spodziewany prąd zwarciový przekracza zdolność wyłączania odgromnika,
- zabezpieczają ograniczniki przed przekroczeniem obciążalności zwarciový,
- dokonują samoczynnego wyłączenia zasilania dla celów ochrony przeciwporażeniowej w razie trwałego zwarcia L-PE w poprzecznej gałęzi ochrony,
- zabezpieczają od skutków zwarć przewody poprzecznej gałęzi ochrony.

Wymienione funkcje bierze się pod uwagę decydując o umiejscowieniu zabezpieczeń i doborze ich parametrów. Poprawnie przeprowadzony dobór ogranicza do minimum możliwość eksplozji wkładek i samych ograniczników przepięć, eliminuje możliwość zniszczenia przewodów, a do rozsądnego poziomu – uzależnionego od wymagań stawianych ciągłości zasilania instalacji – ogranicza prawdopodobieństwo wywoływania przerw w zasilaniu w następstwie zbędnych działań wkładek bezpiecznikowych w głównym torze zasilania.

Wypada też zdawać sobie sprawę, że określenie „bezpieczniki poprzedzające” jest umowne, bo kierunek propagacji prądu piorunowego i/lub fali przepięciowej nie musi się pokrywać z kierunkiem przesyłania energii. Po uderzeniu pioruna w zasilającą linię napowietrzną część prądu piorunowego z tej linii wnika do instalacji odbiorcy i jej uziemień. Natomiast po uderzeniu pioruna w piorunochron budynku, część prądu piorunowego poprzez główną szynę wyrównawczą i odgromniki wpływa do sieci zasilającej.

Przed rokiem 2000 koordynację odgromników z bezpiecznikami opierano na rozumowaniu uproszczonym, nieuwzględniającym należycie bezpośredniego następowania po sobie dwóch skutków cieplnych: prądu piorunowego i prądu następczego. Zatem publikowane wcześniej wskazówki doboru i zalecenia firmowe należy traktować z rezerwą.

Literatura

1. Birkel J.: Überspannungs-Schutzeinrichtungen – stoßstromgerecht installiert und normenkonform getestet. VEÖ Journal, 2001, nr 9, s. 37–42.
2. Hasse P., Noack F.: Neue Blitzschutznormen in der Praxis. Elektromeister + Deutsches Elektrohandwerk, 1998, nr 1–2, s. 41–47, nr 3, s. 140–142.
3. Hering E.: Blitzstoßstromableiter und Überstrom-Schutzeinrichtungen. Elektropraktiker, 1999, nr 7, s. 630–634.
4. Hering E.: Trennfunkstrecken für den Blitzschutz-Potentialausgleich. Elektropraktiker, 2001, nr 5, s. 394–397.

5. Hering E.: Blitzstoßstromableiter für Hauptstromversorgungssysteme. Elektropraktiker, 2005, nr 2, s. 123–127.
6. Musiał E.: Znowelizowane warunki techniczne dla instalacji elektrycznych w budynkach. Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”. 2002, nr 48, s. 79–95.
7. Raab V.: Blitz- und Überspannungsschutz-Maßnahmen in NS-Anlagen. Elektropraktiker, 1996, nr 11, s. 944–950, nr 12, s. 1043–1046.
8. Raab V., Zahlmann P.: Kurzschlusschutz von Blitzstromableitern. Sonderdruck Nr. 45, DEHN + SÖHNE GMBH.
9. Schönau J., Noack F.: Blitzstromverhalten von Niederspannungs-Hochleistungs-(NH)-Sicherungen. etz 2004, nr 1, s. 24–27.
10. Sowa A.: Oddziaływanie ograniczników przepięć na inne urządzenia w instalacji elektrycznej w obiekcie budowlanym. Elektroinstalator, 2002, nr 12, s. 34–38.
11. Sultanem F.: Protection contre les surtensions dues à la foudre: la normalisation française – NFC 15-100. REE, 1998, nr 6, s. 85–90.
12. Zitzmann H.: Überspannungsschutz nach dem SEP-Prinzip. Elektro- und Gebäudetechniker, 2000, nr 11, s. 32–35.
13. Zitzmann H.: SEP-Prinzip und Blitzschutzkonzept kombiniert. Elektropraktiker, 2003, nr 12, s. 958–960.
14. PN-EN 60099-5:1999/A1:2004 Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania
15. PN-IEC 60364-4-443:1999 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi.
16. PN-IEC 60364-4-444:2001 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona przed zakłóceniami elektromagnetycznymi (EMI) w instalacjach obiektów budowlanych.
17. PN-IEC 60364-5-534:2003 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Urządzenia do ochrony przed przepięciami.
18. PN-IEC 60364-5-54:1999: Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Uziemienia i przewody ochronne.
19. PN-IEC 61024-1-1:2001 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.
20. PN-IEC 61312-1:2001 Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym.
21. PN-IEC/TS 61312-3:2004 Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. Część 3: Wymagania dotyczące urządzeń do ograniczania przepięć (SPD).
22. PN-IEC 61643-1:2001 Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Część 1: Wymagania techniczne i metody badań.
23. N SEP-E-001:2003 Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa.
24. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 7 kwietnia 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. 04.109.1156 i wersja poprzednia Dz.U. 02.75.690.
25. Überspannungs-Schutzeinrichtungen der Anforderungsklasse B. Richtlinien für den Einsatz in Hauptstromversorgungssystemen. VWEW-Verlag, Frankfurt am Main, 1998.

Dane bibliograficzne:

Musiał E.: **Dobezpieczanie ograniczników przepięć**. Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, 2006, nr 76-77, s. 3–37.