

Dr inż. Edward MUSIAŁ
Katedra Elektroenergetyki
Politechnika Gdańska

B E Z P I E C Z N I K I

W N O W O C Z E S N Y C H U K Ł A D A C H

Z A B E Z P I E C Z E Ń U R Z Ą D Z E Ń N I S K I E G O N A P I Ę C I A

Referat przedstawia główne charakterystyki i parametry bezpieczników ważne ze względu na ich dobór do różnorodnych warunków pracy. Prezentuje też ważniejsze klasy bezpieczników i ich przeznaczenie oraz podstawowe zasady doboru bezpieczników wraz z przykładami liczbowymi.

1. Wstęp

Bezpieczniki są chronologicznie najstarszymi zabezpieczeniami stosowanymi w urządzeniach elektroenergetycznych. Zabezpieczają przed przetężeniami, przede wszystkim przed skutkami zwarć, bo ich przydatność jako zabezpieczeń przeciążeniowych jest ograniczona.

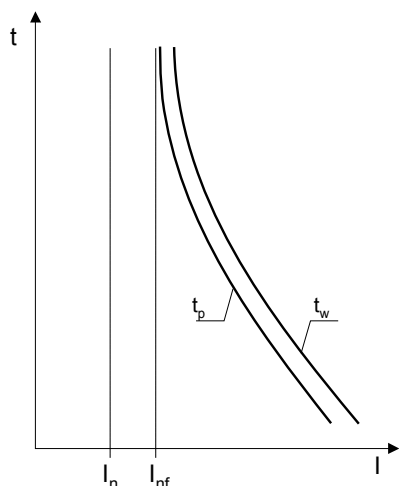
W porównaniu z bezpiecznikami wyłączniki są droższe, ale lepiej zachowują się w roli zabezpieczeń przeciążeniowych, a mogą też samoczynnie reagować na inne stany anormalne, jak zanik napięcia, prąd różnicowy, odwrócenie kierunku przepływu mocy itd. Pomimo takiej konkurencji nie następuje odwrót od bezpieczników, nadal są one produkowane w ogromnych ilościach i są stosowane w nowych urządzeniach, również w urządzeniach stawiających najwyższe wymagania co do ciągłości pracy. Konstrukcje bezpieczników i aparatów zespolonych z bezpiecznikami nadal są doskonałe i pojawiają się nowe śmiałe rozwiązania pozwalające sądzić, że przyszłość bezpieczników nie jest zagrożona [3].

Liczne są tego powody. Bezpieczniki są tańsze, za ich pomocą łatwiej uzyskać dużą zdolność wyłączania i silny efekt ograniczania prądu zwarciovego i łatwo zapewnić wybiórcze działanie aparatów zainstalowanych na kolejnych stopniach zabezpieczeń. Charakterystyki bezpieczników są precyzyjnie kształtowane odpowiednio do konkretnych zastosowań i w większości zastosowań są odporne na procesy starzeniowe. Bezpieczniki wcale nie są dziś uważane za zamiennik wyłącznika w mniej odpowiedzialnych zastosowaniach.

Aby w pełni wykorzystywać możliwości, jakie oferują nowoczesne bezpieczniki, projektanci oraz użytkownicy powinni mieć dobre rozeznanie w ich asortymencie, poprawnie interpretować ich parametry i charakterystyki, a także biegle posługiwać się licznymi charakterystykami, które dawniej nie miały tak dużego znaczenia.

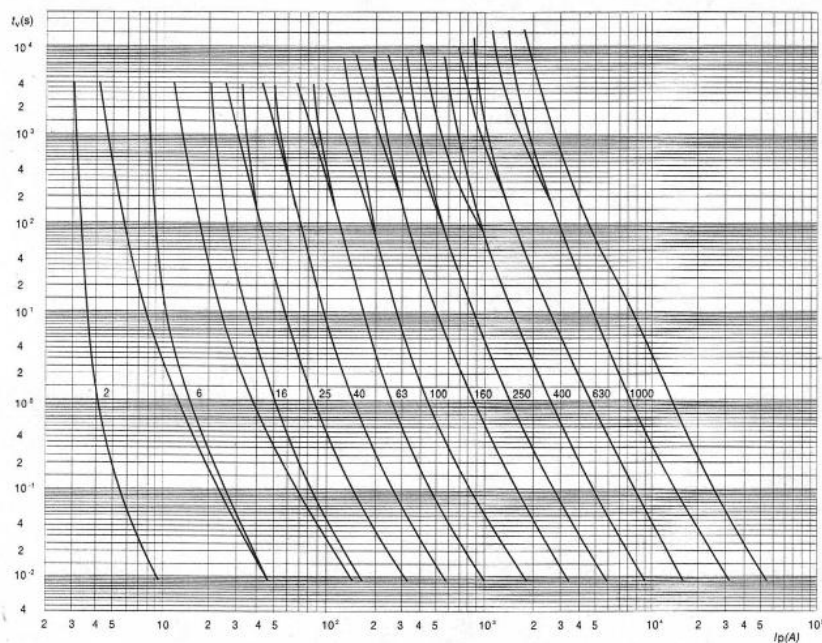
2. Główne cechy konstrukcyjne i podstawowe charakterystyki

Na działanie, parametry i jakość bezpiecznika wpływają wszystkie jego części składowe, ale wpływ decydujący mają topik, gasiwo i korpus. Materiał i ukształtowanie topika oraz rodzaj gasiwa decydują o przebiegu charakterystyki czasowo-prądowej (charakterystyki $t-I$), całki Joule'a przedłukowej $I^2 t_p$ i całki Joule'a wyłączania $I^2 t_w$ oraz zdolności wyłączania.



Rys. 1. Pasmowa charakterystyka czasowo-prądowa wkładki bezpiecznikowej
 t_p – czas przedłukowy; t_w – czas wyłączenia

Najbardziej znaną charakterystyką bezpiecznika jest **charakterystyka czasowo-prądowa $t-I$** , przedstawiająca czas działania t w funkcji prądu I . Jest to charakterystyka zależna, typowa dla aparatów o cieplnej zasadzie działania: im większy prąd, tym krótszy czas działania. Pełna, pasmowa charakterystyka czasowo-prądowa (rys. 1, rys. 2) jest ograniczona dwiema krzywymi: od dołu linią najmniejszych czasów przedłukowych t_p , a od góry – linią największych czasów wyłączenia t_w . Na osi odciętych podaje się wartość skuteczną prądu, a ściślej – co jest ważne w zakresie dużych prądów – wartość skuteczną składowej okresowej prądu spodziewanego (zwarciovego), tzn. bez uwzględnienia ewentualnego efektu ograniczającego w wyniku zadziałania bezpiecznika.



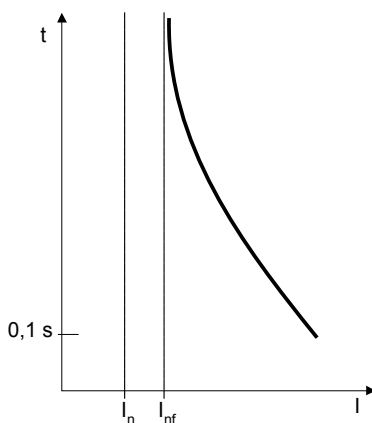
Rys. 2. Przykładowe pasmowe charakterystyki czasowo-prądowe wkładek bezpiecznikowych pełnozakresowych ogólnego przeznaczenia (gG) ETI-POLAM

Zwraca uwagę, że asymptotą charakterystyki bynajmniej nie jest linia wyznaczająca prąd znamionowy wkładki I_n , lecz – linia wyznaczająca prąd graniczny dolny I_{nf} (prąd niez-

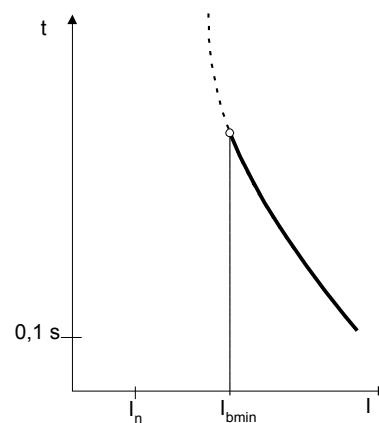
działania), większy od prądu znamionowego co najmniej o 25 %. To ważny powód, dla którego bezpiecznik jest miernym zabezpieczeniem przeciążeniowym, zwłaszcza odbiorników; w ogóle nie reaguje na znaczne przeciążenia, rzędu 25-50 %.

Dawniej charakterystyki czasowo-prądowe rysowano również w zakresie dużych prądów zwarciovych i najkrótszych czasów, ale jest to mało sensowne, bo w tym zakresie na obu osiach występują fikcyjne, umowne wartości zarówno prądu, jak i czasu i z punktu widzenia fizykalnego zależność $t-I$ niewiele wtedy wyjaśnia i jej praktyczna użyteczność jest żadna. Obecnie charakterystyki czasowo-prądowe urywa się od dołu na ogół na poziomie 0,1 s (rys. 3, rys. 4). W zakresie krótszych czasów i większych prądów miarodajne są charakterystyki całki Joule'a I^2t-I .

W kierunku dłuższych czasów i mniejszych prądów charakterystykę czasowo-prądową można dowolnie przedłużyć (np. do czasu 1...2 h) w przypadku **bezpieczników o pełnozakresowej zdolności wyłączenia**, nazywanych też w skrócie bezpiecznikami pełnozakresowymi i oznaczanych literą **g**, tzn. takich, które poprawnie wyłączają dowolnie mały prąd przepływający topik (rys. 2, rys. 3). Niełatwo to zapewnić, zwłaszcza w przypadku bezpieczników o wyższym napięciu znamionowym. Bezpiecznik należy do aparatów łączeniowych, w których elektryczny łuk wyłączeniowy sam stwarza warunki sprzyjające jego zgaszeniu (łuk samobójca). W takich aparatach występuje zakres prądów krytycznych, przy prądach wyłączeniowych znacznie mniejszych od znamionowego prądu wyłączalnego (zdolności wyłączenia) czas łukowy wydłuża się i zamiast do wyłączenia może dojść do katastrofalnego cieplnego zniszczenia wkładki bezpiecznikowej zagrażającego zabezpieczanemu obwodowi i sąsiednim urządzeniom. Takiemu nieprawidłowemu zadziałaniu sprzyjają ostrzejsze warunki napięciowe przy wyłączaniu, np. w obwodach baterii kondensatorowych. Zdarzenia takie nie powinny mieć miejsca w przypadku poprawnie dobranych bezpieczników o pełnozakresowej zdolności wyłączenia.



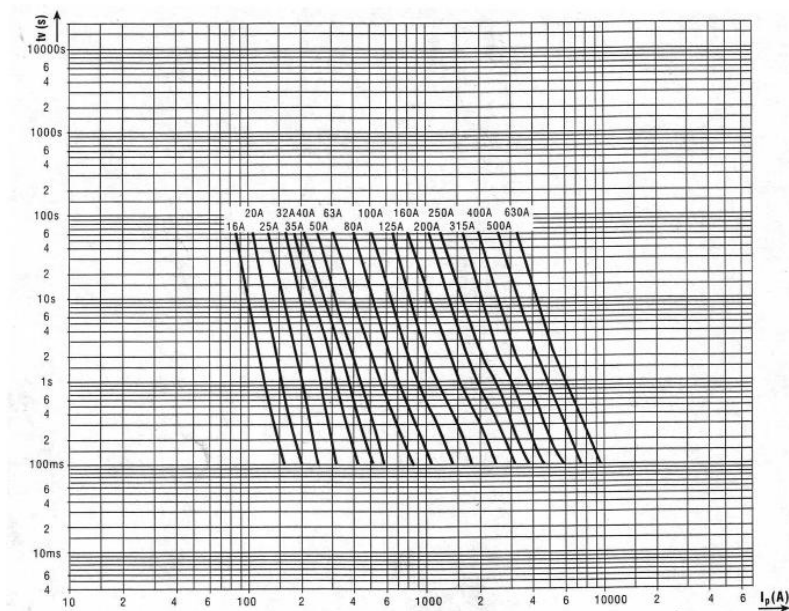
Rys. 3. Charakterystyka czasowo-prądowa (liniowa) wkładki bezpiecznikowej o pełnozakresowej zdolności wyłączenia



Rys. 4. Charakterystyka czasowo-prądowa (liniowa) wkładki bezpiecznikowej o niepełnozakresowej zdolności wyłączenia (część przedstawiona linią przerywaną na ogół nie jest uwidoczniona w katalogach – por. rys. 5) I_{bmin} – najmniejszy prąd wyłączalny

Są też na rynku **bezpieczniki o niepełnozakresowej zdolności wyłączenia** (oznaczone literą **a**), dla których wytwórca podaje najmniejszy prąd wyłączalny I_{bmin} , nie większy niż 4-krotny prąd znamionowy wkładki bezpiecznikowej, nie dając żadnej gwarancji, jak wkładka

zachowa się przy ewentualnej próbie wyłączania mniejszego prądu. Charakterystyka czaso-prądowa wkładek **a** od góry urywa się przy najmniejszym prądzie wyłączalnym (rys. 4, rys. 5). Wyżej można linią przerywaną podać czas przedłukowy, aby zwrócić uwagę, że po tym czasie dojdzie do przepalenia topika i zapłonu łuku, po czym nie wiadomo, co się stanie.



Rys. 5. Przykładowe liniowe charakterystyki czaso-prądowe wkładek bezpiecznikowych niepełnozakresowych do zabezpieczania silników i urządzeń rozdzielczych (aM) ETI-POLAM

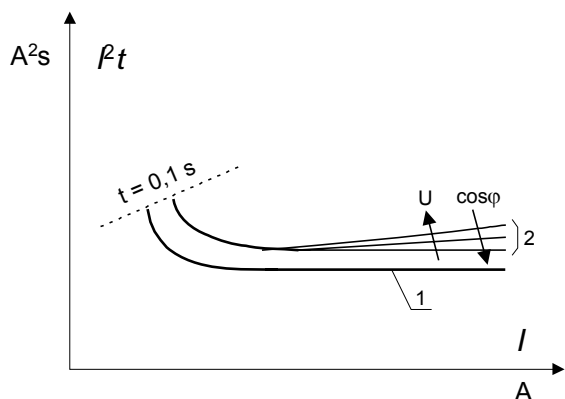
Całka Joule'a $I^2 t$ jest miarą ilości ciepła ($I^2 \cdot R \cdot t$) przepływającego przez wkładkę bezpiecznikową i przez wszystkie elementy zabezpieczanego obwodu w określonym czasie, np. w czasie przedłukowym ($I^2 t_p$) i w czasie wyłączenia ($I^2 t_w$). Liczbowo całka Joule'a jest energią cieplną wyrażoną w dżulach, jaką prąd w rozpatrywanym obwodzie wydzieliliby na rezystancji 1 oma.

Charakterystyka $I^2 t$ - I bezpiecznika podaje zależność całki Joule'a (przedłukowej i/lub wyłączenia) od wartości skutecznej składowej okresowej prądu spodziewanego (rys. 6). Całka Joule'a przedłukowa bezpiecznika ze wzrostem prądu spodziewanego początkowo maleje, a w zakresie dużych prądów zwarciovych ustala się na stałym poziomie. Topik rozpada się po przepuszczeniu ściśle określonej wartości $I^2 t$, zależnej od przekroju topika S_z w miejscach zwarciovych tzn. w przewężeniach, tam, gdzie jest on najmniejszy

$$\int_0^{t_p} i^2 dt = S_z^2 K$$

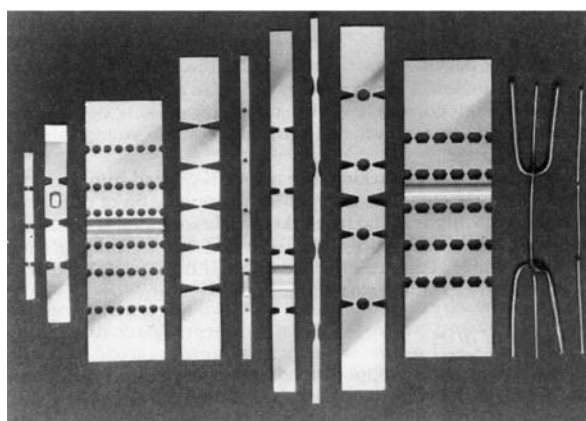
przy czym K jest stałą materiałową (stałą Meyera) przewężeń topika w przybliżeniu równą iloczynowi temperatury topnienia, ciepła właściwego (odniesionego do jednostki objętości) i konduktywności elektrycznej. Przekrój topika w miejscach przewężeń S_z (rys. 7) jest miarą całki Joule'a przedłukowej i charakteryzuje zdolność ograniczania prądu zwarciovego przez bezpiecznik.

Całka Joule'a przedłukowa nie zależy od parametrów obwodu, natomiast całka wyłączenia (suma całki przedłukowej i całki łukowej) jest większa, jeśli wyższe jest napięcie obwodu i niższy współczynnik mocy (rys. 6).



Rys. 6. Charakterystyka całki Joule'a prądowej (krzywa 1) i całki Joule'a wyłączenia (krzywe 2) wkładki bezpiecznikowej

Całka Joule'a dobrze nadaje się do analizy nagrzewania adiabatycznego (bez wymiany ciepła z otoczeniem), które zachodzi w krótkim czasie trwania zwarcia, a jest informacją bez praktycznego znaczenia przy długim czasie nagrzewania (małym prądem przeciążeniowym). Zatem dla czasów krótszych niż 0,1 s podaje się charakterystykę I^2t-I , a dla czasów dłuższych niż 0,1 s – charakterystykę czasowo-prądową $t-I$. Dopiero obie charakterystyki łącznie dobrze określają możliwości zabezpieczeniowe bezpiecznika, jeśli chodzi o ograniczanie cieplnych skutków przeciążeń i zwarcie, a także są potrzebne do badania wybiórczego działania bezpieczników w zakresie odpowiednio przeciążeniowym i zwarciovym.



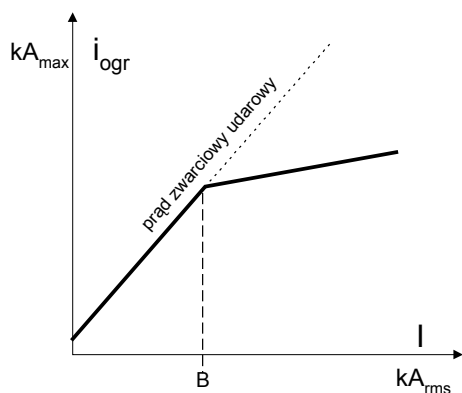
Rys. 7. Przykładowe ukształtowania topików z widocznymi przeżęciami [1]

Z kolei zdolność ograniczania przez bezpiecznik elektrodynamicznych skutków zwarcie przedstawia **charakterystyka prądów ograniczonych** i_o-I czyli zależność prądu ograniczonego od wartości skutecznej składowej okresowej prądu spodziewanego. Efekt ograniczający nie występuje przy małym prądzie przetężeniowym, bezpiecznik przepuszcza pełną jego wartość szczytową, również pełny prąd zwarciovym udarowy (rys. 8, rys. 9). Natomiast przy odpowiednio dużym spodziewanym prądzie zwarciovym rozpad topika następuje przed wystąpieniem prądu udarowego i_p (rys. 10), wobec czego szczytowa wartość przepuszczonego impulsu prądowego, czyli *prąd ograniczony* i_o , jest mniejsza od szczytowej wartości prądu spodziewanego i_p w stosunku określonym przez *stopień ograniczenia*

$$k_o = \frac{c \cdot i_o}{i_p}$$

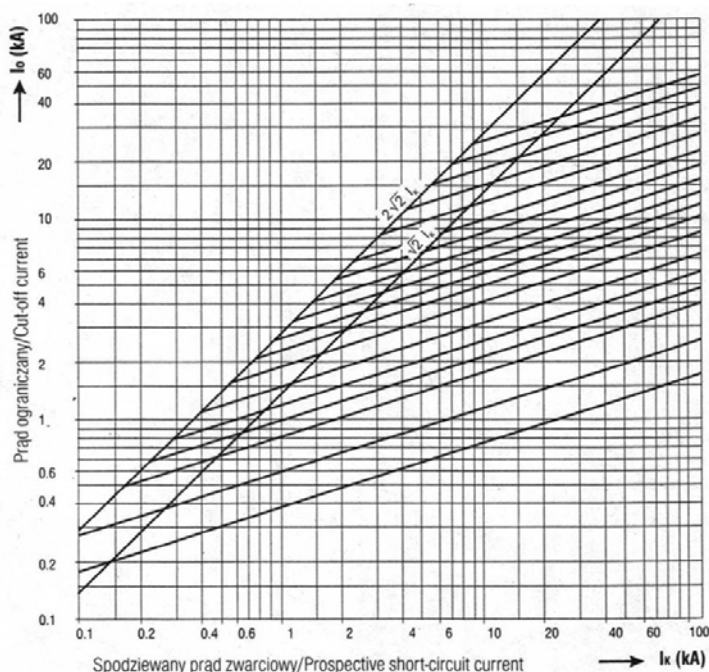
a siły elektrodynamiczne towarzyszące przepływowi prądu zwarciovego maleją w stosunku określonym przez wartość stopnia ograniczenia podniesioną do kwadratu k_o^2 . Występujący w

powyższym wzorze współczynnik bezpieczeństwa $c \in (1,2 \div 1,5)$ stosuje się, jeśli *charakterystyka prądów ograniczonych* podawana przez wytwórcę nie uwzględnia maksymalnych dodatnich odchyłek produkcyjnych.



Rys. 8. Charakterystyka prądów ograniczonych wkładki bezpiecznikowej; efekt ograniczający występuje przy prądzie spodziewanym większym od wartości wyznaczonej przez punkt B.

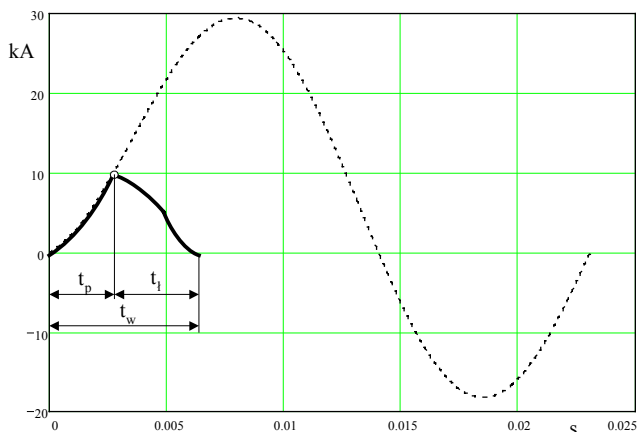
Ze wzrostem prądu spodziewanego prąd ograniczony zwiększa się w przybliżeniu proporcjonalnie do jego wartości w potęgze $1/3$, np. 5-krotny wzrost prądu spodziewanego oznacza zwiększenie prądu ograniczonego w stosunku $\sqrt[3]{5} = 1,71$, czyli tylko o ok. 70%. Zważywszy, że jednocześnie prąd udarowy wzrasta proporcjonalnie do prądu spodziewanego (przy niezmiennym stosunku R/X obwodu), to stopień ograniczenia jest proporcjonalny do wartości prądu spodziewanego w potęgze $-2/3$; przy 5-krotnym zwiększeniu prądu spodziewanego stopień ograniczenia maleje do $5^{-2/3} = 0,34$ poprzedniej wartości, czyli maleje 3-krotnie.



Rys. 9. Charakterystyki prądów ograniczonych wkładek gG 500 V ETI-POLAM

Narażenia zwarciove przewodów, aparatów i wszelkich urządzeń zabezpieczonych bezpiecznikami są scharakteryzowane przez:

- największą możliwą wartość całki Joule'a wyłączenia $I^2 t_w$, jeśli chodzi o narażenia cieplne,
- największą możliwą wartość prądu ograniczonego i_o , która występuje przy największym spodziewanym prądzie zwarciovym, jeśli chodzi o narażenia elektrodynamiczne.



Rys. 10. Oscylogram wyłączenia prądu zwarciovego ($I_k'' = 15$ kA, $i_p \approx 30$ kA, $\cos\varphi = 0,30$, $\kappa = 1,40$) przez bezpiecznik ograniczający gG 160 A

$$i_o = 10 \text{ kA}; \quad I^2 t_w = 175.000 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$$

t_p – czas przedłukowy; t_l – czas łukowy;
 t_w – czas wyłączenia

Z kolei najmniejsza możliwa wartość całki Joule'a przedłukowej jest potrzebna do analizy wybiórczości działania zabezpieczeń, do sprawdzenia czy rozpatrywany bezpiecznik przetrzymuje przepływ prądu zwarciovego, który powinien wyłączyć inny aparat zabezpieczający.

3. Zasady doboru bezpieczników

Przystępując do doboru bezpiecznika w określonym miejscu sieci lub instalacji, należy cechy i parametry bezpiecznika porównać z warunkami jego pracy, uwzględniając liczne, powiązane ze sobą problemy, występujące i oddziałujące jednocześnie. Z konieczności są one niżej wyjaśnione kolejno, każdy z osobna, ale dopóki procedury doboru nie zakończy się, nie ma pewności, czy nie trzeba będzie powrócić do wcześniejszych rozważań i decyzji, aby je skorygować. Przedstawione niżej ogólne zasady doboru bezpieczników mogą wymagać uzupełnienia, kiedy rozważa się zabezpieczanie urządzeń charakteryzujących się szczególnymi warunkami pracy. Niezależnie od tego wypada zalecić szczególną docieklivość przy doborze lub przy sprawdzaniu doboru bezpieczników podlegających innym rygorom normalizacyjnym, np. przy rozważaniu jakimi bezpiecznikami dostępnymi w kraju zastąpić bezpieczniki w urządzeniu importowanym z USA lub Kanady. Inne są tam klasy bezpieczników, a identycznie nazywane parametry mogą niezupełnie to samo oznaczać.

Napięcie znamionowe bezpiecznika U_n . Parametr ten jest związany z dwoma różnymi narażeniami bezpiecznika. Po pierwsze, ze względu na napięciowe narażenia izolacji *znamionowe napięcie izolacji* bezpiecznika U_i , przede wszystkim podstawy bezpiecznikowej, powinno być nie mniejsze niż napięcie znamionowe sieci lub instalacji U_N , a ściślej – nie mniejsze niż największe dopuszczalne napięcie robocze U_m , co wyraźnie odróżnia się w urządzeniach wysokonapięciowych. Powinien być zatem spełniony warunek $U_i \geq U_N$ lub $U_i \geq U_m$. Po drugie, podobne wymaganie powinno spełniać *znamionowe napięcie wyłączeniowe* wkładki bezpiecznikowej U_e , związane z przypisaną jej zdolnością wyłączenia.

Wyłączeniu prądu przez bezpiecznik towarzyszy przepięcie, którego największą dopuszczalną wartość określają właściwe normy przedmiotowe. Bezpiecznik ograniczający ge-

neruje *przebiecie wyłączeniowe* (zapłonowe i gaszeniowe) o wartości szczytowej zależnej od konstrukcji wkładki. Przewymiarowana napięciowo wkładka bezpiecznikowa wyłączając zwarcie gasi łuk intensywniej niż w warunkach probierczych i może generować przebiecie większe niż jej się przypisuje i tym bardziej przekracza ono wartość dopuszczalną dla obwodu o niższym niż ona napięciu znamionowym. Wspomniana wyżej nierówność, zwłaszcza w przypadku bezpieczników wysokonapięciowych, powinna być zatem spełniona bez zbędnego zapasu, by nie nadwierać izolacji obwodu.

Od każdej zasady są wyjątki. Ze względu na warunki wyłączania w obwodzie kondensatorów wskazany jest dobór bezpieczników o napięciu znamionowym nieco wyższym niż napięcie znamionowe urządzenia. Zaleca się:

- wkładki bezpiecznikowe 500 V w urządzeniu 400 V,
- wkładki bezpiecznikowe 690 V w urządzeniu 500 V,
- wkładki bezpiecznikowe 1000 V w urządzeniu 690 V.

Są dodatkowe powody, by wspomnianej zasady przestrzegać. Im niższe napięcie znamionowe, tym *ceteris paribus* topik raczej krótszy, mniejsze straty mocy we wkładce i mniejszy cały bezpiecznik, co jest korzystne zwłaszcza przy instalowaniu większej liczby bezpieczników w obudowach albo przy tworzeniu konstrukcji zespolonych – rozłączników lub wyłączników z bezpiecznikami. Tego rodzaju korzyści najłatwiej dostrzec, rozważając skutki spóźnionego wprowadzenia w Polsce bezpieczników instalacyjnych 400 V (D0) zamiast 500 V w najbardziej rozpowszechnionych instalacjach 220/380 V (230/400 V) prądu przemienne.

Innego rodzaju kwestia występuje w przypadku bezpieczników miniaturowych o bardzo małym prądzie znamionowym, odznaczających się dużą rezystancją (np. 1800 Ω dla wkładki 2 mA, 150 V). Bezzasadne użycie wkładki o zbyt dużym napięciu znamionowym, o dłuższym topiku, może oznaczać wprowadzenie do obwodu niedopuszczalnie dużej rezystancji i w rezultacie – nadmiernego spadku napięcia. Rezystancja topika wzrasta w miarę nagrzewania do temperatury zadziałania i zachodzi pytanie, czy obwód ma wystarczające napięcie, by doprowadzić do przetopienia go. Jako wstępną wskazówkę można wtedy przyjąć, że napięcie obwodu powinno być co najmniej 5÷8 razy większe niż podawany w katalogu spadek napięcia na wkładce obciążonej prądem znamionowym.

Powyższe problemy są związane z napięciem znamionowym wkładki bezpiecznikowej; żadne negatywne skutki, poza większymi wymiarami obrysowymi, nie wynikają z użycia podstawy bezpiecznikowej o napięciu znamionowym większym niż napięcie obwodu.

W niskonapięciowych obwodach prądu przemienne stosuje się w Europie wkładki bezpiecznikowe o napięciu znamionowym 32, 63, 125, 250, 400, 500, 690 i 1000 V; najmniejsze wartości dotyczą bezpieczników miniaturowych.

W obwodach prądu stałego bezpiecznik może być użyty, jeżeli wytwórca gwarantuje w nich zdolność wyłączania (znamionowy prąd wyłączalny przy określonym U_e napięciu i określonej stałej czasowej obwodu $T = L/R$). W porównaniu z parametrami przy prądzie prądzie przemianym, mimo przypisania zwykłym bezpiecznikom znacznie mniejszego napięcia znamionowego, prąd wyłączalny może być kilkakrotnie mniejszy. Dla niektórych bezpieczników jest on rażąco mały i w ogóle nie jest podawany w katalogu. Ponadto w zastosowaniach stałoprądowych może być potrzebna korekta innych parametrów i charakterystyk bezpieczników dotyczących ich działania w obwodach prądu przemienne, np. charakterystyk prądów ograniczonych.

Klasa bezpiecznika rozumiana jako typ charakterystyki czasowo-prądowej wkładki bezpiecznikowej. W przypadku bezpieczników niskonapięciowych jest ona scharakteryzowa-

na dwiema literami, z których pierwsza oznacza **zakres zdolności wyłączenia**:

- g** – Wkładka ogólnego zastosowania, której zdolność wyłączenia jest gwarantowana poczynając od prądu przetapiającego topik w ciągu 1 h, bo to jest sprawdzane w trakcie badań, do znamionowego prądu wyłączalnego. Niskonapięciowa wkładka **g** jest – praktycznie biorąc – wkładką o pełnozakresowej zdolności wyłączenia, zdolną wyłączyć każdy prąd przetapiający topik¹.
- a** – Wkładka o niepełnozakresowej zdolności wyłączenia (ang. *back-up fuse, partial range fuse*), tzn. wkładka, która wyłącza poprawnie prąd zawarty między najmniejszym prądem wyłączalnym I_{bmin} (np. $4 \cdot I_n$) a znamionowym prądem wyłączalnym I_{bn} ; nie gwarantuje poprawnego wyłączenia małych prądów przeciążeniowych i w zasadzie powinien jej towarzyszyć w obwodzie aparat (samoczynny rozłącznik, wyłącznik) przejmujący to zadanie².

Druga litera symbolu oznacza **kategorię użytkowania**:

- G** – Wkładka ogólnego przeznaczenia, do zabezpieczania przewodów, o charakterystyce czasowo-prądowej odpowiadającej dawnym wkładkom zwłocznym (ang. *general application*, niem. *Generalschutz*).
- F** – Wkładka o charakterystyce szybkiej (ang. *fast*, niem. *flink*), wycofana z normalizacji międzynarodowej IEC oraz europejskiej EN, traktowana jako wykonanie przejściowe. W Polsce wkładki o charakterystyce szybkiej są nadal produkowane w oparciu o dawną Polską Normę PN-87/E-93100/05 bądź zakładowe warunki techniczne.
- M** – Wkładka do zabezpieczania silników i urządzeń rozdzielczych (ang. *motor*, niem. *Motorschutz*).
- R** – Wkładka do zabezpieczania urządzeń półprzewodnikowych (ang. *rectifier*).
- Tr** – Wkładka do zabezpieczania transformatorów (ang. *transformer*, niem. *Transformatorenschutz*).
- B** – Wkładka do zabezpieczania urządzeń w podziemiach kopalń (niem. *Bergbauanlagenschutz*).

Dobierając klasę bezpiecznika trzeba się kierować informacjami, jakie niosą oba człony oznaczenia. Wkładkę **a** w zasadzie używa się tylko w obwodzie, w którym jest łącznik z zabezpieczeniem przeciążeniowym i prądy mniejsze niż najmniejszy prąd wyłączalny wkładki wyłącza on zanim dojdzie do przetopienia topika. Wkładkę **a** stosuje się w takim obwodzie, aby uzyskać określoną korzyść, np. mniejszy gabaryt, mniejsze straty mocy. Jeśli wspomniane warunki nie występują, to stosuje się wkładkę ogólnego zastosowania **g**.

Nie jest też trudna decyzja co do wyboru kategorii użytkowania. Jeśli nie ma powodów, by postąpić inaczej, wybiera się wkładkę ogólnego przeznaczenia **G**. I tak, do zabezpieczania przewodów w instalacjach i sieciach stosuje się wkładki **gG**³. Jeśli najmniejszy prąd zwar-

¹ W przypadku wkładek wysokiego napięcia odróżnia się wkładki ogólnego zastosowania (ang. *general purpose fuses*) o bardzo małym (1-godzinnym) najmniejszym prądzie wyłączalnym od wkładek pełnozakresowych (ang. *full range fuses*), poprawnie wyłączających każdy prąd przetapiający topik, nawet prąd znamionowy wkładki I_n . Próbę wyłączenia prądu I_n przeprowadza się przy temperaturze otoczenia wkładki tak podwyższonej, aby doszło do jej przepalenia; odpowiada to warunkom pracy w rozdzielnicach średniego napięcia o zwartej budowie.

² Dopuszcza się odstępstwo od tej zasady, jeśli znikome jest prawdopodobieństwo wystąpienia w obwodzie prądu mniejszego niż najmniejszy prąd wyłączalny wkładki I_{bmin} (np. prąd I_{bmin} jest mniejszy niż prąd zwarcia jedno- i dwufazowego u końca zabezpieczanego odcinka sieci lub instalacji).

³ Wkładki **gG** wprowadzono w normalizacji IEC z początkiem lat 90. Przypisano im charakterystykę czasowo-prądową zwłoczną stanowiącą kompromis w stosunku do wkładek, które z czasem mają one wyprzeć: wkładek **gL** (Niemcy) i wkładek **gI** (W. Brytania).

ciowy wyłączają one po czasie zbyt długim z punktu widzenia wymagań ochrony przeciwporażeniowej, to w przypadkach koniecznych można zastąpić je wkładkami o działaniu szybkim **gF**. Obwody silnikowe ze stycznikami i przekaźnikami przeciążeniowymi zabezpiecza się wkładkami **aM**, **gM** lub **gG**, przeksztaltniki energoelektroniczne – wkładkami **aR** lub **gR**, transformatory – wkładkami **gTr**, a urządzenia dołowe w kopalniach – wkładkami **gB**.

Ciekawym rozwiązaniem są bezpieczniki klasy **gM**, zwłoczne, o pełnozakresowej zdolności wyłączania, którym przypisuje się dwie wartości prądu (ang. *dual rating*) – mniejszy, prąd znamionowy I_n , oznaczający obciążalność długotrwałą wkładki i podstawy zespolonej oraz większy, *prąd charakterystyczny* I_{ch} , określający przebieg charakterystyki $t-I$, charakterystyki prądów ograniczonych oraz wartości całki Joule’a. Za wyjaśnienie poglądowe, chociaż niezupełnie ściśle, niech posłuży następujący przykład. Wkładka **gM** 32M63 powstaje w ten sposób, że topik wkładki **gG** 63 A umieszcza się w korpusie wkładki 32 A. Tak powstała wkładka ma charakterystykę $t-I$, charakterystykę prądów ograniczonych oraz całki Joule’a mniej więcej taką, jak wkładka **gG** 63 A, a jej obciążalność długotrwałą 32 A jest limitowana możliwością odprowadzania ciepła z mniejszego korpusu. Taka kombinacja parametrów przydaje się w obwodzie silnikowym o prądzie rozruchowym znacznie większym niż prąd normalnego użytkowania.

Jak duże znaczenie ma rozeznanie charakterystyk i innych właściwości bezpieczników różnych klas, może świadczyć przykład zaczerpnięty z poradnika IEC 1459:1996 [4]. W obwodzie silnika indukcyjnego trójfazowego 400 V, 15 kW, o prądzie znamionowym 28 A, o względnym prądzie rozruchowym nie przekraczającym 7, o rozruchu bezpośrednim i rzadkim, trwającym nie dłużej niż 10 s, właściwym bezpiecznikiem jest jeden z pięciu bezpieczników zestawionych w tabl. 1.

Tablica 1. Bezpieczniki nadające się do obwodu silnika klatkowego 400 V, 15 kW

Klasa bezpiecznika	Właściwy prąd znamionowy	Przeznaczenie, rodzaj bezpiecznika	Występowanie, dokumenty normalizacyjne
gG	63 A	Bezpiecznik ogólnego przeznaczenia	IEC
gM	32M63	Bezpiecznik do obwodów silnikowych	IEC, przejęty z normalizacji brytyjskiej
aM	32 A	Bezpiecznik do obwodów silnikowych	IEC, przejęty z normalizacji francuskiej (aM = accompagnement moteur)
gN	70 A	Bezpiecznik szybki	Ameryka Północna
gD	40 A	Bezpiecznik zwłoczny	Ameryka Północna

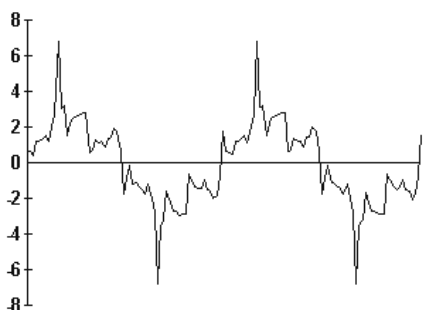
Rodzaj budowy bezpiecznika z punktu widzenia bezpieczeństwa obsługi. Chodzi o rozróżnienie między bezpiecznikami przeznaczonymi do stosowania przez osoby niewykwalifikowane i bezpiecznikami przeznaczonymi do stosowania przez osoby wykwalifikowane. Rozróżnienie to dotyczy popularnych bezpieczników niskonapięciowych, zwłaszcza klasy **gG**, o prądzie znamionowym nie przekraczającym 100 A (dawniej 200 A). Osobom niewykwalifikowanym powierzano w budownictwie mieszkaniowym i ogólnym bezpieczniki instalacyjne wkrętkowe i rozłączniki bezpiecznikowe z wkładkami instalacyjnymi, ale nie można powierzyć – bezpieczników o stykach nożowych.

Rozróżnienie to nie jest potrzebne i możliwości wyboru nie ma w wielu innych przypadkach; wyłącznie do stosowania przez osoby wykwalifikowane są przeznaczone bezpieczniki niskonapięciowe innych klas (**gR**, **aR**, **gTr**, **gB**) i tym bardziej wszelkie bezpieczniki wysokonapięciowe.

Dyskusyjna jest sprawa bezpieczników aparaturowych w urządzeniach powszechnego użytku o zasilaniu sieciowym – ułatwić laikom dostęp do nich, czy nie. Z punktu widzenia bezpieczeństwa wymiany wkładki problem można rozwiązać mocując ją do łatwo odejmowalnej, dostępnej z zewnątrz pokrywy podstawy zespolonej. Pozostaje jednak ryzyko uszkodzenia kosztownego urządzenia po wymianie przepalonej wkładki na niewłaściwą lub po zastąpieniu jej kawałkiem drutu.

Prąd znamionowy ciągły wkładki bezpiecznikowej I_n . Zależnie od wykonania i przeznaczenia bezpieczników spotykany zakres prądów znamionowych obejmuje wartości od 2 mA do 1600 A, ale spotyka się wartości zarówno mniejsze, jak i większe. Podobnie jak doбира się prąd rozruchowy zabezpieczeń przekaźnikowych, prąd znamionowy wkładki w określonym zastosowaniu powinien być jak najmniejszy, ale wystarczająco duży, aby zapewnić przez przewidywany wieloletni okres użytkowania urządzenia, z uwzględnieniem (w obwodach rozdzielczych) naturalnego narastania obciążenia:

- długotrwałe przewodzenie *prądu szczytowego obciążenia* I_B obwodu bez przekroczenia dopuszczalnych przyrostów temperatury,
- przetrzymywanie, bez zbędnych zadziałań i bez nadwężania topika, krótkotrwałych impulsów prądu roboczego I_{mr} , zwłaszcza przy załączaniu lub przełączaniu obwodu, np. prądu rozruchowego silników lub prądu załączeniowego transformatorów,
- wybiórczość z szeregowo połączonymi zabezpieczeniami na niższych stopniach rozdziału energii, co oczywiście nie dotyczy ostatniego stopnia zabezpieczeń w obwodach odbiorczych.



Rys. 11. Przebieg prądu pobieranego w czasie 40 ms przez lampę metalohalogenkową 400 W zasilaną z instalacji 230 V, 50 Hz
Wartość skuteczna 2,2 A, wartość szczytowa 6,8 A, współczynnik szczytu 3,1

Prąd znamionowy ciągły wkładki I_n jest to jej *obciążalność długotrwała* czyli największy prąd, jakim wolno wkładkę długotrwałe obciążyć w warunkach umownych (pojedyncza podstawa z wkładką, w powietrzu o temperaturze +40°C, niezakłócona konwekcja grawitacyjna, znormalizowany przebieg prądu). Rzeczywiste warunki użytkowania mogą na tyle różnić się od warunków probierczych, że zachodzi konieczność skorygowania obciążalności długotrwałej wkładki, zwykle jej obniżenia (ang. *derating*), i to z dwóch powodów:

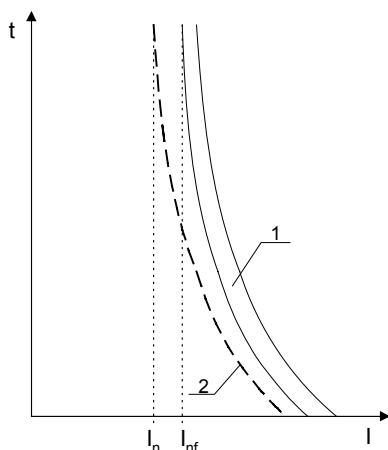
- pogorszone są warunki chłodzenia z tytułu podwyższonej temperatury otoczenia i/lub zainstalowania bezpieczników w obudowie [2] (współczynnik poprawkowy $k_c \leq 1$),
- przebieg prądu w czasie znacznie odbiega od warunków probierczych, np. prąd przemieniczny ma współczynnik szczytu k_s znacznie większy niż $\sqrt{2}$ (rys. 11) charakteryzujący przebieg sinusoidalny (współczynnik poprawkowy $\frac{\sqrt{2}}{k_s} \leq k_i \leq 1$).

Skorygowana, rzeczywista obciążalność długotrwała wkładki $k_c \cdot k_i \cdot I_n$, powinna być nie mniejsza niż obliczeniowy prąd szczytowego obciążenia obwodu I_B :

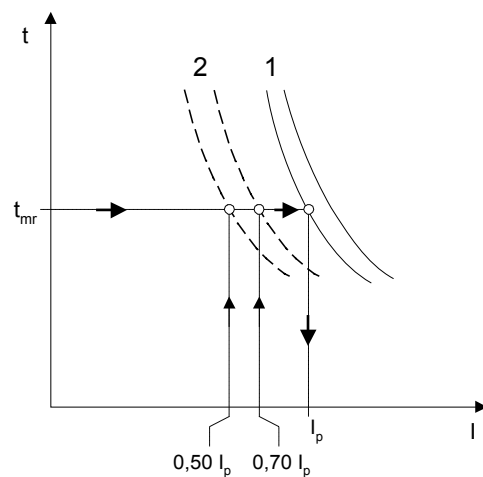
$$k_c \cdot k_i \cdot I_n \geq I_B$$

Przy zmiennym w czasie przebiegu obciążenia prąd I_B jest prądem zastępczym, niezmiennym w czasie, wywołującym równoważne efekty cieplne. W pierwszym przybliżeniu jest to największa możliwa wartość średnia kwadratowa wyznaczona w takim przedziale czasu równym trzem ciepłym stałym czasowym rozpatrywanego obiektu, w jakim wypada ona największa. Zważywszy, że bezpiecznik ma na ogół najmniejszą cieplną stałą czasową ze wszystkich elementów obwodu, wyznaczony dla niego prąd zastępczy jest największy. Na przykład, ze względu na obciążalność cieplną roboczą, w polu transformatora o prądzie znamionowym (o obciążalności długotrwałej) I_{nT} mogą być potrzebne przewody o obciążalności długotrwałej $1,2 \cdot I_{nT}$ i bezpiecznik o prądzie znamionowym (o obciążalności długotrwałej) $1,5 \cdot I_{nT}$ ¹, jeśli ma być wykorzystywana przeciążalność ruchowa transformatora.

Jeśli obwód odbiorczy ma być permanentnie obciążany prądem roboczym I_B , to bezpiecznik powinien mieć prąd znamionowy nieco większy ($I_n \geq 1,25 \cdot I_B$), chociażby ze względu na możliwe skutki nieuchronnych odchyłań napięcia. Podobne zalecenie dotyczy obwodów rozdzielczych o długotrwałym niezmiennym obciążeniu.



Rys. 12. Usytuowanie charakterystyki przeciążeniowej (krzywa 2) względem charakterystyki czasowo-prądowej (pasmo 1) wkładki bezpiecznikowej o prądzie znamionowym I_n i prądzie granicznym dolnym I_{nf}



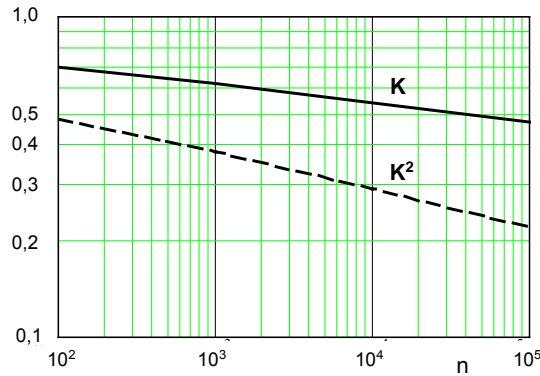
Rys. 13. Tworzenie charakterystyki przeciążeniowej (pasmo 2) w oparciu o charakterystykę czasowo-prądową (pasmo 1) wkładki bezpiecznikowej

Wkładce bezpiecznikowej można też przypisać pewną *obciążalność krótkotrwałą* wynikającą z *charakterystyki przeciążeniowej* leżącej na lewo od charakterystyki czasowo-prądowej $t-I$ czasów przedłukowych (rys. 12), w takim oddaleniu, by nie dochodziło nie tylko do zadziałania wkładki, ale nawet do zmian struktury topika pod wpływem powtarzających się krótkotrwałych obciążeń. Takie „zapamiętywanie przeciążeń” przyspieszałoby starzenie topika i sprzyjało nieoczekiwanemu, zbędnemu zadziałaniu, bo charakterystyka czasowo-prądowa wkładki stopniowo przesuwalaby się w lewo.

Wkładce można przypisać różne charakterystyki przeciążeniowe, z tym większym mar-

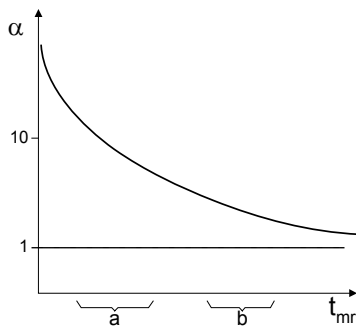
¹ Na ogół będzie potrzebna jeszcze większa wartość, $(1,8 \div 2,2) \cdot I_{nT}$, ze względu na przetrzymywanie prądu załączeniowego transformatora.

ginesem bezpieczeństwa w stosunku do charakterystyki $t-I$ przedłukowej, im większa jest częstość występowania rozpatrywanych krótkotrwałych obciążeń, im większą ich liczbę n wkładka powinna przetrzymać do chwili zbędnego zadziałania wskutek zmian starzeniowych.



Rys. 14. Współczynnik odporności na wielokrotne przeciążenia impulsowe K (do sporządzenia charakterystyki przeciążeniowej $t-I$) oraz wartość K^2 (do wyznaczenia wielokrotnie wytrzymywanej całki Joule'a) w zależności od liczby przetrzymywanych cykli przeciążeniowych n . Podane wartości dotyczą przeciążeń impulsowych o czasie trwania poniżej 1 s (ang. *impulse loads*), a w przypadku dłuższych trwających przeciążeń odczytane z wykresu wartości można zwiększyć o 15÷20 %.

Charakterystyka przeciążeniowa powstaje w ten sposób (rys. 13), że danej rzędnej t odpowiadającej czasowi trwania obciążenia krótkotrwałego t_{mr} przypisuje się odciętą $I = K \cdot I_p$, przy czym I_p jest prądem przedłukowym, a wartość **współczynnika odporności na wielokrotne przeciążenia** K dobiera się (rys. 14) zależnie od liczby cykli przeciążeniowych n , którą wkładka powinna przetrzymać; zwykle $K \in (0,50 \div 0,70)$.



Rys. 15. Względna obciążalność krótkotrwałą α wkładki bezpiecznikowej (krzywa 2 z rys. 12) w funkcji czasu trwania krótkotrwałego obciążenia roboczego (a – załączanie baterii kondensatorów lub transformatora, b – rozruch silnika)

Obciążalność krótkotrwałą wkładki wygodnie jest odnosić do jej prądu znamionowego I_n i podawać jako *względną obciążalność krótkotrwałą* α w zależności od czasu t_{mr} trwania prądu obciążenia krótkotrwałego I_{mr} (rys. 15), przy czym

$$\alpha = \frac{K \cdot I_p}{I_n}$$

Częstość takich obciążeń, ważną zwłaszcza w obwodach silników, uwzględnia się wybierając właściwą wartość α z zalecanego przedziału wartości. Powinien być zatem spełniony kolejny warunek określający najmniejszy dopuszczalny prąd znamionowy wkładki bezpiecznikowej

$$\alpha \cdot I_n \geq I_{mr} \quad \text{czyli} \quad I_n \geq \frac{I_{mr}}{\alpha}$$

W obwodach zasilających pojedyncze urządzenia o dużym prądzie załączeniowym (silniki, transformatory, kondensatory, urządzenia elektroniczne z zasilaczem impulsowym) warunek uwzględniający prądy załączeniowe jest ostrzejszy od warunku $I_n \geq I_B$ i decyduje o doborze prądu znamionowego bezpiecznika.

W zakresie najkrótszych czasów, dla których nie podaje się charakterystyk $t-I$, miarodajną informacją jest przedłukowa całka Joule'a $(I^2 t)_p$ wkładki bezpiecznikowej. Wielokrotnie wytrzymywana całka Joule'a impulsowego prądu załączeniowego wynosi $K^2 \cdot (I^2 t)_p$.

Rozważając dobór prądu znamionowego bezpieczników, ze względu na przetrzymywanie prądów załączeniowych, dobrze mieć na względzie skutki ewentualnego błędu w wyniku doboru prądu za małego lub za dużego o jeden bądź dwa stopnie. Dobór zbyt małego prądu znamionowego objawi się zbędnymi zadaniami, utrudniającymi bądź uniemożliwiającymi użytkowanie określonego urządzenia, wymusi przeróbki, które mogą się okazać kłopotliwe i kosztowne, za co zostanie obwiniony projektant instalacji. Natomiast nieznaczne przewymiarowanie prądu znamionowego bezpiecznika pozostanie niezauważone.

Prąd znamionowy wyłączalny wkładki bezpiecznikowej I_c . Określa on zwarciovą zdolność wyłączania w obwodzie o określonym napięciu U_e i charakterze wynikającym ze stosunku indukcyjności i rezystancji (L/R lub $\cos \varphi$). W obwodzie prądu przemiennego parametr ten powinien być nie mniejszy niż największy spodziewany prąd zwarciovą początkowy I_k'' w miejscu zainstalowania wkładki o działaniu ograniczającym. Zasada ta dotyczy również sieci wydzielonych o ograniczonej mocy, np. sieci okrętowych, w których składowa okresowa prądu zwarciovego szybko maleje w pierwszych półokresach; podstawą doboru jest jej wartość w chwili $t = 0$. W sieciach okrętowych współczynnik mocy obwodu przy zwarciu w pobliżu generatorów może być mniejszy niż stosowany przy badaniu zdolności wyłączania bezpieczników i dobór powinien być poparty dodatkowymi próbami, a co najmniej uzgodnieniami z wytwórcą.

Zależnie od wykonania i przeznaczenia bezpieczników spotykany zakres zdolności wyłączania w obwodach prądu przemiennego obejmuje wartości od 35 A (bezpieczniki miniaturowe) do 200 kA (bezpieczniki przemysłowe).

4. Przykłady liczbowe [1]

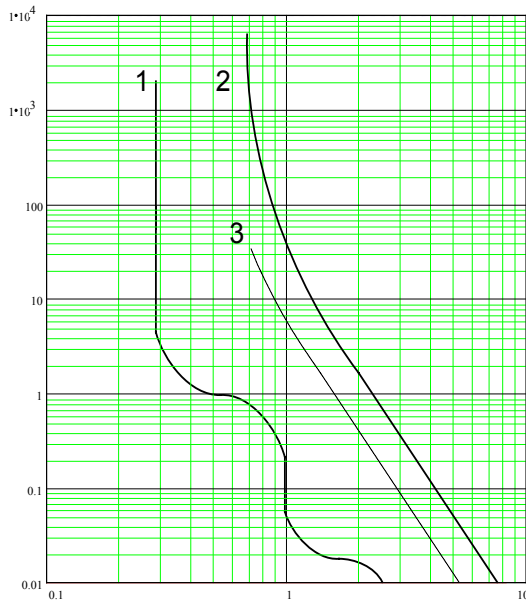
Przykład 4.1.

W obwodzie rozdzielczym 400 V charakterystyka $t-I$ obciążenia przedstawia się jak na rys. 16. Krótkotrwałe prądy załączeniowe występują sporadycznie, nie częściej niż raz na godzinę. Określić najmniejszy dopuszczalny prąd znamionowy bezpieczników klasy gG.

Przed wszystkim trzeba się upewnić, czy podana charakterystyka $t-I$ obciążenia uwzględnia odpowiednio daleki horyzont czasowy, czyli naturalne narastanie obciążenia w obwodach rozdzielczych. Jeśli tak, to można ją przyjąć za podstawę doboru i powinny być spełnione dwa warunki:

- prąd znamionowy wkładki bezpiecznikowej powinien być nie mniejszy niż prąd szczytowego obciążenia obwodu $I_B = 280$ A,
- charakterystyka przeciążeniowa wkładki bezpiecznikowej nie powinna przecinać charakterystyki $t-I$ obciążenia; z uwagi na małą częstość występowania prądów załączeniowych można przyjąć dużą wartość współczynnika odporności na wielokrotne przeciążenia K ,

np. $K = 0,70$.



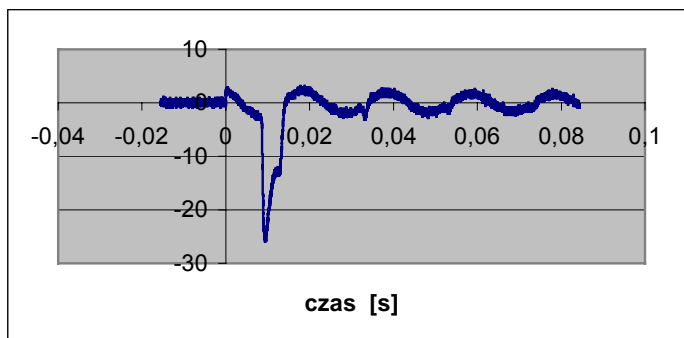
Rys. 16. Sprawdzenie krótkotrwałej przeciążalności wkładki bezpiecznikowej (przykład 4.1)

1- charakterystyka $t-I$ obciążenia, 2 – charakterystyka przedłukowa wkładki bezpiecznikowej gG 315 A, 3 – charakterystyka przeciążeniowa wkładki gG 315 A

Obydwa warunki spełnia wkładka gG 315 A. Pozostaje sprawdzić, czy jest ona wystarczająca ze względu na wybiórczość z zabezpieczeniami nadprądowymi na kolejnym stopniu.

Przykład 4.2.

Do instalacji oświetleniowej z żarówkami halogenowymi 12 V należy dobrać wkładkę bezpiecznikową do zabezpieczenia transformatora toroidalnego 230/12 V, 150 VA, o przebiegu prądu załączeniowego, jak na rys. 17.



Rys. 17. Przebieg prądu przy załączeniu transformatora toroidalnego TS 150 VA obciążonego znamionowo (wartość szczytowa 26 A, krotność $38 \cdot I_n$)

Chodzi oczywiście o wkładkę bezpiecznikową po stronie pierwotnej, wbudowaną w transformator lub zainstalowaną na początku obwodu zasilającego tylko ten jeden transformator. Jej prąd znamionowy należy tak dobrać, aby były spełnione dwa wymagania:

1) Wkładka powinna umożliwiać długotrwałe przewodzenie prądu roboczego i w tym celu powinna mieć prąd znamionowy nie mniejszy niż prąd znamionowy pierwotny transformatora $150/230 = 0,65$ A. Wartość ta może wymagać korekty w górę ze względu na temperaturę otoczenia w miejscu zainstalowania wkładki.

2) Wkładka powinna wielokrotnie przetrzymywać prąd załączeniowy transformatora.

Z podanego reprezentatywnego przebiegu prądu załączeniowego można obliczyć skutek cieplny zakładając, że jest to przebieg piłokształtny o wartości szczytowej 26 A i czasie trwania 0,004 s:

$$I^2 t_z = \left(\frac{i_z}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot t_z = \left(\frac{26}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 0,004 = 0,90 \text{ A}^2\text{s}$$

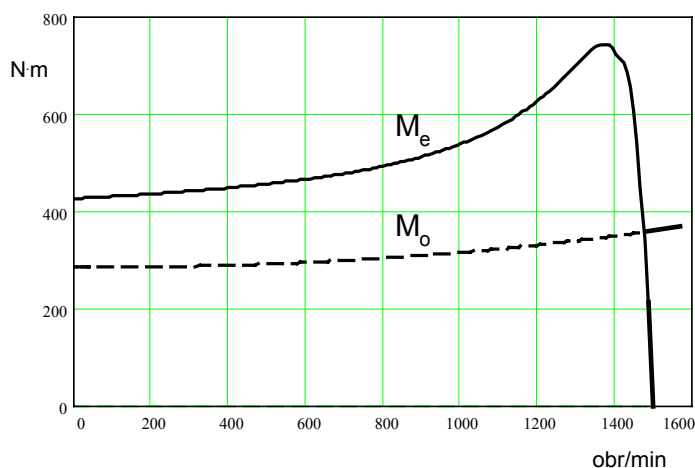
Przyjmując, że wkładka powinna przetrzymać 10^4 impulsów prądu załączeniowego można dobrać z rys. 14 współczynnik charakteryzujący odporność wkładki na wielokrotne przeciążenia impulsowe $K^2 = 0,29$. Potrzebna jest zatem wkładka bezpiecznikowa, której cała Joule'a przedłukowa wynosi co najmniej

$$I^2 t_p = \frac{I^2 t_z}{K^2} = \frac{0,90}{0,29} = 3,1 \text{ A}^2\text{s}$$

Spośród wkładek gG warunek ten spełnia dopiero wkładka 4 A ($I^2 t_p = 4,9 \text{ A}^2\text{s}$). W katalogach bezpieczników aparatowych o charakterystyce bardzo zwłocznej można sprawdzić, że postawiony warunek – zależnie od wytwórcy i typu wkładki – spełniają wkładki o prądzie znamionowym co najmniej 1,6 A lub 2 A. Dobrana wkładka powinna mieć napięcie znamionowe 250 V AC i zdolność wyłączania odpowiadającą spodziewanemu prądowi zwarciowemu w miejscu zainstalowania.

Przykład 4.3.

Dobrać prąd znamionowy bezpiecznika aM zabezpieczającego obwód silnika klatkowego 400 V, 55 kW, $I_{nM} = 93 \text{ A}$, $i_{LR} \approx 6$, 1470 obr/min, o częstotliwości rozruchów do 5 h^{-1} w zakładzie o ruchu ciągłym. Charakterystyki mechaniczne silnika i urządzenia napędzanego przedstawiają się, jak na rys. 18, moment bezwładności układu wynosi $J = 6,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ i nie zależy od prędkości obrotowej.



Rys. 18. Charakterystyki mechaniczne silnika $M_e(n)$ oraz urządzenia napędzanego $M_o(n)$ z przykładu 4.3

Ze względu na obciążalność długotrwałą wkładka bezpiecznikowa powinna mieć prąd znamionowy co najmniej $1,25 \cdot 93 = 116 \text{ A}$, czyli 125 A.

Znając charakterystyki mechaniczne (rys. 18) można dokładnie obliczyć czas rozruchu przy napięciu znamionowym na zaciskach silnika, który w tym przypadku wynosi $t_r = 5,0 \text{ s}$.

Jest to zarazem w przybliżeniu czas przepływu prądu rozruchowego o wartości $I_{LR} = 1,2 \cdot 6 \cdot 93 = 670$ A z uwzględnieniem dopuszczalnej odchyłki +20 %.

Ze względu na wielokrotne przetrzymywanie prądów rozruchowych z rys. 14 można przyjąć wartość współczynnika $K = 0,47$ dla liczby cykli 10^5 , co odpowiada trwałości wkładek ok. 3 lat. Przeciążenia rozruchowe trwają dłużej niż 1 s, co pozwala zwiększyć odczytaną wartość o ok. 15 % i ostatecznie $K = 1,15 \cdot 0,47 = 0,54$. Potrzebne są zatem wkładki bezpiecznikowe silnikowe, które przy czasie $t_r = 5$ s mają prąd przedłukowy co najmniej $670/0,54 \approx 1240$ A.

Warunek ten spełniają wkładki aM 690 V firmy ETI POLAM o prądzie znamionowym co najmniej 200 A. Są to wkładki niepełnozakresowe, które będą stanowiły element rozrusznika bezpośredniego (zestaw złożony z bezpieczników, stycznika i przełącznika przeciążeniowego), a zatem nie będą narażone na wyłączenie prądów przeciążeniowych.

Na przykładzie rozważanego układu napędowego można prześledzić, jaki wpływ na przebieg rozruchu i procedurę doboru bezpiecznika miałoby uwzględnienie obniżenia napięcia na zaciskach silnika podczas rozruchu. Przyjmując, że napięcie ma wartość niezmienną podczas przepływu prądu rozruchowego, otrzymuje się wyniki zestawione w tabl. 2. Wynika z niej, że dla rozważanego napędu, mimo obniżenia napięcia i wydłużenia czasu rozruchu, każdorazowo wystarczają wkładki aM 200 A (z trudem nawet w ostatniej pozycji $0,82 \cdot U_n$, która obrazuje stan graniczny niedopuszczalny zarówno dla układu napędowego, jak i dla aparatury obwodu silnika).

Tablica 2. Wpływ poziomu napięcia na zaciskach silnika podczas rozruchu na wartość i czas przepływu prądu rozruchowego i na dobór bezpiecznika

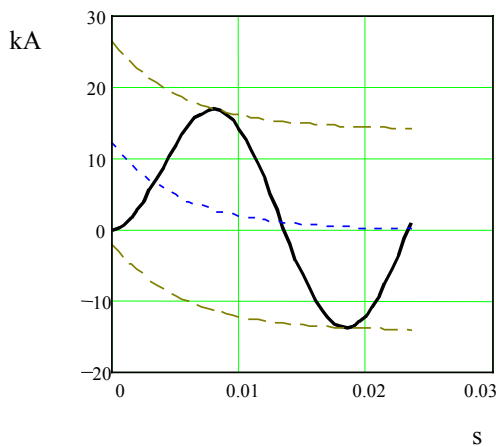
Poziom napięcia U/U_n	Czas rozruchu t_r	Prąd rozruchowy I_{LR}	Wymagany prąd przedłukowy wkładki $I_{LR}/0,54$	Wkładka aM przetrzymująca rozruch
-	s	A	A	A
1,00	5,0	670	1240	200
0,95	6,8	635	1180	200
0,90	10,4	600	1120	200
0,85	20,4	570	1050	200
0,82	72,7	550	1020	200

Tak jest w rozważanym przypadku dzięki określonoemu nachyleniu charakterystyk $t-I$ wkładek bezpiecznikowych, mimo że w miarę obniżania napięcia wyraźnie zwiększa się całkowita Joule'a prądu rozruchowego (prawie trzykrotnie przy obniżeniu napięcia od poziomu 100 % do 85 %).

Przykład 4.4.

Określić wymagany prąd wyłączalny bezpieczników w obwodzie narażonym na przepływ prądu zwarciovego o przebiegu przedstawionym na rys. 19.

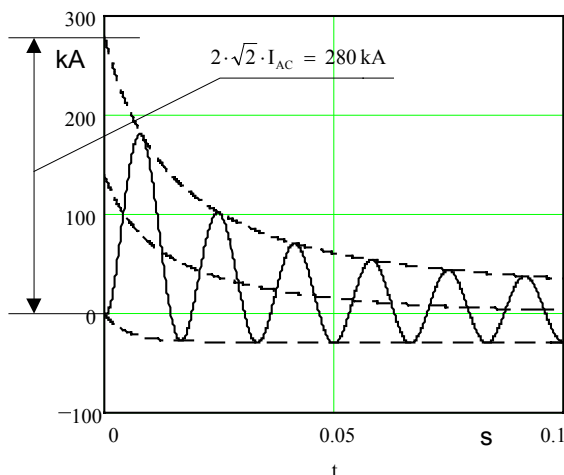
Jest to przypadek zwarcia odległego; w czasie jego trwania składowa okresowa prądu zwarciovego ma niezmienną wartość skuteczną, równą początkowemu prądowi zwarciovemu $I_k'' = 10$ kA. Wartość ta jest zarazem wymagany prądem wyłączalnym bezpieczników.



Rys. 19. Przebieg prądu zwarciovego w obwodzie niskiego napięcia do chwili drugiego naturalnego przejścia przez zero (prąd zwarciovowy początkowy $I_k'' = 10 \text{ kA}$, prąd udarowy $i_p = 16,9 \text{ kA}$, współczynnik mocy obwodu zwarciovego $\cos\varphi = 0,5$). Symetralna między obwiedniami prądu jest składową nieokresową prądu zwarciovego.

Przykład 4.5.

Określić wymagany prąd wyłączalny bezpieczników w obwodach odpływowych rozdzielni głównej statku narażonych na przepływ prądu zwarciovego o przebiegu przedstawionym na rys. 20.



Rys. 20. Sposób określania wymaganej zdolności wyłączania bezpieczników na podstawie reprezentatywnego oscylogramu prądu przy zwarciu bliskim (sieć 440 V, 60 Hz, $I_k'' = 99 \text{ kA}$)

Jest to przypadek zwarcia bliskiego; w czasie jego trwania składowa okresowa prądu zwarciovego maleje od wartości początkowej $I_k'' = 99 \text{ kA}$ (w chwili $t = 0$) do wartości ustalonego prądu zwarciovego. Zwraca uwagę znaczna różnica wartości szczytowej w kolejnych okresach przebiegu prądu (178, 102, 70 kA) i odpowiadającej im bieżącej wartości skutecznej prądu. Zastępczy współczynnik mocy obwodu zwarciovego wynosi zaledwie $\cos\varphi = 0,18$; tak małej wartości nie spotyka się w sieciach lądowych i nie uwzględniają jej normy przedmiotowe dla urządzeń wyłączających. W chwili $t = T/2$, kiedy występuje prąd udarowy $i_p = 178 \text{ kA}$ składowa okresowa prądu zwarciovego wynosi już tylko 72 kA; zwykle stanowi ona podstawę doboru zdolności wyłączania wyłączników o działaniu bezzwłocznym. Zdolność wyłączania bezpieczników, w których czas do chwili zapłonu łuku przy wyłączeniu największego spodziewanego prądu zwarciovego jest znacznie krótszy niż w wyłącznikach, doбира

się do początkowego prądu zwarciovego I_k'' :

$$I_{AC} = I_k'' = \frac{280}{2 \cdot \sqrt{2}} = 99 \text{ kA}$$

Powinna ona zatem wynosić co najmniej 100 kA i powinna być gwarantowana w obwodzie 440 V, 60 Hz, o współczynniku mocy $\cos\varphi = 0,18$ lub mniejszym.

Literatura

1. Lipski T., Musiał E.: Bezpieczniki topikowe i ich zastosowania. Monografia przygotowywana do druku.
2. Musiał E.: Zagadnienia wymiany ciepła przy projektowaniu rozdzielnic. W: [Materiały] Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Projektowanie, eksploatacja i modernizacja rozdzielnic nn i SN”. ENERGO-EKO-TECH, Poznań, 29-30 maja 2001.
3. Wolny A.: What can fuses offer to survive the next century. W: [Materiały] Sixth International Conference on Electric Fuses and their Applications, Turyn, 1999, s. 1-9.
4. IEC Publ. 1459: Low-voltage fuses – Coordination between fuses and contactors/motor-starters – Application guide. 1996.

Dane bibliograficzne

Musiał E.: **Bezpieczniki w nowoczesnych układach zabezpieczeń urządzeń niskiego napięcia.** W: [Materiały] Ogólnopolskie Szkolenie Techniczne „Zabezpieczenia niskonapięciowych instalacji i urządzeń elektrycznych” Poznań, październik 2001. Poznań: ENERGO-EKO-TECH. s. [1-19].