

W poprzednim odcinku Notatnika zakończyliśmy omawianie podstawowych parametrów i właściwości bezpieczników.

Teraz zajmiemy się zagadnieniem ochrony zwarciowej elementów półprzewodnikowych.

# Bezpieczniki topikowe

## Część 3



Przed miesiącem wspomnieliśmy bardzo krótko, iż ochrona elementów półprzewodnikowych pracujących w obwodach sieci 220V przed uszkodzeniem nie jest sprawą łatwą. Dziś chcemy przybliżyć to zagadnienie.

Zastanówmy się teraz dokładniej, jakie zjawiska zachodzą w bezpieczniku gdy w obwodzie o dużej wydajności prądowej nastąpi zwarcie.

W przemysłowych sieciach zasilających 3 x 380V spodziewane prądy zwarciove mogą wynieść dziesiątki tysięcy amperów (!), a i w domowej instalacji 220V trzeba się liczyć z prądami zwarcia rzędu co najmniej kilkuset, a w pobliżu transformatora nawet ponad tysiąca amperów. W obwodach prądu przemiennego szybkość narastania prądu zwarcia będzie zależec od:

- nominalnego napięcia sieci,
- wypadkowej rezystancji obwodu zwarcia, będącej sumą rezystancji wewnętrznej źródła zasilania, rezystancji bezpiecznika i przewodów doprowadzających,
- indukcyjności obwodu,
- a także od momentu w którym wystąpiło zwarcie.

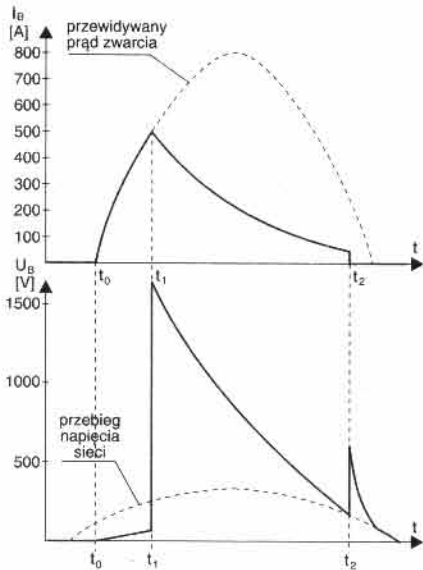
Podobna sytuacja wystąpi w obwodach prądu stałego i obwodach zawierających elementy prostownicze.

Wiemy, że obwody sieci energetycznej 220V mają pewną indukcyjność. I właśnie z istnienia tejże indukcyjności wynikają poważne konsekwencje. Rosnący gwałtownie prąd zwarcia powoduje stopienie drutu topikowego bezpiecznika w czasie rzędu jednej milisekundy. W czasie tej jednej milisekundy prąd zdąży wzrosnąć do wartości, na przykład, 500 amperów. Niestety stopienie topika nie spowoduje natychmiastowego przerwania przepływu prądu. W miejscu, gdzie był drut topika powstanie zjonizowany kanał przewodzący prąd, inaczej mówiąc łuk elektryczny. Możemy powiedzieć, że łuk ten będzie miał pewną rezystancję, większą niż istniejący wcześniej drucik. W naszym obwodzie zwarciowym zamiast rezystancji bezpiecznika pojawi się rezystancja łuku elektrycz-

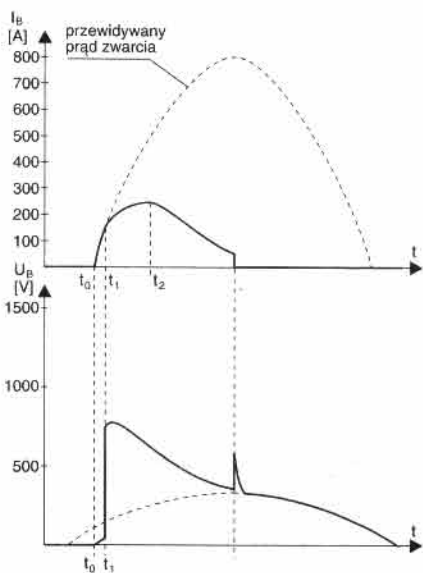
nego. Pomocą w analizie takiej sytuacji będzie rysunek 6. Przedstawia on napięcie i prąd w czasie zwarcia obwodu wyposażonego w zwykły bezpiecznik topikowy. Fundamentalne zasady elektrotechniki mówią, że w szeregowym obwodzie zawierającym indukcyjność prąd nie może zaniknąć w nieskończone krótkim czasie. Dlatego też w momencie wtrącenia do obwodu znacznej rezystancji łuku (na naszym rysunku jest to chwila  $t_1$ ), na indukcyjności powstanie przepięcie o takiej wartości aby zachować ciągłość prądu. Szybkość narastania czoła tego przepięcia jest bardzo duża i może wynosić nawet 200V/ $\mu$ s. Już tu widać, że wielkość tego przepięcia zależec będzie od rezystancji powstałego łuku. Dokładniej rzecz ujmując będzie to iloczyn rezystancji łuku i chwilowej wartości prądu płynącego w obwodzie (w naszym przypadku 500A).

Popularne bezpieczniki do instalacji domowych mogą generować przepięcia dochodzące do 3...4kV, a wkładki aparatu WTA i WTA-T do 1,5...2kV! Energia związana z takim przepięciem może sięgać w zwykłych bezpiecznikach nawet dziesiątków kilodżuli. Tak dużego przepięcia nie potrafimy stłumić żadnymi prostymi i tanimi metodami. I takie właśnie przepięcia pojawiają się w obwodzie zwarcia w momencie zadziałania „zwykłego” bezpiecznika. Jeśli w takim obwodzie zwarcia występuje szeregowo element półprzewodnikowy to zapewne zostanie on zniszczony, ponieważ wartość jego parametru przeciążeniowego  $I^2t$  będzie mniejsza niż całka  $I^2t$  związana z przedstawionym procesem wyłączenia prądu; inaczej mówiąc prąd zwarcia zdąży narosnąć do wartości przekraczającej maksymalny niepowtarzalny prąd przewodzenia tyrystora lub diody.

Jeśli „obok” w takim obwodzie umieszczone są inne elementy półprzewodnikowe to ulegną one uszkodzeniu wskutek opisanego przepięcia o dużej energii. Przy tej okazji wspomnijmy, iż jeśli bezpiecznik



Rys. 6 a/b. Przebieg napięcia i prądu w standardowym bezpieczniku topikowym podczas występowania obciążenia



Rys. 7a/b. Przebieg napięcia i prądu w bezpieczniku topikowym z przewężonym topikiem

ma być użyty w obwodzie, gdzie występuje kilka elementów półprzewodnikowych: diod czy tyrystorów, to napięcie powstałego przepięcia nie może przekroczyć niepowtarzalnego szczytowego napięcia wstecznego (lub napięcia blokowania) użytych elementów.

W dalszym przebiegu procesu przerywania obwodu rezystancja powstałego łuku będzie się zwiększać a wartość płynącego prądu i wielkość powstałego przepięcia będą się zmniejszać. Stopniowo prąd zmaleje do niewielkiej wartości i łuk w pewnym momencie (w chwili t2) zgaśnie. W momencie zgaśnięcia łuku obwód zostanie ostatecznie przerywany, ale w momencie skokowego zaniku tego niewielkiego prądu powstanie jeszcze jedno przepięcie. To drugie przepięcie będzie jednak zdecydowanie mniejsze, wręcz pomijalnie małe w porównaniu z energią pierwszego przepięcia.

Teraz widzimy jasno, dlaczego przy bezpiecznikach mówimy o maksymalnym napięciu pracy. Przecież po zadziałaniu bezpiecznika i przerywaniu obwodu na jego zaciskach wystąpi napięcie (SEM) źródła. Jeśli więc napięcie zasilania danego obwodu byłoby zbyt wysokie, to łuk nie zgaśnie, tylko utrzyma się na stałe. Między innymi dlatego bezpieczniki o dużej zdolności wyłączenia wypełnione są gąsiewem - piaskiem kwarcowym. Z tego też powodu, że trudniej jest zgasić łuk powstały w obwodzie zasilanym ze źródła napięcia stałego, dla tego samego bezpiecznika podaje się maksymalne napięcie pracy przy prądzie zmiennym i znacznie niższe dopuszczalne napięcie pracy przy prądzie stałym - a wiele bezpieczników przeznaczonych jest do pracy tylko przy prądzie zmiennym.

**Napięcie przepięcia jest wprost proporcjonalne do rezystancji powstałego łuku elektrycznego.**

Jeśli topik wykonany jest z drutu lub taśmy o jednakowym przekroju (i długości kilku centymetrów), to łuk powstaje jednocześnie na całej jego długości i będzie mieć stosunkowo dużą rezystancję. Gdy jednak topik będzie mieć przewężenie, wtedy łuk powstanie najpierw w miejscu tego przewężenia - w pierwszym momencie będzie mieć znacznie mniejszą rezystancję i oczywiście powstałe przepięcie będzie dużo mniejsze. To nasze rozumowanie jest

może nieco uproszczone, ale całkowicie oddaje sens zachodzących zjawisk. Bezpieczniki mające znamionowe napięcia pracy (wyłączeniowe) 500 czy 600V mają kilka takich przewężeń - zapewnia to pewne zgaszenie łuku i rozłączenie.

Rysunek 7 pokazuje przebieg napięcia i prądu w obwodzie z takim bezpiecznikiem. Dzięki zastosowaniu przewężeń przepięcie w momencie powstawania łuku ma względnie małą wartość (chwila t1 na rys. 7). Następnie łuk obejmuje stopniowo coraz większą długość topika, wzrasta jego rezystancja, prąd jednak ciągle wzrasta do chwili t2. Później dalszy wzrost rezystancji łuku powoduje spadek wartości prądu aż do niewielkiego poziomu przy którym łuk gaśnie (chwila t3). Oczywiście podczas zaniku łuku powstaje znów przepięcie, ale w związku z niewielką wartością przerwanej prądu ma ono stosunkowo niewielką energię.

Oba omawiane rysunki dotyczą sytuacji w obwodzie prądu przemiennego - linią przerywaną na rysunkach 6a, 7a zaznaczono przebieg spodziewanego prądu zwarcia, a na rysunkach 6b i 7b - przebieg napięcia sieci. W obwodzie stałoprądowym sytuacja jest podobna.

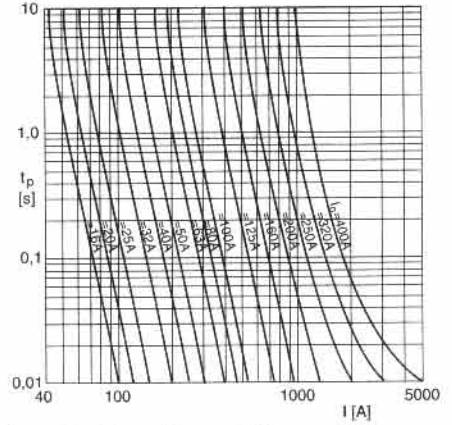
**Zastosowanie odpowiednio dobranych przewężeń topika zmniejsza radykalnie przetężenia generowane w czasie przepięcia.**

Teraz już chyba wszyscy są przekonani, że nie należy lekceważyć nawet tak „prymitywnych“ elementów jak bezpieczniki.

W poprzednim odcinku wspomnieliśmy, że dobry bezpiecznik powinien ograniczyć prąd do wartości znacznie mniejszej niż spodziewany prąd zwarcia. Inaczej mówiąc powinien on szybko i skutecznie przerwać obwód. Z drugiej strony w procesie wyłączenia nie powinny powstać niebezpieczne przepięcia.

Są to wymagania wzajemnie sprzeczne i znalezienie satysfakcjonujących rozwiązań kosztowało konstruktorów немало wysiłku.

Również w naszym kraju opracowano całą serię bezpieczników uwzględniając omówione przed chwilą zasady. Są to bezpieczniki przeznaczone do ochrony elementów półprzewodnikowych mocy w urządzeniach przemysłowych i mają symbol Btp. Produkowane są na zakres prądów od kilku do kilkuset ampe-



Rys. 8. Charakterystyki prądowo - napięciowe bezpieczników Btp.

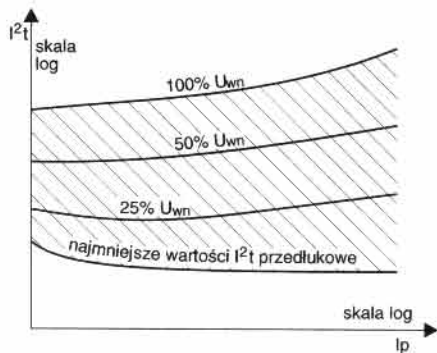
rów. Mają one zupełnie inną konstrukcję niż wkładki bezpiecznikowe znane z domowych instalacji. Bezpiecznik taki to ceramiczna rurka posiadająca z dwóch stron zaciski umożliwiające przykręcenie bezpiecznika do przewodów czy szynoprzewodów za pomocą śrub. Oczywiście nie wymagają one gniazd bezpiecznikowych.

Wiemy, że spora część naszych Czytelników ma do czynienia z różnymi urządzeniami automatyki przemysłowej. Dlatego, choć bezpieczniki te nie są stosowane w warunkach domowych, podajemy nieco informacji na ten temat.

W katalogach, najczęściej w formie wykresów podaje się tzw. czasy przedłukowe, czyli czasy do momentu stopienia topika i powstania łuku.

I właśnie na rysunku 8 pokazano rodzinę charakterystycznych prądowo-czasowych bezpieczników Btp. Nie podaje się natomiast czasu trwania łuku, ponieważ czas ten zależy od kilku czynników, tak więc nie można podać jednej, konkretnej wartości całkowitego czasu wyłączenia. Nawet przy prawidłowo dobranym bezpieczniku całkowity czas rozłączenia obwodu zwarcioowego jest nie mniejszy niż kilka milisekund. Podobnie podana w tabelicy 4 wartość całki I²t dotyczy czasu przedłukowego - wskazuje na to oznaczenie I²t\_p. Aby obliczyć końcową wartość tego parametru w całym procesie wyłączenia należałoby skorzystać z pewnego wzoru, podstawiając do niego współczynniki uwzględniających konkretne warunki pracy odczytane z kilku wykresów. W uproszczeniu można przyjąć, iż całkowita wartość parametru I²t jest trzykrotnie większa od „przedłukowej“ wartości I²t\_p z tabeli 4.

W katalogach można znaleźć wy-



Rys. 9. Wykres obrazujący zależność czasu przedłukowego od prądu zwarcia

kresy przedstawiające zależność  $I^2t$  od spodziewanego prądu zwarcia i od napięcia pracy. Wykresy te wyglądają jak na rysunku 9.

Tabela 4. Czas przedłukowy bezpieczników Btp

$I_n$ (A)	16	20	25	32	40	50	63
$I^2t_p$ (A²s)	50	90	130	300	500	700	1200

Kolejną ważną dla użytkownika informacją jest maksymalna wielkość pojawiającego się przepięcia. W tabeli 5 podano największe wartości tego przepięcia dla bezpieczników Btp 500V pracujących w najmniej korzystnych warunkach pracy. Przy niższym napięciu zasilania i mniejszych niż 100kA spodziewanych prądach zwarciovych generowane przepięcia będą miały jeszcze mniejszą wartość.

W katalogach podaje się stosowny wykres, nieco podobny z wyglądu do omawianego poprzednio.

Tabela 5. Wartości generowanych przez bezpieczniki Btp przepięć

Prąd bezpiecznika	16...20A	25...100A
Przepięcie	900V	800V

Kolejną informacją jest charakterystyka prądów ograniczonych. Jeśli podczas zwarcia prąd zdąży wzrosnąć do wartości przekraczającej wartość  $I_{TSM}$  lub  $I_{FSM}$  użytego tyrystora lub diody, to półprzewodnik ulegnie uszkodzeniu. W katalogach bezpieczników podaje się stosowny wykres taki jak na rysunku 10. Często jednak informacja taka nie jest konieczna, ponieważ wspomniany warunek zawiera się w warunku na nieprzekroczenie wartości  $I^2t$  danego elementu półprzewodnikowego.

Praktyka życiowa uczy nas, że w tym świecie nie ma nic za darmo. Tak jest również w przypadku omawianych bezpieczników. Zastosowanie przewężeń topika utrudnia wyłączenie małych przeciążeń. Bezpieczniki takie optymalizowane są do warunków powstających w stanie zwarcia. Jeśli więc prąd obciążenia wzmósni powoli ponad wartość prądu nominalnego bezpiecznika, to bezpiecznik może nie zadziałać, co doprowadzi do przegrzania i uszkodzenia przyrządu półprzewodnikowego.

Dlatego przy charakteryzowaniu bezpieczników „półprzewodnikowych” np. typu Btp podaje się dodatkowo klasę bezpiecznika.

Bezpieczniki klasy aR działają dobrze przy dużych prądach prze-

ciążeniowych (zwarciach), ale nie gwarantuje się ich poprawnego działania przy stosunkowo niewielkim przekroczeniu prądu nominalnego.

Dostępne są też lepiej dopracowane bezpieczniki klasy gR gwarantujące prawidłowe rozłączenie już od najmniejszego prądu przetapiającego.

Z tego widać, że przy stosowaniu bezpieczników klasy aR należałoby zastosować dodatkowo inne zabezpieczenia skuteczne przy małych prądach przeciążeniowych.

**Podsumowanie**

Z przeprowadzonych rozważań wynika, iż zwykle bezpieczniki instalacyjne i wkładki topikowe WTA i WTA-T absolutnie nie nadają się do zabezpieczania elementów półprzewodnikowych, zaś duże przepięcia na nich powstające mogą stanowić zagrożenie dla innych półprzewodników umieszczonych w tym samym obwodzie zasilania.

W urządzeniach powszechnego użytku konstruowanych we własnym zakresie najczęściej nie stosujemy skutecznych zabezpieczeń elementów półprzewodnikowych pracujących w obwodach sieciowych 220V. Liczymy się z koniecznością wymiany elementu, ale prawdopodobieństwo tego jest niewielkie. Dla skutecznej ochrony należałoby oprócz szybkich wkładek WTA-F-G stosować zabezpieczenia przepięciowe.

W urządzeniach przemysłowych celowe jest stosowanie bezpieczników np. typu Btp, ale dokładne obliczenie skuteczności zabezpieczeń wykorzystujących bezpieczniki Btp lub podobne nie jest wcale łatwe.

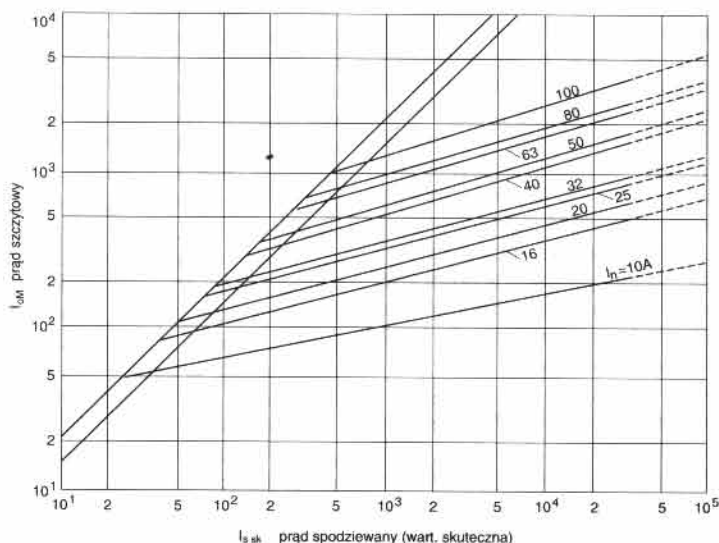
**Skuteczna ochrona półprzewodników jest możliwa po zastosowaniu dwóch rodzajów zabezpieczeń: zwarciovych (przepięciowych) oraz ograniczających stromości narastania napięcia i prądu do wartości dopuszczalnych.**

W praktyce „w pierwszym podejściu” należy stosować bezpieczniki Btp o możliwie małym prądzie nominalnym, a w żadnym wypadku nie stosować bezpieczników przewymiarowanych, o większym prądzie niż to jest konieczne.

Korzystna jest też praca przy napięciach zasilających mniejszych niż napięcie nominalne bezpiecznika.

**Piotr Górecki**

ciąg dalszy w EP 9/95



Rys. 10. Zależność prądu szczytowego bezpiecznika od prądu spodziewanego (przy zerowym  $I_n$ )