

# 12. OCHRONNIKI

## 12.1. ISKIERNIK OCHRONNY

Do ochrony urządzeń elektroenergetycznych przed skutkami przepięć piorunowych służą urządzenia zwane ochronnikami. Ich zadaniem jest obniżenie napięcia fali przepięciowej do poziomu nie zagrażającego izolacji innych elementów stacji energetycznej.

Najprostszym ochronnikiem jest iskiernik ochronny w postaci np. dwóch prętów nabudowanych na izolatorze (patrz rys. 11.3).

Zastosowanie iskierników ochronnych może być dwojakie:

1. Iskiernik stanowiący uzbrojenie izolatorów liniowych. To zastosowanie omówiono pokrótce w rozdziale 11.2.
2. Iskiernik stanowiący uzbrojenie izolatorów urządzeń stacyjnych np. transformatorów. Ten rodzaj zastosowania iskiernika ochronnego jest obecnie traktowany w zasadzie jako zabezpieczenie dodatkowe. Podstawową ochronę zapewniają bardziej doskonałe ochronniki jak wydmuchowy ogranicznik przepięć (rozdz. 12.2) lub zaworowy iskiernikowy czy beziskiernikowy ogranicznik przepięć (rozdz. 12.3 i 12.4).

Istota działania iskiernika np. prętowego jak na rysunku 11.3a, polega po prostu na przeskoku iskry między elektrodami iskiernika i zwarcia doziemnym. Wówczas napięcie na obiektach (zwanych obiektami chronionymi) znajdujących się za iskiernikiem (patrząc z kierunku nadbiegającej fali napięciowej) spada do zera i na obiektach chronionych przeskoczek lub przebicie zaistnieć nie może.

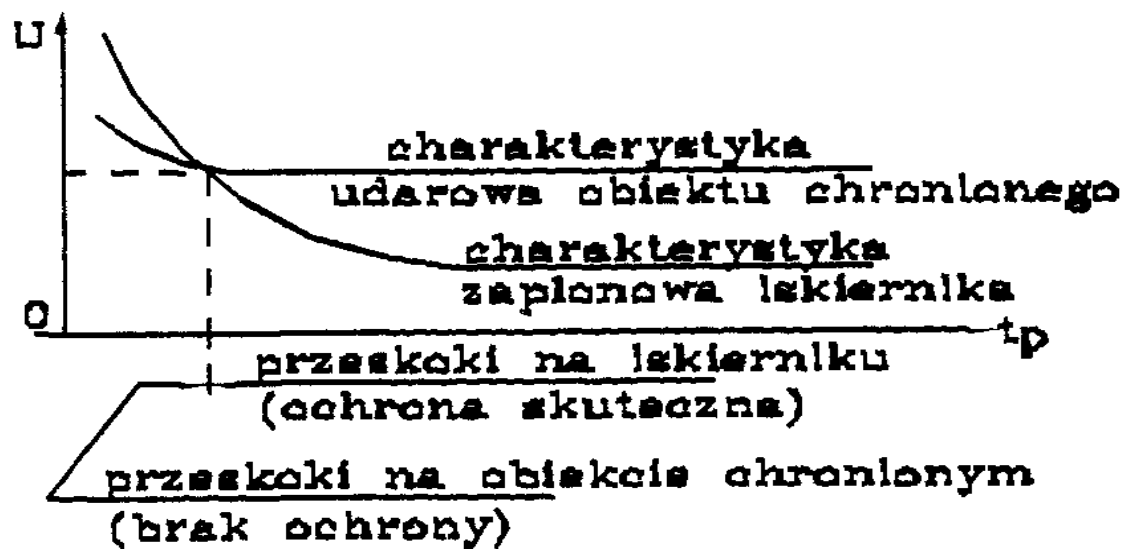


Prostota konstrukcji i taniość iskiernika ochronnego jest okupiona, niestety, całym szeregiem wad dyskwalifikujących go w większości przypadków jako ochronnik.

1. Iskiernik ucina falę wędrowną bardzo stromo (rys. 12.1) co jest groźne dla izolacji wszelkiego typu uzwojeń (patrz rozdz. 13).
2. Po zapłonie łuku w iskierniku łuk ten nie zostaje samoczynnie zgaszony i jest podtrzymywany przez napięcie robocze sieci. W układzie energetycznym powstaje więc po prostu zwarcie doziemne. Linia musi zostać wyłączona i załączona ponownie (np. poprzez układ tzw. samoczynnego powtórnego załączania - SPZ).

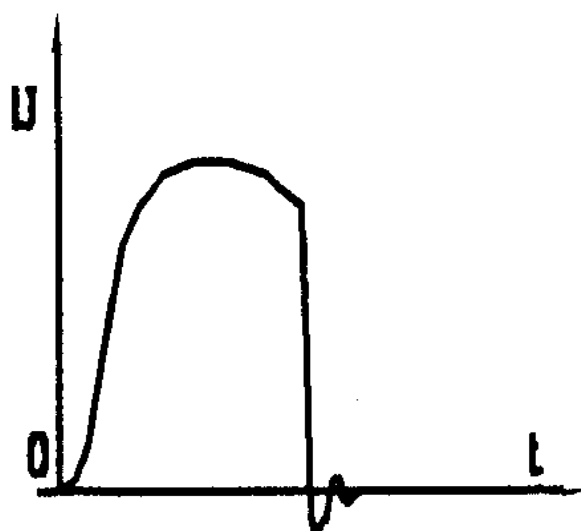


Rys. 12.1. Ucięcie napięcia przez iskiernik prętowy

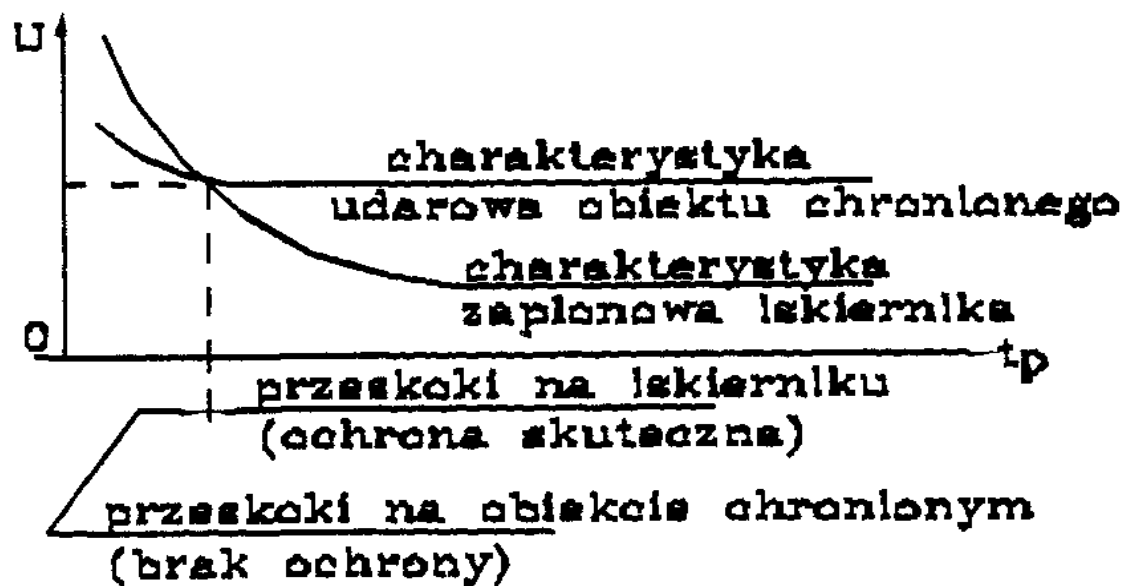


Rys. 12.2. Charakterystyka udarowa iskiernika prętowego i hipotetyczna charakterystyka udarowa izolacji transformatora

3. Zależność napięcia przeskoku w iskierniku od czasu do przeskoku (charakterystyka udarowa) jest silnie zagięta (rys. 12.2) co wobec stosunkowo płaskich charakterystyk udarowych niektórych obiektów chronionych np. transformatorów, powoduje, że przy dużych stromościach fali wędrownej w zakresie krótkich czasów do przeskoku ochrona jest całkowicie nieskuteczna. Wcześniej zostanie przebita izolacja transformatora niż zadziała iskiernik.



Rys. 12.1. Ucięcie napięcia przez iskiernik prętowy



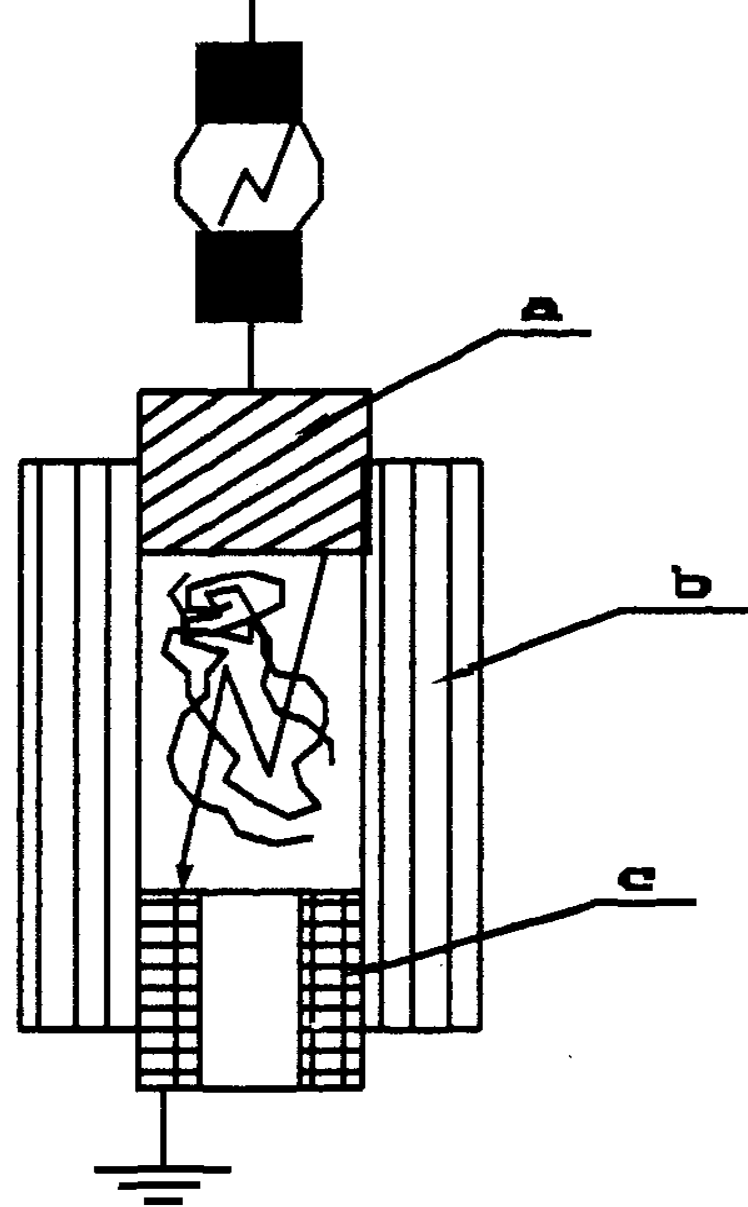
Rys. 12.2. Charakterystyka udarowa iskiernika prętowego i hipotetyczna charakterystyka udarowa izolacji transformatora

4. Napięcie przeskoku bardzo silnie zależy od warunków atmosferycznych.
5. Przy biegunowości ujemnej napięcia fali przepięciowej napięcie przeskoku jest znacznie wyższe niż przy biegunowości dodatniej (patrz również rozdz. 5.4). Jest to szczególnie niekorzystne, dlatego że większość wyładowań atmosferycznych ma biegunowość ujemną (patrz rozdz. 10.1.2).
6. Iloraz napięcia przeskoku przy napięciu udarowym do napięcia przeskoku przy napięciu przemiennym [współczynnik udarowy  $k_u = \frac{U_{pu}}{\sqrt{2} \cdot U_{pp}}$ ] jest duży. Iskiernik nie może zadziałać przy maksymalnym napięciu roboczym sieci ani przy przepięciach długotrwałych o częstotliwości sieciowej, ani nawet przy przepięciach łączeniowych, musi zatem mieć dostatecznie duży odstęp elektrod wynikający z przemiennego napięcia przeskoku. Udarowe napięcie przeskoku wynika z wartości  $k_u$ . Im większy współczynnik  $k_u$  tym większe napięcie może się pojawić na obiekcie chronionym i tym mniej skuteczna jest ochrona lub tym droższa musi być izolacja obiektów chronionych.

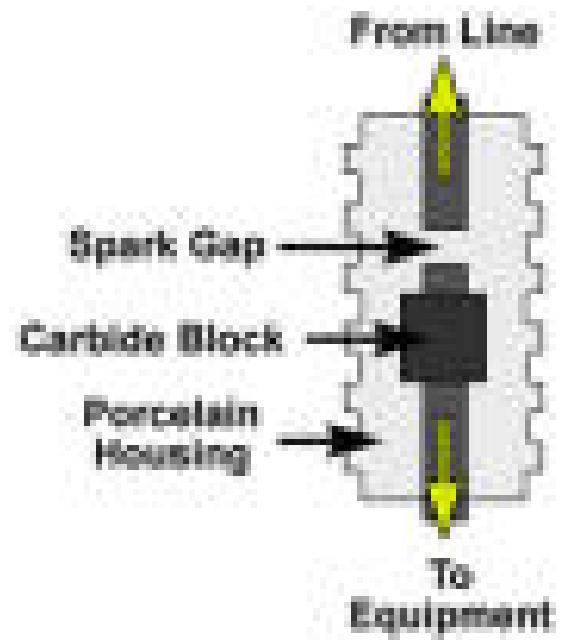
## 12.2. WYDMUCHOWY ogranicznik przepięć

Wydmuchowy ogranicznik przepięć składa się z dwóch szeregowo połączonych iskierników, zewnętrznego oraz wewnętrznego (rys. 12.3), przy czym iskiernik wewnętrzny jest umieszczony w rurze z materiału izolacyjnego o specjalnych właściwościach. Materiałem tym może być przykładowo fibra, pleksiglas lub ebonit i musi on mieć właściwość wydzielania dużej ilości gazu pod działaniem temperatury łuku elektrycznego.

Iskiernik wewnętrzny wraz ze swą obudową stanowi podstawowy element odgromnika wydmuchowego, a iskiernik zewnętrzny odgrywa tylko rolę przerwy izolacyjnej.



Rys. 12.3. Uproszczona konstrukcja odgromnika wydmuchowego  
a - elektroda górna, b - rura z materiału gazującego, c - elektroda dolna



Po dotarciu do zacisku ogranicznika przepięć fali piorunowej, o dostatecznie dużej wartości szczytowej napięcia, następuje zapłon obydwu iskierników. Po zadziałaniu iskierników przez ogranicznik przepięć płynie prąd spowodowany falą piorunową zwany **prądem wyładowczym**. Po przeminieciu fali przepięciowej prąd jest utrzymywany nadal przez napięcie sieci. Prąd ten nosi nazwę **prądu następczego**. Rolą ogranicznika przepięć jest przerwanie tego prądu. Wskutek przepływu prądu następczego o częstotliwości sieciowej a więc o długim, w porównaniu z prądem wyładowczym, czasie trwania, wewnątrz ogranicznika przepięć wydzielają się gazy powodując wzrost ciśnienia wewnątrz izolacyjnej obudowy iskiernika wewnętrznego.

Gazowanie ścianek obudowy iskiernika wewnętrznego zużywa pewną część energii palącego się łuku elektrycznego, a wypływ gazów z rury ogranicznika przepięć ochładza kolumnę łukową (a w dalszych etapach również połukową) i wyrzuca na zewnątrz gazy zjonizowane. Powoduje to szybką regenerację wewnętrznej przerwy iskrowej i zgaszenie łuku przy przejściu prądu przez zero.

Po zgaszeniu łuku na ściankach rury gazującej mogą pozostać osady przewodzące, które mogłyby być przyczyną ponownego zapłonu ogranicznika przepięć. Zapobiega temu zewnętrzna przerwa iskrowa.

Wydmuchowe ograniczniki przepięć działają poprawnie tylko w pewnym zakresie prądów zwarcia w sieci. Prądy te ogranicza od dołu wartość prądu, który powoduje ciśnienie wystarczająco duże dla zgaszenia łuku. Od góry natomiast ograniczenie wynika z wartości prądu, przy której ciśnienie może rozsadzić odgromnik. Prądy zwarcia w miejscu zainstalowania wydmuchowego ogranicznika przepięć muszą się mieścić między tymi wartościami granicznymi.



Wydmuchowy ogranicznik przepięć ma dwie poważne zalety:

1. jest tani i prosty w konstrukcji i montażu;
2. jest odporny na duże prądy wyładowcze pochodzące od fali piorunowej. Wytrzymuje nawet bezpośrednie uderzenia prądu pioruna. Jest tak prosty, że nie ma co się w nim popsuć przy tak małych energiach jakie towarzyszą wyładowaniu piorunowemu (patrz również rozdz. 10.1.3); zagazowanie, wzrost ciśnienia i wydmuch łuku jest odpowiedzialny dopiero prąd następczy płynący pod wpływem napięcia sieci.

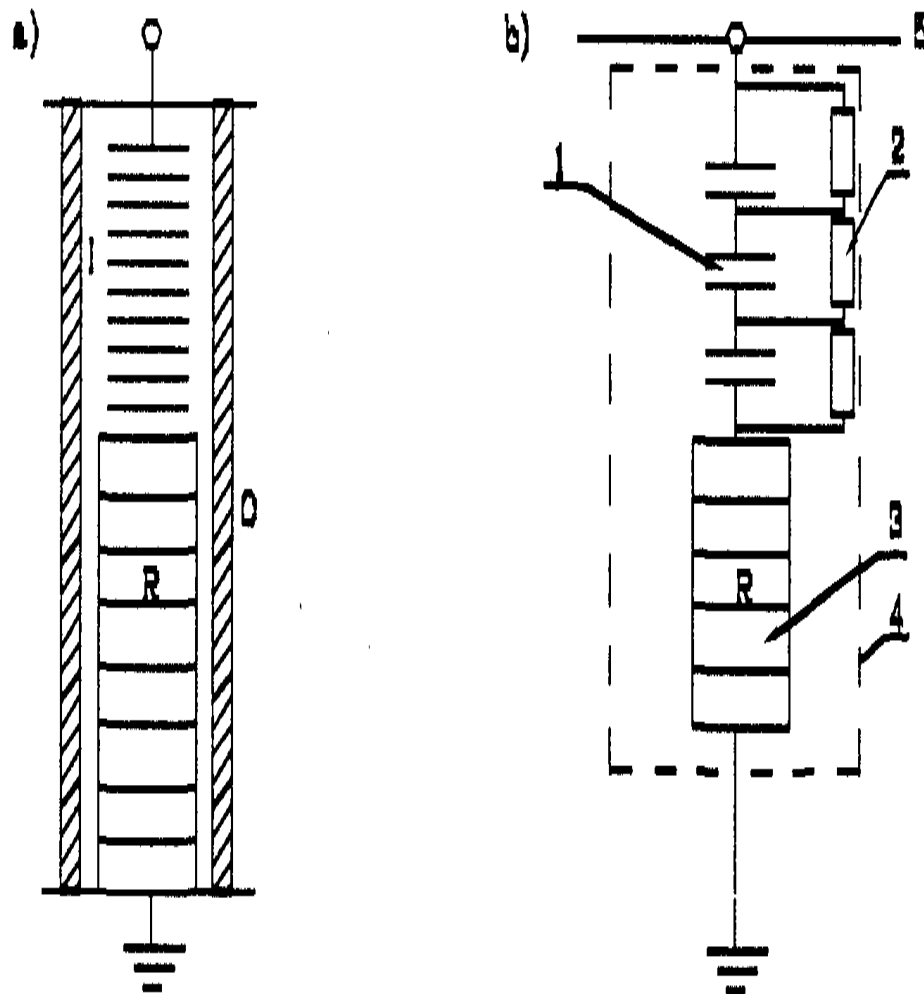
Poza powyższymi zaletami wydmuchowy ogranicznik przepięć ma wszystkie wady iskiernika ochronnego.

W kraju wydmuchowe ograniczniki przepięć były stosowane do napięć 30 kV, w świecie nawet do 110 kV. Oczywiście konstrukcje rzeczywiste były znacznie bardziej skomplikowane niż to wynika z rysunku 12.3.

## 12.3. ISKIERNIKOWY OGRANICZNIK PRZEPIĘĆ

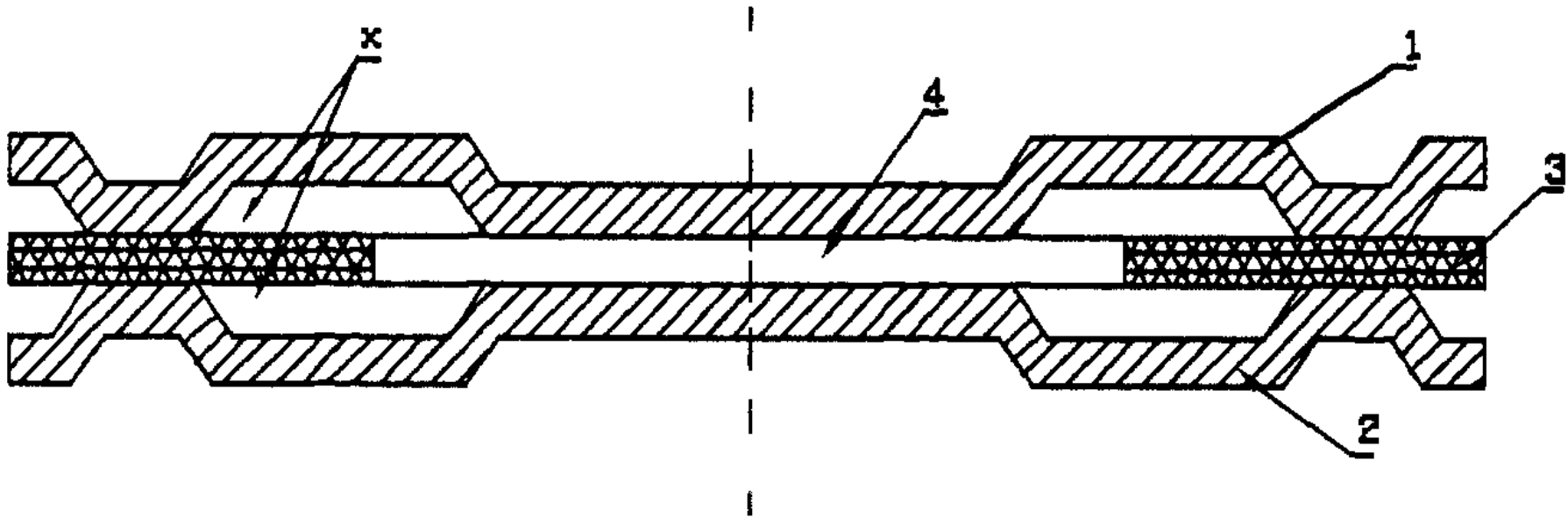
### 12.3.1. Budowa

Na rysunku 12.4 podano podstawowy schemat elektryczny klasycznego iskiernikowego ogranicznika przepięć zwanego dawniej odgromnikiem zaworowym. Jak widać z rysunku, iskiernikowy ogranicznik przepięć składa się z dwóch części: iskiernika noszącego nazwę iskiernika wielokrotnego oraz stosu zmiennooporowego. Trzecią niewidoczną na rysunku, lecz również istotną częścią takiego ogranicznika przepięć jest jego obudowa.



Rys. 12.4. Odgromnik zaworowy: a) elementy składowe: I - iskiernik, R - stos zmiennooporowy, O - obudowa, b) schemat elektryczny:  
1 - iskiernik, 2 - oporniki sterujące rozkład napięcia wzdłuż stosu iskiernika, 3 - stos zmiennooporowy, 4 - obudowa, 5 - przewód fazowy sieci

1. **Iskiernik wielokrotny** był złożony z wielu połączonych w szereg przerw iskrowych o konstrukcji, która w najprostszym przypadku może mieć postać jak na rysunku 12.5. Jak widać na rysunku iskiernik taki składa się z dwóch odpowiednio uformowanych płytek metalowych rozdzielonych mikanitową przekładką izolacyjną.

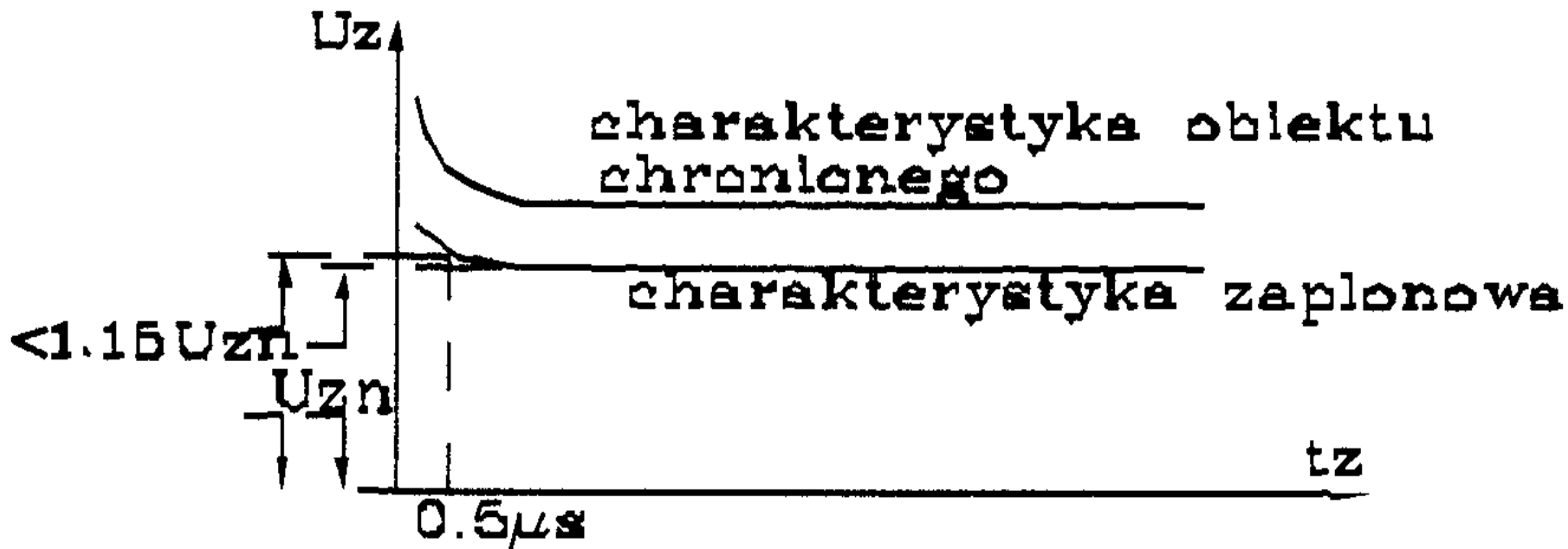


Rys. 12. 5. Najprostsza konstrukcja jednego członu iskiernika wielokrotnego  
1,2 - elektrody metalowe, 3 - przekładka izolacyjna, 4 - przerwa powietrzna, x -miejsce  
występowania wyładowań ślizgowych

Jest to zatem iskiernik płaski, o równomiernym polu elektrycznym,

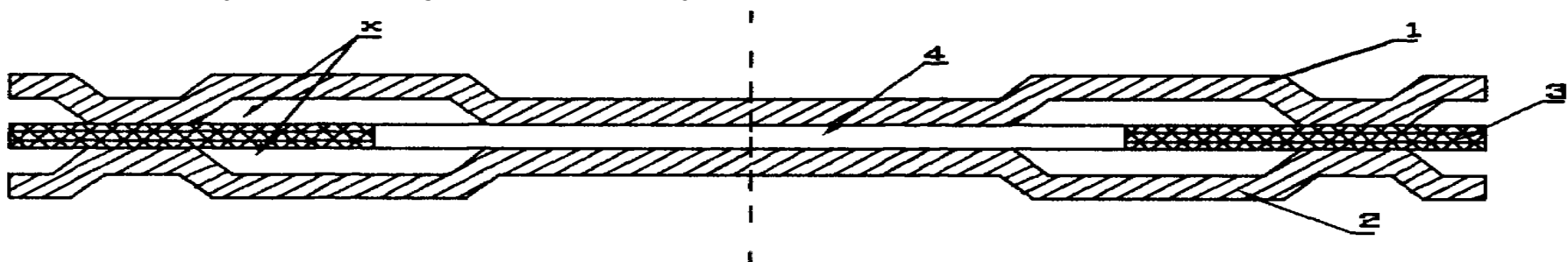
charakteryzujący się następującymi właściwościami

- posiada bardzo niewielki wpływ biegunowości napięcia na wartość napięcia przeskoku;
- ma równie płaską charakterystykę udarową (rys. 12.6) jak transformator (porównaj rys. 12.2);



Rys. 12.6. Charakterystyka udarowa iskiernika wielokrotnego

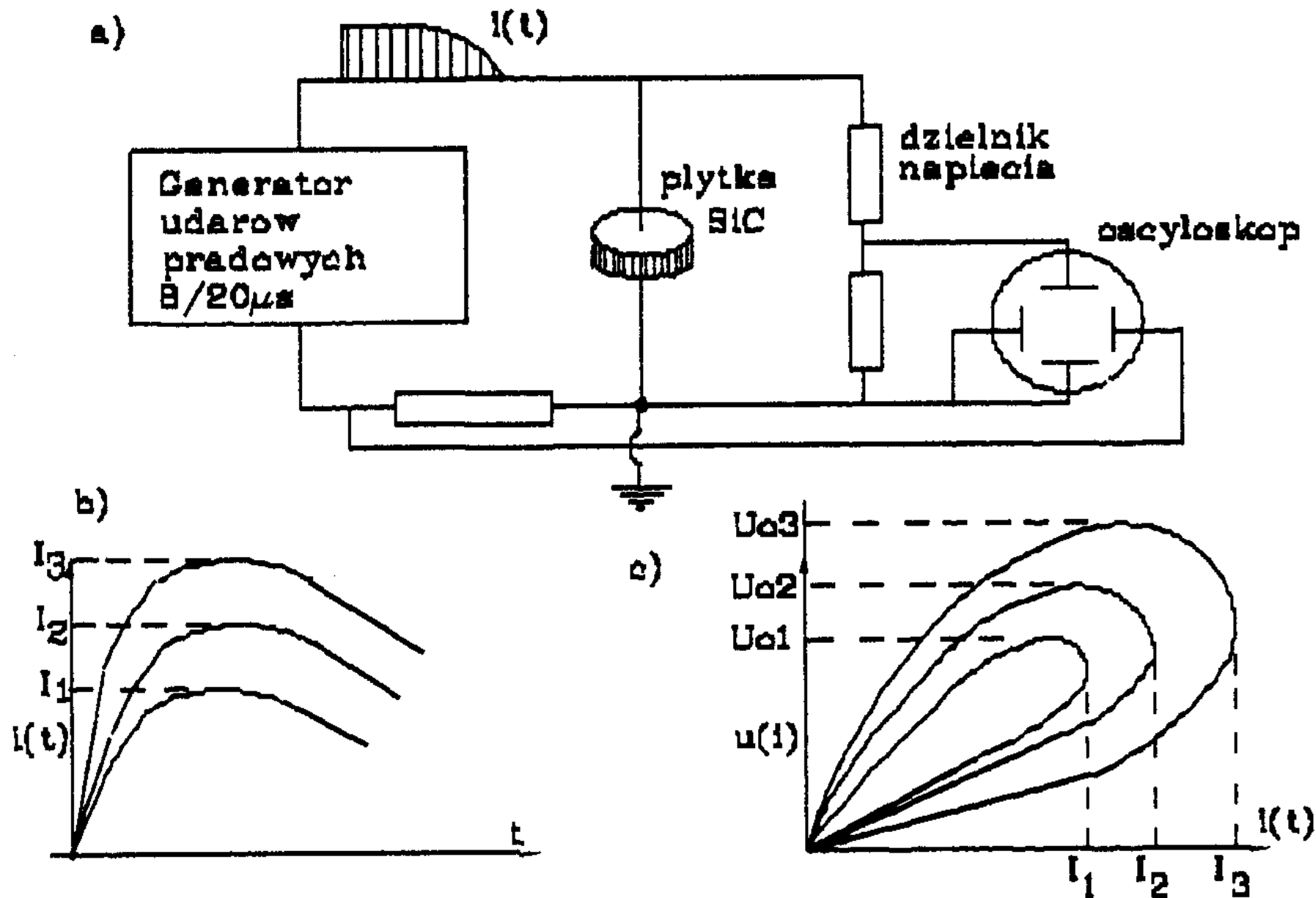
- jest nieczuły na warunki atmosferyczne gdyż znajduje się w szczelnej obudowie;
- charakteryzuje się niewielkimi rozrzutami napięć przeskoku wskutek wyeliminowania statystycznego czasu opóźnienia przeskoku (patrz również rozdz. 5.2.6). Osiąga się to przez wyładowania ślizgowe w miejscu pokazanym na rysunku 12.5. Wyładowanie ślizgowe zachodzące przy napięciach niższych niż statyczne napięcie przeskoku iskiernika emituje twarde fotony eliminując w ten sposób losowość momentu inicjacji rozwoju wyładowania lawinowego w iskierniku;
- posiada niewielki współczynnik udarowy  $k_u \approx 1.1$ , co pozwala obniżać napięcie na obiektach chronionych do wartości niewiele większych od wartości przepięć wewnętrznych, przy których iskiernik nie może działać (por. rozdz. 12.1);
- gdy iskierniki płaskie są zestawione w stos złożony z wielu pojedynczych elementów (rys.12.5), wówczas jest to typowy układ szeregowo połączonych pojemności, którego właściwości omówiono w rozdziale 3.4. Nierównomierny rozkład napięcia może powodować obniżenie napięcia zapłonu iskiernika przy napięciu przemiennym, co jest niekorzystne. Stosuje się, zatem sterowanie rozkładem napięcia wzdłuż iskiernika wielokrotnego (rys. 12.4), co znacznie komplikuje jego budowę. Przy napięciach udarowych nierównomierny rozkład napięcia mógłby z kolei powodować zwiększenie rozrzutów napięć zapłonu jak również wydłużenie czasów do przeskoku.



Rys. 12. 5. Najprostsza konstrukcja jednego członu iskiernika wielokrotnego  
 1,2 - elektrody metalowe, 3 - przeladka izolacyjna, 4 - przerwa powietrzna, x -miejsce występowania wyładowań ślizgowych

Zadaniem stosu zmiennooporowego jest złagodzenie stromości ucięcia napięcia udarowego po zadziałaniu odgromnika, ograniczenie wartości napięcia na odgromniku przy przepływie prądu wyładowczego i ograniczenie prądu następczego płynącego pod wpływem napięcia roboczego po przeminięciu fali napięcia udarowego.

Grubość płytek warystorów waha się od 1 do 6 cm. Produkcja płytek o zunifikowanej grubości daje możliwość składania stosów na różne napięcia z płytek jednego rodzaju. Jeśli do płytki warystora SiC doprowadzić udar prądowy o znormalizowanym kształcie ( $8/20\ \mu\text{s}$ ) i zoscylografować jednocześnie prąd płynący przez płytkę i napięcie panujące na płytce (rys. 12.7a) to uzyska się tzw. pętlę napięciowo-prądową lub inaczej dynamiczną charakterystykę napięciowo-prądową (rys. 12.7c). Jak widać z rysunku 12.7c, powierzchnia pętli napięciowo-prądowej jest zależna od wartości szczytowej udaru prądowego.



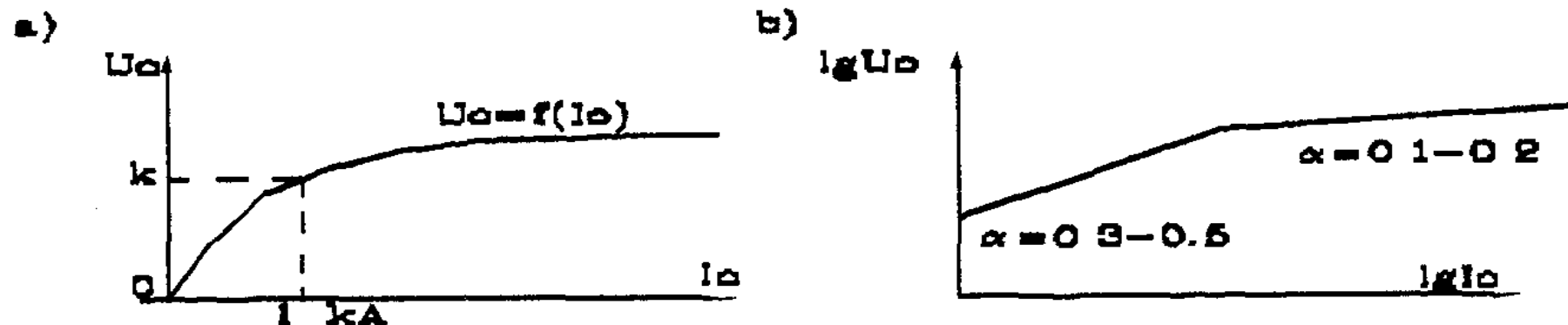
Rys. 12.7. Dynamiczna charakterystyka (pętlica) napięciowo-prądowa: a) schemat pomiarowy, b) udary prądowe o rosnącej wartości szczytowej, c) pętlice napięciowo-prądowe

Jeśli z pętlicy dla każdej wartości szczytowej udaru prądowego (rys. 12.7b)  $I_1, I_2, I_3$ , itd. odczytać wartości napięć  $U_{01}, U_{21}, U_{03}$ , itd. to można skonstruować tzw. statyczną charakterystykę napięciowo-prądową (rys. 12.8). Maksymalne wartości napięć  $U_0$ , odczytane z pętlicy napięciowo-prądowej, noszą nazwę **napięcia obniżonego**. Statyczna charakterystyka z rysunku 12.8 może być aproksymowana zależnością:

$$U = k \cdot I^\alpha \quad (12.1)$$

gdzie:  $\alpha$  - współczynnik zaworowości,  $k$  - stała zależna od wymiarów odgromnika.

Zwykle charakterystykę napięciowo-prądową kreśli się we współrzędnych logarytmicznych co daje aproksymację dwoma odcinkami linii prostych o współczynnikach zaworowości  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  (rys. 12.8b). Dla krajowych iskiernikowych ograniczników przepięć  $\alpha_1 = 0.3 \div 0.5$  i  $\alpha_2 = 0.1 \div 0.2$ .



Rys. 12.8. Statyczna charakterystyka napięciowo-prądowa: a) w skali liniowej, b) w skali logarytmicznej



Jednym z najważniejszych znamion iskiernikowego ogranicznika przepięć jest znamionowy prąd wyładowczy, który określa zdolność warystorów do odprowadzania prądów fali piorunowej bez ich uszkodzenia. Prądem wyładowczym znamionowym ogranicznika  $I_n$  nazywa się taką wartość szczytową udaru probierczego  $8/20 \mu s$ , którą wytrzymuje co najmniej 20 razy bez zmiany swych właściwości.

Napięcie obniżone  $U_{0n}$  odpowiadające znamionowemu prądowi wyładowczemu  $I_n$  nazywa się **znamionowym napięciem obniżonym** ogranicznika.

**Znamionowe prądy wyładowcze** iskiernikowych ograniczników przepięć stanowią następujący szereg: 1.5; 2.5; 5; 10; 15 kA.

Nieliniowość charakterystyki napięciowo-prądowej płytek karborundowych tłumaczy się w oparciu o zjawiska kontaktowe na krawędzi ziarna karborundu, gdzie występuje zarówno warstwa dwutlenku krzemu  $SiO_2$  jak i warstwa ładunku przestrzennego na głębokości  $10^{-6} \text{ cm}$  od powierzchni kryształu, tworząc barierę potencjału. Wskutek energii pola elektrycznego jak i wskutek zjawisk cieplnych ze wzrostem wartości prądu powstaje, w objętości płytki, coraz to większa liczba równoległych dróg przepływu prądu, co prowadzi do malenia rezystancji. Na grzbiecie udaru, gdy prąd maleje, rezystancja rośnie wolniej niż malała ze wzrostem prądu na czole udaru, co tłumaczy się bezwładnością zjawisk, głównie termicznych. Skutkiem jest pętla napięciowo-prądowa.

3. Trzecim elementem iskiernikowego ogranicznika przepięć jest szczelna obudowa, która ma za zadanie uniezależnić parametry ogranicznika od wpływu zewnętrznych warunków atmosferycznych. Jest to obudowa porcelanowa, wewnątrz której umieszcza się czasem odpowiednie higroskopijne osuszacze, lub którą (w ogranicznikach na wyższe napięcia) wypełnia się suchym gazem (np. azotem). Zapobiega to zawilgoceniu płytek stosu zmiennooporowego.

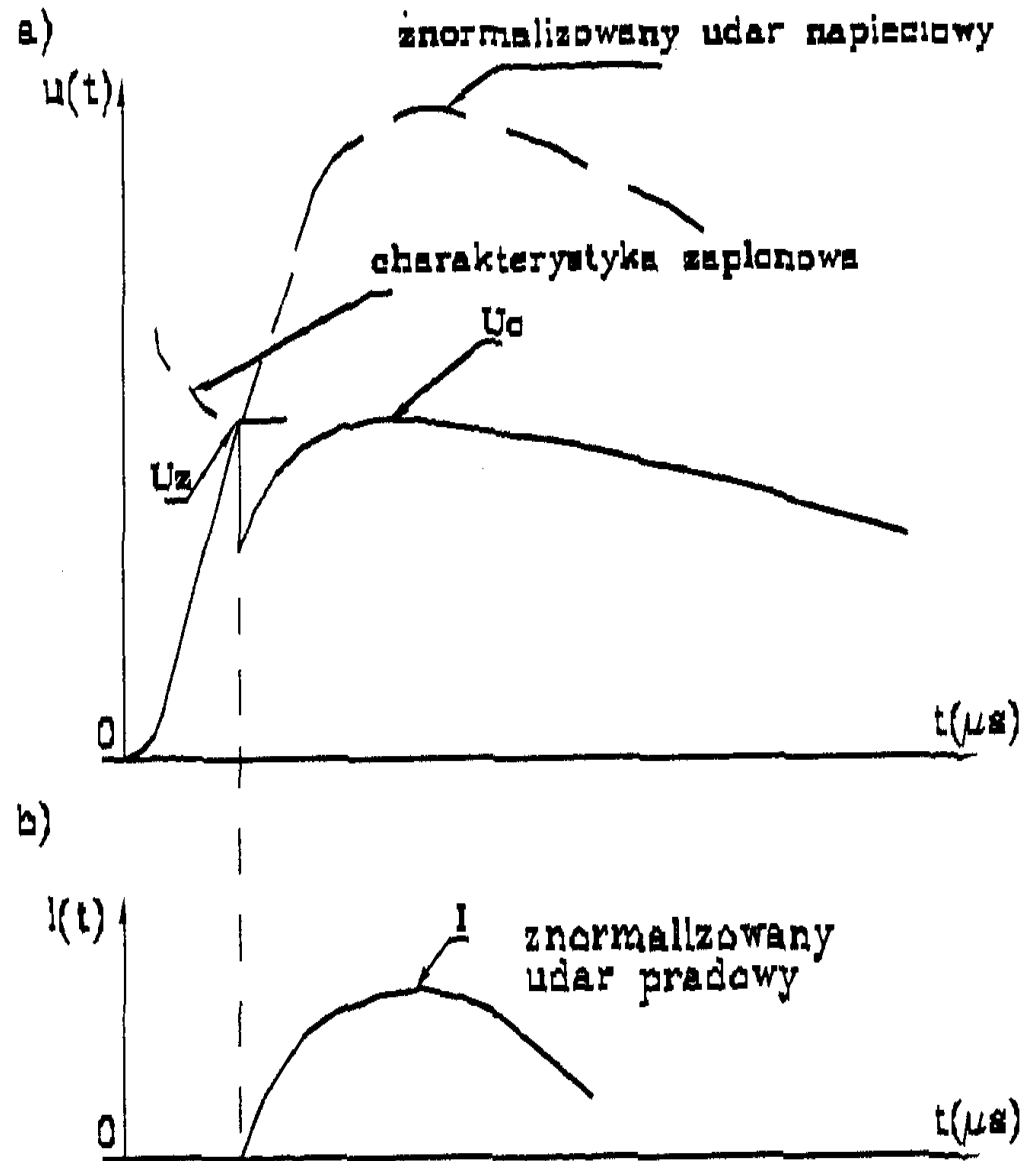
### 12.3.2. Zasada działania iskiernikowego ogranicznik przepięć

Przy omawianiu zasady działania można wyróżnić trzy następujące etapy zachodzących zjawisk:

1. zapłon iskiernika;
2. przepływ prądu wyładowczego;
3. przepływ i gaszenie prądu następczego.

#### Zapłon iskiernika.

Do liniowego zacisku odgromnika dociera fala przepięciowa o przykładowym kształcie **1.2/50  $\mu\text{s}$**  jak na rysunku 12.9a (linia przerywana). Po przekroczeniu napięcia zapłonu  $U_z$  iskiernika następuje zapłon łuku w iskierniku wielokrotnym. W tym etapie o właściwościach odgromnika decydują jedynie właściwości iskiernika, a konkretnie jego charakterystyka udarowa (rys. 12.6).



Rys. 12.9. Odgromnik w czasie przepływu prądu wyładowczego (mikrosekundowa skala czasu): a) napięcie, b) prąd

## **Przepływ prądu wyładowczego.**

Po zapłonie łuku w iskierniku wielokrotnym przez ogranicznik rozpoczyna płynąć prąd wyładowczy, który odkłada na stosie zmiennooporowym pewien spadek napięcia. Maksymalna wartość tego spadku napięcia to napięcie obniżone. Stos zmiennooporowy ma teraz, przy dużym prądzie, małą rezystancję. Zatem spadek napięcia na stosie zmiennooporowym nie jest zbyt duży, co zapewnia skuteczną ochronę obiektom chronionym. Zwykle parametry ogranicznika są tak dobrane, by  $U_{zn}$  oraz  $U_{0n}$  były zbliżone; gdzie  $U_{zn}$  jest poziomem charakterystyki udarowej iskiernika wielokrotnego, a  $U_{0n}$  jest znamionowym napięciem obniżonym stosu zmiennooporowego.

W drugim etapie działania ogranicznika o jego właściwościach decydują właściwości stosu zmiennooporowego, gdyż spadek napięcia na łuku palącym się w iskierniku jest pomijalnie mały.

Rozważając dwa pierwsze etapy działania ogranicznika można wyodrębnić trzy następujące wielkości, będące jego podstawowymi parametrami:

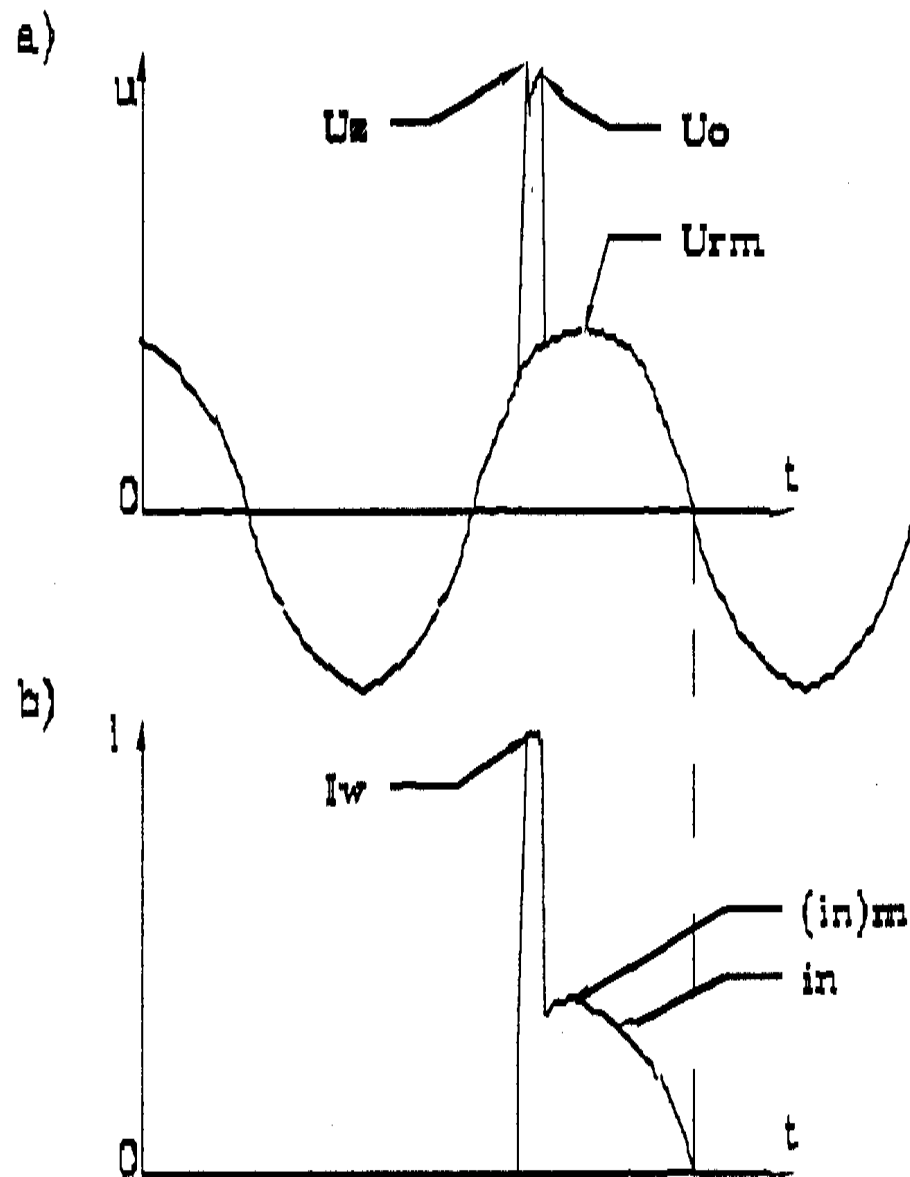
- $U_{zn}$  znamionowe napięcie zapłonu określone jako poziom 100-procentowej charakterystyki udarowej (blisko 100% prawdopodobieństwa, że zapłon nastąpi) iskiernika (rys. 12.6);
- $U_{z0.5}/1.15$  czyli wartość 100-procentowej charakterystyki udarowej iskiernika odczytana dla czasu  $0.5 \mu s$  dzielona przez  $1.15$  (rys. 12.6);
- znamionowe napięcie obniżone przy prądzie znamionowym, na który ogranicznik został obliczony i oznakowany.

Największa z tych trzech wartości napięcia nosi nazwę **poziomu ochrony** ogranicznika. Jest to zatem maksymalne napięcie jakie występuje na zaciskach ogranicznika w znamionowych warunkach pracy.

## Przepływ i gaszenie prądu następczego.

Po przeminieciu fali wyładowczej, łuk w iskierniku pali się nadal podtrzymywany napięciem roboczym sieci. Przez ogranicznik płynie teraz prąd zwarcia sieci zwany prądem następczym. W tym etapie stos zmiennooporowy współpracuje z iskiernikiem dążąc do zgaszenia prądu następczego. Czas trwania etapu trzeciego jest dużo dłuższy niż etapów jeden i dwa. Stos zmiennooporowy ma za zadanie zwiększyć swą rezystancję na tyle by ograniczyć prąd następczy do takiej wartości by iskiernik wielokrotny był w stanie go zgasić. Napięcie na ograniczniku i prąd płynący przez ogranicznik w całym zakresie działania, lecz w skali czasu napięć przemiennej 50 Hz, pokazuje rysunek 12.10.

Jednym z czynników ułatwiających gaszenie łuku jest duża liczba elektrod iskiernika (duża masa metalu), co ułatwia chłodzenie łuku. Stosowano również iskierniki z wydmuchem magnetycznym.



Rys. 12.10. Odgromnik w czasie przepływu prądu następczego (milisekundowa skala czasu):

a) napięcie, b) prąd

### 12.3.3. Przypadki przekroczenia poziomu ochrony iskiernikowego ogranicznika przepięć

Gdy jako środek ochrony przeciwprzepięciowej zastosuje się iskiernikowy ogranicznik przepięć to w zasadzie na obiekcie chronionym nie powinno pojawić się napięcie wyższe niż poziom ochrony ogranicznika. W praktyce jednakże mogą wystąpić przypadki, gdy poziom ochrony zostanie przekroczony. Występują cztery typowe możliwości przekroczenia poziomu ochrony ogranicznika:

1. Gdy do ogranicznika dotrą udary o bardzo dużej stromości to wówczas napięcie zapłonu iskiernika może być wyższe niż znamionowe napięcie zapłonu  $U_{zn}$  (rys. 12.6). Strome udary występują w przypadku bliskich wyładowań piorunowych, zatem niedopuszczanie fali przychodzącej z bliskiej odległości zapobiega takim przewyższeniom poziomu ochrony (patrz również rozdz. 11.1 i 11.2).
2. Gdy prąd wyładowczy przekracza wartość znamionowego prądu wyładowczego to wówczas napięcie obniżone przekracza wartość znamionowego napięcia obniżonego. Przykładowo, zakładając wartość współczynnika zaworowości  $\alpha = 20$  uzyskuje się zależność dla charakterystyki napięciowo-prądowej:

$$U_0 = k \cdot I^\alpha = k \cdot \sqrt[5]{I} \quad (12.2)$$

co przy dwukrotnej wartości prądu znamionowego ogranicznika daje wartość napięcia obniżonego  $U_0 \approx 1.15 \cdot U_{0n}$  czyli 15% przekroczenia poziomu ochrony. Przy 10-krotnym przekroczeniu prądu znamionowego, co jak wynika z rozdziału 10.1.3 (rys. 10.8) jest możliwe, uzyskuje się  $U_0 \approx 1.6 \cdot U_{0n}$  czyli 60-procentowe przekroczenie poziomu ochrony. Takim zagrożeniom zapobiega również ochrona podejść do stacji energetycznych nie dopuszczająca fal z bliskiej odległości.

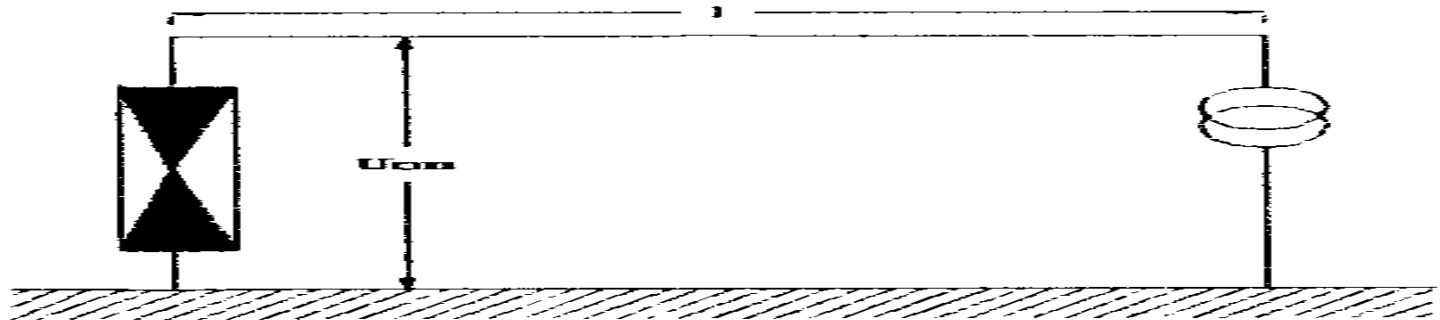
3. Ogranicznik przepięć jest zawsze sytuowany w pewnej odległości od obiektu chronionego np. od transformatora. Ilustruje to rysunek 12.11. Przebiegi falowe na odcinku ogranicznik-transformator powodują spiętrzanie się fali i wzrost napięcia na transformatorze względem napięcia na ograniczniku. W przybliżonych rozważaniach można nawet traktować transformator jako otwarty koniec linii (rozd. 10.3.3), gdzie fala spiętrza się do podwójnej wartości.

Wzrost napięcia na transformatorze w porównaniu z napięciem na ograniczniku spowodowany jego oddaleniem od transformatora można oszacować z zależności:

$$U_T = U_{0n} + \Delta U = U_{0n} + 2 \cdot s \cdot \frac{l}{g} \quad (12.3)$$

gdzie:  $s$  - stromość fali [kV/s];  $l$  - odległość między transformatorem, a ogranicznikiem [m],  
 $g$  - prędkość fali [m/μs].

Należy zatem dążyć do umieszczania ogranicznika jak najbliżej obiektu chronionego. Przepisy określają dopuszczalne odległości i tak np. dla sieci 15 kV odległość ogranicznik-transformator nie może być większa niż 20 m a dla sieci 400 kV nie może przekraczać 80 m. W przypadku ograniczników beziskiernikowych (patrz rozdz. 12.4) jest to jeden z argumentów za zabudowywaniem ogranicznika wewnątrz transformatora.



**Rys. 12. 11. Usytuowanie odgromnika i transformatora**

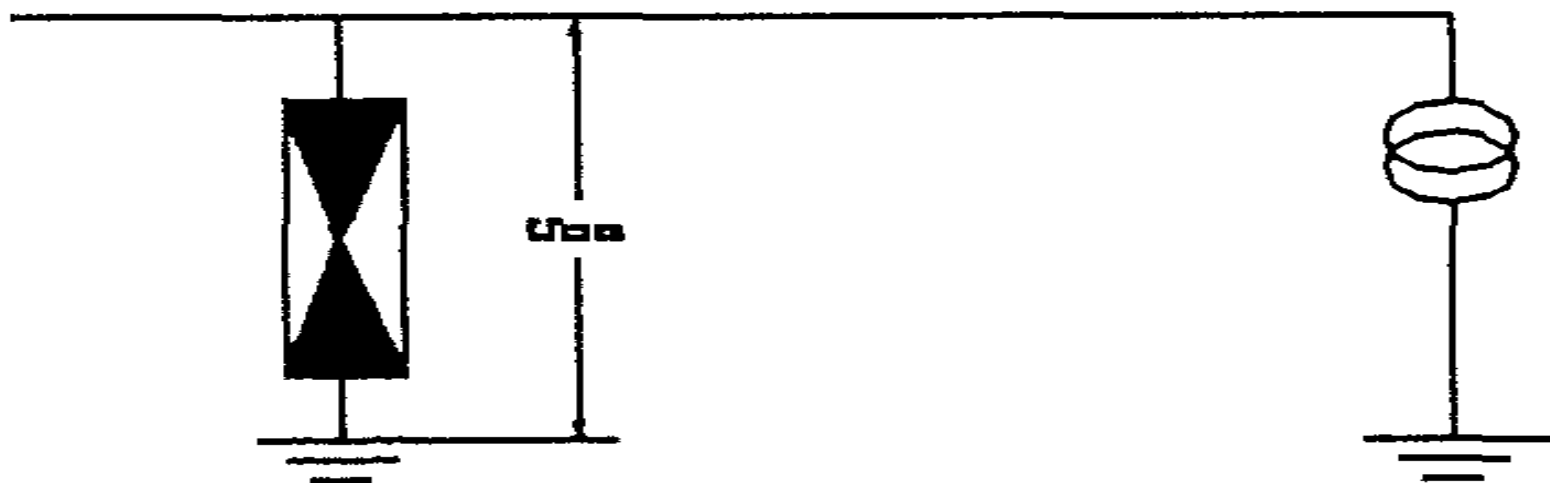


4. Jeśli ogranicznik i obiekt chroniony mają odrębne uziemienia to na uziemieniu ogranicznika wystąpi spadek napięcia, który dodaje się do spadku napięcia na stosie zmiennooporowym (albo inaczej rezystancja uziemienia dodaje się do rezystancji stosu zmiennooporowego) i na obiekcie chronionym (rys. 12.12) wystąpi napięcie wyższe od napięcia na ograniczniku

$$U_T = U_{0n} + \Delta_z U = U_{0n} + R_{uz} \cdot I_{wn} \quad (12.4)$$

gdzie:  $R_{uz}$  - rezystancja uziemienia;  $I_{wn}$  - znamionowy prąd wyładowczy.

Zatem ogranicznik i obiekt chroniony muszą mieć wspólne uziemienie.



Rys. 12.12. Nieprawidłowe uziemienie odgromnika

### 12.3.4. Zarys zasad doboru iskiernikowego ogranicznika przepięć do warunków sieciowych

Dobierając ogranicznik do pracy w danym punkcie sieci elektroenergetycznej trzeba wziąć pod uwagę trzy aspekty tego zagadnienia:

1. dobór najwyższego napięcia roboczego ogranicznika;
2. dobór znamionowego prądu wyładowczego;
3. zapewnienie skutecznej ochrony obiektu chronionego.

**Dobór najwyższego napięcia roboczego** ogranicznika wynika z założenia, że w każdych warunkach pracy sieci wartość jej najwyższego napięcia między fazą a ziemią w miejscu zainstalowania ogranicznika nie może przekraczać wartości jego najwyższego napięcia roboczego. Do tej bowiem tylko wartości napięcia producent zapewnia poprawne działanie ogranicznika. Zatem w sieciach z izolowanym punktem zerowym najwyższe napięcie robocze musi być wyższe lub co najmniej równe maksymalnemu napięciu roboczemu międzyfazowemu, bo taka wartość napięcia może wystąpić na fazie zdrowej przy zwarciu doziemnym w sieci (patrz rozdz. 8.3.1).

W sieciach o skutecznie uziemionym punkcie zerowym (rozdz. 8.3.4), gdzie przy zwarciu doziemnym, na fazach zdrowych wystąpi co najwyżej **80%** napięcia międzyprzewodowego, napięcie robocze ogranicznika może również być obniżone do wartości **80%** w stosunku do tego, co byłoby konieczne w sieci z izolowanym punktem zerowym. Zatem w przypadku sieci ze skutecznie uziemionym punktem zerowym mówi się potocznie o tzw. ogranicznikach 80-procentowych.

Przykładowo, w sieci **110 kV** może być zastosowany ogranicznik o najwyższym napięciu roboczym  $U_{\text{rmo}} = 96 \text{ kV}$ , w sieci **220 kV** może być  $U_{\text{rmo}} = 198 \text{ kV}$ , w sieci **400 kV** może być  $U_{\text{rmo}} = 330 \text{ kV}$  itp.

Pojęcie ogranicznik 80-procentowy jest skrótem myślowym następującego rozumowania: jeśli można zastosować ogranicznik o niższej wartości  $U_{rmo}$  to wskutek właściwości iskiernika wielokrotnego będzie miał niższe napięcia zapłonu, a więc jako całość może mieć niższy (obniżony do 80%) poziom ochrony. Zatem ogranicznik taki zapewni skuteczniejszą ochronę i pozwoli obniżyć koszty izolacji obiektów chronionych.

Problem **doboru znamionowego prądu wyładowczego** ogranicznika sprowadza się do spełnienia zaleceń formułowanych w odpowiednich przepisach. I tak, w sieciach o napięciach 110 kV i wyższych zaleca się stosować ograniczniki o znamionowym prądzie wyładowczym 10 kA, w sieciach 3÷60 kV zaleca się 5 kA, a w sieciach do 1 kV zaleca się 2.5 kA. Dodatkowym problemem jest stosowanie iskiernikowych ograniczników przepięć do ochrony nie tylko od przepięć piorunowych ale również od przepięć łączeniowych. Przy przepięciach łączeniowych występuje konieczność odprowadzania przez ogranicznik znacznie większej energii niż w przypadku przepięć piorunowych. Zatem ogranicznik przeznaczony do ochrony od przepięć łączeniowych musi być dostosowany do trudniejszych warunków pracy poprzez odpowiednie zwymiarowanie przekroju płytek stosu zmiennooporowego jak i poprzez odpowiednią konstrukcję iskiernika dobraną do odprowadzania dużych energii. Ograniczniki takie noszą nazwę ograniczników ciężkich.

Ostatnim aspektem doboru odgromnika jest **dobór poziomu ochrony** tak by był on odpowiednio niższy od poziomu izolacji obiektu chronionego. Przy czym poziom izolacji obiektu chronionego jest definiowany za pomocą odpowiedniego napięcia probierczego, którym obiekt chroniony jest badany u wytwórcy. Zatem przy doborze odgromnika zaworowego, który ma chronić przed przepięciami piorunowymi musi być spełniony warunek:

$$U_{ochp} \leq \frac{U_{ip}}{k_{bp}} \quad (12.5)$$

gdzie:  $U_{ip}$  - napięcie probiercze obiektu chronionego;  $k_{bp}$  - współczynnik bezpieczeństwa,  $k_{bp} \geq 1.3$

Dla odgromników ciężkich dochodzi warunek dotyczący ochrony przy przepięciach łączeniowych:

$$U_{ochl} \leq \frac{U_{il}}{k_{bl}} \quad (12.6)$$

gdzie:  $U_{il}$  - łączeniowy poziom izolacji obiektu chronionego,  $k_{bl}$  - współczynnik bezpieczeństwa przy przepięciach łączeniowych,  $k_{bl} \geq 1.15$ .

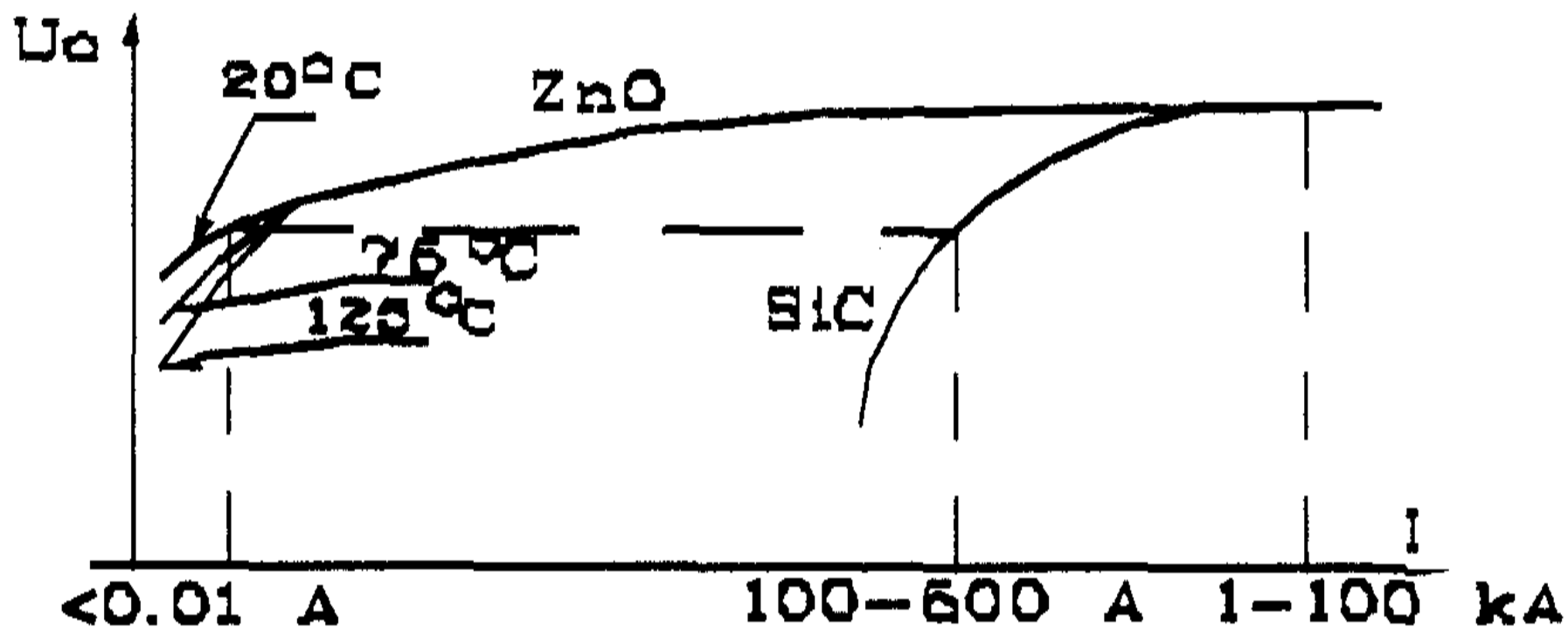


## **12.4. OGRANICZNIKI BEZISKIERNIKOWE**

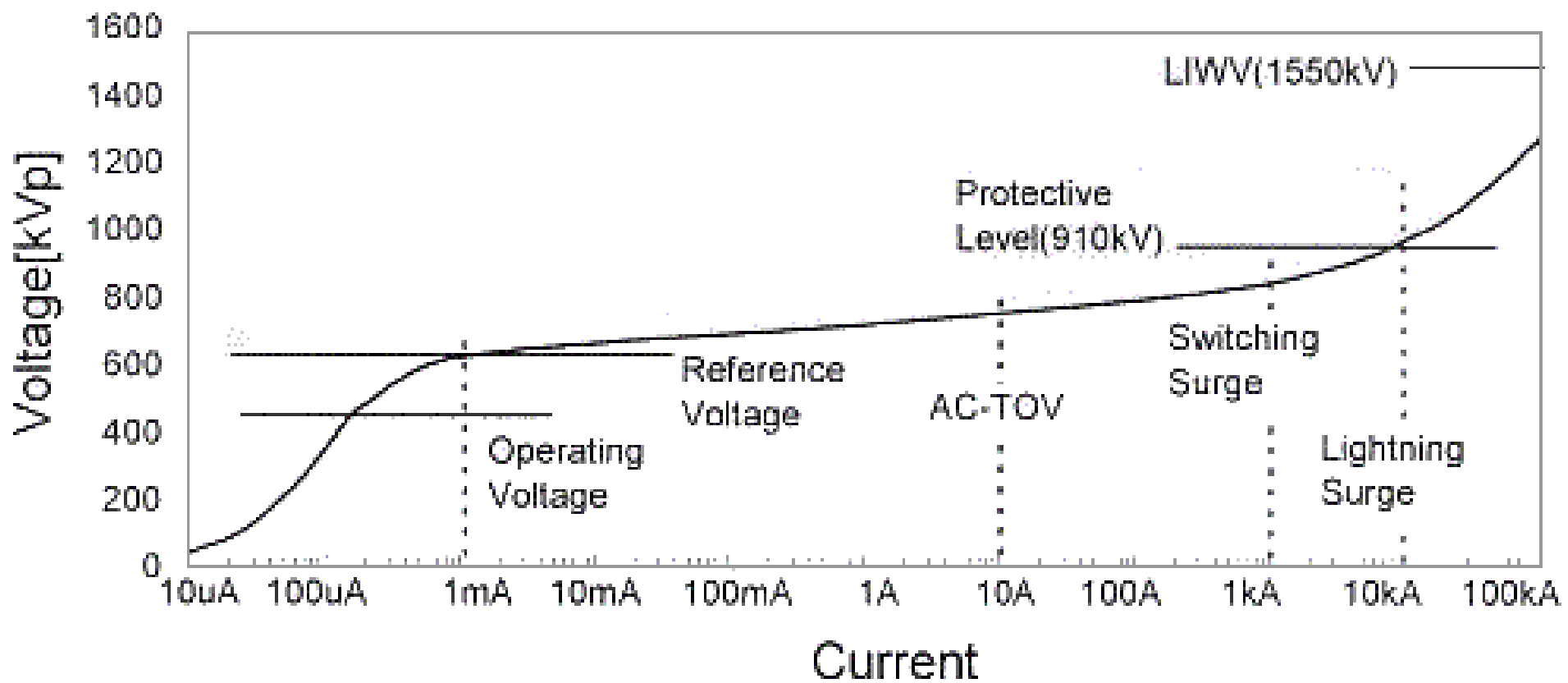
### **12.4.1. Wprowadzenie**

W 1968 roku wynaleziono w Japonii warystory budowane w oparciu o granulowaną mieszaninę tlenku cynku  $\text{ZnO}$  z dodatkami  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (trójtlenek bizmutu),  $\text{CoO}$  (tlenek kobaltu),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (trójtlenek chromu),  $\text{MnO}$  (tlenek manganu),  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  (trójtlenek antymonu).

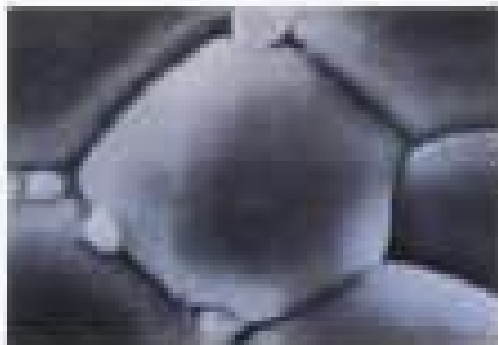
Charakterystyka napięciowo-prądowa takich warystorów jest znacznie bardziej płaska niż charakterystyka warystorów karborundowych (rys. 12.13). Przy napięciach odpowiadających przemienным napięciom roboczym sieci przez warystory  $\text{ZnO}$  płynie tak mały prąd, że izolowanie stosu zmiennooporowego od sieci za pomocą iskiernika staje się zbędne stąd nazwa ograniczniki beziskiernikowe (inna nazwa to ograniczniki tlenkowe). Pierwsze tego typu ograniczniki zbudowano w Japonii w roku 1973, a w roku 1978 wprowadzono do eksploatacji kompletną serię ograniczników na napięcia  $3.3\div 500$  kV. Obecnie ograniczniki te są powszechnie stosowane w całym świecie.



Rys. 12.13. Porównanie charakterystyk napięciowo-prądowych płytek ZnO i SiC [25]







Microstructure of TNR



Figure 2. Elements Series

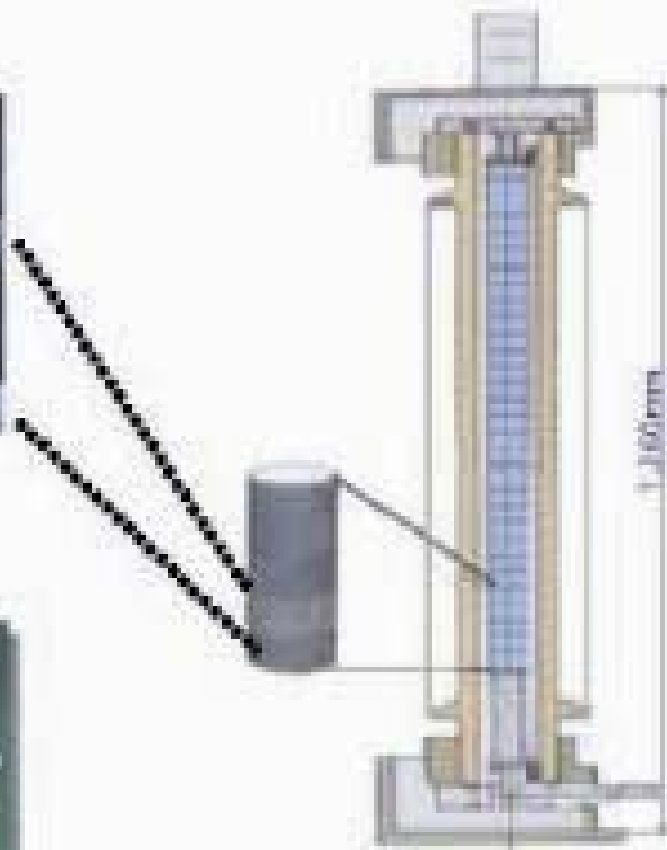
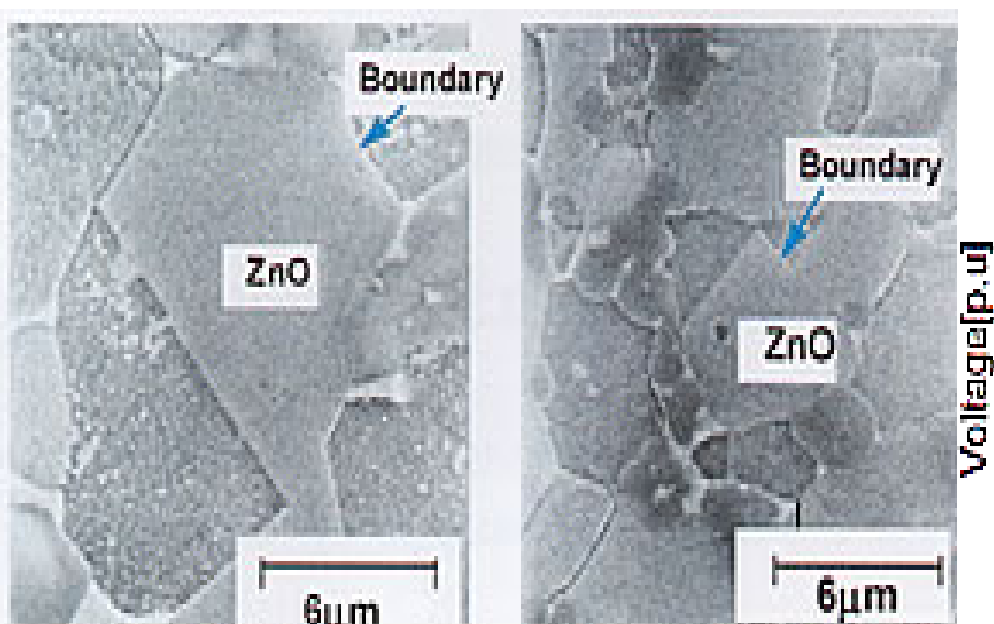


Figure 1. Construction of TNR Surge Arrestor

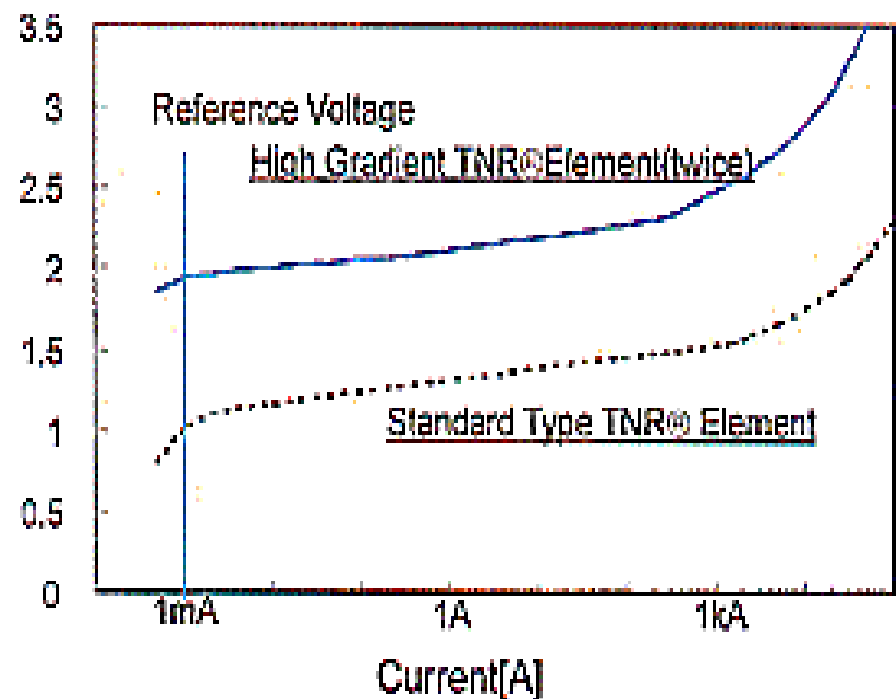
TNR<sup>®</sup> - Toshiba Non-linear Resistor ZnO Element

® - firmowe oznaczenie firmy Toshiba



Standard type  
(Grain size 10  $\mu\text{m}$ )

High Gradient type  
(Grain size 5  $\mu\text{m}$ )



TNR<sup>®</sup> - Toshiba Non-linear Resistor ZnO Element

® - firmowe oznaczenie firmy Toshiba

## 交流系統用金屬氧化物避雷器

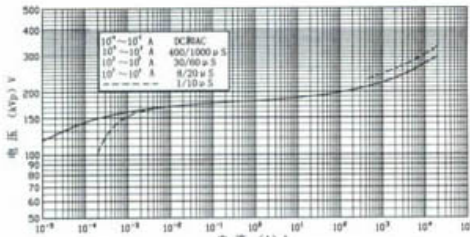


图1 Y10W6-108型金属氧化物避雷器伏—安特性  
Fig1 V-A characteristic of Y10W6-108 MOA

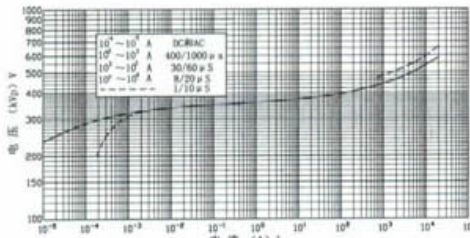


图2 Y10W6-216型金属氧化物避雷器伏—安特性  
Fig2 V-A characteristic of Y10W6-216 MOA

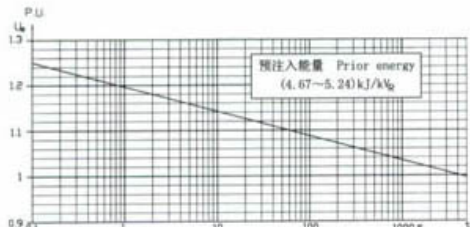
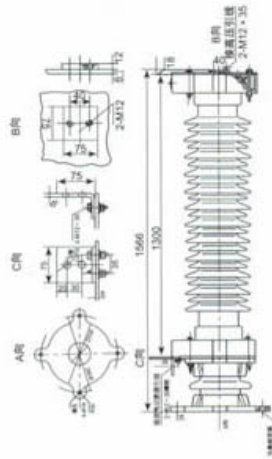
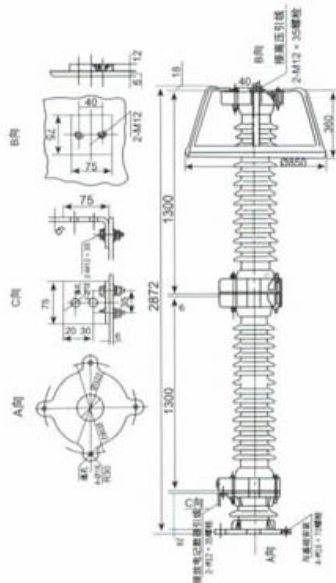


图3 Y10W6-108 型金属氧化物避雷器工频电压耐受时间特性  
Y10W6-216  
Fig3 Power frequency voltage verduis time characteristics of MO



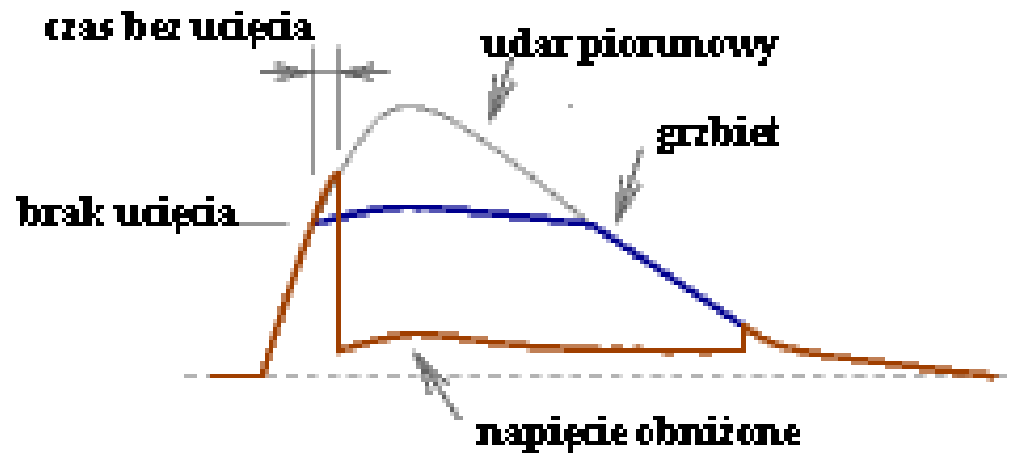
Y10WZ6-96/250W(G)      Y10WZ6-102/266W(G)  
Y10WZ6-100/260W(G)      Y10WZ6-108/281W(G)



Y10WZ6-192/500W(G) Y10WZ6-204/532W(G)  
Y10WZ6-200/520W(G) Y10WZ6-216/562W(G)

W porównaniu z klasycznymi ogranicznikami iskiernikowymi z warystorami SiC ograniczniki beziskiernikowe mają następujące zalety:

- bardzo płaską charakterystykę napięciowo-prądową (rys.12.13);
- brak ucięcia napięcia na ograniczniku;

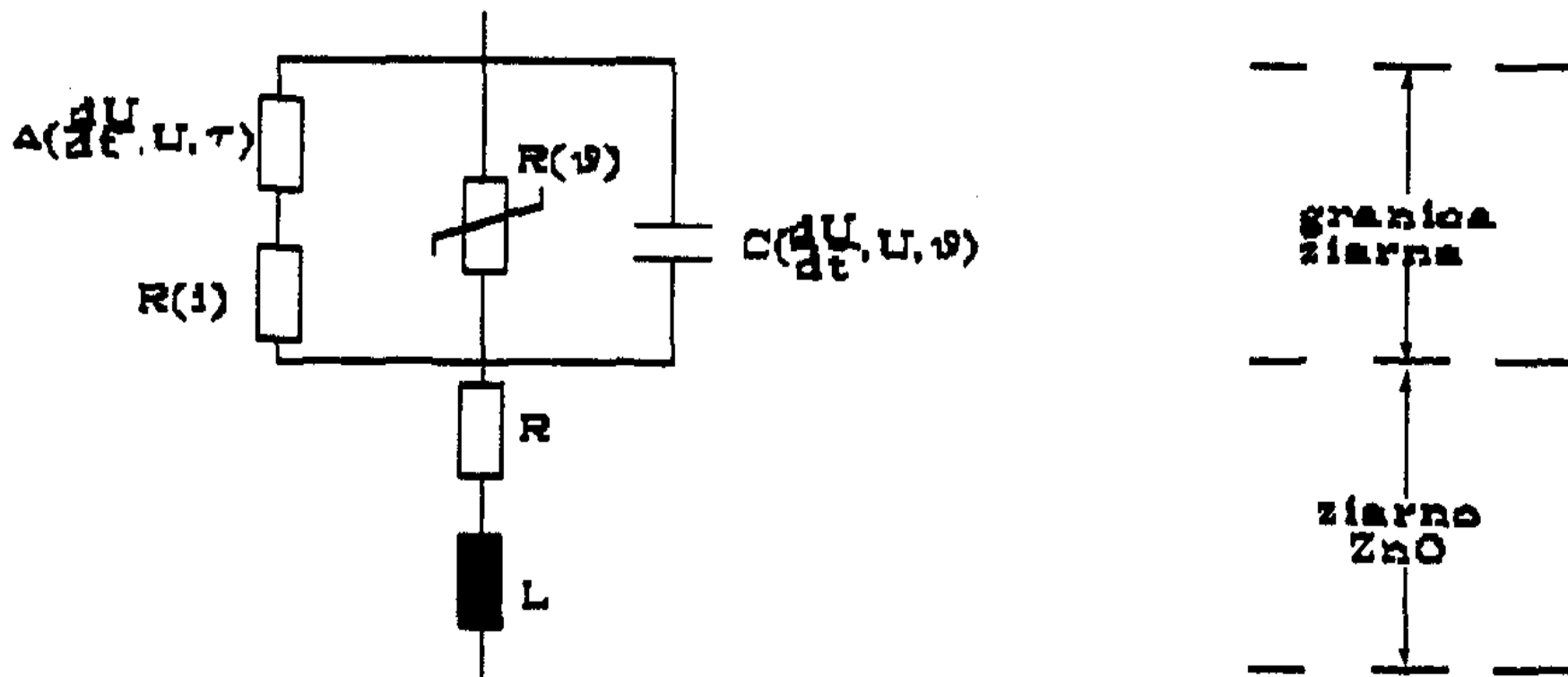


Linia czerwona dotyczy iskiernikowego a niebieska beziskiernikowego ogranicznika przepięć

- znakomitą zdolność do odprowadzania energii na jednostkę objętości warystora;
- lepszą charakterystykę napięciową przy stromych udarach prądowych;
- możliwość łatwego konstruowania ograniczników ciężkich przez równoległe łączenie warystorów;
- brak iskiernika wielokrotnego co umożliwia ich pracę w różnych środowiskach nie tylko z gazowym ale również ze stałym i ciekłym ośrodkiem izolacyjnym; stwarza to możliwość zabudowywania ogranicznika wewnątrz obiektu chronionego;
- dokładnie zdefiniowany poziom ochrony ogranicznika wynikający tylko z napięcia obniżonego na warystorach co gwarantuje idealną powtarzalność (brak rozrzutów związanych z losowością zjawisk); zmniejsza to marginesy niepewności i pozwala obniżyć koszty chronionej izolacji;
- ochrona przy wszystkich rodzajach przepięć;
- brak prądu następczego, a tym samym zmniejszenie się ryzyka zakłócenia systemu energetycznego;
- wysoka odporność na zabrudzenia, co daje bardziej niezawodną ochronę i obniżenie kosztów na kontrolowanie i czyszczenie izolacji zewnętrznej.

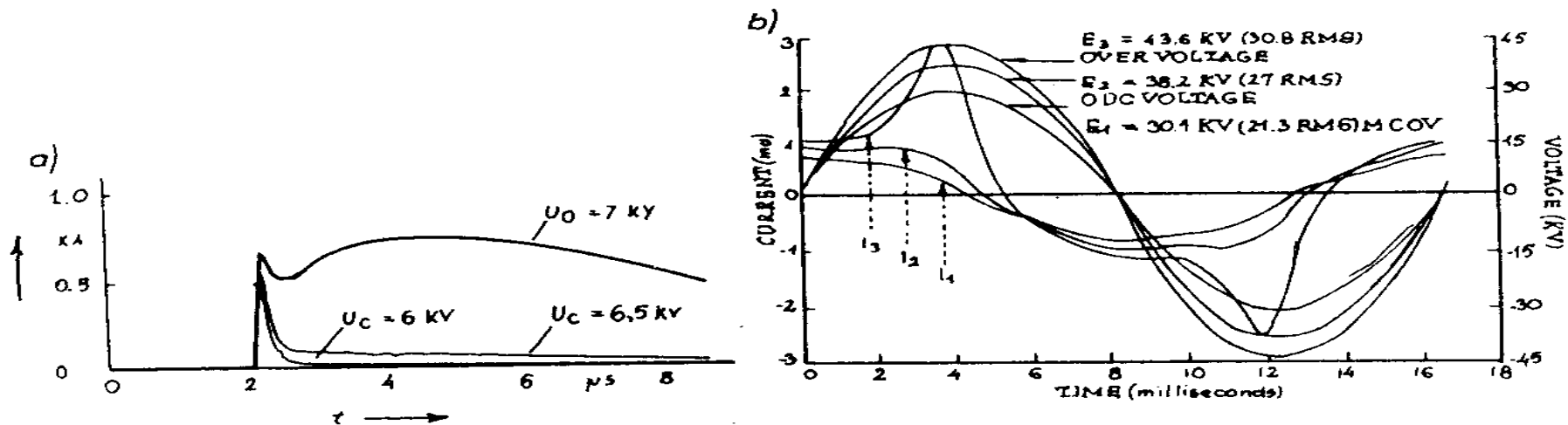
## 12.4.2. Schemat zastępczy warystora ZnO

Na rysunku 12.14 pokazano schemat zastępczy warystora **ZnO**. Jak widać w schemacie zastępczym występują trzy równoległe gałęzie, których właściwości są związane z powierzchnią graniczną ziarna **ZnO**.



Rys. 12.14. Schemat zastępczy płytki warystora ZnO [26]

Do określonego napięcia płytka ZnO zachowuje się jak pojemność. Ze wzrostem napięcia zaczynają dominować właściwości rezystancji nieliniowej nad właściwościami pojemnościowymi (rys. 12.15). Tak długo jak napięcie doprowadzone do warystora jest niższe od określonego, krytycznego napięcia  $U_0$  (rys. 12.15a), przez warystor płynie głównie prąd pojemnościowy. Po przekroczeniu wartości napięcia "załączającego" dominuje prąd czynny płynący w gałęzi z nieliniową rezystancją  $R(i)$ .

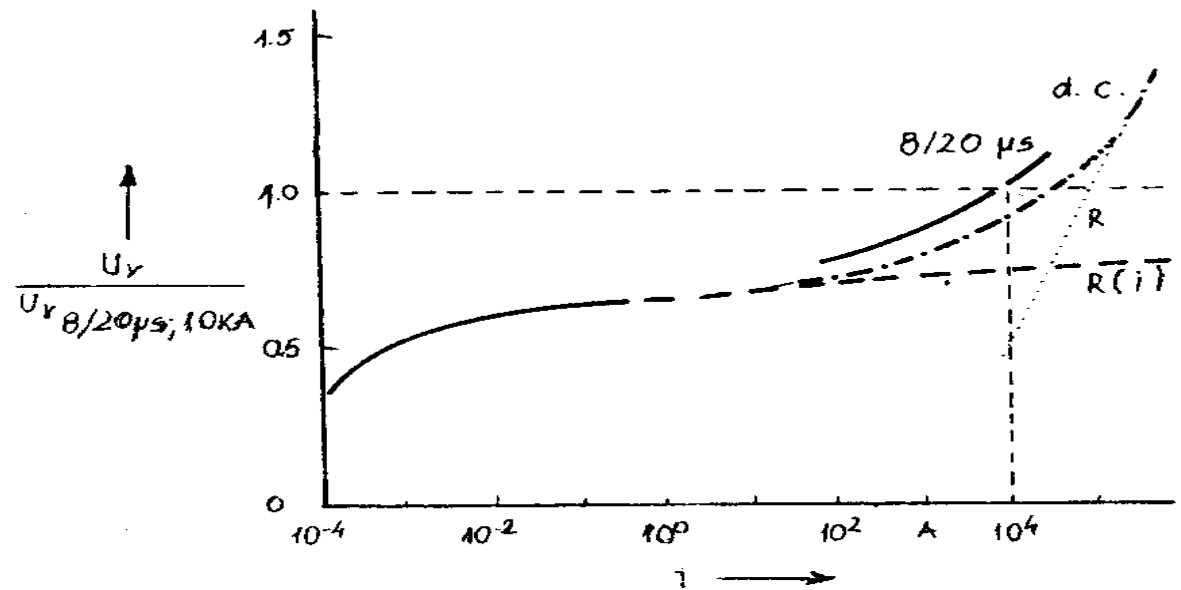


Rys. 12.15. Przebiegi prądu płynącego przez odgromnik na poziomach napięcia niższych i wyższych od napięcia "załączającego": a) przy uderzeniach napięciowych [26], b) przy napięciu przemiennym [25]

Nieliniowość rezystancji płytki warystora jest spowodowana nałożeniem się zjawisk nieliniowych na granicy ziarna  $\mathbf{R(i)}$  oraz liniowych zjawisk wewnątrz ziarna  $\mathbf{R}$  (rys. 12.16).

Element załączający  $\mathbf{A}$  (rys. 12.14) odzwierciedla dynamiczny rozkład ładunku na granicy ziarna  $\mathbf{ZnO}$ . Właściwości dynamiczne tego elementu schematu zależą od stromości narastania i wartości szczytowej napięcia oraz od stałej czasowej określającej stan równowagi elektronów i dziur na granicy ziarna.

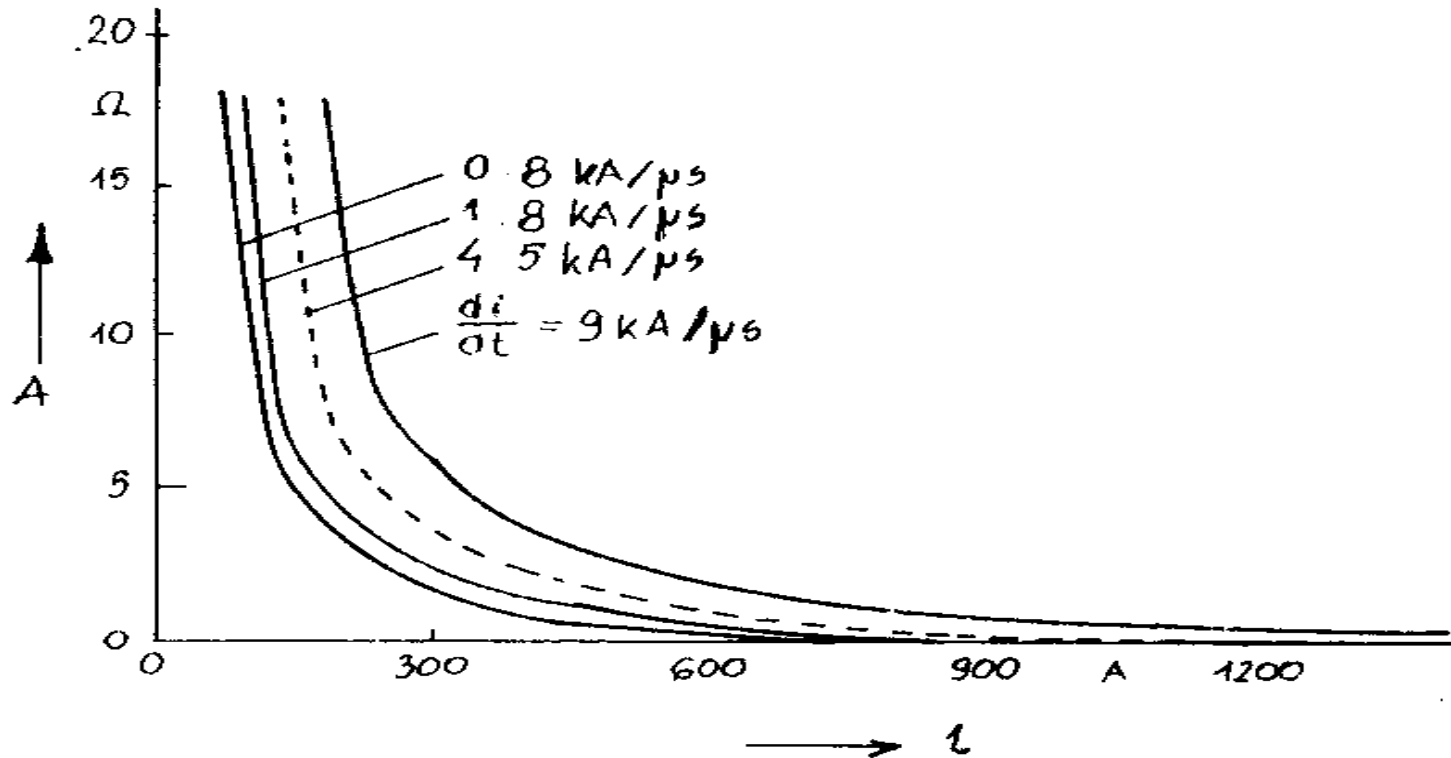
Rys. 12.16. Charakterystyka napięciowo-prądowa względna warystora ZnO do określania parametrów schematu zastępczego z rysunku 12.14 [26]





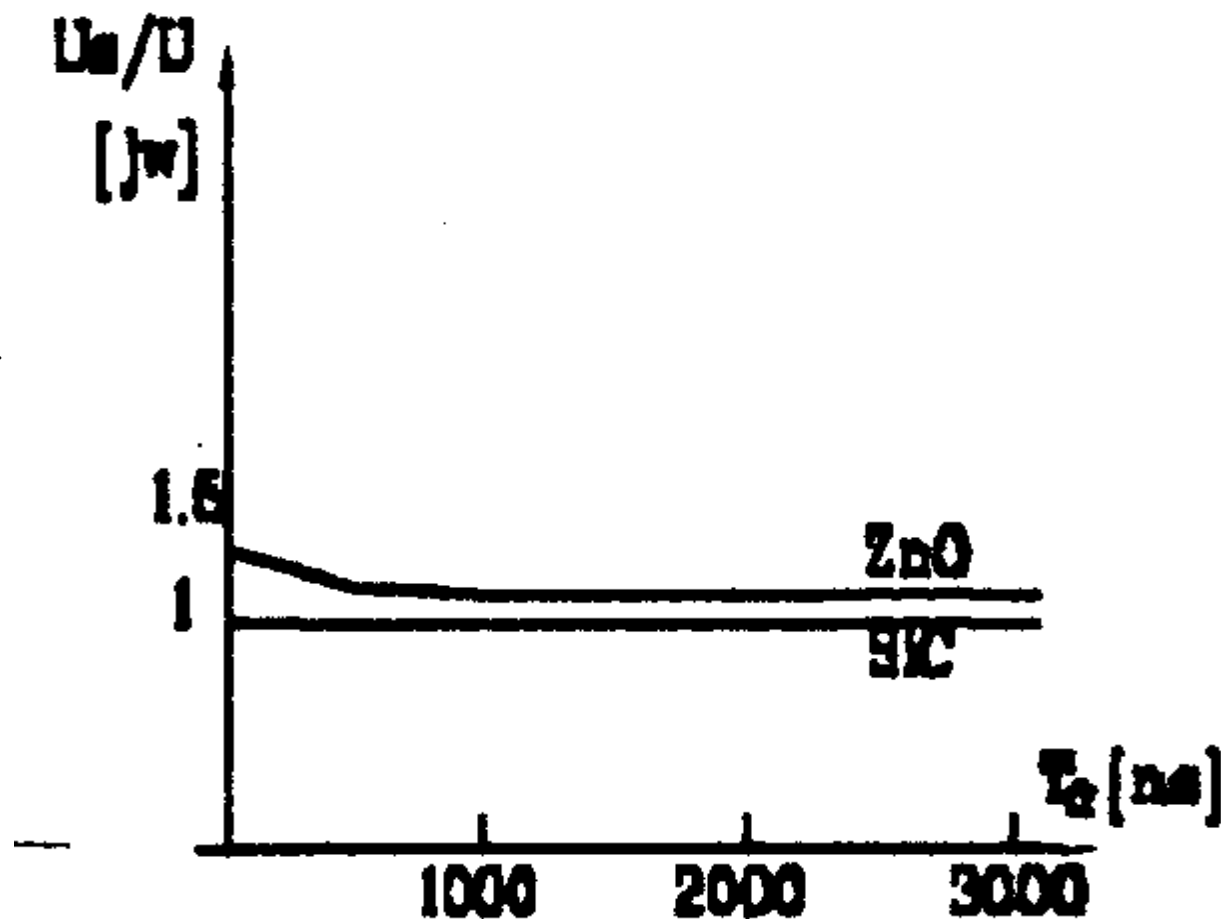
Przykładowe charakterystyki elementu załączającego podano na rysunku 12.17. Dla różnych składów materiału płytek **ZnO** wartości liczbowe mogą być inne lecz charakter zależności pozostaje.

Pojemność **C** płytki zależy od stromości prądu i szacuje się, że pojemność ta jest rzędu **1 nF** dla dużych stromości prądu i rośnie dla niskich wartości **di/dt**. Wysokoomowa rezystancja **R(v)** zależy głównie od temperatury i jest istotna przy względnie niskich prądach (< 1 A). Jest to rezystancja odpowiedzialna za upływność przy napięciu roboczym.



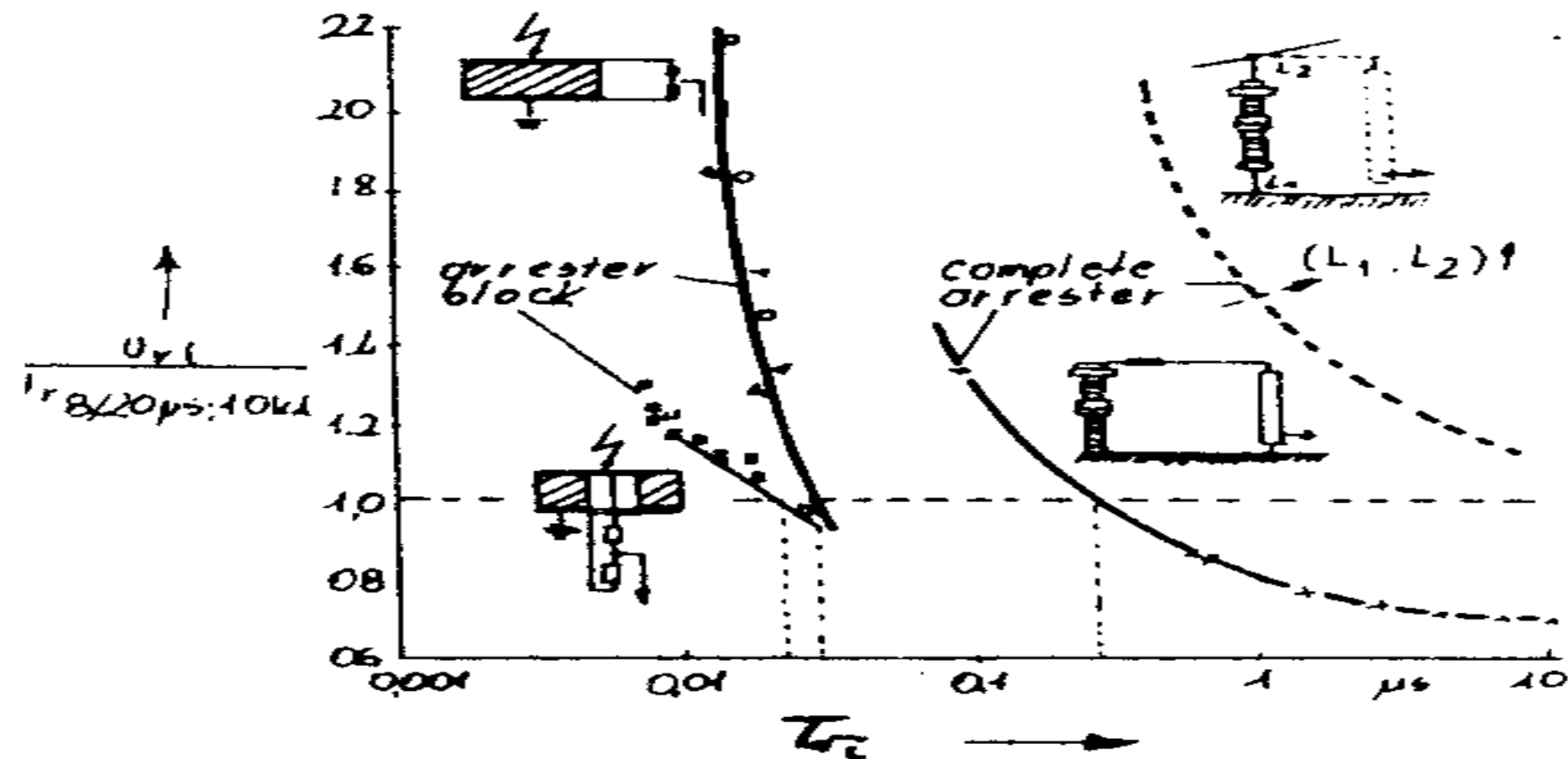
**Rys. 12.17. Charakterystyki elementu załączającego A [26]**

Indukcyjność  $L$  obrazuje pola magnetyczne zarówno wewnętrzne jak i zewnętrzne względem płytki **ZnO**. Jeśli wpływ pól zewnętrznych nie istnieje lub został wyeliminowany to można tę indukcyjność oszacować jako równą  $1 \mu\text{H/m}$ . Indukcyjność  $L$  jest odpowiedzialna za wzrost napięcia na płytce **ZnO** przy dużych stromościach prądu (rys. 12.18). Takiej zależności napięcia obniżonego od stromości udaru prądowego nie mają warystory **SiC** - jednakże w klasycznym iskiernikowym ograniczniku przepięć występuje wzrost napięcia zapłonu iskiernika przy stromych uderach napięciowych.



**Rys. 12.18. Zależność napięcia obniżonego od stromości udaru prądowego [26]**

Jeśli w obwodzie występują dodatkowe indukcyjności (np. indukcyjności połączeń) dodające się do indukcyjności płytki **ZnO** to wzrost napięcia może występować już przy dłuższych czołach udaru (rys. 12.19). Zatem dla uzyskania odpowiedniej ochrony przy stromych przepięciach piorunowych, długość przewodów łączących winna być tak krótka jak tylko jest to możliwe.



**Rys. 12.19. Wpływ indukcyjności połączeń**

### 12.4.3. Podstawy doboru ograniczników beziskiernikowych

Stosowanie ograniczników beziskiernikowych wymaga nowej koncepcji doboru ogranicznika do warunków sieciowych. Jednakże podstawowe zadania ogranicznika - wytrzymywanie w sposób ciągły przemiennego napięcia roboczego, przy którym jest zainstalowany i ograniczanie przepięć występujących w sieci przez odprowadzenie energii stanu przejściowego reprezentowanej przez prąd - pozostają bez zmian.

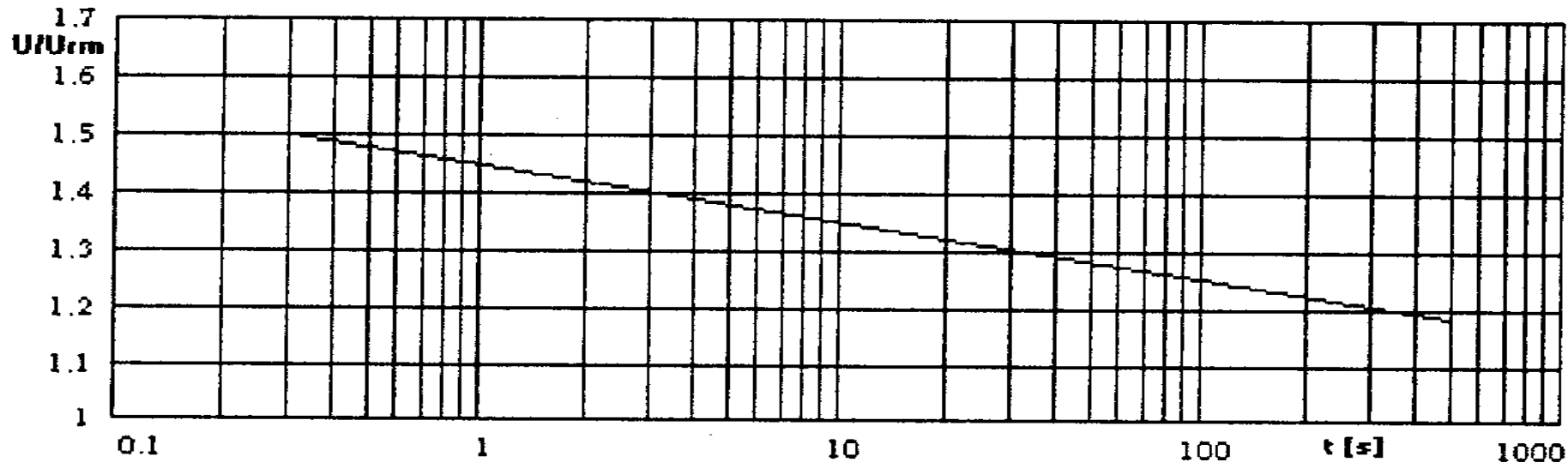
Jak już wspomniano w rozdziale 12.4.2, warystory **ZnO** przechodzą gwałtownie do stanu przewodzenia przy dokładnie zdefiniowanym poziomie napięcia i przerywają przewodzenie, gdy napięcie opada poniżej tego poziomu. Iskiernik wielokrotny nie jest konieczny dla izolowania ogranicznika od ziemi ponieważ warystory przewodzą przy napięciu roboczym jedynie mały prąd upływu.

Ogranicznik tlenkowy będzie pracował prawidłowo i zachowywał swoje właściwości pod warunkiem, że nie będzie zmuszony odprowadzać więcej energii niż może tolerować. Zatem może pracować przy napięciach powyżej poziomu przewodzenia w czasach jedynie tak długich jak to wynika z jego pojemności energetycznej. Jeśli napięcie obniży się do napięcia roboczego wcześniej zanim pojemność energetyczna warystora zostanie przekroczona to będzie zachowywał swoje właściwości i nie ulegnie zniszczeniu.

Zakres poprawnej pracy odgromnika zawiera więc napięcia aż do napięcia progu przewodzenia. Napięcie to zależy od temperatury i ze wzrostem temperatury maleje. Zatem podstawowym kryterium doboru odgromnika jest temperatura, gdyż charakterystyka napięciowo-prądowa zależy, w zakresie niskich prądów, od temperatury (rys. 12.13). Jeśli temperatura otoczenia rośnie lub rośnie energia dostarczona do odgromnika to rośnie również temperatura warystora. Powoduje to z kolei wzrost wartości prądu, co powoduje dalsze nagrzewanie itd. Jeśli temperatura przekroczy pojemność cieplną warystora to następuje przegrzanie i odgromnik zmierza do uszkodzenia. Ponieważ decydują warunki cieplne, odgromnik beziskiernikowy musi być dobierany w oparciu o maksymalne napięcie, które może wytrzymać w sposób ciągły przy danej temperaturze otoczenia.

Drugim kryterium jest krotność i czas trwania przebiegów długotrwałych. Wykorzystując, podawane przez producentów odgromników, charakterystyki napięciowo-czasowe (rys. 12.20) trzeba rozważyć czy przebieg nie stanie się przyczyną inicjującą cieplny mechanizm uszkodzenia. Dla właściwego doboru odgromnika do sieci rozdzielczej maksymalne napięcie robocze odgromnika musi być równe lub większe, od maksymalnego napięcia roboczego sieci, natomiast zdolność odgromnika do pochłaniania energii przebiegów dorywczych nie może być przekroczona w warunkach uszkodzenia lub zwarcia w mniej niż trzech fazach.

Szczególną uwagę trzeba też zwrócić na rzeczywiste napięcie występujące w sieciach rozdzielczych. Normalizacja napięcia dotyczy jedynie pomiaru u odbiorcy, natomiast w innych punktach sieci są dopuszczalne znacznie większe wahania napięcia tak długo jak długo wynik pomiaru u odbiorcy mieści się w granicach normy.



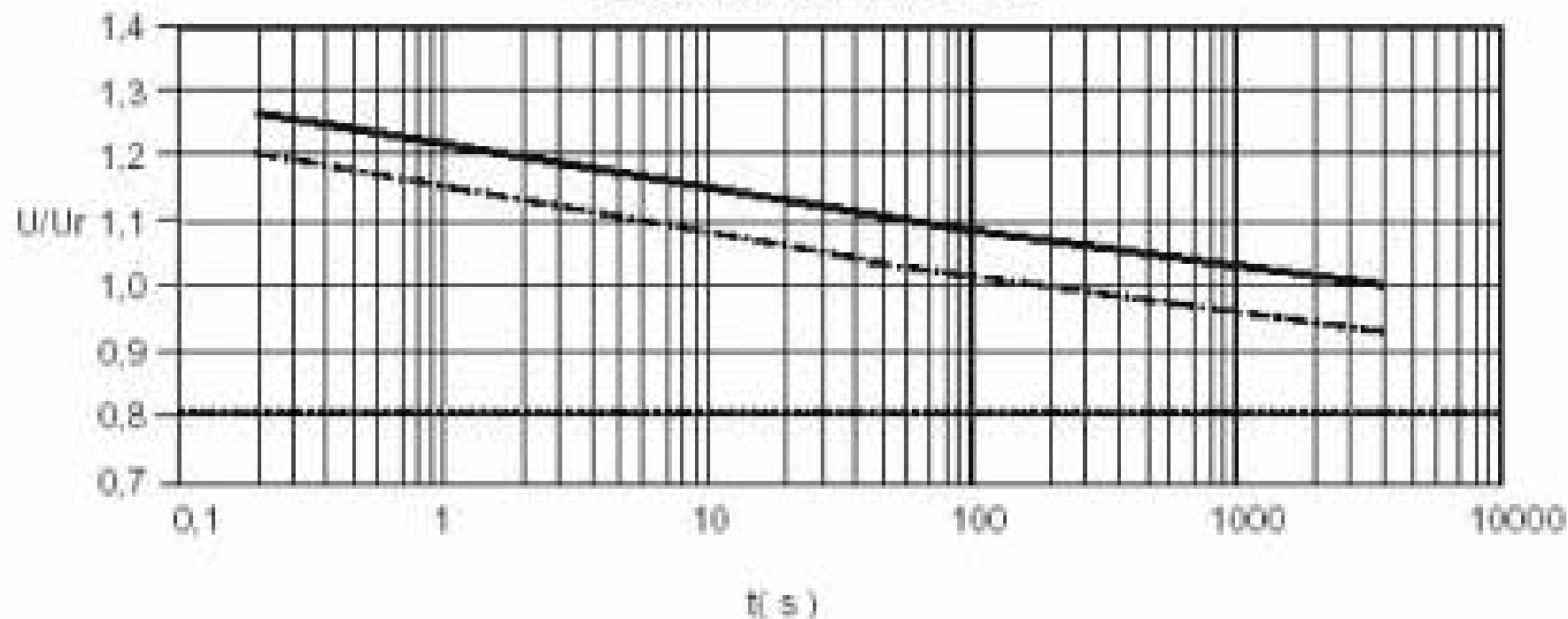
Rys. 12.20. Zależność wartości dopuszczalnej przebiegu od czasu trwania

Power frequency voltage versus time characteristic (TOV)

(Initial temperature +60°C) /

Wechselspannungs - Zeit - Kennlinie (TOV)

(Ausgangstemperatur +60°C)

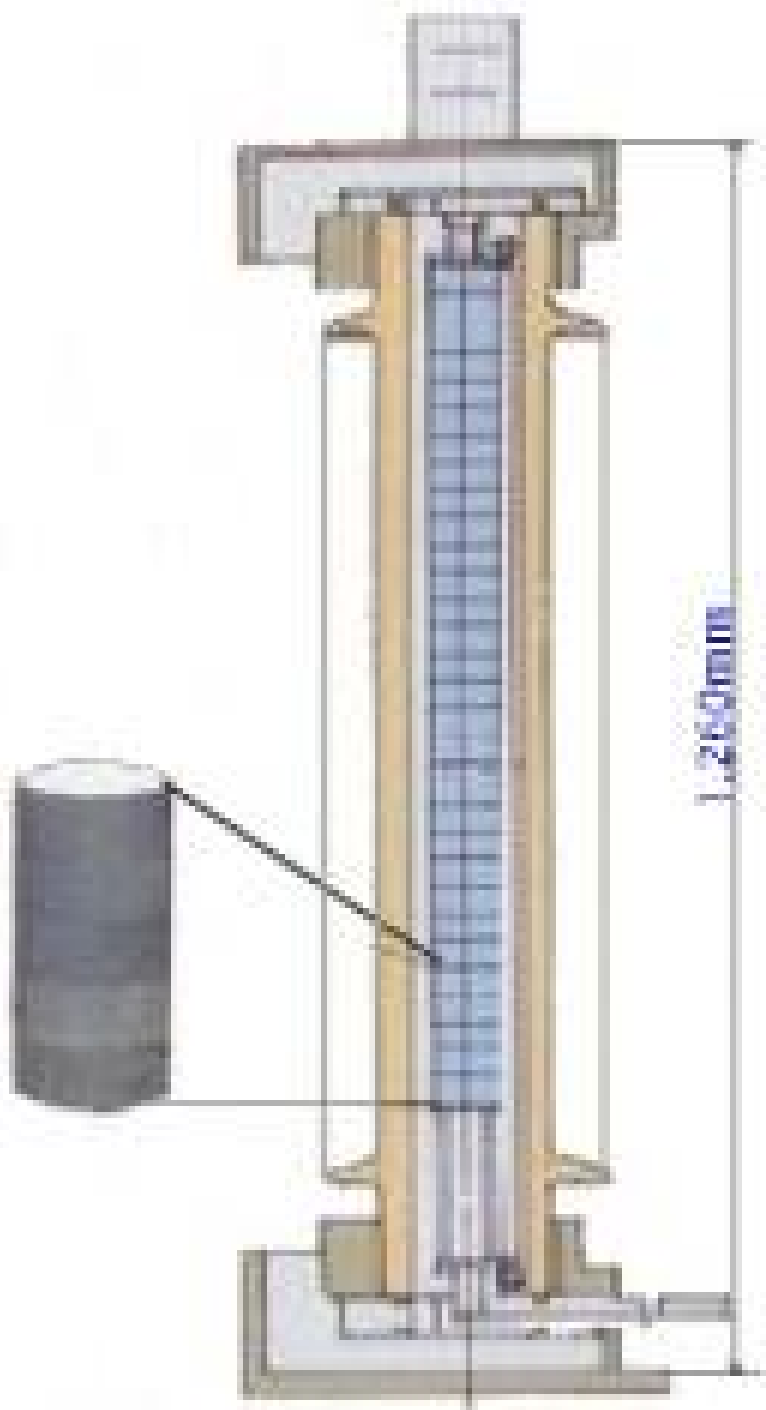


**Table 1. Standard Ratings**

Type of surge arrester		RVLQD	RVLQC	RVLQB	RVLQE	RVLQA
System voltage	[kV]	3-245	60-420	60-550	60-550	60-800
Rated voltage	[kV]	3-198	54-360	54-492	54-492	54-624
Nominal discharge current	In[kA]	10	10	20	20	20
Line discharge class	IEC	Class2	Class3	Class4	Class5	Class5
	ANSI	Station	Station	Station	Station	Station
High current impulse capability	[kA]	100	100	100	100	100
Pressure relief class	[kA]	20/50	50	65	65	65
Discharge voltage level ratio (Residual voltage at 10kA / Rated voltage)		2.7	2.6	2.3	2.3	2.2
Energy capability	[kJ/kV-Ur]	4.5	7	11	15	26

- Note**
- 1) Surge arrester with more heavy energy capability is available if required.
  - 2) The energy capability values mean the dissipated total energy per two shots of switching surge that the surge arresters can withstand thermally with these values.

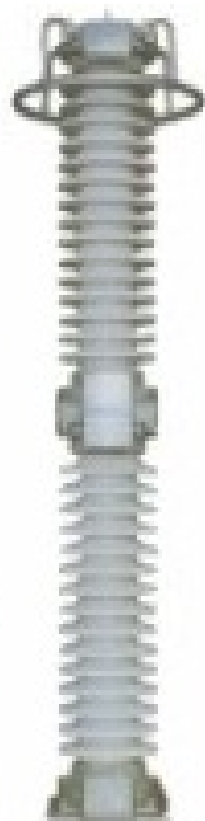




Gas Insulated type



**For Power Station,  
Transmission**



Porcelain type



Distribution  
type

**For Distribution**

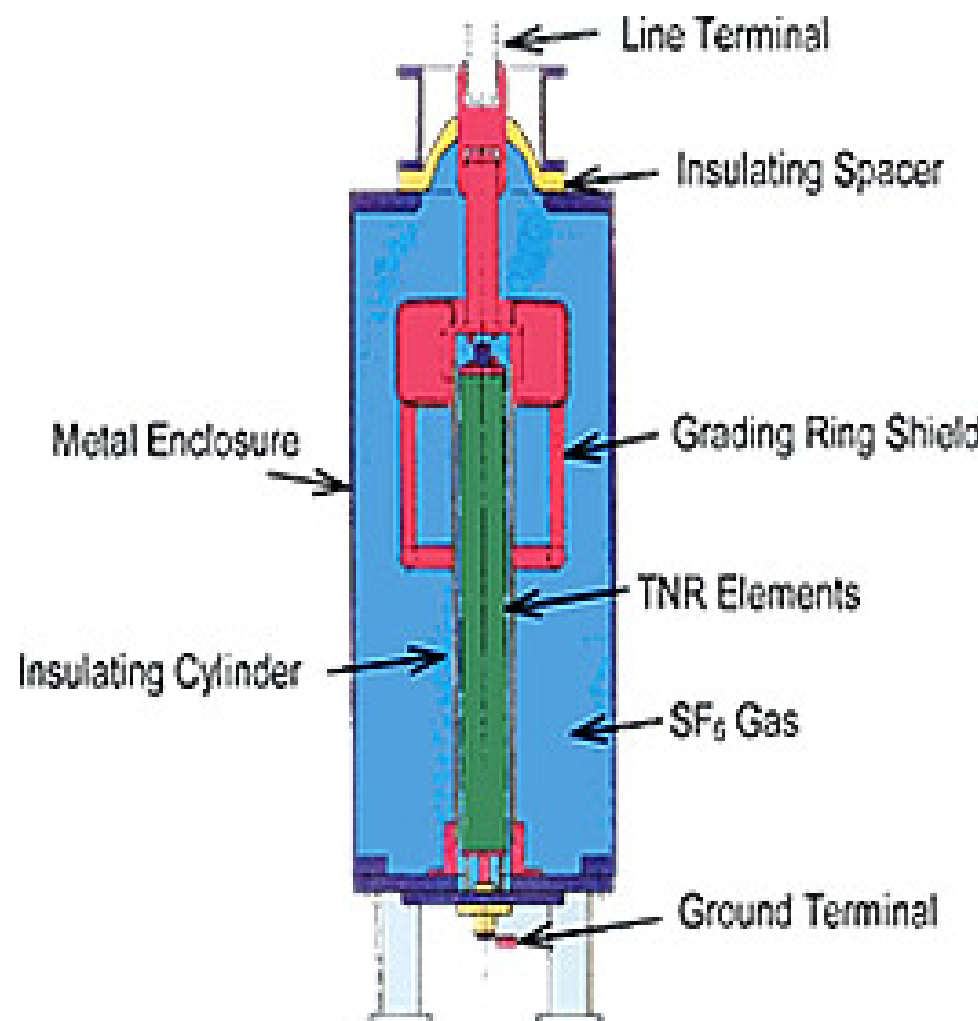
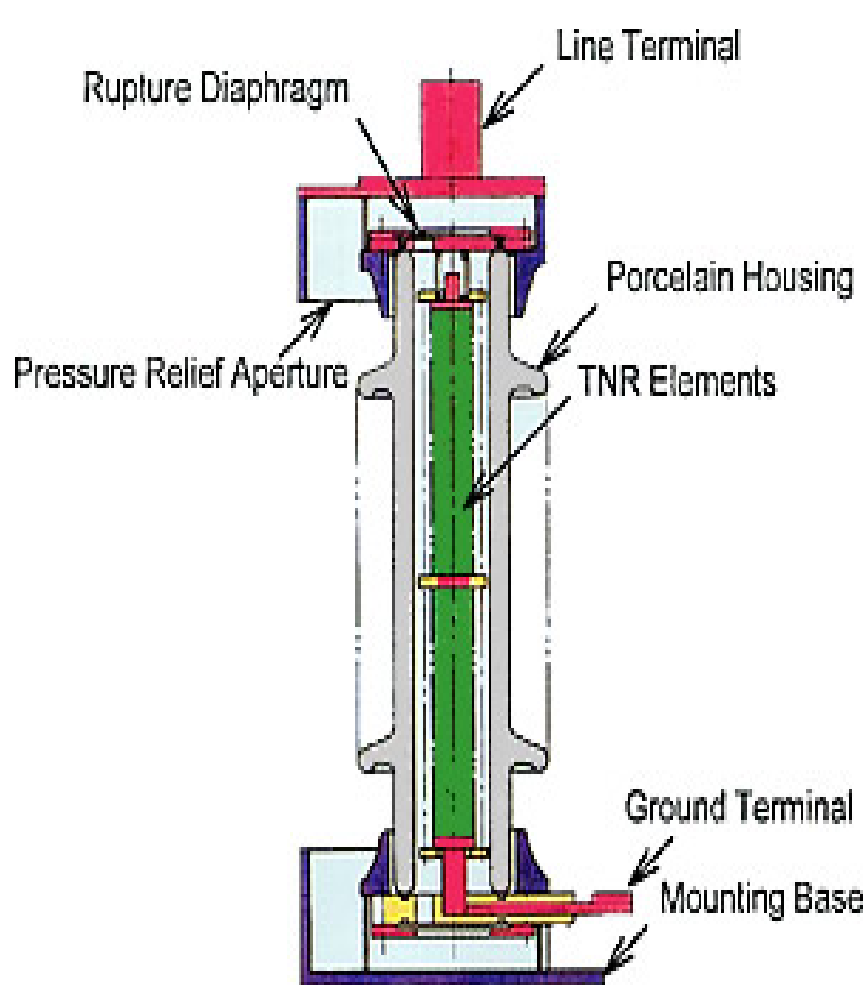
Enclosed  
type



Rolling stock  
type



**For Rolling stock**



TNR<sup>®</sup> - Toshiba Non-linear Resistor ZnO Element

<sup>®</sup> - firmowe oznaczenie firmy Toshiba