

WYŁĄCZNIKI OCHRONNE RÓŻNICOWOPRĄDOWE. PRZEGLĄD I CHARAKTERYSTYKA WSPÓŁCZESNYCH KONSTRUKCJI

Streszczenie

W artykule przedstawiono problemy i rozwiązania konstrukcyjne oraz zasady działania współczesnych wyłączników różnicowoprądowych. Opisano ich podstawowe cechy i parametry określone przez normy przedmiotowe. Przedstawiono charakterystyki przekładników sumujących, ich własności elektromagnetyczne oraz przydatność do wyłączników o określonym uczuleniu na wartość i kształt przebiegu prądu różnicowego. Objąsniiono liczne warianty układu połączeń obwodu wyzwającego wyłączników. Omówiono rozwiązania członu kontrolnego wyłącznika i stawiane mu wymagania. Zwrócono uwagę na podstawowe problemy terminologiczne związane z wyłącznikami różnicowoprądowymi.

1. Podstawowe cechy i parametry wyłączników różnicowoprądowych

Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe są **łącznikami zabezpieczeniowymi**, co oznacza, że są przystosowane do długotrwałej pracy w stanie zamkniętym, a nie do częstych czynności łączeniowych. Z definicji zawierają człon zabezpieczeniowy różnicowoprądowy, a niektóre wykonania mają ponadto człon zabezpieczeniowy nadprądowy. Takie przeznaczenie wyznacza pewne zasady konstrukcyjne: wyłączniki różnicowoprądowe są **łącznikami zamkowymi o wyzwaniu swobodnym**, umożliwiającym wyzwalenie i samoczynne otwarcie niezależnie od sposobu manipulowania urządzeniem napędowym (dźwignią lub przyciskiem). Dzięki temu bezskuteczne są uporne próby załączenia obwodu dotkniętego uszkodzeniem i podobne nieprawidłowe manipulacje urządzeniem napędowym.

Obowiązuje **rozłączanie pełnobiegunowe**, również toru neutralnego, jeśli występuje. Nie ma tu odstępstw, jak w odniesieniu do wyłączników nadprądowych. Styki ruchome wszystkich biegunów powinny być tak powiązane mechanicznie, że wszystkie bieguny – z wyjątkiem neutralnego, jeśli występuje – zamykają się i otwierają praktycznie jednocześnie zarówno przy działaniu samoczynnym, jak i przy manipulowaniu napędem ręcznym. Rozłączalny biegun neutralny powinien mieć **zestyk o przedłużonej styczności**, zamykający się wcześniej, a otwierający później niż inne bieguny. Jest to szczególnie ważne w przypadku wyłączników czterobiegunowych instalowanych w obwodach trójfazowych. Nowa norma [15] tylko pozornie formułuje to inaczej: biegun neutralny powinien zamykać się nie później, a otwierać nie wcześniej niż inne bieguny. Znaczy to dokładnie to samo, bo nie można zagwarantować idealnej jednoczesności zamykania i otwierania zestyków łącznika wielobiegunowego.

Od współczesnych wyłączników różnicowoprądowych wymaga się ponadto, aby były **łącznikami izolacyjnymi**, tzn. w stanie otwartym stwarzały w obwodzie **przerwę izolacyjną bezpieczną**; informacja o tej właściwości może być podana na obudowie w postaci symbolu graficznego odłącznika. Wyłącznik różnicowoprądowy powinien mieć **wskaźnik stanu otwarcia** oraz **wskaźnik stanu zamknięcia**, łatwo dostrzegalny z przodu wyłącznika również po nałożeniu pokrywy lub obudowy. Wskaźnik świetlny, jeśli jest, nie powinien być jedynym wskaźnikiem stanu zamknięcia. Wszelkie oznaczenia powinny być dobrze widoczne po zainstalowaniu wyłącznika.

Stan otwarcia oznacza się w skali międzynarodowej kółkiem **O**, a stan zamknięcia prostą linią pionową **I**; dopuszcza się dodatkowe, krajowe oznaczenia bądź napisy. Jeżeli do tego celu uży-

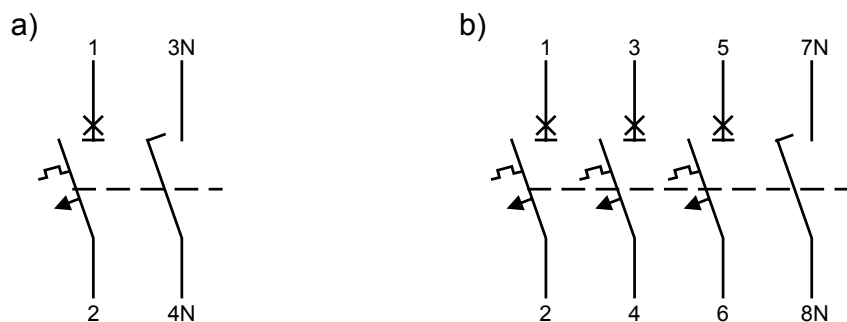
wa się kolorów, to czerwony powinien oznaczać stan zamknięcia, a zielony – stan otwarcia. Jeżeli jest oczywistym, że do zamykania wyłącznika służy przycisk (bez samoczynnego powrotu), to wyraźny stan wciśnięcia tego przycisku można uważać za wystarczający wskaźnik stanu zamknięcia. W wyłącznikach o napędzie za pomocą dwóch przycisków, przycisk służący tylko do otwierania powinien być czerwony i/lub oznaczony symbolem graficznym **O**. Barwy czerwonej nie należy używać do oznaczania jakiegokolwiek innego przycisku wyłącznika (np. przycisku TEST).

Wyłącznik różnicowoprądowy powinien mieć **napęd ręczny** umożliwiający zamykanie i otwieranie. Elementem napędowym współczesnych wyłączników na ogół jest dźwignia. Kierunkiem zamykania jest wtedy kierunek ku górze albo w prawo. Tego, kto wyłącznik zainstaluje w położeniu naruszającym tę zasadę, w razie wypadku dającego się powiązać z takim błędem, czeka rozmowa z prokuratorem wspomaganym przez biegłego.

Oznaczenia zacisków torów głównych wyłączników różnicowoprądowych są takie, jak w przypadku innych łączników elektroenergetycznych. Kolejne bieguny mają oznaczenia odpowiednio: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8. **Biegun neutralny**, odmienny od pozostałych, wyróżnia się dodając literę N, np. w wyłączniku dwubiegunowym: 1-2, 3N-4N lub po prostu: 1-2, N-N, a w wyłączniku czterobiegunowym: 1-2, 3-4, 5-6, 7N-8N lub po prostu: 1-2, 3-4, 5-6, N-N. Poprawna identyfikacja i poprawne przyłączenie bieguna neutralnego jest ważne z następujących powodów:

- zestyki bieguna neutralnego mają przedłużoną styczeńność (rys. 1), co zapobiega niesymetrii napięć fazowych w obwodzie trójfazowym w razie trwałego niepełnobiegunowego zetknięcia się styków,
- do bieguna neutralnego może być przyłączony jeden z przewodów zasilających obwód kontrolny,
- w wyłącznikach różnicowoprądowych z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym wyzwalacza nadprądowego z zasady nie ma w biegunie neutralnym.

Jeżeli nie jest obojętne, do których zacisków przyłącza się zasilanie, a do których obciążenie obwodu, to zaciski należy opatrzyć napisami zasilanie/obciążenie albo strzałkami pokazującymi kierunek przepływu mocy.



Rys. 1. Graficzne oraz alfanumeryczne oznaczenia biegunów i samych zestyków wyłączników różnicowoprądowych izolacyjnych z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym (RCBO): a) wyłącznik dwubiegunowy; b) wyłącznik czterobiegunowy

Wyłączniki różnicowoprądowe powinny być urządzeniami **klasy ochronności II**. Wymaganie to spełnia się wyposażając wyłącznik w ochronną osłonę izolacyjną o należytej wytrzymałości mechanicznej i odpowiednich własnościach elektrycznych. Niedopuszczalne są jakiejkolwiek części przewodzące dostępne na obudowie. Jeżeli stopień ochrony obudowy jest inny niż IP 20, to powinien być na niej oznaczony.

Każdemu łącznikowi przypisuje się określone parametry zdolnościowe wyrażone liczbowo i ewentualnie opisowo, które informują użytkowników, do jakich celów i przy jakich narażeniach sieciowych oraz środowiskowych dany łącznik może być zastosowany i czego można po nim oczekiwać. Niektóre z tych parametrów dotyczą wszelkich łączników (np. napięcie znamionowe i prąd znamionowy ciągły), inne są specyficznymi cechami określonej grupy łączników. Większość z nich jest podana na samym wyłączniku w postaci wartości liczbowych bądź umownych symboli graficz-

nych, pozostałe można znaleźć w katalogach.

Napięcie znamionowe U_n wyłączników różnicowoprądowych jest oczywiście związane z napięciem znamionowym izolacji, jak w każdym aparacie i urządzeniu: określa wymagania odnośnie do odstępów izolacyjnych powierzchniowych i powietrznych, wytrzymałości elektrycznej przerwy bezpiecznej (wyłączników izolacyjnych) oraz rezystancji izolacji. Jest też związane – jak w każdym wyłączniku – ze zdolnością łączenia roboczą, a zwłaszcza – ze zdolnością łączenia zwarciovą. Jest też związane z zasilaniem członu kontrolnego, którego prawidłowe działanie wymaga zasilania napięciem o wartości z określonego przedziału. Aktualnie zalecane wartości napięcia znamionowego wyłączników różnicowoprądowych zestawiono w tabl. 1.

Tablica 1. Zalecane wartości napięcia znamionowego wyłączników różnicowoprądowych [15]

Wyłącznik	Obwód	Napięcie znamionowe [V]
Jednobiegunowy o dwóch torach prądowych	Dwuprzewodowy – przewód fazowy i uziemiony przewód środkowy	110, 120
	Jednofazowy – przewód fazowy i przewód neutralny	230
Dwubiegunowy o dwóch torach prądowych	Dwuprzewodowy – przewód fazowy i uziemiony przewód środkowy	110, 120
	Jednofazowy – przewód fazowy i przewód neutralny	230
	Jednofazowy – dwa przewody fazowe	400
Trójbiegunowy o trzech torach prądowych	Trójfazowy, trójprzewodowy	400
Trójbiegunowy o czterech torach prądowych	Trójfazowy, czteroprzewodowy	400
Czterobiegunowy	Trójfazowy, czteroprzewodowy	400

Zalecane przez normę wartości napięcia znamionowego wyłączników różnicowoprądowych pokrywają następujące zastosowania:

110 i 120 V – wyłączniki 2-biegunowe do obwodów jednofazowych (standard północnoamerykański),

230 V – wyłączniki do obwodów jednofazowych (standard ogólnoswiatowy),

400 V – wyłączniki 3- i 4-biegunowe do obwodów trójfazowych 230/400 V (standard ogólnoswiatowy) oraz wyłączniki 2-biegunowe do obwodów zasilanych napięciem międzyprzewodowym 400 V.

Spotyka się ponadto wyłączniki o napięciu znamionowym 500 V przeznaczone do obwodów trójfazowych 500 V, produkowane według przepisów niemieckich VDE. W razie potrzeby użycia wyłącznika w obwodzie 690 V lub 1000 V trzeba uciec się do konstrukcji zespolonej: przekaźnika różnicowoprądowego współpracującego z wyłącznikiem nadprądowym o stosownych parametrach.

Częstotliwość znamionowa zwykłych wyłączników różnicowoprądowych wynosi 50 Hz i/lub 60 Hz, bo te częstotliwości występują w elektroenergetyce w różnych rejonach świata. Wartość częstotliwości ma wpływ na nagrzewanie toru prądowego, na zdolność łączenia, a przede wszystkim – na działanie różnicowego układu wyzwalającego. Wyłącznik bez oznaczonej częstotliwości prądu nadaje się do obwodów $f = 50$ Hz (60 Hz); w instalacjach prądu zwiększonej częstotliwości są potrzebne wyłączniki do tego przystosowane i odpowiednio oznaczone (np. 400 Hz).

Prąd znamionowy ciągły I_n wyłączników różnicowoprądowych, czyli największy prąd, jakim wolno je długotrwale obciążać w stanie zamkniętym, jest wybrany [15] z ciągu liczb normal-

nych R10¹: 6 – 10 – 13 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 A; norma podaje ponadto wartości: 160 – 200 – 250 – 400 – 630 A, dotychczas niewykorzystywane. Jeżeli jest potrzebny wyłącznik o większym prądzie znamionowym ciągłym, mający człon zabezpieczeniowy różnicowoprądowy, to stosuje się osobny przekaźnik różnicowoprądowy współpracujący z wyłącznikiem o potrzebnym prądzie znamionowym ciągłym, wyposażonym w wyzwalacz napięciowy zanikowy.

Badania nagrzewania wyłączników różnicowoprądowych przeprowadza się prądem równym prądowi znamionowemu ciągłemu I_n . W razie przeciążenia wyłącznika bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego (RCCB) najbardziej są narażone ciasno nawinięte przewody uzwojeń przekładnika sumującego. Osiągają one szczególnie wysokie przyrosty temperatury, a przy większych przeciążeniach ($> 2I_n$) mogą powstawać zwarcia międzyzwojowe. Przed uszkodzeniem nie chroni bezpiecznik dobezpieczający, który zwykle ma prąd znamionowy większy niż prąd znamionowy ciągły wyłącznika. Na przykład wyłącznik różnicowoprądowy o prądzie znamionowym ciągłym $I_n = 40$ A dobezpiecza się wkładką gG 63 A o górnym prądzie probierczym $I_2 = 100$ A. Największy długotrwale występujący przyrost temperatury torów prądowych może teoretycznie osiągać wartość $(100/40)^2 \approx 6$ razy większą niż przy prądzie znamionowym. Ochrona od takich zdarzeń polega na skrupulatnym przestrzeganiu zasad projektowania i eksploatacji instalacji, a zabezpieczenie przed ich skutkami – na wbudowanym w uzwojenia przekładnika czujniku temperatury inicjującym otwarcie przeciążonego wyłącznika za pośrednictwem dodatkowego uzwojenia na rdzeniu przekładnika sumującego oraz układu wyzwalającego różnicowoprądowego.

Znamionowy prąd różnicowy zadziałania $I_{\Delta n}$ wyłączników różnicowoprądowych jest najważniejszym parametrem z punktu widzenia pełnionej przez nie funkcji ochronnej, jest parametrem tylko im właściwym. Najprościej jest on definiowany dla wyłączników o wyzwalaniu typu AC: podana przez wytwórcę (najmniejsza) wartość skuteczna sinusoidalnego prądu różnicowego o częstotliwości znamionowej, przy której w określonych warunkach wyłącznik powinien zadziałać. Powinien on być jak najmniejszy ze względu na skuteczność ochrony, ale zarazem wystarczająco duży, aby nie następowały zbędne zadziałania powodowane przez ustalone bądź przejściowe prądy upływowe albo niewybiórcze działanie wyłączników różnicowoprądowych zainstalowanych na kolejnych stopniach zabezpieczeń. Zalecane [15] wartości znamionowego prądu różnicowego zadziałania $I_{\Delta n}$ wyłączników różnicowoprądowych są następujące: 0,006 – 0,01 – 0,03 – 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,5 – 1 – 2 – 3 – 5 – 10 – 20 – 30 A. Elektrykom zauroczonym wyłącznikami 30 mA warto zwrócić uwagę, że są też inne, że powyżej 30 mA jest aż jedenaście zalecanych wartości $I_{\Delta n}$, a poniżej tylko dwie. Tylko jedna z nich – 10 mA – wchodzi w rachubę w Polsce, w instalacjach 230 V, i tylko w wyjątkowych okolicznościach. Druga – 6 mA – jest standardem amerykańskim i jest przeznaczona tylko do instalacji o napięciu nieprzekraczającym 120 V i tylko do obwodów odbiorczych.

Tablica 2. Podział wyłączników różnicowoprądowych ze względu na czułość i przydatność do celów ochronnych

Wyłączniki	Znamionowy prąd różnicowy zadziałania	Przydatność do ochrony		
		przeciwporażeniowej uzupełniającej	przeciwpożarowej	przeciwporażeniowej dodatkowej
wysokoczułe	$I_{\Delta n} \leq 30$ mA	X	X	X
średnioczułe	$30 < I_{\Delta n} \leq 500$ mA		X	X
niskoczułe	$I_{\Delta n} > 500$ mA			X



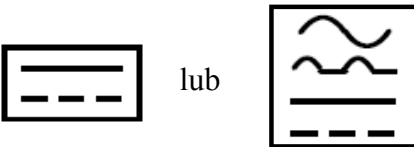
¹ Ciąg liczb normalnych R10 – ciąg umownych liczb powstałych przez zaokrąglenie wyrazów ciągu geometrycznego o ilorazie $\sqrt[10]{10}$; norma pomija wartość 8 A, jako zbyt mało różniącą się od sąsiednich.

Ze względu na znamionowy prąd różnicowy zadziałania $I_{\Delta n}$ wyłączniki różnicowoprądowe można podzielić na trzy grupy korespondujące z ich przydatnością do celów ochronnych (tabl. 2)

Jeżeli wyłącznik umożliwia nastawianie wartości prądu zadziałania spośród gamy wartości, to za znamionowy prąd różnicowy zadziałania uważa się największą możliwą wartość nastawczą.

Typ wyzwania wyłącznika czyli zakres uczulenia na kształt przebiegu prądu różnicowego jest nieodzownym uzupełnieniem informacji o czułości wyłącznika, czyli informacji o jego znamionowym prądzie różnicowym zadziałania $I_{\Delta n}$. Informacje na ten temat, zestawione w tabl. 3, pochodzą z najnowszych norm międzynarodowych [15, 17]. W stosunku do wyłączników o wyzwaniu typu B są one ostrzejsze i bardziej kompletne niż w poprzednich normach. Warto na to zwrócić uwagę, bo liczne wyłączniki B już zainstalowane i nadal sprzedawane nie w pełni te wymagania spełniają. Aby umożliwić odróżnianie „starych” od „nowych” wyłączników B, zmodyfikowano wymagany symbol graficzny umieszczany na obudowie wyłącznika.

Tablica 3. Rodzaje wyłączników różnicowoprądowych ze względu na zakres uczulenia na kształt przebiegu prądu różnicowego [15, 17]

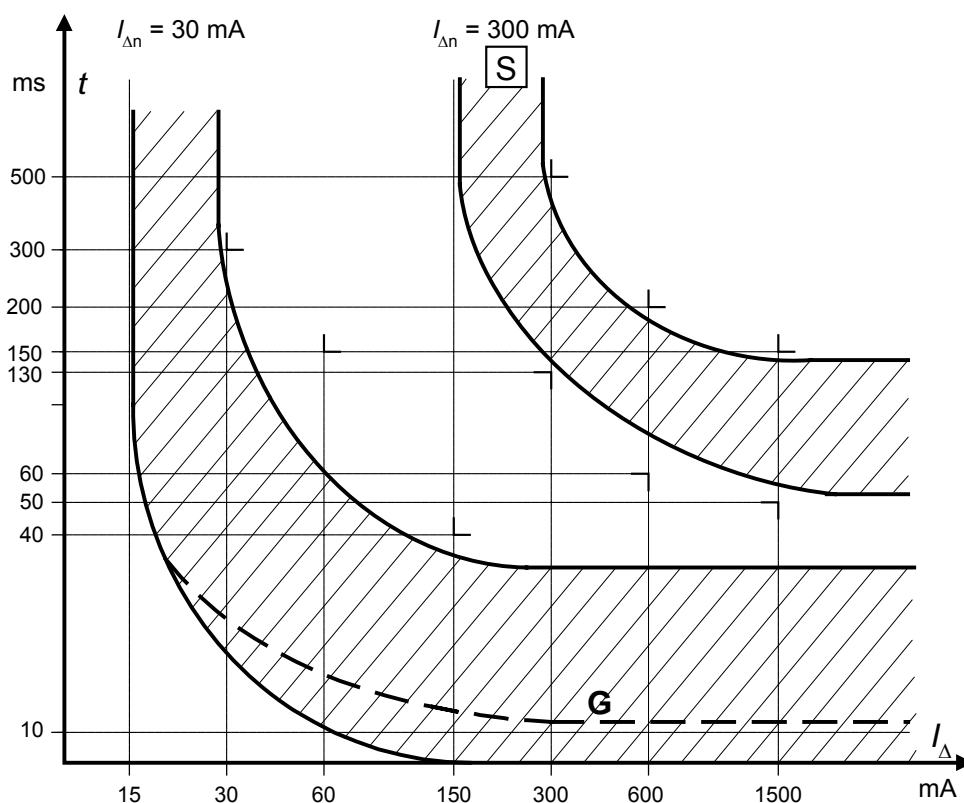
Oznaczenie literowe	Symbol graficzny	Przebieg prądu różnicowego, pojawiającego się nagle lub stopniowo narastającego, przy którym jest zapewnione wyzwanie wyłącznika
AC		– prąd przemienny sinusoidalny (tylko 50/60 Hz, jeżeli nie jest podana górna wartość dopuszczalnego zakresu częstotliwości)
A		– jak dla wyłącznika AC, – prąd pulsujący stały, – prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną 6 mA, z ewentualnym sterowaniem fazowym i niezależnie od biegunowości.
B		– jak dla wyłącznika A, – prąd przemienny sinusoidalny o częstotliwości nieprzekraczającej 1000 Hz, – prąd przemienny sinusoidalny ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4I_{\Delta n}$ oraz 10 mA, – prąd pulsujący stały ze składową wygładzoną o wartości większej spośród dwóch: $0,4I_{\Delta n}$ i 10 mA, – prąd stały z układów prostownikowych, tj.: - z prostownika dwupulsowego zasilanego napięciem międzyprzewodowym w przypadku wyłączników 2-, 3- i 4-biegunowych, - z prostownika trzypulsowego (układ gwiazdy) albo z prostownika sześciopulsowego w przypadku wyłączników 3- i 4-biegunowych, – prąd stały wygładzony, z ewentualnym sterowaniem fazowym i niezależnie od biegunowości.

W wytwórni wyłączniki podlegają badaniom typu i badaniom wyrobu w celu sprawdzenia, czy spełniają wymagania podane w normach. Niektóre wyroby spełniają niektóre wymagania, również odnośnie do zakresu uczulenia na kształt przebiegu prądu różnicowego, z wyraźnym zapasem. Reagują na przebiegi prądu różnicowego, których wykrywać nie muszą. Wytwórca może o tym w ogóle nie wiedzieć, stosownych prób nie przeprowadza, bo nie jest do tego zobowiązany. Użytkownicy, którzy takie ponadnormatywne własności przypadkiem wykryją, nie powinni swoich spostrzeżeń i wniosków uogólniać, bo mogą one dotyczyć tylko szczególnego wykonania i określonej serii wyłączników. Można to sprawdzić tylko w odpowiednio wyposażonym i kompetentnym labo-

ratorium.

Zwłoczność wyzwala wyłącznika różnicowoprądowego jest potrzebna, ze względu na wybiórczość działania, w wyłącznikach zwłocznych, selektywnych S, które w instalacji poprzedzają inne wyłączniki różnicowoprądowe (bezwłoczne bądź krótkozwłoczne). Czas przetrzymywania prądu różnicowego przez wyłącznik selektywny powinien być, z pewnym marginesem bezpieczeństwa, większy niż czas wyłączenia wyłączników różnicowoprądowych, które on poprzedza. Ten warunek powinien być spełniony przy dowolnej wartości prądu różnicowego.

Oznacza to, że pasmowe charakterystyki czasowo-prądowe $t = f(I_{\Delta})$ wyłączników zainstalowanych na kolejnych stopniach zabezpieczeń nie powinny się stykać, co więcej – powinny być odpowiednio oddalone od siebie, jak na rys. 2. Znaczniki podają wymagania norm [14, 15] odnośnie do przebiegu charakterystyki dla wybranych tytułem przykładu wyłączników: bezwłocznego $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ i zwłocznego $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$. Podane wartości czasu przetrzymywania i czasu wyłączenia można odnosić do innych wyłączników odpowiednio bezwłocznych i zwłocznych zachowując na osi odciętych tę samą krotność prądu $I_{\Delta n}$.



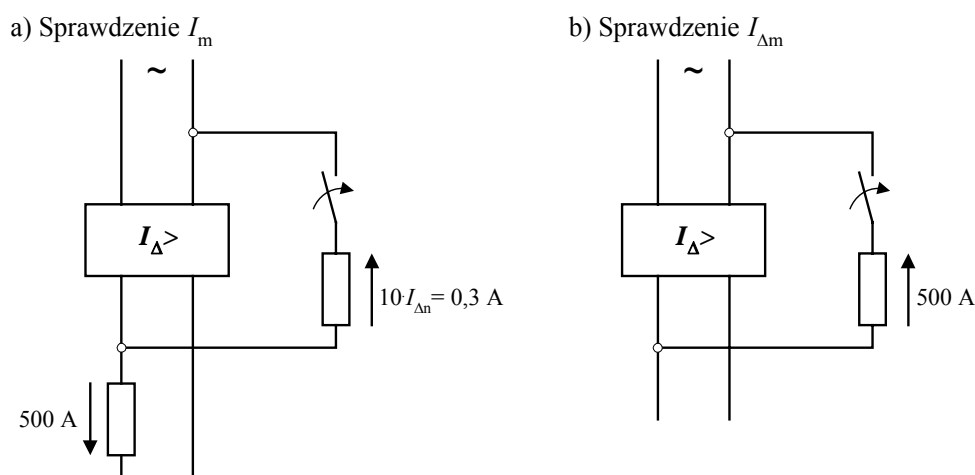
Rys. 2. Zestawienie pasmowych charakterystyk czasowo-prądowych dwóch wyłączników różnicowoprądowych: bezwłocznego $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ i zwłocznego $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$

Na rys. 2 wrysowano linią przerywaną, oznaczoną G, charakterystykę czasów przetrzymywania wyłączników krótkozwłocznych, które mają gwarantowany czas przetrzymywania co najmniej 10 ms. Dla wyłączników bezwłocznych linia czasów przetrzymywania obniża się do poziomu znacznie niższego, nawet około 1 ms; te wartości nie są kontrolowane i nie są gwarantowane przez wytwórcę. Sam wyzwalacz różnicowy niespolaryzowany o odpadającej zworze może mieć czas własny poniżej 1 ms.

Natomiast obie odmiany wyłączników, bezwłoczne i krótkozwłoczne, spełniają te same wymagania odnośnie do przebiegu linii największych dopuszczalnych czasów wyłączenia, czyli górnej linii ograniczającej charakterystykę pasmową na rys. 2. Wobec tego obie odmiany wyłączników, bezwłoczne i krótkozwłoczne, obowiązują te same warunki wybiórczego współdziałania

z poprzedzającymi wyłącznikami zwłocznymi.

Znamionowa zdolność załączania i wyłączania wyłącznika różnicowoprądowego I_m powinna być [15] niemniejsza niż większa z dwóch wartości: $10I_n$ oraz 500 A ¹. Badanie odbywa się w umownych warunkach probierczych scharakteryzowanych wartością skuteczną składowej okresowej prądu, współczynnika mocy obwodu probierczego i przebiegu napięcia powrotnego. Dostępne na rynku wyłączniki o prądzie znamionowym ciągłym I_n nieprzekraczającym 50 A na ogół mają zdolność załączania i wyłączania równą 500 A , czyli $I_m \geq 10I_n$, natomiast wyłączniki o prądzie znamionowym ciągłym $I_n \geq 63\text{ A}$ mają zdolność załączania i wyłączania $I_m = 10I_n$. Taki poziom zdolności wyłączania ($\geq 10I_n$) pozwala zakwalifikować aparat łączeniowy do kategorii wyłączników. Identyczne wymaganie dotyczy zdolności znamionowej załączania i wyłączania prądu różnicowego $I_{\Delta m}$.



Rys. 3. Warunki sprawdzania: a) zdolności znamionowej załączania i wyłączania I_m ; b) zdolności znamionowej załączania i wyłączania prądu różnicowego $I_{\Delta m}$ (wartości liczbowe przykładowe – objaśnienia w tekście)

Jak widać, obciążalność zwarciovą wyłączników różnicowoprądowych charakteryzuje się dwoma parametrami: znamionową zdolnością załączania i wyłączania (I_m) oraz znamionową zdolnością załączania i wyłączania prądu różnicowego ($I_{\Delta m}$). Te dwa terminy są podobne, wartości obu parametrów bywają jednakowe, ale rozróżnienie ich może być ważne, zwłaszcza kiedy ich wartości się różnią. Różnicę między tymi pojęciami najlepiej zrozumieć widząc sposób sprawdzania obu parametrów. Przykładowe schematy na rys. 3 i podane na nim wartości liczbowe dotyczą wyłącznika różnicowoprądowego dwubiegunowego o prądzie znamionowym $16\div 40\text{ A}$ i znamionowym prądzie różnicowym zadziałania 30 mA .

Sprawdzenie znamionowej zdolności załączania i wyłączania (I_m) przeprowadza się następująco: do obu biegunów wyjściowych wyłącznika przyłącza się rezystor wymuszający prąd 500 A , po czym w obwodzie przyłączonym jak obwód kontrolny wyłącznika wymusza się prąd $10I_{\Delta n} = 0,3\text{ A}$. Wyłącznik otwiera się, oba bieguny wyłączają 500 A , sprawdza się poprawność czynności wyłączania i stan wyłącznika po jej wykonaniu.

Sprawdzenie znamionowej zdolności załączania i wyłączania prądu różnicowego ($I_{\Delta m}$) przeprowadza się następująco: w obwodzie przyłączonym jak obwód kontrolny wyłącznika wymusza się prąd 500 A , Wyłącznik otwiera się, jeden biegun wyłącza 500 A , sprawdza się poprawność operacji wyłączania i stan wyłącznika po jej wykonaniu.

Znamionowa obciążalność zwarciovą przepustowa, tzn. odporność zamkniętego wyłącz-

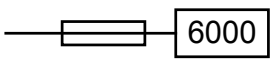
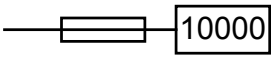
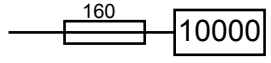
¹ Tylko 250 A w przypadku przenośnych urządzeń różnicowoprądowych (PRCD) i gniazd wtyczkowych z członem różnicowoprądowym (SRCD).

nika na cieplne i elektrodynamiczne skutki przepływu prądu zwarciovego, zagrażające szepieniem styków i brakiem zadziałania w razie wystąpienia prądu różnicowego, zależy od tego, z jakim wykonaniem wyłącznika ma się do czynienia:

- **RCCB – Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego** (ang. *residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection*), o niedużej zdolności wyłączania, z zasady wymagają dobezpieczenia.
- **RCBO – Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym** (ang. *residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection*) mają zdolność wyłączania porównywalną z wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi. Wymagają dobezpieczenia, jeśli warunki zwarciovie w miejscu zainstalowania przekraczają ich zwarciovą zdolność wyłączania.

W obu wypadkach wytwórca podaje na wyłączniku jako obciążalność zwarciovą największy dopuszczalny **prąd zwarciový początkowy** w miejscu zainstalowania wyłącznika i dodaje symbol graficzny bezpiecznika, jeśli dobezpieczenie jest konieczne. Jeżeli największy dopuszczalny prąd znamionowy wkładki klasy gG jest większy niż 63 A, wartość jego jest podana przy symbolu bezpiecznika. Jako wykonanie normalne traktuje się obciążalność zwarciovą 6000 A przy dobezpieczeniu wkładką gG 63 A, stanowiącą standardowe główne zabezpieczenie europejskiej instalacji mieszkaniowej. Przykładowe oznaczenia podano w tabl. 4.

Tablica 4. Przykładowe oznaczenia obciążalności zwarcioviej przepustowej na obudowie wyłączników

Oznaczenie graficzne	Interpretacja
	Obciążalność zwarciovą przepustową 6 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG 63 A ($I_{bn} \leq 63$ A)
	Obciążalność zwarciovą przepustową 10 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG 63 A ($I_{bn} \leq 63$ A)
	Obciążalność zwarciovą przepustową 10 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG 160 A ($I_{bn} \leq 160$ A)

Nowa norma [15] wymaga od wytwórcy podawania dla każdego wyłącznika dwóch parametrów charakteryzujących jego obciążalność zwarciovą przepustową cieplną i elektrodynamiczną:

- wytrzymawanej **całki Joule’a** I^2t [A^2s], która powinna być niemniejsza niż **całka wyłączenia** [A^2s] bezpiecznika bądź wyłącznika nadprądowego stanowiącego dobezpieczenie rozważanego wyłącznika różnicowoprądowego oraz
- wytrzymawanego **prądu szczytowego** [kA], który powinien być niemniejszy niż **prąd ograniczony** [kA] bezpiecznika bądź wyłącznika nadprądowego stanowiącego dobezpieczenie rozważanego wyłącznika różnicowoprądowego (oba parametry są wyrażone wartością szczytową prądu).

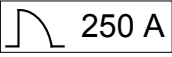

Z powyższego sformułowania wynika, że powinny być jednocześnie spełnione obie nierówności; nie wystarcza dotrzymanie tylko jednego z tych warunków.

Odporność na prądy różnicowe przejściowe, które nie są wynikiem uszkodzenia izolacji doziemnej w chronionym obwodzie, jest ważna z punktu widzenia zapobiegania zbędnemu wyzwaniu wyłączników i wyłączaniu odbiorników stawiających wysokie wymagania co do ciągłości zasilania.

Odpornością na prąd różnicowy przejściowy **przy załączaniu obwodu** o znacznych pojemnościach doziemnych (np. długich tras przewodów o metalowych osłonach bądź ekranach albo filtrów przeciwzakłóceńowych w sprzęcie elektronicznym i energoelektronicznym) cechują się **wyłączniki krótkozwłoczne** oznaczane w Austrii G (ang. *general application*), w Niemczech VSK, KVP lub KV (niem. *kurzverzögert*), a we Francji Si, Hpi, HI (franc. *haute immunité*). Przetrzymują one bez wyzwania nawet duże prądy różnicowe przejściowe przez czas co najmniej 10 ms. W tym

celu w wytwórni każdy biegun wyłącznika sprawdza się dwukrotnie półfalami prądu o częstotliwości sieciowej, o biegunowości ujemnej i dodatniej.

Tablica 5. Przykładowe oznaczenia odporności burzowej wyłączników różnicowoprądowych

Oznaczenie	Interpretacja
 250 A	Wyłącznik bezzwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 250 A o przebiegu 8/20 μ s
G lub KV lub HI	Wyłącznik krótkozwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 3 kA, 8/20 μ s
 S	Wyłącznik zwłoczny odporny na prąd różnicowy udarowy 5 kA, 8/20 μ s

Duże znaczenie ma **odporność burzowa** wyłączników różnicowoprądowych. W następstwie przepięć udarowych pochodzenia atmosferycznego przedostających się do instalacji ładują się pojemności doziemne przewodów i płyną do ziemi prądy przejściowe o przebiegu udarów i/lub tłumionych oscylacji. Wartość szczytowa przepięcia może narastać w wyniku odbicia fali od końca trasy przewodów. Odporność na prądy różnicowe udarowe jest szczególnie ważna w przypadku wyłączników przyłączeniowych (w rozdzielnicy głównej lub w złączu). Tam narażenia z tytułu przepięć atmosferycznych są największe, a konsekwencje zbędnych zadziałań dotyczą całej instalacji odbiorczej.


Podstawowym badaniem jest próba odporności na **prąd różnicowy udarowy** o kształcie 8/20 μ s, przy czym wartość szczytowa prądu zależy od rodzaju wyłącznika (tabl. 5).

Bada się też odporność na **prąd różnicowy oscylacyjny tłumiony**. Wyłącznik powinien przetrzymać bez zadziałania pięć lub dziesięć przebiegów oscylacyjnych tłumionych o przebiegu 0,5 μ s/100 kHz, o biegunowości ujemnej i dodatniej, o wartości szczytowej kilkuset amperów.

W przypadku wyłączników o działaniu zależnym od napięcia sieci, które mają obwód wyzwalający połączony galwanicznie z obwodem głównym, sprawdza się odporność obwodu wyzwalającego na przepięcia. Podczas badania napięciem udarowym 6 lub 8 kV, 1,2/50 μ s nie powinno dochodzić do uszkodzeń izolacji bądź elektroniki ani do zbędnych zadziałań.

Dopuszczalny zakres temperatury otoczenia określa się ze względu na skomplikowaną budowę wyłączników różnicowoprądowych, a w szczególności delikatny wyzwalacz różnicowy o odpadającej zworze i niektóre elementy elektroniczne. Są dwa wykonania: podstawowe i mrozo odporne (tabl. 6). To drugie jest przewidziane do pracy na wolnym powietrzu, zwłaszcza w instalacjach na placach budowy, w ograniczonych przestrzeniach przewodzących, na terenach targowisk i festynów.

Tablica 6. Oznaczenia dopuszczalnego zakresu temperatury otoczenia wyłączników różnicowoprądowych

-5°C lub brak oznaczenia temperatury	Wyłącznik w wykonaniu podstawowym, do pracy w miejscu o temperaturze otoczenia od -5°C do +40°C (w ogrzewanym lub nieogrzewanym pomieszczeniu)
	Wyłącznik w wykonaniu mrozo odpornym, przystosowany do pracy w miejscu o temperaturze otoczenia od -25°C do +40°C (na wolnym powietrzu)

Te zakresy temperatury nie są imponujące zważywszy, że amerykańskie wyłączniki GFCI są przystosowane do pracy w zakresie temperatury otoczenia od -35 °C do 66 °C.

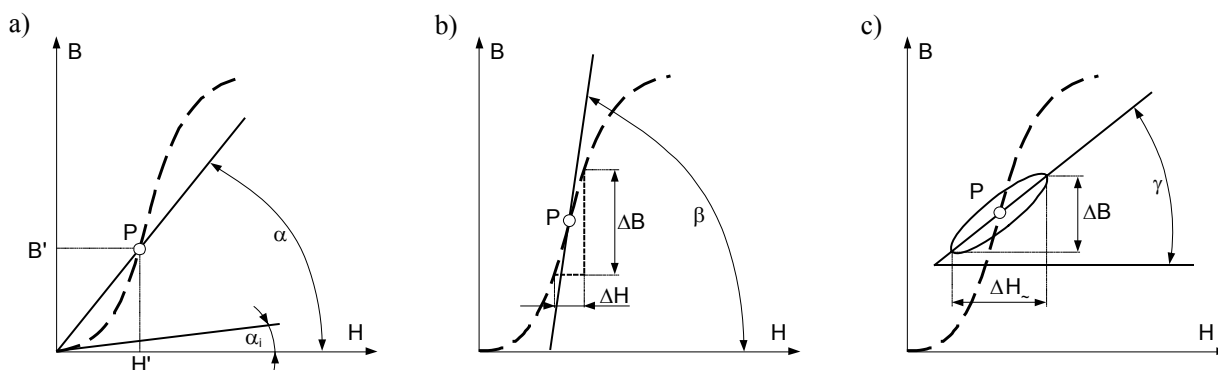
2. Budowa i własności przekładnika sumującego

Przekładnik prądowy sumujący jest – obok obwodu wyzwającego – jednym z dwóch głównych podzespołów wyłącznika różnicowoprądowego decydujących o jego własnościach ochronnych. Podstawowym problemem związanym z jego konstrukcją, zasadą działania i zakresem stosowania nie jest:

- ani minimalizacja błędów prądowego i kąтового w normalnych warunkach pracy, jak to jest w przypadku przekładników prądowych pomiarowych,
- ani dokładność transformacji prądów pierwotnych o dużej krotności, w stosunku do znamionowego prądu pierwotnego, jak to jest w przypadku większości przekładników prądowych zabezpieczeniowych.

Głównym problemem w przypadku przekładnika sumującego do wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwaniu bezpośrednim jest pobór z obwodu pierwotnego mocy wystarczająco dużej do zadziałania wyłączacza różnicowego w obwodzie wtórnym. Pod tym względem rozpatrywane przekładniki sumujące mają pewne cechy wspólne z przekładnikami składowej zerowej prądu (przekładnikami Ferrantiego), stosowanymi od dawna do zasilania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w urządzeniach wysokiego napięcia. W obu przypadkach moc użyteczna pochodzi z pojawiającego się w obwodzie pierwotnym prądu różnicowego o wartości niewielkiej w stosunku do prądu obciążenia. Jednakowoż w porównaniu z układami zabezpieczeniowymi składowej zerowej prądu, wyłącznikom różnicowoprądowym stawia się wymagania znacznie surowsze i bardziej zróżnicowane odnośnie do uczulenia na wartość wykrywanego prądu i kształt jego przebiegu w czasie.

Podstawowym parametrem opisującym własności magnetyczne materiału na rdzeń przekładnika sumującego jest jego **przenikalność magnetyczna** $\mu = B/H$, czyli stosunek indukcji magnetycznej B do natężenia wzbudzającego pola magnetycznego H . Na rys. 4 przedstawiono, na tle pierwotnej charakterystyki magnesowania, interpretacje graficzne kilku pojęć przenikalności magnetycznej, użytecznych przy rozpatrywaniu przydatności ferromagnetyków na rdzenie przekładników sumujących.



Rys. 4. Interpretacja graficzna przenikalności magnetycznej: a) statycznej; b) różniczkowej; c) odwracalnej

Przenikalność magnetyczna statyczna w punkcie P charakterystyki magnesowania (rys. 4a) jest wyrażona zależnością:

$$\mu_s = \frac{B'}{H'} = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Jest to wartość przenikalności magnetycznej w pełni miarodajna przy ustalonej pracy układu w punkcie P ze stałym wzbudzeniem H , a przy pracy ze zmiennym wzbudzeniem przedstawia bieżącą wartość przenikalności. W punkcie styczności pierwotnej charakterystyki magnesowania z prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych wartość przenikalności statycznej jest największa; jest to **przenikalność magnetyczna maksymalna** μ_{\max} (ang. *maximum permeability*).

Z kolei przesuwając rozpatrywany punkt pracy P dostatecznie blisko początku układu ($H \rightarrow 0$), otrzymuje się **przenikalność magnetyczną początkową** μ_i (ang. *initial permeability*), tak ważną w przypadku rdzeni przekładników prądowych [4].

Przenikalność magnetyczna różniczkowa μ_{dif} (ang. *differential permeability*), zwana też przenikalnością dynamiczną, w punkcie P charakterystyki magnesowania (rys. 4b) jest określona jako pochodna indukcji względem natężenia pola w rozpatrywanym punkcie:

$$\mu_{\text{dif}} = \frac{dB}{dH} \approx \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \text{tg} \beta \quad (2)$$

Określa ona nachylenie charakterystyki magnesowania w określonym punkcie. Jest to wartość przenikalności miarodajna przy rozpatrywaniu niewielkich zmian wzbudzenia w pobliżu rozpatrywanego punktu pracy P.

Przenikalność magnetyczna odwracalna μ_{rev} (ang. *reversible permeability*), zwana też przenikalnością rewersyjną, w punkcie P charakterystyki magnesowania (rys. 4c) jest określona jako pochodna indukcji względem składowej przemiennej natężenia pola przy powtarzalnym odwracalnym przemagnesowywaniu wokół rozpatrywanego punktu:

$$\mu_{\text{rev}} = \frac{dB}{dH_{\sim}} \approx \lim_{\Delta H_{\sim} \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H_{\sim}} = \text{tg} \gamma \quad (3)$$

Jest to wartość przenikalności miarodajna przy rozpatrywaniu zjawisk w obwodach magnetycznych, w których występuje strumień magnetyczny przemienny (tzn. dwukierunkowy symetryczny względem osi czasu) z jednoczesnym podmagnesowaniem strumieniem stałym, jak w przekładnikach sumujących wyłączników o wyzwaniu typu A.

W powyższych wzorach wartości przenikalności magnetycznej są wartościami bezwzględnymi, wyrażonymi w henrach na metr (H/m), bo to upraszcza ich interpretację graficzną; na wszystkich wykresach (rys. 4a, b, c) przenikalność bezwzględna jest równa tangensowi kąta między wskazaną prostą a osią odciętych. W praktyce powszechnie operuje się **przenikalnością względną**, tzn. poprzedzonymi wartościami odniesionymi do przenikalności próżni $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m:

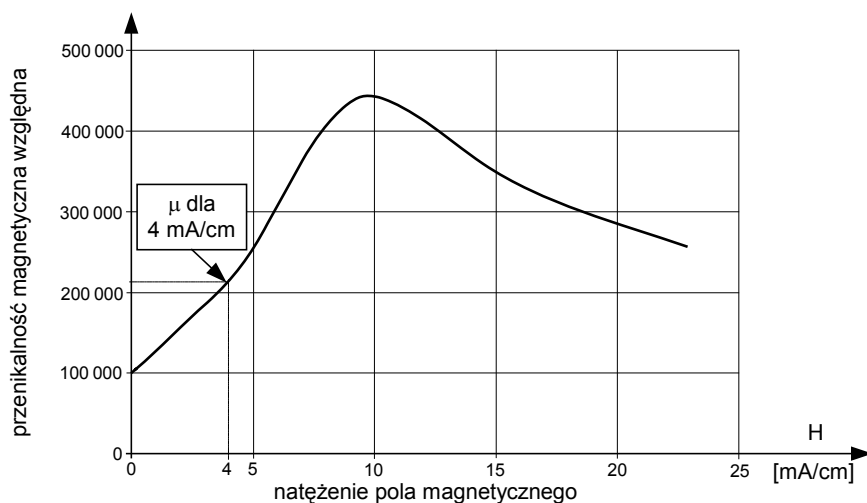
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

Wszystkie cytowane niżej w tekście i w tablicach wartości przenikalności magnetycznej początkowej, maksymalnej i innej są wartościami względnymi.

Pełna gama wyłączników różnicowoprądowych, łącznie z najtrudniejszymi technologicznie wyłącznikami wysokoczułymi o wyzwaniu bezpośrednim, jest produkowana od 50 lat. W tym czasie ewoluowały wymagania norm przedmiotowych w miarę, jak pojawiały się nowe potrzeby użytkowników oraz nowe możliwości i oferty wytwórców. Doskonalono rozwiązania techniczne głównych podzespołów wyłączników różnicowoprądowych, w tym materiały magnetyczne na rdzenie przekładników sumujących. Specjalizujące się w tym firmy oferują następujące materiały magnetyczne, dostosowane do czułości wyłączników i typu wyzwania (AC, A):

- Ferromagnetyki miękkie, domieszkowane amorficzne stopy żelazo-niklowe, również stopy nanokrystaliczne o niskiej stratności, poddawane odpowiedniej przeróbce plastycznej i obróbce cieplnej, która ma decydujący wpływ na wartość uzyskiwanej przenikalności magnetycznej początkowej. Ten parametr – objaśniony w artykule wprowadzającym [4] – jest podawany przede wszystkim w przypadku ferromagnetyków na rdzenie przekładników prądowych. Teoretycznie jest to przenikalność magnetyczna występująca przy natężeniu pola magnetycznego dążącym do zera. Wartości katalogowe odnoszą się do natężenia pola magnetycznego 4 mA/cm (wartość μ_4) i/lub 15 mA/cm (wartość μ_{15}).
- Ferromagnetyki o płaskiej pętli histerezy i dużej przenikalności magnetycznej odwracalnej w przypadku wyłączników o wyzwaniu typu A, pozwalające uzyskać jak największy zakres zmian indukcji przy prądzie różnicowym jednokierunkowym pulsującym.
- Ferromagnetyki o małym natężeniu koercji H_c , poniżej 10 mA/cm.

- Miniaturowe rdzenie toroidalne zwijane z taśm o grubości $0,025 \div 0,2$ mm, a nie składane z kształtek pierścieniowych.



Rys. 5. Przenikalność magnetyczna względna stopu ferromagnetycznego żelazo-niklowego Ultraperm 250 w zależności od poziomu wzbudzenia [8]

W wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwaniu bezpośrednim wyzwalacz czerpie moc tylko z sygnału prądu różnicowego, a w przypadku wyłączników wysokoczułych wchodzi w rachubę moc na poziomie zaledwie ułamka miliwoltampera. Wymagania szczególnie ostre dotyczą rdzeni do wyłączników wysokoczułych, np. ferromagnetyk Ultraperm 250 ma przenikalność względną maksymalną przekraczającą 400 000, a przenikalność względną początkową μ_4 przy 4 mA/cm – tylko dwukrotnie mniejszą (rys. 5). Te wartości przenikalności początkowej są nawet setki razy większe niż dla transformatorowej blachy krzemowej o ulepszonej strukturze domenowej.

Przykładowe dane materiałów magnetycznych stosowanych na rdzenie przekładników sumujących w wyłącznikach różnicowoprądowych zawarto w tablicach 7, 8 i 9, w których występują następujące oznaczenia:

μ_4 – przenikalność względna początkowa [–] przy natężeniu pola magnetycznego 4 mA/cm,

μ_{15} – przenikalność względna [–] przy natężeniu pola magnetycznego 15 mA/cm,

μ_{\max} – przenikalność względna maksymalna [–],

H_c – natężenie koercji [mA/cm],

B_s – indukcja nasyceniowa [T],

ΔH_{stat} , ΔB_{stat} – zmiana natężenia pola magnetycznego [mA/cm] oraz zmiana indukcji magnetycznej [mT] przy wzbudzeniu prądem różnicowym pulsującym stałym.

Tablica. 7. Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwaniu typu AC (tylko przy prądzie różnicowym przemiennym) [8]

Znamionowy prąd różnicowy zadziałania wyłącznika $I_{\Delta n}$ [mA]	Materiał	Gęstość [g/cm ³]	Indukcja nasyceniowa [T]	Przenikalność μ_{15}
10÷100	Ultraperm 200/250	8,7	0,74	200 000 ÷ 300 000
	Ultraperm 10	8,7	0,74	100 000 ÷ 200 000
10÷100 z kondensatorem szeregowym w obwodzie wtórnym	Ultraperm F60	8,7	0,74	125 000
	Vitroperm 800F	7,35	1,2	145 000
300÷500	Permax M	8,25	1,5	50 000
	Permenorm 5000 H2	8,25	1,55	12 000

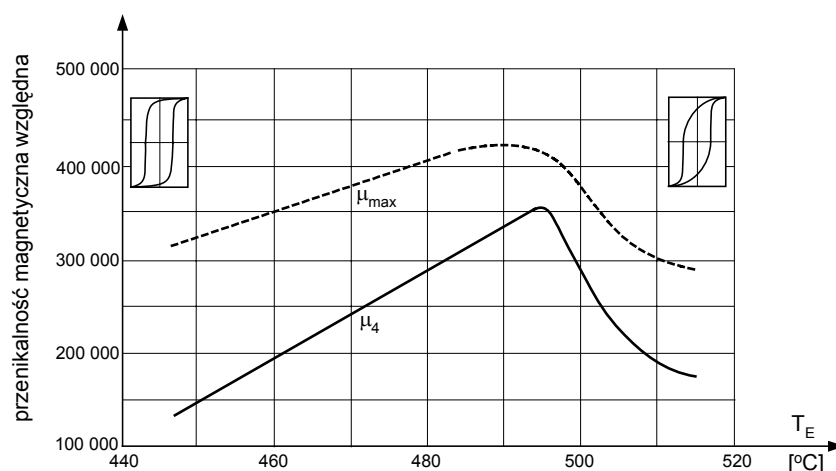
Tablica. 8. Własności materiałów magnetycznych stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych o wyzwalaniu typu A (przy prądzie różnicowym przemiennym i pulsującym stałym) [8]

Znamionowy prąd różnicowy zadziałania wyłącznika $I_{\Delta n}$ [mA]	Materiał	Gęstość [g/cm ³]	Indukcja nasyceniowa [T]	Przenikalność μ_{15}
10÷100	Vitroperm 800F	7,35	1,2	135 000÷160 000
	Ultraperm F80	8,70	0,74	110 000
300÷500	Vitroperm 500F	7,35	1,2	20 000÷80 000

Tablica. 9. Porównanie własności magnetycznych (przy 50 Hz) rdzeni przekładników stosowanych w wyłącznikach różnicowoprądowych różniących się uczuleniem na wartość i przebieg prądu różnicowego [9]

Przekładniki do wyłączników	Materiał	Własności magnetyczne
wysokoczulych AC	Magnifer 7904 80 % Ni, 5 % Mo, 15 % Fe taśmy 0,065 mm	$\mu_4 > 240\ 000$; $\mu_{\max} = 320\ 000 \div 420\ 000$; $H_c < 10$ mA/cm; $B_s = 0,74$ T
wysokoczulych A	Magnifer 7904F25	$\Delta B_{\text{stat}} > 200$ mT przy $\Delta H_{\text{stat}} = 15$ mA/cm
niskoczulych AC	Magnifer 53 MG60 55 % Ni, 45 % Fe, taśma 0,1 mm	$\mu_4 > 60\ 000$
niskoczulych AC	Magnifer 50 RG 48 % Ni, 52 % Fe, taśma 0,2 mm	$\mu_4 > 8\ 000$; $H_c < 50$ mA/cm; $B_s = 1,55$ T;
niskoczulych A	Magnifer 53 F	$\Delta B_{\text{stat}} > 200$ mT przy $\Delta H_{\text{stat}} = 50$ mA/cm

Poza składem stopu ferromagnetyka duże znaczenie ma **tryb obróbki cieplnej**: sposób wyżarzania kształtek poddanych działaniu pola magnetycznego, a następnie – procedura ich schładzania. Wyżarzanie odbywa się w temperaturze 750÷1200 °C w atmosferze azotu, mieszaniny azotu z wodorem lub czystego wodoru. Na przykład stop żelazo-niklowy Magnifer 7904 wyżarza się 4 godziny w temperaturze 1200 °C, po czym schładza w piecu przy gradiencie temperatury –0,9 K/min. Po schłodzeniu do temperatury $T_E \approx 490$ °C wyjmuje się z pieca i szybko schładza w powietrzu. Niewielka zmiana temperatury T_E , przy której materiał wyjmuje się z pieca dla dalszego szybkiego schłodzenia, ma ogromny wpływ na wartości przenikalności magnetycznej początkowej μ_4 oraz maksymalnej μ_{\max} (rys. 6).



Rys. 6. Wpływ końcowej temperatury schładzania w piecu T_E na przenikalność magnetyczną początkową i przenikalność maksymalną stopu Magnifer 7904 [9]

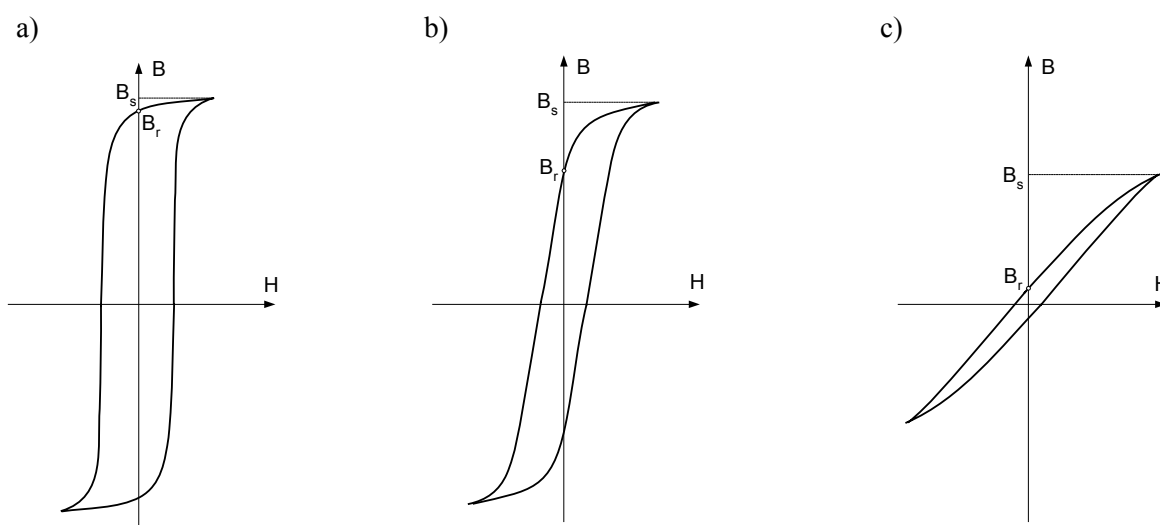
Ważną własnością rdzenia przekładnika sumującego jest **kształt pętli histerezy**, zależny od składu chemicznego i technologii wytwarzania ferromagnetyka. Umownie wyróżnia się trzy charakterystyczne kształty pętli histerezy (rys. 7), w zależności od stosunku indukcji remanencyjnej B_r do indukcji nasyceniowej B_s :

pętla histerezy prostokątna: $B_r/B_s \approx 0,9$,

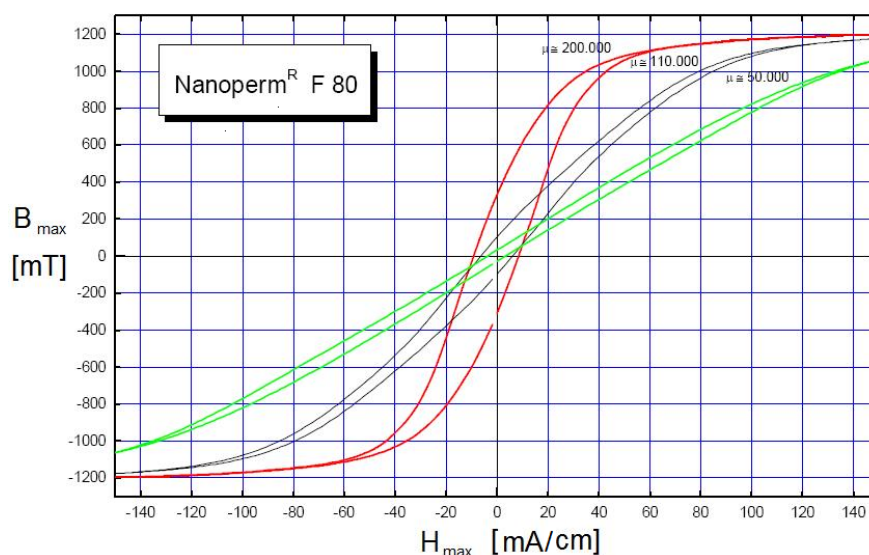
pętla histerezy zaokrąglona: $B_r/B_s \approx 0,6 \div 0,7$,

pętla histerezy płaska: $B_r/B_s < 0,5$.

Tańsze rdzenie mają pętlę histerezy prostokątną lub zaokrągloną (rys. 7a i 7b), które charakteryzują się dużą indukcją remanencyjną. Eliminuje to możliwość ich stosowania w wyłącznikach o wyzwaniu typu A, mających wykrywać prądy jednokierunkowe, natomiast z powodzeniem mogą być stosowane w wyłącznikach o wyzwaniu typu AC.



Rys. 7. Charakterystyczne kształty pętli histerezy: a) pętla prostokątna; b) pętla zaokrąglona; c) pętla płaska; B_s – indukcja nasyceniowa, B_r – indukcja remanencyjna

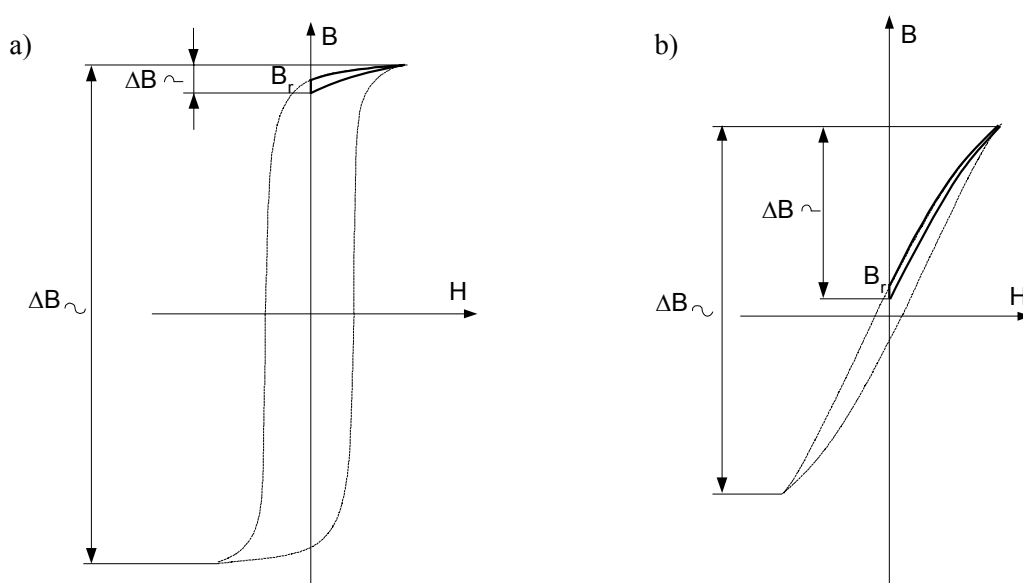


Rys. 8. Płaskie pętli histerezy materiału Nanoperm F80 przy 50 Hz [9]

O poziomie sygnału prądu różnicowego w obwodzie wtórnym przekładnika sumującego decyduje **rozpiętość zmian indukcji** w jego rdzeniu, jaką wywołuje prąd różnicowy o określonym kształcie przebiegu. Nieco upraszczając problem, można zauważyć, co następuje:

- Prąd różnicowy przemienny (o przebiegu symetrycznym względem osi czasu) wywołuje rozpiętość zmian indukcji w rdzeniu osiągającą nawet $2B_s$. Zatem w przypadku wyłączników o wyzwalaniu typu AC kształt pętli histerezy nie ma znaczenia, bo nie ma znaczenia wartość indukcji remanencyjnej.
- Prąd różnicowy pulsujący stały (wyprostowany jednopółkowo) wywołuje rozpiętość zmian indukcji w rdzeniu osiągającą zaledwie $(B_s - B_r)$, czyli około 5 % poprzedniej wartości w przypadku pętli prostokątnej, kilkanaście procent w przypadku pętli zaokrąglonej i co najmniej 25 % – w przypadku pętli płaskiej. Jak widać, tylko ferromagnetyk o płaskiej pętli histerezy nadaje się na rdzenie przekładników sumujących wyłączników o wyzwalaniu typu A (rys. 8, 9b).

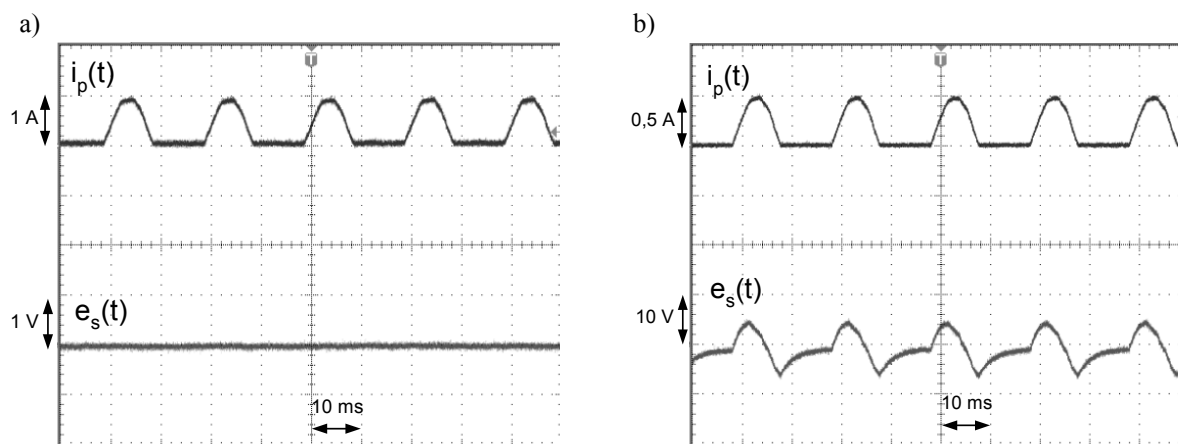
Na rys. 9 przedstawiono skutki użycia na rdzeń przekładnika sumującego materiałów o skrajnych kształtach pętli histerezy: o pętli prostokątnej (rys. 9a) i pętli płaskiej (rys. 9b). Na obu rysunkach pokazano odpowiednio pierwotną pętlę histerezy przy magnesowaniu prądem przemiennym (linia cienka) i wtórną pętlę – przy magnesowaniu prądem pulsującym stałym (linia pogrubiona), zaznaczając każdorazowo wywołaną rozpiętość zmian indukcji magnetycznej w rdzeniu ΔB .



Rys. 9. Pętli histerezy przy magnesowaniu prądem przemiennym i prądem pulsującym stałym: a) ferromagnetyk o pętli prostokątnej; b) ferromagnetyk o pętli płaskiej

Na rys. 10 przedstawiono, dla dwóch różnych przekładników sumujących, przebieg napięcia indukowanego $e_s(t)$ w uzwojeniu wtórnym (dolny wykres) przy wystąpieniu w obwodzie pierwotnym prądu różnicowego pulsującego stałego $i_p(t)$ (górny wykres). Przebiegi z rys. 10a dotyczą przekładnika w wyłączniku o wyzwalaniu typu AC (prostokątna pętla histerezy), a z rys. 10b – przekładnika w wyłączniku o wyzwalaniu typu A (płaska pętla histerezy).

W przekładniku z rdzeniem o prostokątnej pętli histerezy zmiana indukcji magnetycznej przy prądzie różnicowym pulsującym stałym jest tak mała, że napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym jest praktycznie równe zero. Taki przekładnik nie nadaje się do wyłączników o wyzwalaniu typu A. Wymagają one ferromagnetyka o małej indukcji remanencyjnej B_r (rys. 8, 9b), aby zmiany indukcji były wystarczająco duże również przy przebiegach jednokierunkowych. Płaska pętla histerezy umożliwia transformację prądu jednokierunkowego, ale pod warunkiem, że charakteryzuje się on znacznym tętnieniem. Warto podkreślić, że napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym oraz prąd wtórny mają odmienny przebieg w czasie niż prąd różnicowy w obwodzie pierwotnym (rys. 10b): przy prądzie różnicowym pulsującym stałym napięcie indukowane w obwodzie wtórnym jest przemiennie o znacznym odkształceniu.

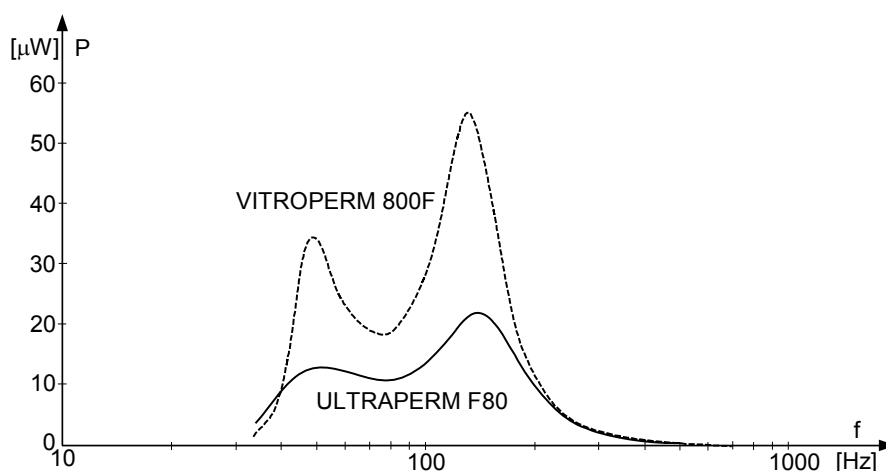


Rys. 10. Prąd różnicowy pulsujący stały w obwodzie pierwotnym $i_p(t)$ i napięcie indukowane $e_s(t)$ w uzwojeniu wtórnym: a) przekładnika wyłącznika typu AC o prostokątnej pętli histerezy; b) przekładnika wyłącznika typu A o płaskiej pętli histerezy

Przykładowe materiały na rdzenie przekładników sumujących do wyłączników o wyzwalaniu typu A przedstawiono w tabl. 8 i 9. Litera F (ang. *flat*) przed lub po liczbie w oznaczeniu materiału świadczy, że jest to materiał o płaskiej pętli histerezy. Porównując przenikalności magnetyczne rdzeni przekładników stosowanych do budowy wysokoczułych wyłączników o wyzwalaniu typu AC oraz tych o wyzwalaniu typu A (tabl. 7, 8, 9) można zauważyć, że w wyłącznikach A niekiedy wystarczają rdzenie o mniejszej przenikalności magnetycznej niż w wyłącznikach AC. Łatwo o pochopny wniosek, że wystarczają gorsze materiały magnetyczne. Po prostu przy prądzie różnicowym pulsującym stałym przenikalność magnetyczna rdzenia nie jest tak ważna, jak kształt pętli histerezy.

Moc dostarczana do wyzwalacza różnicowego zależy także od stratności rdzenia przekładnika sumującego. Zwłaszcza w wyłącznikach wysokoczułych o wyzwalaniu bezpośrednim pożądany jest taki ferromagnetyk, aby tracona była jak najmniejsza część mocy pobieranej z uzwojenia pierwotnego przekładnika.

Na rys. 11 przedstawiono moc uzyskiwaną z przekładnika sumującego przy prądzie różnicowym pulsującym stałym dla dwóch różnych materiałów magnetycznych. Widać, że rdzeń z taśmy nanokrystalicznej pozwala ponad dwukrotnie zwiększyć uzyskiwaną moc w stosunku do stopu krystalicznego żelazo-niklowego. Na taki efekt składa się cały zespół parametrów i cech ferromagnetyka.



Rys. 11. Moc uzyskiwana z obwodu wtórnego przekładnika sumującego dla materiałów magnetycznych: Ultraperm F80 (stop krystaliczny Ni80/Fe20) i Vitroperm 800F (taśma nanokrystaliczna) [7, 8]

O tym, jak ważne jest trafne określenie parametrów rdzenia przekładnika świadczy następujący przykład. Liczne odmiany wyłączników różnicowoprądowych mają rdzeń przekładnika sumującego wykonany ze stopów magnetycznie miękkich, o handlowej nazwie Mumetal, Hipernom lub Permalloy. Są to stopy żelazo-niklowe o zawartości niklu w zasadzie nieprzekraczającej 78%, z dodatkiem miedzi i molibdenu, o pełnym składzie na przykład Ni77/Fe14/Cu5/Mo4.

W dokumencie IEC 64/1454/INF datowanym 2005-03-18, zawierającym zestawienie uwag komitetów narodowych do dokumentu 64/1435/DC na temat celowości nowelizacji normy IEC 60364-5-551 jest ciekawy załącznik do uwag komitetu holenderskiego. Przedstawia on wyniki badania zachowania się wyłączników różnicowoprądowych o wyzwalaniu typu A poddanych działaniu prądu różnicowego zawierającego składową stałą (tabl. 10). Dużą wrażliwość na zawartość składowej stałej w prądzie różnicowym wykazują właśnie wyłączniki, które mają rdzeń przekładnika sumującego wykonany z Mumetalu, podczas gdy wyłączniki z **przekładnikiem o rdzeniu ferrytowym** okazały się zupełnie niewrażliwe na obecność składowej stałej w zakresie objętym pomiarami (do 500 mA składowej stałej).

Tablica. 10. Wyniki badania wpływu składowej stałej na rzeczywisty prąd różnicowy zadziałania wyłączników o wyzwalaniu typu A w zależności od materiału rdzenia przekładnika sumującego

Składowa stała	Rzeczywisty prąd różnicowy zadziałania wyłączników o wyzwalaniu typu A		
	Rdzeń z Mumetalu		Rdzeń ferrytowy
	Wyłącznik $I_{\Delta n} = 30$ mA	Wyłącznik $I_{\Delta n} = 300$ mA	Wyłącznik $I_{\Delta n} = 30$ mA
mA	mA	mA	mA
0	34	350	36
6	37	360	36
10	38	400	36
20	47	510	36
30	> 280	> 600	36
50	> 280	> 600	36
75	> 280	> 600	36
100	> 280	> 600	36
200	nie badano	nie badano	36
300	nie badano	nie badano	36
500	nie badano	nie badano	36

Zgodnie z normą IEC 61008-1 wymagana wartość rzeczywistego prądu różnicowego zadziałania wyłączników o wyzwalaniu typu A wynosi $I_{\Delta} \leq 1,4I_{\Delta n}$, tzn. $I_{\Delta} \leq 42$ mA dla wyłącznika 30 mA oraz $I_{\Delta} \leq 420$ mA dla wyłącznika 300 mA. Jako wynik pomiaru podano rzeczywistą wartość skuteczną prądu (true rms).

Wprawdzie obecne normy w odniesieniu do wyłączników o wyzwalaniu typu A wymagają niewrażliwości na składową stałą o wartości do 6 mA, i tę klauzulę wszystkie badane wyłączniki spełniają, ale z pomiarów wynika, że jest duże pole zastosowań tańszych wyłączników typu A z rdzeniem ferrytowym w przekładniku sumującym w sytuacjach, w których według obecnych standardów byłyby nieodzowne wielokrotnie droższe wyłączniki o wyzwalaniu typu B. O ponadnormatywnych cechach i parametrach zdolnościowych niektórych wyłączników różnicowoprądowych klient się nie dowiaduje, bo stosownych prób producent nie przeprowadza, a nie przeprowadza, bo normy go do tego nie obligują. Takie i podobne sytuacje nieoczekiwanie ujawniają się w wyniku prac badawczych, których wyniki nie są ogólnie dostępne.

Powszechne, ale niesłuszne jest przekonanie, że przekładnik prądowy sumujący wytwarza w uzwojeniu wtórnym sygnał prądu różnicowego tylko wtedy, kiedy w obwodzie pierwotnym pojawia się prąd różnicowy i że ten sygnał jest tym większy, im większy jest prąd różnicowy w obwodzie pierwotnym.

Wskutek asymetrii geometrycznej uzwojeń pierwotnych względem rdzenia powstaje asyme-

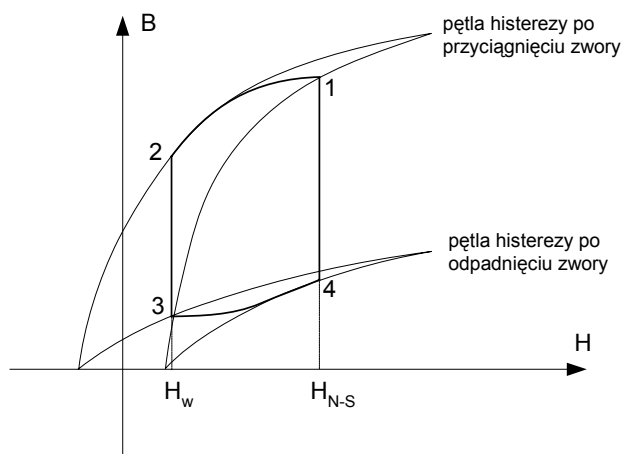
tria elektromagnetyczna, indukcyjności wzajemne między poszczególnymi uzwojeniami pierwotnymi a uzwojeniem wtórnym nie są jednakowe. Z tego powodu generowane jest w uzwojeniu wtórnym **napięcie uchybowe**, przedstawiane na schemacie zastępczym przekładnika w gałęzi wzdłużnej tego uzwojenia (rys. 15). Jest to źródło dodatkowego błędu. Przy zwarciu między przewodami czynnymi chronionego obwodu, bez udziału ziemi, nie ma prądu różnicowego, ale z powodu wspomnianej asymetrii może pojawić się wystarczająco duży sygnał w obwodzie wyzwalającym i wyzwalacz różnicowy może zadziałać, otwierając wyłącznik. Norma wymaga sprawdzenia, że nie będzie do tego dochodziło przy prądach przetężeniowych o wartości do $6I_n$, symetrycznie obciążających wielobiegunowy wyłącznik. To łagodne wymaganie.

Z kolei coraz większy prąd różnicowy w końcu nasycza rdzeń, co sprawia, że w uzwojeniu wtórnym są generowane piki napięcia o coraz krótszym czasie trwania. Jeśli czas ich trwania jest bardzo mały, to układ wyzwalający wyłącznika – poza wyłącznikami o wyzwalaniu impulsowym – może nie reagować. Należałoby zatem sprawdzać reakcję wyłącznika i czas wyłączenia również przy większych prądach, rzędu kilkudziesięciu i kilkuset amperów. Jest to ważne zwłaszcza przy stosowaniu wyłączników w instalacjach o układzie TN, w których występują duże prądy różnicowe w następstwie zwarć L-PE.

3. Konfiguracja obwodu wyzwalającego

Podstawowym elementem obwodu wtórnego przekładnika sumującego, czyli obwodu wyzwalającego wyłącznika różnicowoprądowego, jest wyzwalacz różnicowy. We współczesnych wyłącznikach o wyzwalaniu typu AC lub A, które w większości są wyłącznikami o działaniu bezpośrednim, stosuje się spolaryzowany lub niespolaryzowany wyzwalacz o odpadającej zworze. Rysunki przedstawiające budowę i działanie obydwu rodzajów wyzwalaczy przedstawiono w artykule wprowadzającym [4].

W wyłącznikach o wyzwalaniu bezpośrednim wyzwalacz różnicowy powinien w maksymalnym stopniu wykorzystywać niewielką moc, którą dostarcza przekładnik. Wobec tego magnetowód wyzwalacza – podobnie jak przekładnika sumującego – powinien charakteryzować się dużą przenikalnością magnetyczną i jak najmniejszą stratnością. Stosuje się czyste żelazo lub żelazo z dodatkiem krzemu, natomiast w wyłącznikach wysokoczułych – stopy żelazo-niklowe [8, 9, 11].



Rys. 12. Zmiany indukcji w magnetowodzie wyzwalacza różnicowego przed i po odpadnięciu zwory

W zamkniętym wyłączniku, w stanie równowagi, tzn. przy braku sygnału prądu różnicowego, magnes trwały wywołuje natężenie pola H_{N-S} i utrzymuje zworę wyzwalacza, która została przyciągnięta do jarzma przez układ napędowy podczas zamykania wyłącznika. Stan ten przedstawia punkt 1 (rys. 12). Jeżeli pojawia się prąd różnicowy, to redukuje natężenie pola do wartości H_w (punkt 2). Wtedy zwora odpada, zwiększa się szczelina powietrzna oraz reluktancja magnetowodu, co powo-

duże zmniejszenie indukcji (punkt 3). Odpadająca zwora powoduje zwolnienie zapadki zamka, otwierają się zestyki głównego wyłącznika, zanika prąd w obwodzie pierwotnym i wtórnym przekładnika sumującego. Stan ten odzwierciedla punkt 4 (rys. 12).

Zarówno wyzwalacz spolaryzowany, jak i niespolaryzowany zawierają m.in. magnes trwały oraz cewkę nawiniętą na niewielkim karkasie obejmującym jarzmo wyzwalacza. Wartość progowa prądu w obwodzie wtórnym, powodująca zadziałanie wyzwalacza jest stosunkowo mała, na przykład kilka do kilkunastu miliamperów. Niekoniecznie wzrasta ona wraz ze znamionowym prądem różnicowym zadziałania wyłącznika. Na przykład, w jednym z badanych wyłączników 30 mA o wyzwalaniu typu A wynosi ona 9,5 mA, natomiast w wyłączniku 300 mA o wyzwalaniu typu A – tylko 1,7 mA¹. W **wyzwalaczu spolaryzowanym** zadziałanie następuje tylko przy określonej biegunowości prądu. Jeżeli w obwodzie wtórnym przekładnika nie ma prostownika, to prąd płynący przez wyzwalacz jest przemienny i w kolejnych półokresach na przemian wzmacnia i osłabia strumień pochodzący od magnesu trwałego. Odpadnięcie zwory jest możliwe tylko w półokresie, w którym następuje osłabianie tego strumienia. Łatwo to sprawdzić zasilając uzwojenie wyzwalacza prądem stałym. Wyzwalacz wspomnianego wcześniej wyłącznika 30 mA o wyzwalaniu typu A, który działa przy prądzie przemiennym o wartości około 9,5 mA, podczas wymuszania prądu stałego o określonej biegunowości wyzwała przy 12 mA, natomiast przy biegunowości przeciwnej nie reaguje nawet na prądy wielokrotnie większe.

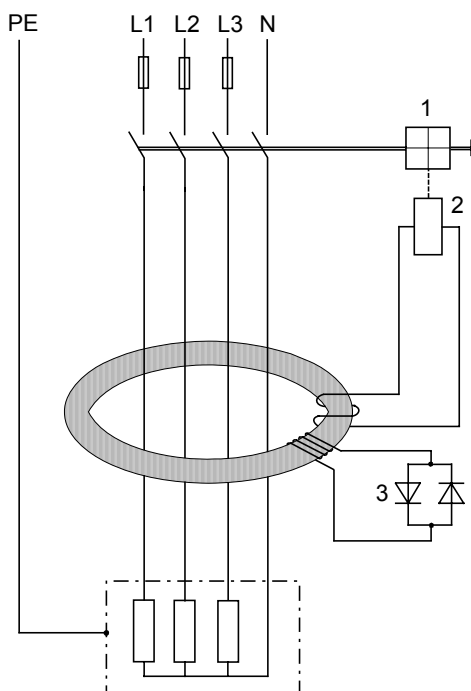
Wyzwalacz niespolaryzowany działa niezależnie od biegunowości prądu płynącego przez jego uzwojenie. Na przykład wyzwalacz wyłącznika 300 mA typu A wyzwalający przy prądzie przemiennym o wartości 1,7 mA, przy prądzie stałym nietętniącym wyzwała niezależnie od biegunowości prądu przy 2,2 mA. Stosunek $2,2/1,7 = 1,3$ odpowiada współczynnikowi szczytu rozważanego przebiegu prądu; przy prądzie sinusoidalnym byłoby 1,41. Znane spostrzeżenie, iż o zadziałaniu wyzwalacza elektromagnetycznego wzrostowego decyduje wartość szczytowa prądu, potwierdza się w przypadku badanych wyzwalaczy różnicowych. Widać to wyraźnie przy prądzie różnicowym silnie odkształconym. Przy przebiegu „wyostrzonym” wartość skuteczna prądu zadziałania jest wyraźnie mniejsza niż przy przebiegu „spłaszczonym” [2].

Wyzwalacz różnicowy może być przyłączony do uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego bezpośrednio albo poprzez mniej lub bardziej złożony układ elektroniczny. Najprostsze rozwiązanie konstrukcyjne układu wyzwalającego wyłącznika typu AC o działaniu niezależnym od napięcia sieci przedstawiono na rys. 13. W obwodzie wtórnym z wyzwalaczem różnicowym nie ma żadnych pośredniczących elementów elektronicznych, bo mimo to – w sposób naturalny – udało się zapewnić dopasowanie mocowe². Prąd wtórny przemienny, będący sygnałem prądu różnicowego, bezpośrednio oddziałuje na wyzwalacz różnicowy. W celu wyeliminowania zbędnych zjawisk, wywołanych prądami różnicowymi udarowymi, wprowadzono dodatkowe uzwojenie wtórne z antyrównoległe połączonymi diodami. Jeżeli w obwodzie pierwotnym pojawia się duży prąd różnicowy udarowy, to w uzwojeniu wtórnym dodatkowym o liczbie zwojów znacznie większej niż w uzwojeniu obwodu wyzwalającego, indukuje się napięcie przekraczające napięcie progowe³ diod. Zależnie od biegunowości tego napięcia przewodzi jedna z diod lub przewodzą kolejno obie, zwierając obwód wtórny. Dzięki temu są kompensowane amperozwoje pierwotne, zmniejsza się w przybliżeniu dwukrotnie strumień magnetyczny w rdzeniu przekładnika sumującego, co chroni obwód wyzwalający zasilany z drugiego uzwojenia przed pojawieniem się prądu przejściowego powodującego zbędne wyzwalanie.

¹ Chodzi o wartości prądu płynącego w uzwojeniu wyzwalacza, ważne przy konstruowaniu wyłącznika i przy nastawianiu wyzwalacza przed próbami wyrobu; nie są one podawane przez wytwórców. Ich związek z wartościami prądu różnicowego w obwodzie pierwotnym wyłącznika i z czułością wyłącznika jest bardzo złożony.

² Dopasowanie mocowe albo dopasowanie energetyczne źródła i odbiornika – stan źródła i odbiornika, połączonych ze sobą, występujący wtedy, gdy źródło przekazuje odbiornikowi największą moc.

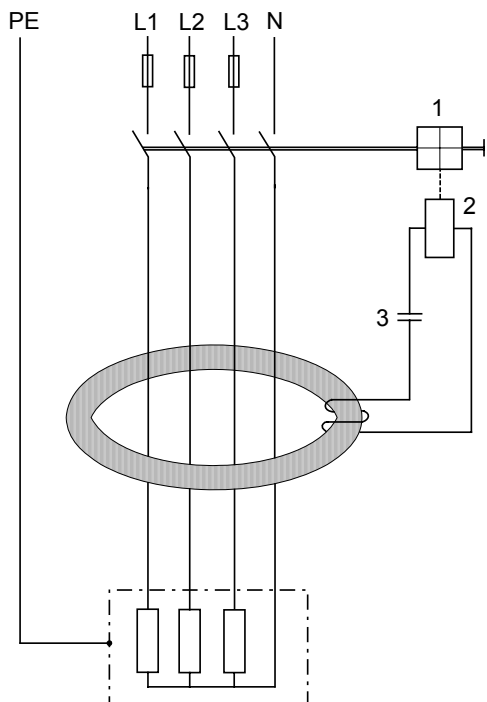
³ Napięcie progowe – najmniejsze napięcie w kierunku przewodzenia, przy którym dioda przewodzi (ściślej: wartość napięcia odpowiadająca punktowi przecięcia osi napięcia i linii prostej aproksymującej charakterystykę napięciowo-prądową w stanie przewodzenia).



Rys. 13. Wyłącznik różnicowoprądowy o działaniu niezależnym od napięcia sieci z przekładnikiem sumującym o dwóch uzwojeniach wtórnych:

- 1 – zamek,
- 2 – wyzwalacz różnicowy,
- 3 – diody połączone antyrównolegle

Jeżeli moc czerpana przez wyzwalacz różnicowy pochodzi tylko z sygnału prądu różnicowego, to rolę pierwszorzędną odgrywa wspomniane **dopasowanie mocowe** odbiornika (wyzwalacza różnicowego) do źródła (przekładnika sumującego). Jest to szczególnie ważne w przypadku wyłączników wysokoczułych, w których pozostająca do dyspozycji moc jest szczególnie mała, rzędu ułamka miliwoltampera. Kiedy w sposób naturalny, przez modyfikację parametrów źródła i odbiornika, nie daje się uzyskać stanu zbliżonego do idealnego dopasowania mocowego, wtedy pozostaje dołączanie elementów dopasowujących. Rozwiązaniem dość powszechnym jest kondensator szeregowy (rys. 14).



Rys. 14. Wyłącznik różnicowoprądowy o działaniu niezależnym od napięcia sieci z kondensatorem szeregowym zapewniającym dopasowanie mocowe:

- 1 – zamek,
- 2 – wyzwalacz różnicowy,
- 3 – kondensator szeregowy

Schemat zastępczy obwodu wyzwalającego z kondensatorem do dopasowania mocowego przedstawiono na rys. 15. Moc pozorną S_{sw} dostarczaną do wyzwalacza różnicowego w obwodzie

bez tego kondensatora, można opisać zależnością (5):

$$S_{sw} = \frac{I_p^2 \cdot Z_0}{\frac{Z_0}{Z_{sw}} + 2 \cdot \cos(\phi_{sw} - \phi_0) + \frac{Z_{sw}}{Z_0}} \quad (5)$$

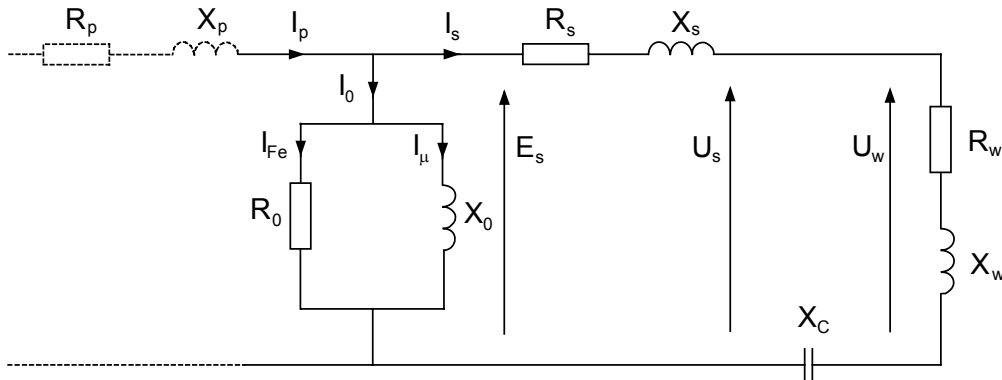
gdzie:

Z_{sw} – łączna impedancja uzwojenia wtórnego i wyzwalacza różnicowego,

Z_0 – impedancja gałęzi magnesowania,

I_p – prąd różnicowy pierwotny sprowadzony do strony wtórnej,

ϕ_{sw} i ϕ_0 – argument odpowiednio impedancji obwodu wtórnego i gałęzi magnesowania.



Rys. 15. Schemat zastępczy obwodu wyzwalającego

R_p, X_p – rezystancja i reaktancja uzwojenia pierwotnego (bez wpływu na przebieg rozważanych zjawisk),

R_s, X_s – rezystancja i reaktancja uzwojenia wtórnego,

R_w, X_w – rezystancja i reaktancja uzwojenia wyzwalacza różnicowego,

R_0, X_0 – rezystancja i reaktancja gałęzi magnesowania przekładnika sumującego,

X_C – reaktancja kondensatora dopasowania mocowego,

I_p, I_s, I_0 – prąd odpowiednio: pierwotny, wtórny, gałęzi magnesowania,

E_s – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wtórnym,

U_s – napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego,

U_w – napięcie na zaciskach cewki wyzwalacza różnicowego

Wyznaczając pochodną mocy wtórnej względem impedancji obwodu wtórnego dS_{sw}/dZ_{sw} i przyrównując ją do zera:

$$\frac{dS_{sw}}{dZ_{sw}} = \frac{I_p^2}{-\frac{1}{Z_{sw}^2} + \frac{1}{Z_0^2}} = 0 \quad (6)$$

otrzymuje się warunek dostarczenia największej mocy do wyzwalacza. Największą moc uzyska się, gdy impedancja obwodu wtórnego będzie równa impedancji gałęzi magnesowania, czyli $Z_{sw} = Z_0$.

Podstawiając $Z_0 = Z_{sw}$ do zależności (5) otrzymuje się równanie opisujące maksymalną moc będącą do dyspozycji w obwodzie wtórnym:

$$S_{max} = \frac{I_p^2 \cdot Z_0}{2 \cdot [1 + \cos(\phi_{sw} - \phi_0)]} \quad (7)$$

Z powyższego równania wynika, że należy dążyć do uzyskania dużej różnicy argumentów $\Delta\phi = \phi_{sw} - \phi_0$ (najkorzystniej 90°), aby wyrażenie w mianowniku przyjmowało jak najmniejszą wartość. W praktyce różnica ta jest największa, kiedy prąd wtórny I_s jest w fazie z siłą elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu wtórnym E_s ($\phi_{sw} = 0^\circ$). Uzyskuje się to włączając w obwodzie

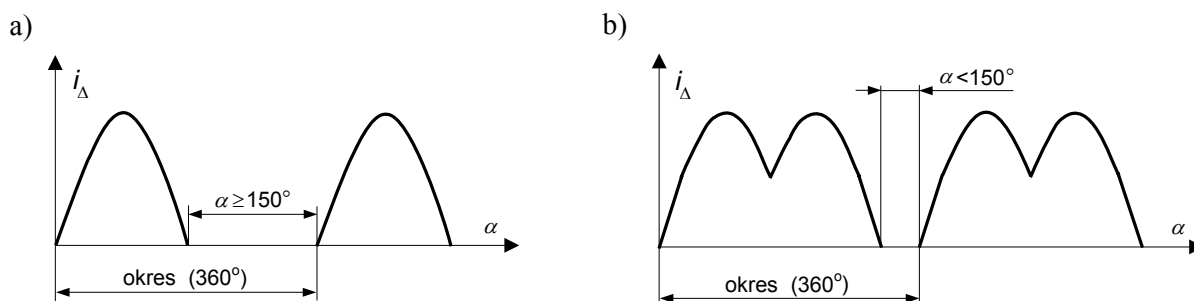
wtórny kondensator szeregowy tak dobrany, aby kompensował reaktancję indukcyjną obwodu wtórnego:

$$X_C = X_s + X_w \quad (8)$$

Po wprowadzeniu kondensatora maksymalna moc dostarczana do wyzwalacza jest większa niż uprzednio obliczona moc S_{\max} i wynosi:

$$S_{C_{\max}} = I_p^2 \cdot \frac{(R_0^2 + X_0^2) \cdot \sqrt{R_w^2 + X_w^2}}{(R_0 + R_w)^2 + (X_0 + X_w - X_C)^2} \quad (9)$$

Przy różnicowym prądzie pulsującym stałym¹ kondensator spełnia jeszcze jedno zadanie: gromadzi ładunek, który zwrotnie przepływa przez uzwojenie wtórne przekładnika podczas przerwy bezprądowej przebiegu prądu różnicowego (rys. 16a). Dzięki temu w wyłącznikach o wyzwalaniu typu A uzyskuje się większą rozpiętość zmian indukcji, rdzeń przekładnika jest bardziej rozmagne-sowywany i korzystniejszy jest przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym [3].

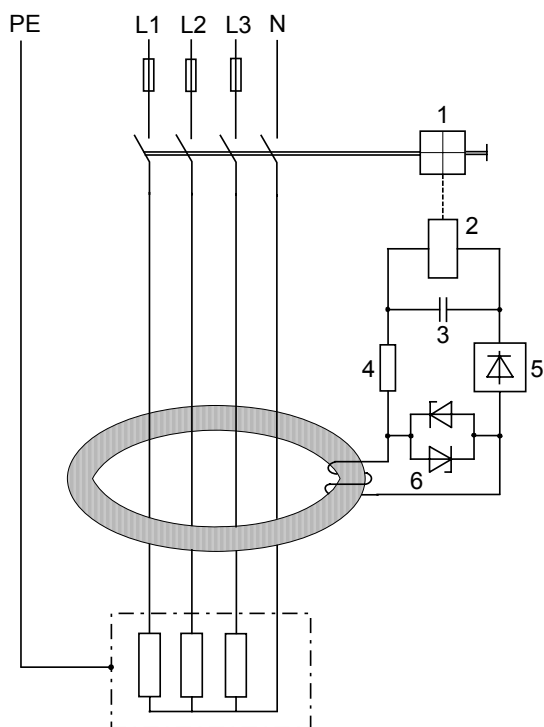


Rys. 16. Przykładowe przebiegi prądu różnicowego w obwodzie prostownika: a) jednopulsowego niesterowanego – wyłącznik o wyzwalaniu typu A wykrywa; b) dwupulsowego niesterowanego, zasilanego napięciem międzyprzewodowym – wyłącznik o wyzwalaniu typu A nie wykrywa prądu różnicowego.

Zarazem tłumaczy to, dlaczego taki wyłącznik może nie reagować na prąd różnicowy, który jest wprawdzie jednokierunkowy o dużym tętnieniu, ale w jego przebiegu nie ma dostatecznie **długich przerw bezprądowych w każdym okresie** odpowiadającym częstotliwości sieciowej (rys. 16b); tak jest w obwodzie prostownika dwupulsowego niesterowanego, zasilanego napięciem międzyprzewodowym. Symbol graficzny wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwalaniu typu A (tabl. 3) należy traktować „dosłownie”, bo trafnie informuje on, na jaki przebieg prądu różnicowego wyłącznik reaguje (rys. 16a).

Bardziej złożony obwód wtórny ma wyłącznik przedstawiony na rys. 17. Zastosowano w nim człon RC zapewniający zwłokę działania. Tuż po pojawieniu się prądu różnicowego nienaładowany kondensator 3 „zwiera” cewkę wyzwalacza 2 i ten nie reaguje na prąd różnicowy. W miarę, jak kondensator 3 ładuje się poprzez prostownik 5, coraz większy prąd płynie przez wyzwalacz. Po osiągnięciu określonej wartości progowej tego prądu następuje zadziałanie wyzwalacza i otwarcie wyłącznika.

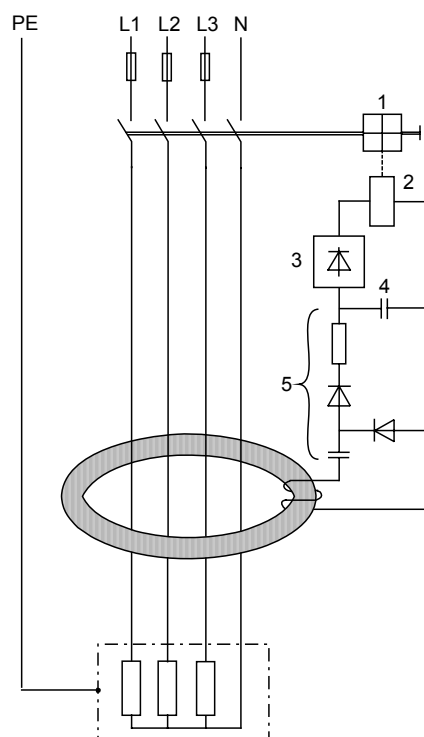
¹ Prąd pulsujący stały – prąd o przebiegu pulsującym, który w każdym okresie odpowiadającym częstotliwości sieciowej przybiera wartość zero albo wartość nie przekraczającą 0,006 A prądu stałego w jednym pojedynczym przedziale czasu, odpowiadającym kątowi co najmniej 150° [14].



Rys. 17. Wyłącznik różnicowoprądowy o działaniu niezależnym od napięcia sieci, bez zasobnika energii (bez wyzwalań impulsowych) [1]:

- 1 – zamek,
- 2 – wyzwalacz,
- 3+4 – człon RC zapewniający zwłokę działania,
- 5 – prostownik dla członu RC,
- 6 – antyrównolegle połączone diody Zenera

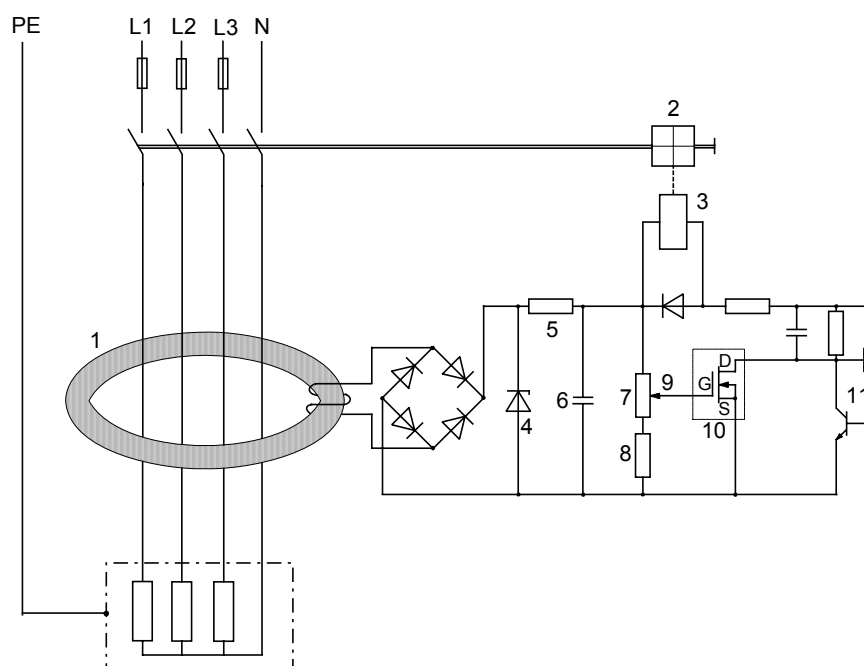
Na rys. 18 przedstawiono wyłącznik zwłoczny o działaniu niezależnym od napięcia sieci i wyzwalań impulsowych. W obwodzie wyzwalającym jest podwajacz napięcia 5 ładującego kondensatorowy zasobnik energii 4 i przykładanego do zacisków łącznika sterowanego napięciowo 3. Zapłon tego łącznika następuje, kiedy energia zgromadzona w kondensatorze $CU^2/2$ z zapasem wystarcza do dokonania czynności wyzwalań. W roli łącznika dawniej wykorzystywano lampkę tłącą o napięciu zapłonu około 150 V, co komplikowało konstrukcję przekładnika sumującego; obecnie na ogół stosuje się małą diodę czterowarstwową o napięciu zapłonu rzędu 10 V. Po wprawieniu zaworu w stan przewodzenia kondensator 4 rozładowuje się przez cewkę wyzwalacza różnicowego 2 i wyłącznik otwiera się.



Rys. 18. Wyłącznik różnicowoprądowy zwłoczny o wyzwalań impulsowym, niezależnym od napięcia sieci

- 1 – zamek,
- 2 – wyzwalacz różnicowy,
- 3 – zawór sterowany napięciowo,
- 4 – kondensatorowy zasobnik energii,
- 5 – podwajacz napięcia

Jeszcze bardziej złożony obwód wyzwalający ma wyłącznik (rys. 19) według opisu patentowego [13]. Cewka wyzwalacza różnicowego 3 jest przyłączona do uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego 1 za pośrednictwem układu elektronicznego zawierającego: mostek prostownicowy, kondensatorowy zasobnik energii, człon zwłoczny, półprzewodnikowy zawór sterowany i układ sterowania tego zaworu w funkcji napięcia na zaciskach zasobnika kondensatorowego. Rdzeń przekładnika sumującego, wykonany ze stopu żelaza o dużej przenikalności magnetycznej i płaskiej pętli histerezy, jest tak dobrany, że przy prądzie różnicowym $I_{\Delta n}$ punkt pracy sytuuje się tuż poniżej nasycenia; odpowiednim ferromagnetykiem są materiały o nazwie handlowej Satimphy lub Permimphy. Zwłokę w działaniu zapewnia człon RC złożony z rezystora 5 i kondensatora zasobnikowego 6. Po pojawieniu się prądu różnicowego wysterowanie zaworów 11 odbywa się za pomocą rezystorowego dzielnika napięcia 7, 8 i tranzystora polowego MOS 10, którego bramka jest połączona z odczepem 9 dzielnika napięcia, źródło jest połączone z masą, a dren – z elektrodą sterującą zaworami półprzewodnikowymi 11.



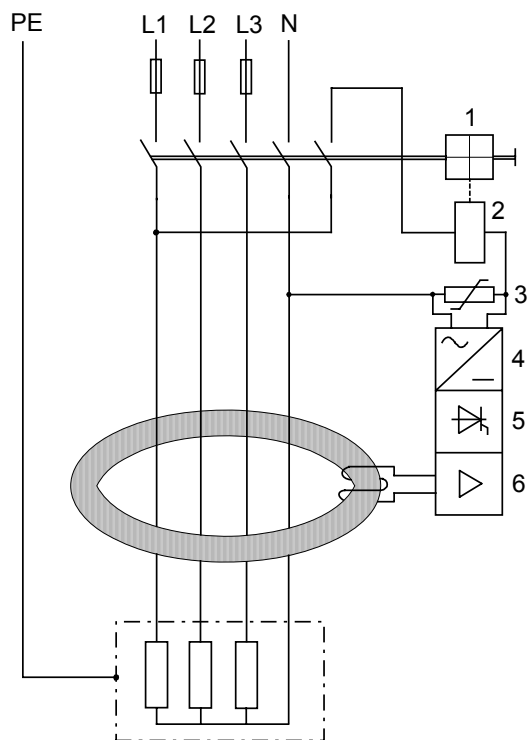
Rys. 19. Wyłącznik różnicowoprądowy selektywny o działaniu niezależnym od napięcia sieci [13]

1 – przekładnik sumujący, 2 – zamek, 3 – wyzwalacz różnicowy, 4 – dioda Zenera w celu ograniczenia napięcia wyjściowego prostownika, 5, 6 – człon RC zapewniający zwłokę działania, 7, 8 – dzielnik napięcia, 9 – odczep dzielnika napięcia, 10 – tranzystor polowy, 11 – zawory półprzewodnikowe

Układ jest tak pomyślany, aby zwłoka działania była dokładnie określona i niezależna od prądu różnicowego. Wybrany rdzeń sprawia, że – przy magnesowaniu go coraz większym prądem różnicowym sinusoidalnym – w uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie wykazujące w każdym półokresie coraz bardziej strome i krócej trwające piki. To sprawia, że ze wzrostem prądu różnicowego w pożądanym stopniu maleje czas ładowania zasobnika kondensatorowego. Ponieważ ładowanie kondensatora pikami napięcia odbywa się skokowo, a tranzystor polowy z dużą dokładnością reaguje na napięcie przykładane między bramką a źródło, można zapewnić bardzo precyzyjne charakterystyki czasu wyłączania $t = f(I_{\Delta})$. Niezależnie od wartości prądu różnicowego I_{Δ} wyzwalanie odbywa się przy tej samej wartości napięcia na kondensatorze, wyzwalacz działa według zasady „wszystko albo nic”.

W celu ograniczenia napięcia wyjściowego prostownika, równoległe do członu RC, jest włączona dioda Zenera 4. Chroni ona elektronikę od przepięć i zapewnia, że czas wyzwalania nie maleje przy dużym prądzie różnicowym, np. przekraczającym $5I_{\Delta n}$. Przynajmniej jeden z rezystorów dzielnika napięcia powinien być regulowany, aby dokładnie nastawić tranzystor polowy.

Opisane wyżej wyłączniki różnicowoprądowe nie wymagają napięcia pomocniczego do zasilania układu wyzwalającego. Są jednak rozwiązania, które takie napięcie wykorzystują, a do wykrywania prądu różnicowego stałego o pomijalnym tętnieniu jest ono niezbędne. Na rys. 20 przedstawiono układ połączeń wyłącznika wysokoczułego (zwykle 30 mA) o zależnych od napięcia sieci układzie detekcji prądu różnicowego i układzie wyzwalania. Impedancja cewki niewzbudzonego wyzwalacza wzrostowego 2 pełni ubocznie rolę rezystora wstępnego prostownika 4. Po przekroczeniu przez prąd różnicowy wartości prądu zadziałania, wzmacniacz 6 wywołuje zapłon tyrystora 5. Następuje zwarcie po stronie stałoprądowej prostownika 4 i przez cewkę wyzwalacza wzrostowego 2 zaczyna płynąć prąd o wartości ograniczonej tylko przez impedancję cewki wzbudzonego wyzwalacza. Warystor tlenkowy 3 włączony równoległe do prostownika jest użyty jako ogranicznik przepięć.

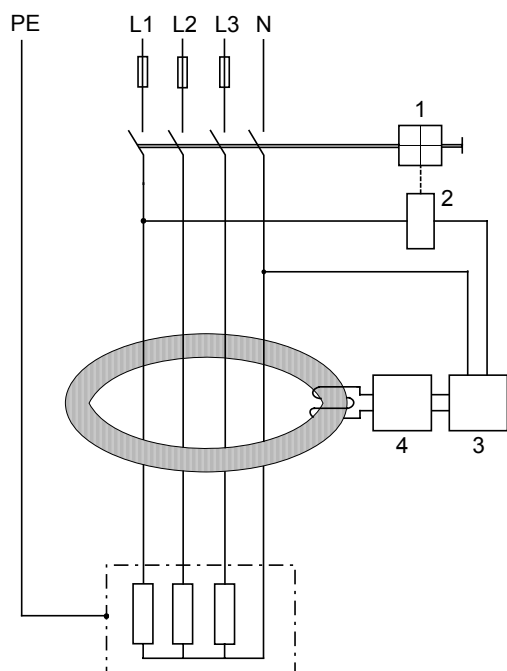


Rys. 20. Wyłącznik różnicowoprądowy wysokoczuły o działaniu zależnym od napięcia sieci [1]:

- 1 – zamek, 2 – wyzwalacz wzrostowy,
- 3 – ogranicznik przepięć tlenkowy, 4 – prostownik,
- 5 – tyrystor, 6 – wzmacniacz sygnału prądu różnicowego

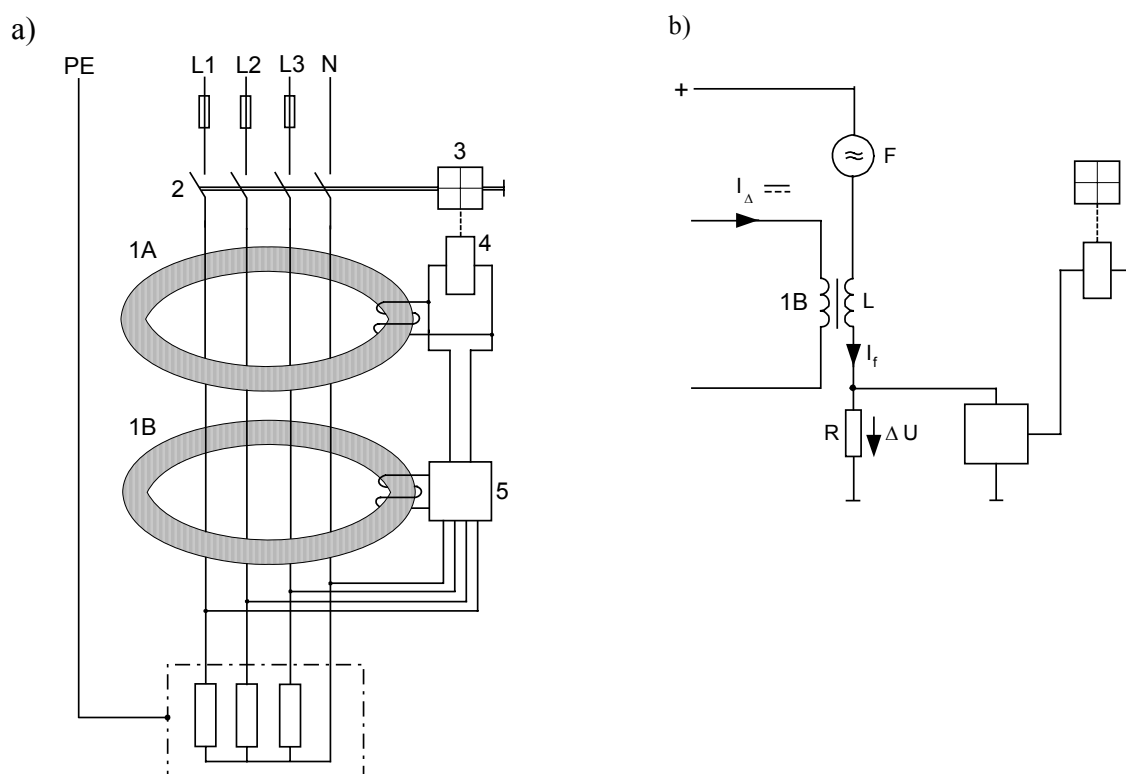
Zapadka zamka wyłącznika o wyzwalaniu bezpośrednim jest pobudzana delikatnym wyzwalaczem różnicowym i wobec tego sam zamek musi być delikatnej konstrukcji, a przez to jest on znacznie bardziej zawodny od zamka zwykłego wyłącznika nadprądowego instalacyjnego. Jednym z pomysłów zmierzających do zbliżenia wskaźników niezawodnościowych wyłączników różnicowoprądowych do poziomu, jaki wykazują wyłączniki nadprądowe, jest rezygnacja z wyzwalacza różnicowego o wyrafinowanej konstrukcji i zastosowanie w wyłącznikach różnicowoprądowych prostych zamków, podobnych do tych, które są stosowane w wyłącznikach nadprądowych. Niestety, oznacza to znaczne zwiększenie mocy potrzebnej do wyzwalania i nieuniknione jest zasilanie wyzwalacza wzrostowego napięciem sieci, jak przedstawiono na rys. 21. Wyłącznik różnicowoprądowy staje się przez to wyłącznikiem o działaniu zależnym od napięcia sieci. Ma wprawdzie elementy elektroniczne, ale – nadal w trosce o wskaźniki niezawodnościowe – nie znajdują się one stale pod napięciem, są uśpione (ang. *dormant operation*, *semi-dormant operation*) i stają się aktywne tylko w procesie wyzwalania.

W obwodach odbiorczych zawierających prostowniki wielopulsowe lub prostowniki jednopulsowe z filtrem prądu stałego przy zwarciu doziemnym prąd różnicowy może być jednokierunkowy o pomijalnym tętnieniu. Wyłączniki różnicowoprądowe mają przekładnik prądowy indukcyjny, uniemożliwiający transformowanie takiego prądu. Mogą być wtedy użyte tylko wyłączniki różnicowoprądowe o wyzwalaniu typu B, mające skomplikowany układ elektroniczny umożliwiający detekcję prądu stałego.



Rys. 21. Wyłącznik różnicowoprądowy o wyzwaniu impulsowym niezależnym od napięcia sieci i wyzwalczu wzrostowym o zasilaniu sieciowym [1]
 1 – zamek prostej konstrukcji (jak w wyłącznikach nadprądowych),
 2 – wyzwalacz wzrostowy prostej konstrukcji,
 3 – przekaźnik elektromagnetyczny lub półprzewodnikowy,
 4 – układ zasobnikowy niezależny od napięcia sieci

Na rys. 22 przedstawiono schemat **wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwaniu typu B**. Wyłącznik ten ma przekładnik prądowy 1A taki, jak wyłączniki o wyzwaniu typu A, reagujące na prądy różnicowe przemiennego i jednokierunkowo pulsującego o składowej stałej nie większej niż 6 mA. Drugi przekładnik prądowy 1B, wraz ze specjalnym układem elektronicznym 5, ma wykrywać prądy różnicowe stałe o pomijalnym tętnieniu.



Rys. 22. Budowa dwuprzekładnikowego wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwaniu typu B [5]:

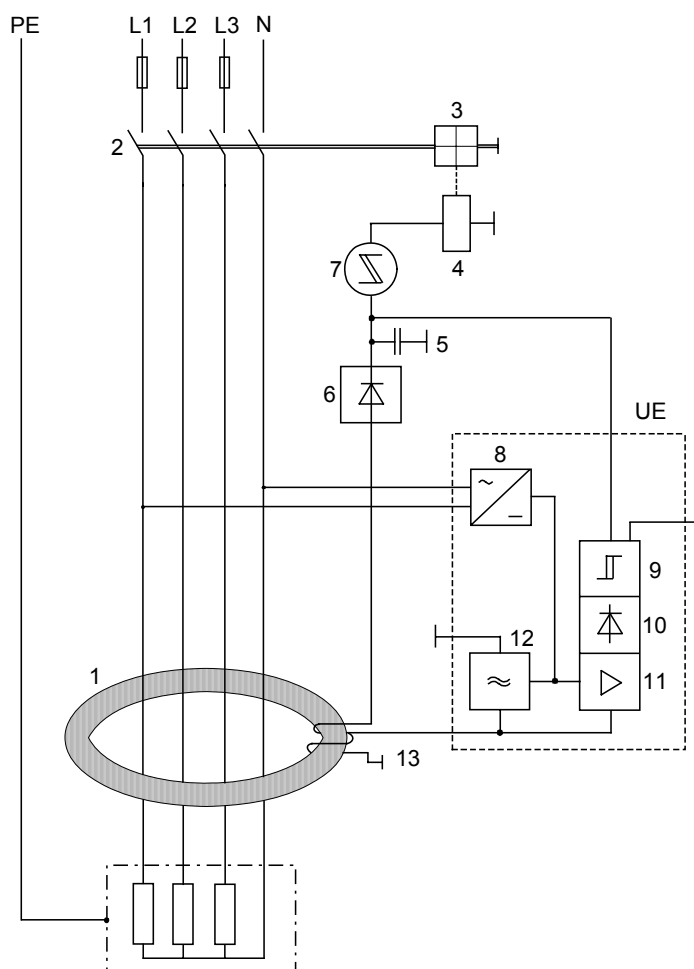
a) układ połączeń; b) układ detekcji prądu stałego o pomijalnym tętnieniu

1A – przekładnik do wykrywania prądów różnicowych przemiennych i pulsujących stałych,
 1B – przekładnik do wykrywania prądów różnicowych stałych o pomijalnym tętnieniu,
 2 – zestyki główne,
 3 – zamek, 4 – wyzwalacz różnicowy, 5 – układ elektroniczny wykrywający prądy różnicowe stałe o pomijalnym tętnieniu

Ten drugi układ działa następująco (rys. 22b). Generator F wymusza w obwodzie wtórnym przekładnika 1B prąd o wysokiej częstotliwości. Prąd ten płynie przez uzwojenie wtórne przekładnika 1B, a także przez rezystancję R , na której wywołuje spadek napięcia ΔU . Przy braku prądu różnicowego w obwodzie pierwotnym układ jest w stanie równowagi. Pojawienie się prądu różnicowego przemiennego ze składową stałą lub prądu stałego powoduje podmagnesowanie rdzenia przekładnika 1B, w wyniku czego zmniejsza się jego przenikalność magnetyczna.

Zmniejszenie się przenikalności magnetycznej rdzenia powoduje zwiększenie prądu w rozpatrywanym obwodzie wtórnym, gdyż maleje indukcyjność L , a zatem i reaktancja uzwojenia wtórnego przekładnika 1B. Zwiększony prąd I_f w obwodzie pomocniczym wywołuje zwiększony spadek napięcia ΔU na rezystancji R . Jeżeli ten spadek napięcia przekroczy wartość progową, to dochodzi do zadziałania wyłącznika za pośrednictwem członu elektronicznego 5. Do wykrywania prądów różnicowych o pomijalnym tętnieniu niezbędne jest doprowadzenie do członu 5 napięcia pomocniczego sinusoidalnie zmiennego (wyzwalanie pośrednie). Wyłącznik może wykrywać prąd różnicowy stały, nawet nietętniący (z baterii akumulatorów), ale wymaga zasilania pomocniczego napięciem przemiennym sinusoidalnym.

Podjęto próby skonstruowania wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwalaniu typu B, reagującego na prądy różnicowe stałe o pomijalnym tętnieniu, który miałby tylko jeden przekładnik. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rys. 23.



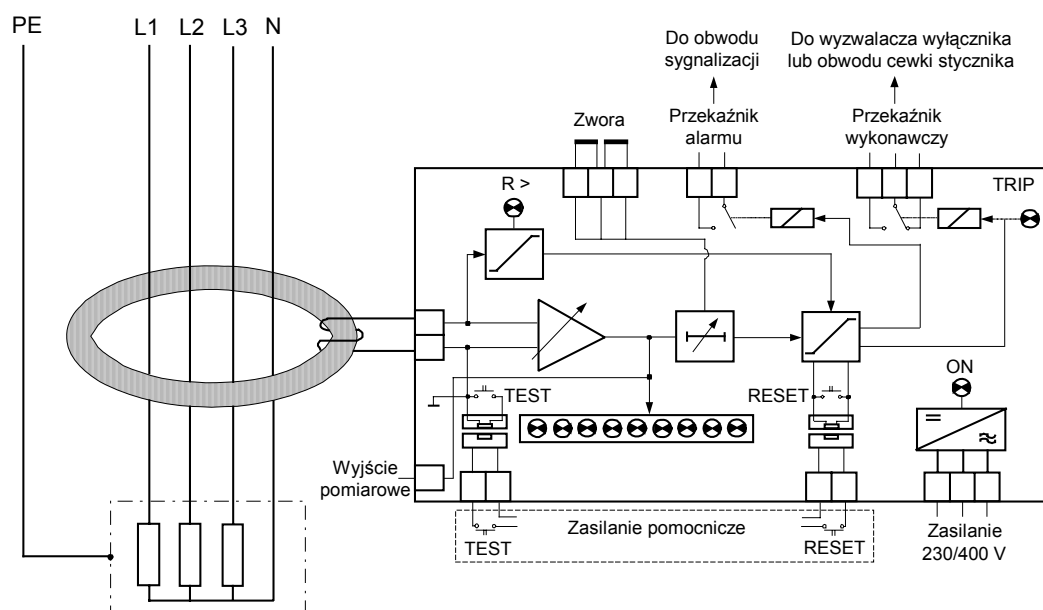
Rys. 23. Budowa jednoprzekładnikowego wyłącznika różnicowoprądowego o wyzwalaniu typu B [12]

Do uzwojenia wtórnego przekładnika sumującego 1 jest przyłączony kondensatorowy zasobnik energii 5, ładowany przez prostownik 6. Po pojawieniu się wystarczająco dużego prądu różnicowego przemiennego kondensator 5 jest ładowany i osiąga napięcie wystarczające do dokonania czynności wyzwalania, zawór sterowany napięciowo 7 zaczyna przewodzić i kondensator rozłado-

wuje się przez cewkę wyzwalacza 4, zostaje zwolniona zapadka zamka i wyłącznik otwiera się. Wyzwalanie impulsowe przy prądzie różnicowym przemiennym jest niezależne od napięcia sieci.

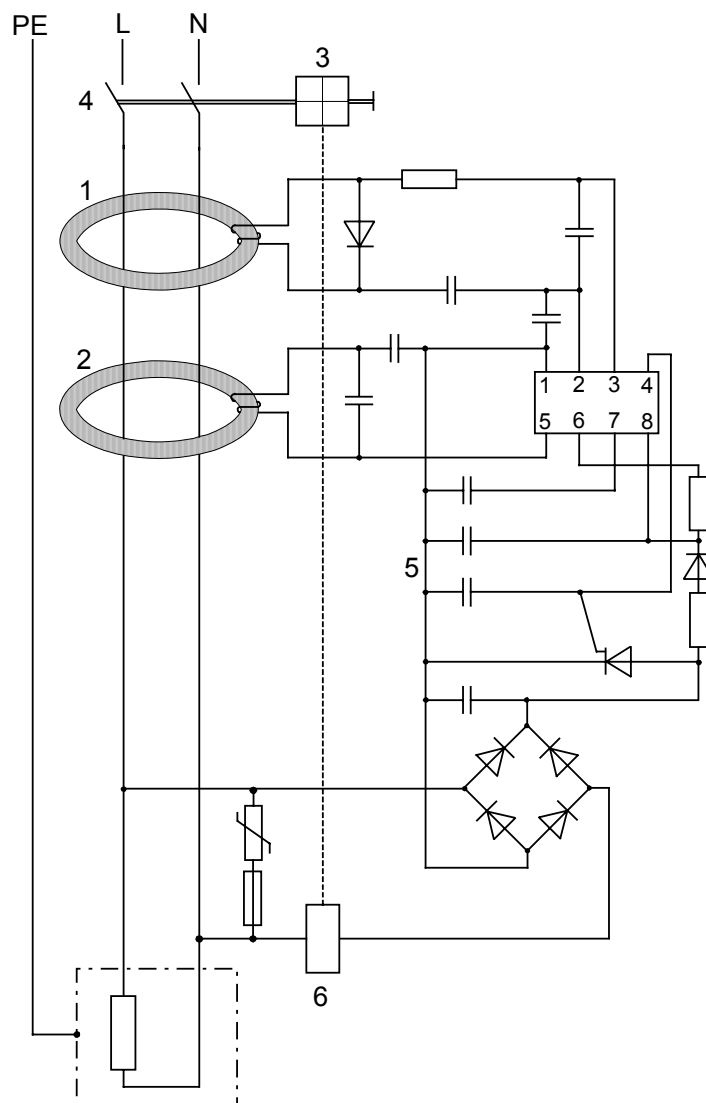
Wyzwalanie przy prądzie różnicowym stałym o pomijalnym tętnieniu i prądzie pulsującym stałym odbywa się za pośrednictwem tego samego przekładnika sumującego i tego samego wyzwalacza, ale przy udziale układu elektronicznego o działaniu zależnym od napięcia sieci. Wspomniany układ elektroniczny UE jest zasilany z sieci za pomocą prostownika 8. Zawiera on wzmacniacz 11, prostownik z układem całkującym 10 oraz komparator z łącznikiem progowym 9, jak również oscylator 12. Oscylator wytwarza prąd zwiększonej częstotliwości (500 Hz) podawany przewodem 13 na część uzwojenia wtórnego w celu przemagnesowywania rdzenia przekładnika sumującego. Kiedy pojawia się prąd różnicowy stały wygładzony lub pulsujący, wtedy punkt pracy na charakterystyce magnesowania przesuwa się w kierunku nasycenia, czyli w kierunku niesymetrii. Powoduje to zmianę wartości napięcia indukowanego 500 Hz, która jest wykrywana i przetwarzana przez układy 9, 10, 11. Doprowadzony zostaje sygnał do łącznika progowego 7 i poprzez cewkę wyzwalającą 4 dochodzi do otwarcia styków głównych. Niezawodność układu można by poprawić zasilając elektronikę za pomocą mostka prostownikowego trójfazowego.

Zamiast wyłącznika różnicowoprądowego zawierającego przekładnik, układ kondycjonowania sygnału oraz wyzwalacz można zastosować zestaw składający się z odrębnych elementów. W takim rozwiązaniu współpracują ze sobą: zewnętrzny przekładnik sumujący i przekaźnik o zasilaniu sieciowym, a elementem wykonawczym, przerywającym obwód główny jest wyłącznik nadprądowy lub stycznik. Na rys. 24 przedstawiono schemat krajowego przekaźnika różnicowoprądowego. Przekaźnik ten może współpracować z dowolnym wyłącznikiem wyposażonym w wyzwalacz napięciowy (wzrostowy lub zanikowy), a także ze stycznikiem. Może działać na sygnał lub na wyłączenie.



Rys. 24. Schemat blokowy przekaźnika różnicowoprądowego [10]

Przekaźniki różnicowoprądowe mają tę zaletę, że pozwalają wybrać nastawienie prądu różnicowego zadziałania oraz zwłoki zadziałania spośród gamy wartości, co umożliwia uzyskanie wybiórczości na kilku stopniach zabezpieczeń. Wymagane parametry przekładnika przy tego typu rozwiązaniu zależą w dużej mierze od zastosowanego układu przekaźnikowego iżądanego uczulenia na kształt przebiegu prądu różnicowego. Zastosowanie odpowiedniego przekładnika i przekaźnika umożliwia budowę zestawów, które są odpowiednikami wyłączników różnicowoprądowych o wyzwalaniu typu AC, A lub B. Przekaźnik wymaga jednak napięcia pomocniczego.

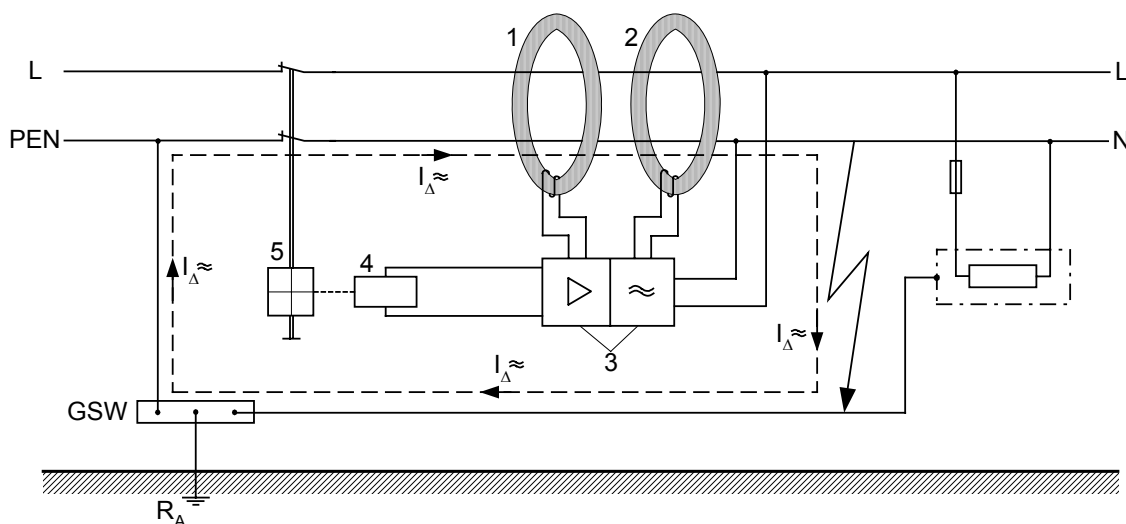


Rys. 25. Amerykański wyłącznik różnicowoprądowy GFCI [1]:

1, 2 – przekładniki, 3 – zamek, 4 – zestyki główne, 5 – układ elektroniczny, 6 – wyzwalacz

Na rys. 25 przedstawiono schemat amerykańskiego wyłącznika różnicowoprądowego GFCI (ang. *ground fault circuit interrupter*). Jego budowa różni się od rozwiązań europejskich. Wyłącznik ma dwa przekładniki prądowe, z których jeden ma za zadanie wykrywać prąd różnicowy, a drugi – wykrywać zwarcie przewodu neutralnego z ziemią, które zmniejsza czułość wyłącznika. W obwodzie wtórnym przekładników jest rozbudowany układ elektroniczny o zasilaniu sieciowym.

Do wykrywania zwarcia przewodu neutralnego z ziemią zastosowano następujące rozwiązanie. W obwodzie wtórnym przekładnika prądowego 2 (rys. 26) jest generator do wymuszania prądu probierczego o podwyższonej częstotliwości, np. 5000 Hz. W razie zwarcia z ziemią przewodu neutralnego prąd ten jest transformowany poprzez przekładnik 2 na stronę pierwotną i płynie w pętli utworzonej przez miejsce zwarcia, przewody ochronne i/lub wyrównawcze i wraca przewodem neutralnym do miejsca zwarcia. Przekładnik sumujący 1 wykrywa ten prąd, zostaje pobudzony układ detekcji i następuje otwarcie wyłącznika. Dopóki nie ma zwarcia przewodu neutralnego z ziemią, to prąd probierczy nie płynie, bo po stronie pierwotnej przekładnika wspomniana pętla jest otwarta.



Rys. 26. Zasada działania wyłącznika GFCI przy zwarciu przewodu neutralnego N z ziemią [1]

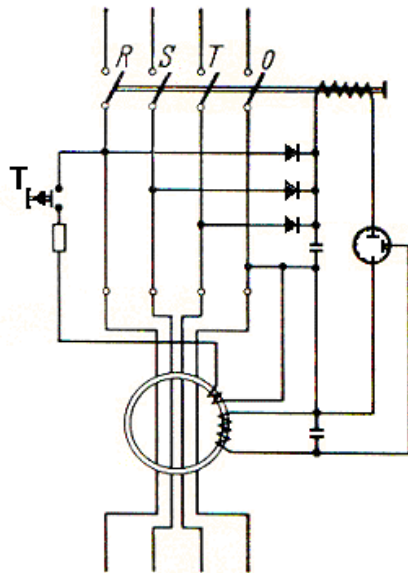
$I_{\Delta\approx}$ – prąd o zwiększonej częstotliwości wymuszany przez generator w obwodzie wtórnym przekładnika 2, 1 – przekładnik do wykrywania prądu różnicowego, 2 – przekładnik do transformacji prądu probierczego, 3 – układ elektroniczny detekcji prądu różnicowego i wymuszania prądu probierczego ze wzmacniaczem, 4 – wyzwalacz, 5 – zamek

4. Człon kontrolny wyłącznika różnicowoprądowego

Wyłączniki różnicowoprądowe mają człon kontrolny, czyli wbudowany podzespół symulujący wystąpienie prądu różnicowego potrzebnego i wystarczająco dużego do zadziałania wyłącznika w określonych warunkach, w celu wstępnego sprawdzenia jego zdolności eksploatacyjnej¹. Mają ten człon kontrolny od początku swego istnienia, od pierwszych prototypów i pierwszych wykonań przemysłowych. Wyjątkiem są niektóre francuskie wyłączniki różnicowoprądowe przyłączeniowe (franc. *interrupteurs différentiels de branchement*) bez członu kontrolnego.

Wyłączniki różnicowoprądowe pojawiły się jako nowsza generacja wyłączników ochronnych w stosunku do wyłączników napięciowych, które miały człon kontrolny, zresztą równie niedoskonały, jak one same [4]. Jako rzecz oczywistą przyjęto, że i nowe wyłączniki wymagają okresowej kontroli zdolności eksploatacyjnej. Było też oczywiste od początku, że chodzi o aparaty spełniające ważne funkcje ochronne, ale mające budowę skomplikowaną, sprzyjającą zwiększonej intensywności uszkodzeń, co zresztą wkrótce potwierdziła praktyka eksploatacyjna. Ponadto okazało się, że wyłączniki dłuższy czas pozostające w stanie zamkniętym mogą nie wyzwalać przy pojawieniu się prądu różnicowego nawet przekraczającego znamionowy prąd różnicowy zadziałania, ale ponownie poprawnie działają po ich przestawieniu za pomocą urządzenia napędu ręcznego (otwarciu i ponownym zamknięciu). Takie przestawienie likwiduje skutki **adhezyjnego przywarcia** powierzchni jarzma i zwory wyzwalacza różnicowego, które podlegają szlifowaniu dokładnemu, nawet z kinematyką docierania. Znaczący odsetek takich zdarzeń był jednym z głównych powodów wprowadzenia wymogu bądź zalecenia okresowego sprawdzania stanu wyłączników przez naciśnięcie przycisku kontrolnego T, początkowo w odstępach miesięcznych, a potem półrocznych. Częstość tego sprawdzania jest określana w dokumentacji wytwórców bądź w przepisach krajowych i instrukcjach eksploatacji, a nie w normach IEC ani EN.

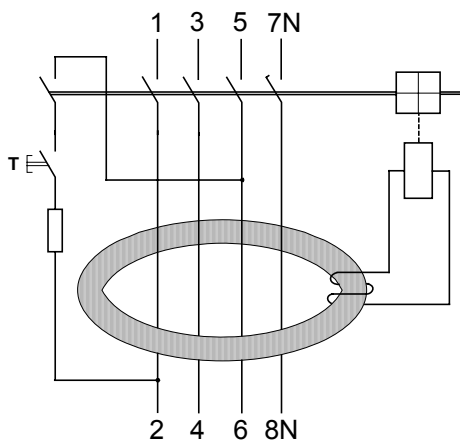
¹ W kolejnych wydaniach normy 61008 są następujące postanowienia: *Wyłączniki powinny być wyposażone w człon kontrolny symulujący przepływ prądu różnicowego przez urządzenie wykrywające, w celu okresowego sprawdzenia prawidłowości działania wyłącznika. UWAGA – Człon kontrolny jest przeznaczony do sprawdzania funkcji wyzwalania, nie służy natomiast do sprawdzania wartości prądu znamionowego różnicowego zadziałania i czasów wyłączenia, przy których to wyzwalanie następuje.*



Rys. 27. Dawne wykonanie członu kontrolnego wyłącznika różnicowoprądowego [6]

Pierwsze wykonania członu kontrolnego były niezbyt wymyślne (rys. 27). Przesadnie uchwycono się zasady, że do detekcji prądu różnicowego – również prądu probierczego – potrzebne jest uzwojenie na rdzeniu przekładnika sumującego. Dodano zatem uzwojenie członu kontrolnego, zupełnie zbyteczne, jak dziś wiadomo. Oznacza to dodatkowe zużycie miedzi i ewentualne zwiększenie okna rdzenia przekładnika, dodatkową moc traconą w uzwojeniach, z czym zwłaszcza początkowo były duże kłopoty [4], bo liczba zwojów uzwojeń pierwotnych była duża. Ponadto w obwodzie kontrolnym nie było zestyku pomocniczego zwiernego, który obecnie jest standardem.

Współczesne wykonanie członu kontrolnego przedstawiono na rys. 28. Szybko zrozumiano, że do wymuszenia probierczego prądu różnicowego nie jest potrzebne dodatkowe uzwojenie. Wystarczy końcówki obwodu kontrolnego przyłączyć po dwóch stronach przekładnika sumującego, a nie po jednej stronie, jak to początkowo czyniono. Ponadto wprowadzono w obwodzie kontrolnym **zestyk pomocniczy zwierny** wyłącznika, otwierający się po otwarciu wyłącznika, jako dodatkowe zabezpieczenie przed spalaniem rezystora w tym obwodzie. W sytuacji z rys. 28 mogłoby to nastąpić – w braku wspomnianego zestyku – gdyby zasilanie było przyłączone od dołu, a ktoś uporczywie naciskał przycisk T albo gdyby zestyk tego przycisku był trwale zwarty w wyniku szepienia styków bądź defektu mechanicznego.



Rys. 28. Współczesne wykonanie członu kontrolnego wyłącznika różnicowoprądowego

Norma wymaga, aby człon kontrolny był wbudowany na stałe i by można go uruchomić niezależnie od kierunku przepływu energii przez wyłącznik, a manipulowanie nim przy otwartym wyłączniku było bezskuteczne. Ponadto manipulowanie przyciskiem kontrolnym T nie powinno wywoływać pojawienia się napięcia na przewodzie ochronnym PE. Przyłączanie wyłącznika o liczbie

biegunów większej niż dwa wymaga przestrzegania oznaczeń zacisków, aby obwód kontrolny był w ogóle zasilany i by był zasilany napięciem o właściwej wartości. Na tę okoliczność należy zwrócić szczególną uwagę wtedy, kiedy wykorzystuje się nie wszystkie bieguny wyłącznika (np. wyłącznik 4-biegunowy instaluje się w obwodzie 3-fazowym bez przewodu neutralnego) albo kiedy wykorzystuje się je w sposób nieprzewidywany przez wytwórcę.

Człon kontrolny nie wymusza znamionowego prądu różnicowego zadziałania $I_{\Delta n}$ wyłącznika, bo nie służy on do sprawdzania, czy wyłącznik wyzwala przy tym prądzie i nie służy do sprawdzania, czy wyłącznik jest w pełni sprawny. Służy tylko do orientacyjnego sprawdzenia, czy – z grubsza biorąc – układ wyzwalający wyłącznika jest sprawny. Przy tej czynności kontrolnej ma być przewyciężone ewentualne przywarcie zwory do jarzma wyzwalacza i dlatego świadomie wymusza się prąd probierczy większy niż $I_{\Delta n}$ wyłącznika, ale nie większy niż $2,5I_{\Delta n}$ (przy napięciu znamionowym na zaciskach zasilających członu kontrolnego). Jeśli wyłącznik umożliwia nastawianie prądu różnicowego zadziałania, to powyższe wymaganie ($I_{\Delta} \leq 2,5I_{\Delta n}$) sprawdza się przy najmniejszej wartości nastawczej. Człon kontrolny powinien poprawnie działać przy zasilaniu napięciem w zakresie $(0,85 \div 1,10)U_{ns}$, przy czym U_{ns} jest napięciem znamionowym zasilania członu kontrolnego.

Człon kontrolny wyłącznika $I_{\Delta n} = 30$ mA, zasilany napięciem fazowym instalacji 230/400 V $U_{ns} = 230$ V, wymuszający prąd nie większy niż $2,5I_{\Delta n} = 2,5 \cdot 30 = 75$ mA, ma rezystor o rezystancji niemniejszej niż:

$$R_s = \frac{U_{ns}}{2,5 I_{\Delta n}} = \frac{230}{2,5 \cdot 0,03} = 3067 \Omega \approx 3,2 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

Moc obliczeniowa wydzielana w tym rezystorze osiąga nadspodziewanie dużą wartość:

$$P_s = \frac{(1,1U_{ns})^2}{R_s} = \frac{(1,1 \cdot 230)^2}{3200} = 20,0 \text{ W} \quad (11)$$

Gdyby taka moc miała być wydzielana w sposób ciągły, trzeba by zmienić konstrukcję i gabaryt wyłącznika. Nie ma takiej potrzeby, z przycisku kontrolnego korzysta się sporadycznie, najwyżej kilka razy w roku, a tylko w wyjątkowych zastosowaniach – codziennie i to nie raz po razie. Czas przepływu prądu w poprawnie wykonanym obwodzie kontrolnym sprawnego wyłącznika, po jednokrotnym naciśnięciu przycisku, nie przekracza 10 ms. Tym niemniej rezystor – ze względu na nagrzewanie – jest wymiarowany z dużym zapasem na **pracę dorywczą** o czasie trwania wyrażonym w sekundach. Mimo to wystarczy rezystor o największej długotrwale dopuszczalnej mocy rozpraszanej co najmniej trzykrotnie mniejszej od obliczonej według wzoru (11).

Skoro rezystor nie jest zwymiarowany na pracę ciągłą, to wielokrotne naciskanie przycisku T w krótkich odstępach czasu może doprowadzić do jego spalania. Najłatwiej byłoby doprowadzić do tego przy naciskaniu przycisku T otwartego wyłącznika, który oczywiście nie wyzwala. Aby temu zapobiec obwód kontrolny zasila się przez zestyk pomocniczy zwierny sprawiający, że naciskanie przycisku T otwartego wyłącznika jest bezskuteczne.

Badania stanu wyłączników różnicowoprądowych *in situ* przeprowadzone w latach 1985÷1996 przez Elektroberatung Bayern [1] wykazały, że 1÷1,5% badanej populacji wyłączników ma uszkodzony człon kontrolny, co zwykle oznacza przepalony rezystor.

Z postanowień normy wynika, że **przycisk kontrolny nie służy do zwykłego otwierania wyłącznika** różnicowoprądowego i jest to napisane w instrukcji dołączonej do wyłącznika, a nawet oznaczone na samym wyłączniku: w końcu przycisk kontrolny nosi oznaczenie **T** (test) a nie **O** (ang. *off*, franc. *ouverture*, pol. *otwieranie*). Jest jednak na wschód od Odry odmiana elektryków nieustannie zastanawiających się, jak postąpić mądrzej niż stanowią choćby najśluszniesze wymagania i zalecenia norm bądź dokumentacji technicznej. Pośród innych innowacji tak zrodził się niewydarzony pomysł, aby wyłącznik różnicowoprądowy każdorazowo otwierać przez naciskanie przycisku kontrolnego **T**, a nie dźwignią napędową lub przyciskiem **O**. Jakoby w trosce o częstsze sprawdzanie stanu wyłącznika.

Trwałość mechaniczna wyłączników różnicowoprądowych wynosi 10 000 do 20 000 przełączeń (bezprądowych). Deklarowana trwałość elektryczna (styków pod pełnym obciążeniem) jest wprawdzie mniejsza, np. 4 000 łączeń, ale ponieważ zdolność łączenia zestyków głównych rzadko jest w pełni wykorzystana, to trwałość łączeniowa (styków torów głównych) zbliża się do trwałości mechanicznej. Tymczasem trwałość łączeniowa zestyku przycisku obwodu kontrolnego (stałe łączącego taki sam prąd) jest mniejsza niż 1 000 łączeń, w wielu przypadkach wynosi 500÷750 łączeń. Wobec tego ten, kto stale otwiera wyłącznik różnicowoprądowy przyciskiem kontrolnym **T**, skraca trwałość wyłącznika 10÷20-krotnie. Tak się kończą dobre intencje realizowane na oślep.

5. Rozterki terminologiczne

Co to jest prąd różnicowy?

Funkcja ochronna wyłączników różnicowoprądowych rozpoczyna się od detekcji prądu różnicowego. Pojęcie *prąd różnicowy* jest zatem pojęciem podstawowym w tej dziedzinie; od niego pochodzi nazwa rozpatrywanych wyłączników. Normy od kilkadziesiąt lat „wyjaśniają” co to jest prąd różnicowy:

prąd różnicowy I_{Δ} – suma wektorowa chwilowych wartości prądów przepływających w obwodzie głównym wyłącznika różnicowoprądowego (wyrażona wartością skuteczną).

Nie jest to bynajmniej jeden z błędów polskiego tłumaczenia, bo w oryginalnych tekstach od niepamiętnych czasów aż do najnowszej normy z roku 2008 [15] definicja ta brzmi następująco:

residual current I_{Δ} – vector sum of the instantaneous values of the current flowing in the main circuit of the residual current device (expressed as r.m.s. value)

courant différentiel résiduel I_{Δ} – somme vectorielle des valeurs instantanées des courants circulant dans le circuit principal de l'interrupteur différentiel (exprimée en valeur efficace)

Student elektrotechniki, który latami uporczywie dodawałby wektorowo (wskazowo) wartości chwilowe prądów, zostałby relegowany z uczelni i miałby przed sobą tylko widmo kariery w normalizacji.

Cóż to zatem jest prąd różnicowy? Ano prąd różnicowy jest **prądem o wartości chwilowej równej sumie algebraicznej wartości chwilowych prądów** przepływających w obwodzie głównym wyłącznika różnicowoprądowego. Jest to definicja najbardziej ogólna, słuszna w każdej sytuacji.

Jeżeli w obwodzie głównym płyną prądy sinusoidalne (nieodkształcone), to można dodać drugą definicję: prąd różnicowy jest prądem równym sumie wektorowej prądów przepływających w obwodzie głównym wyłącznika różnicowoprądowego. Oczywiście dodaje się wektory (wskazy), których moduł (długość, wartość liczbowa) jest miarą **wartości skutecznej** każdego z prądów i jako wynik otrzymuje się wartość skuteczną prądu różnicowego.

W tym roku wreszcie coś drgnęło. W dostępnym w Internecie¹ Międzynarodowym Słowniku Elektrotechnicznym IEC ukazały się nowe wersje definicji prądu różnicowego, nieco lepsze niż poprzednie:

residual current – algebraic sum of the values of the electric currents in all live conductors, at the same time at a given point of an electric circuit in an electrical installation

courant différentiel résiduel – somme algébrique des valeurs des courants électriques dans tous les conducteurs actifs, au même instant en un point donné d'un circuit électrique d'une installation électrique

Nie będą zadowoleni ci, którzy przez wiele lat błędną definicję wykładali na kursach, a następnie egzekwowali na egzaminach.

¹ Adres strony: <http://www.electropedia.org/>, termin oznaczony numerem: IEC number 826-11-19.

Wyłącznik czy rozłącznik różnicowoprądowy?

Z punktu widzenia zdolności łączenia łączniki energoelektryczne dzieli się na trzy grupy, a za kryterium podziału służy stosunek znamionowego prądu wyłączalnego I_{nw} do znamionowego prądu ciągłego I_n :

$I_{nw}/I_n \approx 0$ – odłączniki (łączniki izolacyjne)

$1 < I_{nw}/I_n \leq 10$ – rozłączniki (łączniki robocze)

$I_{nw}/I_n > 10$ – wyłączniki (łączniki zwarcioowe)

Graniczna krotność 10 odróżniająca wyłączniki od rozłączników ma długą tradycję i jest uzasadniona tym, że prądy wyłączeniowe robocze tej krotności nie przekraczają.

Z informacji podanych na początku niniejszego opracowania (stronica 7) wynika, że łączniki ochronne różnicowoprądowe w zasadzie są *wyłącznikami*, bo mają zdolność wyłączania $I_{nw} \geq 10I_n$. Z drugiej strony zdolność wyłączania wyłączników różnicowoprądowych bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego (RCCB) na poziomie zaledwie 500 A nie jest imponująca. Nie wystarcza nawet w europejskim mieszkaniu, w którym rozdzielnica mieszkaniowa powinna być przystosowana do prądu zwarcioowego początkowego 6 kA. Stąd rozdzielenie jaźni.

W polskich tłumaczeniach kolejnych norm IEC i EN jest definicja: *Wyłącznik różnicowoprądowy – łącznik mechanizmowy przeznaczony do załączania, przewodzenia i wyłączania prądów w normalnych warunkach pracy i powodujący otwarcie zestyków, gdy prąd różnicowy osiągnie określoną wartość w określonych warunkach*. Ta definicja nie koresponduje z terminem, który objaśnia. Skoro ten łącznik jest przeznaczony do *wyłączania prądów w normalnych warunkach pracy* i nie ma wyzwalaczy zwarcioowych, to jest to rozłącznik, a nie wyłącznik.

We francuskiej literaturze technicznej, również w katalogach, występują obydwa pojęcia: wyłącznik różnicowoprądowy (*disjoncteur différentiel*) oraz rozłącznik różnicowoprądowy (*interrup-teur différentiel*). Wersję językową francuską mają zarówno normy międzynarodowe IEC, jak i normy europejskie EN. Na sąsiednich stronach, na tym samym poziomie, występują jako równoważne następujące nazwy:

- angielski *wyłącznik* – residual current operated **circuit-breaker**, w skrócie RCD oraz
- francuski *rozłącznik* – **interrup-teur** à courant différentiel résiduel, w skrócie ID.

Po przejechaniu Eurotunelu *wyłącznik* staje się *rozłącznikiem* albo odwrotnie, w zależności od kierunku jazdy.

Niemcy w tej kwestii zachowują neutralność; mają *Fehlerstromschutzschalter*, czyli łączniki (*Schalter*) ochronne (*Schutz*) różnicowoprądowe (*Fehlerstrom*), bez jakiegokolwiek sugestii na temat zdolności wyłączania. Podobnie Rosjanie: *устройства защитного отключения* – УЗО, dosłownie: urządzenia do wyłączania ochronnego.

Jaki przekładnik prądowy?

Wyłączniki różnicowoprądowe mają przekładnik prądowy, pierwszy człon układu detekcji prądu różnicowego. Jak go nazywać?

Przez wiele lat liczni autorzy nazywali go przekładnikiem prądowym Ferrantiego czyli przekładnikiem prądowym ziemnozwarciowym, który w poważnym wydawnictwie terminologicznym [16] został zdefiniowany:

przekładnik prądowy ziemnozwarciowy – przekładnik prądowy lub grupa trzech przekładników prądowych tak wykonanych i połączonych, że wytwarzany sygnał informacyjny jest proporcjonalny do sumy wartości chwilowych prądów w trzech przewodach fazowych obwodu trójfazowego (ang. *residual current transformer*, fr. *transformateur de courant résiduel*, niem. *Erdschlußstromwandler*, ros. *трансформатор тока нулевой последовательности*)

Zwraca uwagę, że odpowiedniki angielski i francuski znaczą po prostu: *przekładnik prądu różnicowego*. Co przeszkadzało, aby tą definicją objąć również czwarty przewód (N) obwodu,

w którym ten przewód przecież nie może być uziemiony. Przekładnik nadal wykrywałby prąd ziemnozwarciowy albo prąd różnicowy, który wypływa do ziemi, poza układ przewodów czynnych. Czterech przewodów czynnych, a nie trzech, jak w pierwotnej definicji. Oczywiście należałoby wtedy zmienić odpowiednik rosyjski, bo nie byłby to już przekładnik (filtr) prądu kolejności zerowej.

W normalizacji na razie utrwalił się termin *przekładnik prądowy sumujący*, tak zdefiniowany w IEC (termin numer 321-02-16)

summation current transformer – a transformer for the measurement of the sum of the instantaneous values of currents having the same frequency within a power system

(fr. *transformateur de courant sommateur*, *transformateur de courant totalisateur*, niem. *Summenstromwandler*, ros. *суммирующий трансформатор тока*)

Pod presją różnojęzycznych odpowiedników ta wersja terminu została przyjęta w niniejszym cyklu artykułów. W rezultacie wyłącznik różnicowoprądowy, pobudzany wyzwalaczem różnicowym ma do detekcji prądu różnicowego przekładnik prądowy sumujący. A dlaczego nie przekładnik prądowy różnicowy? Tym bardziej, że problemy jego konstrukcji mają niewiele wspólnego ze znanymi przekładnikami prądowymi pomocniczymi sumującymi, w których kolejne uzwojenia zwiększają, a nie zmniejszają wypadkowy przepływ. Marzyłoby się więcej logiki i więcej elegancji w terminologii technicznej.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy.

Literatura

1. Biegelmeier G., Kiefer G., Krefter K.-H.: Schutz in elektrischen Anlagen. VDE-Verlag, Berlin – Offenbach, 1999.
2. Czapp S.: The Effect of Earth Fault Current Harmonics on Tripping of Residual Current Devices. IX Conference-Seminar International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation ISNCC2008, Łagów 10-13 czerwiec 2008, ID51.
3. Czapp S.: Czulość wyłączników różnicowoprądowych przy prądzie różnicowym przemiennym o częstotliwości innej niż 50 Hz i przy prądzie różnicowym stałym. Miesięcznik SEP INPE Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2007, nr 96, s. 3-19.
4. Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Powstanie, rozwój, przyszłość. Miesięcznik SEP INPE Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2008, nr 108, s. 3-46.
5. Reinhard S.: Urządzenia różnicowoprądowe w wykonaniu na dowolny kształt prądu do zastosowań przemysłowych (tłum. D. Woźniak). Materiały firmowe, Siemens, 1994.
6. Schranck W.: Schutz gegen Berührungsspannungen. Schutzmaßnahmen gegen elektrische Unfälle durch Berührungsspannungen in Niederspannungsanlagen. Dritte überarbeitete Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1958.
7. Soiński M.: Nowoczesne materiały magnetycznie miękkie w technice. Przegląd Elektrotechniczny, 1999, nr 9.
8. Materiały magnetyczne, Vacuumschmelze.
9. NANOPERM® a superb softmagnetic alloy for ELCB cores. Materiały firmowe, MAGNETEC GmbH.
10. Przekładnik różnicowoprądowy PRP. Materiały firmowe, ELESTER, 1998.
11. VDM Report No. 27, Weichmagnetische Werkstoffe auf Ni-Fe Basis. Materiały firmowe, ThyssenKrup VDM.
12. Patentschrift 383906. Biegelmeier G.: Fehlerstromschutzschalter für Fehlerwechsel- und Fehlergleichströme. Anmeldetag 16.04.1985, Ausgabetag 10.09.1987.
13. Patentschrift DE 3807935 C2. Hugel P.: Selektiver Fehlerstromschutzschalter. Anmeldetag 10.03.1988, Veröffentlichungstag der Patenterteilung 21.08.1997.

14. PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne.
15. IEC/TR 60755:2008 General requirements for residual current operated protective devices. 2nd edition.
16. Słownik terminologiczny elektryki. Aparaty elektryczne wchodzące w skład urządzeń rozdzielczych. Część II. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Polski Komitet Terminologii Elektrycznej. Instytut Elektrotechniki, Warszawa, 1988.
17. IEC 62423:2007 Type B residual current operated circuit-breakers with and without integral overcurrent protection for household and similar uses (Type B RCCBs and Type B RCBOs).

Dane bibliograficzne:

Musiał E., Czapp S.: **Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe (2). Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji**. Miesięcznik SEP „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”. 2008, nr 109, s. 3-44.

cdn.