

NARAŻENIA CIEPLNE I ELEKTRODYNAMICZNE WYŁĄCZNIKÓW RÓŻNICOWOPRĄDOWYCH PRZY ICH DOBEZPIECZANIU WYŁĄCZNIKAMI NADPRĄDOWYMI INSTALACYJNYMI – REFERAT KONFERENCYJNY

Stanisław CZAPP¹, Daniel KOWALAK², Kornel BOROWSKI³

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 347-13-98 fax: 347-18-98 e-mail: s.czapp@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 347-14-30 fax: 347-21-36 e-mail: d.kowalak@ely.pg.gda.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel: 347-13-98 fax: 347-18-02 e-mail: kborowski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: Powszechnie stosowane wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego wymagają dobezpieczenia. Jako urządzenia dobezpieczające stosuje się m.in. wyłączniki nadprądowe instalacyjne. W artykule przedstawiono wyniki badań prądów ograniczonych i całek Joule'a wyłączenia tych wyłączników oraz omówiono zagrożenia, które mogą wystąpić przy dobezpieczaniu wyłączników różnicowoprądowych wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi.

Słowa kluczowe: zabezpieczenia różnicowoprądowe, prądy zwarciowe, dobezpieczenie.

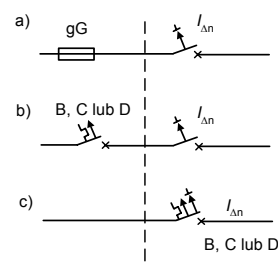
1. WSTĘP

Obciążalność zwarciowa wyłączników różnicowoprądowych, czyli odporność na cieplne i elektrodynamiczne skutki przepływu prądu zwarciowego, zależy głównie od tego, czy rozpatrywany wyłącznik różnicowoprądowy ma wbudowane zabezpieczenie nadprądowe czy też nie.

Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego (RCCB – ang. *residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection*) mają niewielką zdolność wyłączenia prądu różnicowego – nie mniejszą niż 10-krotną wartość prądu znamionowego ciągłego (jednak nie mniej niż 500 A), więc w praktyce wymagają dobezpieczenia. Dobezpieczenie ma również zapewnić to, że w stanie zamkniętym wyłącznik różnicowoprądowy wytrzyma cieplne i elektrodynamiczne skutki przepływu prądu zwarciowego przy zwarciach faza – faza, faza – żyła neutralna oraz prądu doziemnego w razie braku zadziałania wyłącznika.

Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym (RCBO – ang. *residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection*) mają zdolność wyłączenia porównywalną z wyłącznikami nadprądowymi. Producent podaje informację o prądzie znamionowym zwarciowym umownym, np. 6 kA (symbol graficzny $\boxed{6000}$), do którego nie jest wymagane dobezpieczenie.

Jeżeli instaluje się wyłącznik różnicowoprądowy bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego (RCCB), to z reguły należy zastosować odrębne zabezpieczenie nadprądowe (rys. 1). Niezbędne jest wtedy sprawdzenie, czy zastosowane zabezpieczenie nadprądowe prawidłowo dobezpiecza wyłącznik różnicowoprądowy.



Rys. 1. Obwody z wyłącznikiem różnicowoprądowym: a) RCCB dobezpieczonym bezpiecznikiem, b) RCCB dobezpieczonym wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym, c) RCBO niewymagającym dobezpieczenia

2. WYMAGANIA NORM PRZEDMIOTOWYCH

Norma przedmiotowa [1] wymaga, aby wyłączniki różnicowoprądowe RCCB wytrzymały prąd szczytowy i_s oraz całkę Joule'a I^2t , których wartości podano w tabelicy 1.

Wartość wytrzymywanej całki Joule'a powinna być nie mniejsza niż całka wyłączenia I^2t_w bezpiecznika bądź wyłącznika nadprądowego, który stanowi dobezpieczenie rozważanego wyłącznika różnicowoprądowego. Wytrzymywany prąd szczytowy i_s natomiast powinien być nie mniejszy niż prąd ograniczony i_o wspomnianego wcześniej bezpiecznika bądź wyłącznika nadprądowego. Rozpatrując wyłącznik różnicowoprądowy o prądzie znamionowym ciągłym $I_n = 25$ A i prądzie znamionowym zwarciowym umownym 6 kA, na podstawie tabelicy 1 można stwierdzić, że wyłącznik ten ma obowiązek wytrzymać prąd szczytowy do $i_s = 1,7$ kA oraz całkę Joule'a do $I^2t = 3,7$ kA²s. Wymagane przez normę [1]

wymienione wartości wydają się być dość niskie i istnieje ryzyko, że w przypadku dobezpieczenia takiego wyłącznika różnicowoprądowego wyłącznikiem nadprądowym zostaną przekroczone wartości wytrzymawane przez wyłącznik różnicowoprądowy i może ulec on uszkodzeniu.

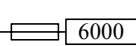
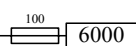
Tablica 1. Wytrzymawane przez wyłącznik różnicowoprądowy RCCB wartości prądu szczytowego i_s i całki Joule'a I^2t [1]

$I_{nc}, I_{\Delta c}$ [A]		I_n [A]						
		≤ 16	≤ 20	≤ 25	≤ 32	≤ 40	≤ 63	≤ 80
500	i_s [kA]	0,45	0,47	0,5	0,57			
	I^2t [kA ² s]	0,4	0,45	0,53	0,68			
1000	i_s [kA]	0,65	0,75	0,9	1,18			
	I^2t [kA ² s]	0,50	0,9	1,5	2,7			
1500	i_s [kA]	1,02	1,1	1,25	1,5	1,9	2,1	
	I^2t [kA ² s]	1	1,5	2,4	4,1	9,75	22	
3000	i_s [kA]	1,1	1,2	1,4	1,85	2,35	3,3	3,5
	I^2t [kA ² s]	1,2	1,8	2,7	4,5	8,7	22,5	26
4500	i_s [kA]	1,15	1,3	1,5	2,05	2,7	3,9	4,3
	I^2t [kA ² s]	1,45	2,1	3,1	5,0	9,7	28	31
6000	i_s [kA]	1,3	1,4	1,7	2,3	3	4,05	4,7
	I^2t [kA ² s]	1,6	2,4	3,7	6,0	11,5	25	31
10000	i_s [kA]	1,45	1,8	2,2	2,6	3,4	4,3	5,1
	I^2t [kA ² s]	1,9	2,7	4	6,5	12	24	31

I_n – prąd znamionowy ciągły wyłącznika różnicowoprądowego
 I_{nc} – prąd znamionowy zwarcia umowy wyłącznika różnicowoprądowego
 $I_{\Delta c}$ – prąd znamionowy różnicowy zwarcia umowy wyłącznika różnicowoprądowego

Producenci mogą wykonać wyłączniki różnicowoprądowe wytrzymałe większy prąd szczytowy i całkę Joule'a niż podane w tablicy 1. Podają oni wtedy największy dopuszczalny prąd zwarcia początkowy w miejscu zainstalowania wyłącznika różnicowoprądowego i dodają symbol graficzny bezpiecznika, jeśli dobezpieczenie jest konieczne (tabl. 2).

Tablica 2. Przykładowe oznaczenia obciążalności zwarciaowej wyłączników RCCB

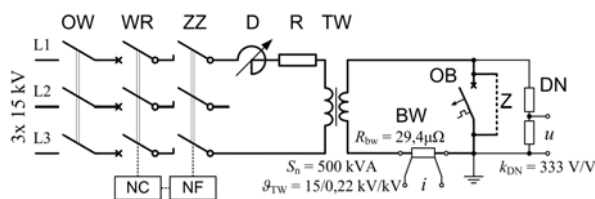
Oznaczenie graficzne	Opis oznaczenia
	Obciążalność zwarciaowa 6 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym $I_{nb} \leq 63$ A
	Obciążalność zwarciaowa 6 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym $I_{nb} \leq 100$ A

Zakłada się zatem, że wyłącznik różnicowoprądowy jest dobezpieczony bezpiecznikiem, a nie wyłącznikiem nadprądowym. W praktyce bezpiecznik często zastępuje się wyłącznikiem nadprądowym – niestety, bez wykonania dodatkowych, niezbędnych analiz. Bezpiecznik można zastąpić wyłącznikiem nadprądowym pod warunkiem, że ograniczy on prąd zwarcia do wartości nie większej niż czyni to wymagany bezpiecznik, a całka Joule'a wyłączenia wyłącznika nadprądowego nie będzie większa niż odpowiednia całka Joule'a tegoż bezpiecznika [2, 3].

3. BADANIA WYŁĄCZNIKÓW NADPRĄDOWYCH

Aby ocenić narażenia wyłączników różnicowoprądowych RCCB przy ich dobezpieczeniu wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi, przeprowadzono badania laboratoryjne prądów ograniczonych i całek Joule'a wyłączenia wybranych wyłączników nadprądowych instalacyjnych. Przebadano wyłączniki nadprądowe o charakterystykach typu B, C i D – łącznie dziesięć sztuk trzech producentów. Zakres badań obejmował rejestracje wspomnianych parametrów przy prądach zwarciaowych o wartościach od 1 do 5 kA

i współczynnika mocy obwodu zwarciaowego mieszczącym się w przedziale $\cos\phi = 0,4 \div 0,85$ (w zależności od wartości prądu zwarciaowego). Schemat stanowiska badawczego przedstawia rysunek 2.



OW – odłącznik, WR – wyłącznik roboczy, ZZ – załącznik zwarciaowy, D – dławik, R – rezystor, TW – transformator wielkopiętrowy, OB – badany wyłącznik, BW – bocznik wielkopiętrowy, DN – dzielnik napięciowy, NF – nastawnik fazowy, NC – nastawnik czasowy, Z – metalowa zwora

Rys. 2. Schemat stanowiska do badań wyłączników nadprądowych instalacyjnych

W skład każdej próby obejmującej badanie wybranego wyłącznika instalacyjnego wchodziła próba kalibracyjna oraz próba wyłączenia określonego prądu zwarciaowego. Celem próby kalibracyjnej było określenie parametrów zespołu probierczego, które pozwoliły uzyskać żądane wartości prądu zwarciaowego (wartość skuteczną spodziewanego prądu zwarciaowego z uwzględnieniem składowej nieokresowej – I_k oraz prąd zwarciaowy udarowy – i_p).

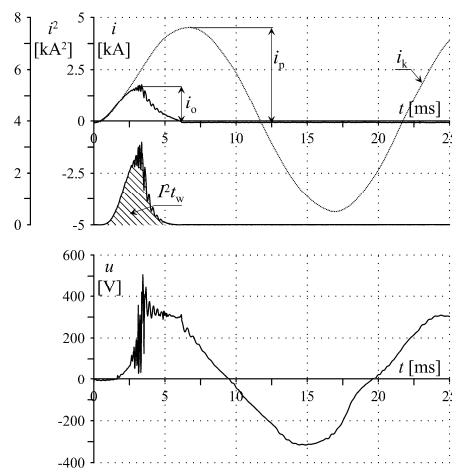
Dla każdego wyłącznika instalacyjnego przeprowadzono po trzy próby wyłączenia prądu zwarciaowego I_k nastawionego w trakcie prób kalibracyjnych. Podczas próby wyłączenia rejestrowano przebiegi prądu wyłączonego przez wyłącznik oraz napięcia na jego zaciskach. Na podstawie otrzymanych rejestracji wyznaczono prąd ograniczony i_o i całkę Joule'a wyłączenia I^2t_w .

Całkę Joule'a wyłączenia obliczono na podstawie zależności:

$$I^2t_w = \int_0^{t_w} i^2 dt, \quad (1)$$

gdzie t_w jest czasem od chwili powstania zwarcia do osiągnięcia przez prąd wartości zero.

Przykładowy przebieg wyłączenia prądu zwarciaowego przez wyłącznik nadprądowy instalacyjny zamieszczono na rysunku 3. Pole pod przebiegiem prądu wyłączonego podniesione do potęgi drugiej (zakreskowany obszar) jest równe całce Joule'a wyłączenia I^2t_w .



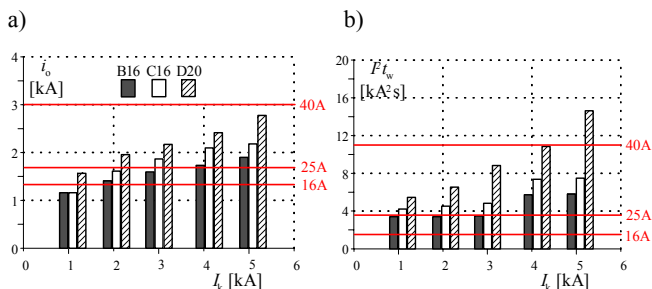
Rys. 3. Wyłączenie prądu zwarciaowego przez wyłącznik nadprądowy instalacyjny C16; $I_k = 3,1$ kA, $i_p = 4,5$ kA, $i_o = 1,8$ kA, $I^2t_w = 4,8$ kA²s

4. ANALIZA I OCENA WYNIKÓW BADAŃ

4.1. Analiza i ocena wyników badań w świetle wymagań normy przedmiotowej [1]

Na podstawie badań opisanych w poprzednim punkcie, opracowano przykładowe wykresy (rys. 4 i 5) przedstawiające wartości prądu ograniczonego i_0 i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w w funkcji spodziewanego prądu zwarciovego I_k . Każdy wykres zawiera linię poziomą przedstawiającą, zgodnie z tabelicą 1, największą wartość prądu szczytowego i_s i całki Joule'a I^2t , którą przetrzyma wyłącznik różnicowoprądowy bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego o określonym prądzie znamionowym ciągłym.

Rysunek 4 przedstawia wyniki badań wyłączników nadprądowych instalacyjnych B16, C16 i D20. Wyniki te zestawiono z największą dopuszczalną wartością prądu szczytowego i całki Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o prądach znamionowych ciągłych kolejno $I_n = 16, 25$ i 40 A. Jeżeli porównać wyniki badań prądów ograniczonych wyłączników nadprądowych instalacyjnych B16 i C16 z największą dopuszczalną wartością prądu szczytowego wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 16$ A (rys. 4a), to okazuje się, że warunek poprawnej koordynacji jest spełniony tylko dla spodziewanego prądu zwarciovego $I_k = 1$ kA (prąd ograniczony wyłączników B16 i C16 nie przekracza wartości dopuszczalnej dla wyłącznika różnicowoprądowego). Niestety, dla tego spodziewanego prądu zwarciovego ($I_k = 1$ kA) jest przekroczone największa dopuszczalna wartość całki Joule'a.

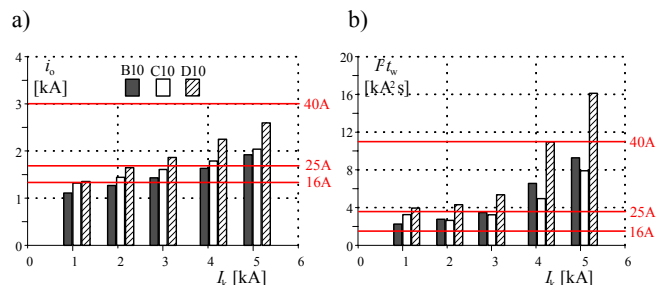


Rys. 4. Prądy ograniczone i_0 (a) i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników B16, C16, D20 oraz największy dopuszczalny prąd szczytowy i całka Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o $I_n = 16, 25$ i 40 A

Zatem wyłączniki B16 i C16 już przy prądzie $I_k = 1$ kA nie dobezpieczają właściwie wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 16$ A, mimo że prąd znamionowy ciągły wyłączników nadprądowych i wyłącznika różnicowoprądowego jest identyczny. Tylko nieznacznie lepiej jest w przypadku wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 25$ A. Wyłącznik różnicowoprądowy o $I_n = 40$ A jest właściwie dobezpieczany przez wyłączniki B16 i C16 w całym badanym zakresie spodziewanych prądów zwarciovych. Wyłącznik D20 jest nieodpowiedni, jeżeli spodziewany prąd zwarciovych osiąga wartość $I_k = 5$ kA.

Analizowano również skuteczność dobezpieczenia tych samych wyłączników różnicowoprądowych ($I_n = 16, 25$ i 40 A) przy zastosowaniu wyłączników nadprądowych instalacyjnych o jeszcze mniejszych, niż na rysunku 4, prądach znamionowych ciągłych ($I_n = 10$ A). Okazuje się, że żaden z wymienionych wyłączników nadprądowych nie stanowi skutecznego dobezpieczenia wyłącznika różnicowo-

prądowego o prądzie znamionowym ciągłym $I_n = 16$ A. Już przy spodziewanym prądzie zwarciovym $I_k = 1$ kA całka Joule'a wyłączenia I^2t_w tych wyłączników nadprądowych przekracza wartość dopuszczalną dla wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 16$ A (rys. 5b). Problematyczne jest też dobezpieczanie wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 25$ A, a nawet o $I_n = 40$ A. W przypadku tego ostatniego, przy spodziewanym prądzie zwarciovym $I_k = 5$ kA nie może być zastosowany wyłącznik nadprądowy D10.



Rys. 5. Prądy ograniczone i_0 (a) i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników o charakterystykach B, C, D i prądzie znamionowym $I_n = 10$ A oraz największy dopuszczalny prąd szczytowy i całka Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o $I_n = 16, 25$ i 40 A

Biorąc pod uwagę wymagania normy [1] może okazać się, że wyłącznik nadprądowy instalacyjny dobezpieczający wyłącznik różnicowoprądowy, będzie charakteryzował się prądem znamionowym ciągłym znacznie mniejszym niż ten drugi. Tym mniejszym, im większy jest spodziewany prąd zwarciovych w rozpatrywanym obwodzie, a to może prowadzić do rozwiązań ekonomicznie nieuzasadnionych.

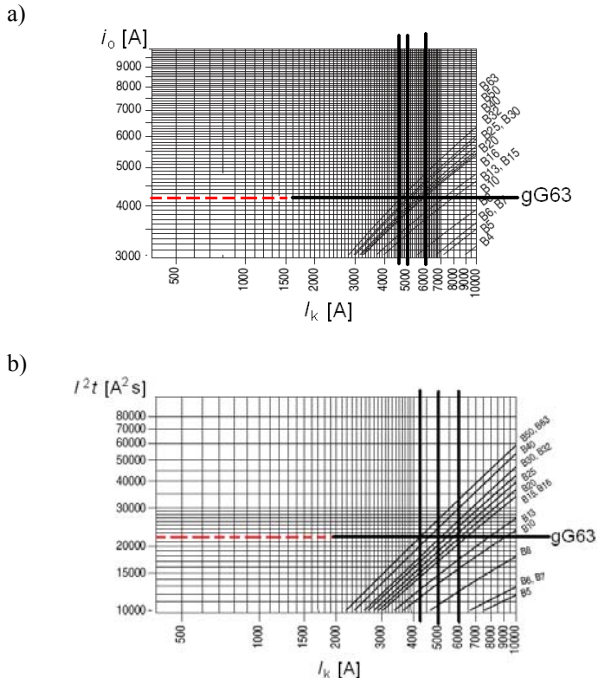
4.2. Analiza i ocena wyników badań w świetle danych producentów aparatów

Producenci mogą wprowadzić na rynek wyłączniki różnicowoprądowe, które wytrzymują większy prąd szczytowy i całkę Joule'a niż podaje norma [1]. Wyłączniki są wtedy oznaczane, jak podano w tabelicy 2. W niniejszym punkcie przeanalizowano wyłącznik różnicowoprądowy o obciążalności zwarciovych 6 kA pod warunkiem dobezpieczenia go bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym 63 A.

Zgodnie z normą [4] całka Joule'a wyłączenia bezpiecznika gG63 wynosi $I^2t_w = 21\,200$ A²s. Na podstawie danych katalogowych [6] stwierdzono, że przy spodziewanym prądzie zwarciovym $I_k = 6$ kA (największym dopuszczalnym dla rozpatrywanego wyłącznika różnicowoprądowego), prąd ograniczony tego bezpiecznika wynosi $i_0 = 4,2$ kA. Zatem wyłącznik różnicowoprądowy dobezpieczony bezpiecznikiem gG63 z pewnością wytrzyma narażenia cieplne $I^2t_w = 21\,200$ A²s i elektrodynamiczne pochodzące od prądu $i_0 = 4,2$ kA.

Rozważano zastąpienie bezpiecznika gG63 wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym. Na rysunku 6 przedstawiono wykres prądu ograniczonego i wykres całki Joule'a wyłączenia wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B (dane producenta), w funkcji spodziewanego prądu zwarciovych. Na każdym wykresie naniesiono linię poziomą, przedstawiającą wspomniane parametry dla bezpiecznika gG63 (bezpiecznika gG o największym prądzie znamionowym, gwarantującym właściwe dobezpieczenie wyłącznika różnicowoprądowego).

Z wykresów na rysunku 6 wynika, że do spodziewanego prądu zwarciovego o wartości około $I_k = 4,2$ kA, nie ma ograniczeń w stosowaniu wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B. W miejsce bezpiecznika gG63 mogą być zastosowane wyłączniki typu B o prądzie znamionowym do 63 A. Powyżej spodziewanego prądu zwarciovego $I_k = 4,2$ kA ograniczenia występują, wówczas prąd znamionowy wyłączników nadprądowych powinien być mniejszy niż 63 A.



Rys. 6. Prąd ograniczony i_o (a) i całka Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B [5]

Tablica 3. Zestawienie prądów ograniczonych i całek Joule'a wyłączenia wybranych zabezpieczeń (dla $I_k = 5$ kA)

Urządzenie zabezpieczające	Prąd ograniczony i_o [kA]	Całka Joule'a I^2t_w [A ² s]
Bezpiecznik gG63	4,2	21 200
dane producenta		
Wyłącznik instalacyjny B25	3,8	20 000
Wyłącznik instalacyjny B32	3,6	21 000
Wyłącznik instalacyjny B40	4,1	24 000
Wyłącznik instalacyjny B50	4,15	27 000
Wyłącznik instalacyjny B63	4,35	27 000
Wyłącznik instalacyjny C40	4,1	23 500
Wyłącznik instalacyjny C50	4,45	25 000
Wyłącznik instalacyjny C63	4,45	29 000
Wyłącznik instalacyjny D40	4,25	30 000
Wyłącznik instalacyjny D50	4,6	40 000
Wyłącznik instalacyjny D63	4,7	44 000
wartości zmierzone		
Wyłącznik instalacyjny D40	3,41	23 500
Wyłącznik instalacyjny D50	4,08	33 700

W tablicy 3 przedstawiono wartości prądu ograniczonego i_o i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w dla wybranych wyłączników nadprądowych przy spodziewanym prądzie zwarciovym $I_k = 5$ kA. Szarym tłem zaznaczono wartości większe niż dla bezpiecznika gG63. Przy prądzie zwarciovym $I_k = 5$ kA w rachubę wchodzi wyłączniki typu B o prądzie znamionowym nie większym niż $I_n = 32$ A. Przy prądzie $I_k = 6$ kA będą to wyłączniki o prądzie znamionowym nie większym niż $I_n = 20$ A (rys. 6). Jeżeli wyłączniki te będą dobezpieczać wyłączniki różnicowoprądowe np. o $I_n = 63$ A, to nie pozwolą na pełne wykorzystanie ich prądu znamionowego ciągłego.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastąpienie bezpiecznika wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym, jako dobezpieczenia wyłącznika różnicowoprądowego powinno być poprzedzone dogłębną analizą. Przy stosunkowo dużym spodziewanym prądzie zwarciovym nawet wyłącznik nadprądowy o prądzie znamionowym wyraźnie mniejszym niż prąd znamionowy wskazanego bezpiecznika może przyczynić się do uszkodzenia wyłącznika różnicowoprądowego. Właściwą koordynację utrudnia fakt, że wielu producentów wyłączników nadprądowych instalacyjnych nie dostarcza charakterystyk prądu ograniczonego. Zatem bez dodatkowych badań laboratoryjnych trudno ocenić narażenia z tego tytułu.

6. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 61008-1:2007 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne.
2. Instalacje elektryczne i teletechniczne. Poradnik monterów i inżyniera elektryka, Verlag Dashöfer, Część 5. Zabezpieczenia w instalacjach elektrycznych.
3. Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji (2) Miesięcznik SEP „Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych”, 2008, nr 109, s. 3-44.
4. PN-HD 60269-2:2010 Bezpieczniki topikowe niskonapięciowe – Część 2: Wymagania dodatkowe dotyczące bezpieczników przeznaczonych do wymiany przez osoby wykwalifikowane (bezpieczniki głównie do stosowania w przemyśle) – Przykłady znormalizowanych systemów bezpiecznikowych od A do J (oryg.).
5. Supplementary Protectors/Miniature Circuit Breakers. Technical Data Catalog, Numbers 1492-SP Series C, Rockwell Automation Publication 1492-TC010D-EN-P – April 2011.

THERMAL AND ELECTRODYNAMICS RISK OF RESIDUAL CURRENT DEVICES IN CASE OF BACK-UP PROTECTION BY OVERCURRENT CIRCUIT BREAKERS – CONFERENCE PAPER

Keywords: residual current devices, short-circuit currents, back-up protection

Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection should be back-up protected. As back-up protection devices the overcurrent circuit breakers are used. The maximum let-through energy and let-through current of the overcurrent devices were evaluated under laboratory condition. Thermal and electrodynamics risk of residual current devices was analyzed.