

Thermal and Electrodynamic Risk of Residual Current Devices in the Case of Back-Up Protection by Overcurrent Circuit Breakers

Authors

Stanisław Czapp
Daniel Kowalak
Kornel Borowski

Keywords

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


Abstract

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

DOI: [10.12736/issn.2300-3022.2014406](https://doi.org/10.12736/issn.2300-3022.2014406)

1. Introduction

The short-circuit current capacity of a residual current operated circuit breaker, i.e. its immunity to thermal and electrodynamic effects of short-circuit current, depends mainly on whether the circuit breaker is provided with integral overcurrent protection, or not.

Residual current breaking capacity of a residual current operated circuit breaker without integral overcurrent protection (RCCB) is low, not lower than 10 times its continuous rated current (but not lower than 500 A), so in practice it requires a back-up protection. Such a back-up protection shall also ensure that, when closed, the residual current operated circuit breaker can withstand thermal and electrodynamic effects of the fault current at a short-circuit between live conductors (L-L, L-N). Residual current breaking capacity of a residual current operated circuit breaker with integral overcurrent protection (RCBO) is comparable with that of an overcurrent circuit breaker. The manufacturer specifies the rated conditional short-circuit current, e.g. 6 kA (graphic symbol ) , up to which back-up protection is not required. Also the type of characteristic is specified for such circuit breakers, like overcurrent circuit breakers, for example B16 [1, 2].

If a residual current operated circuit breaker without integral overcurrent protection (RCCB) is installed, as a rule a separate overcurrent protection has to be added (Fig. 1). It is then necessary to check whether the applied overcurrent protection provides adequate back-up protection for the circuit breaker.

2. Requirements of relevant standards

The relevant standard [1] requires that RCCB circuit breakers withstand the peak currents i_s and Joule integrals I^2t specified in Tab. 1.

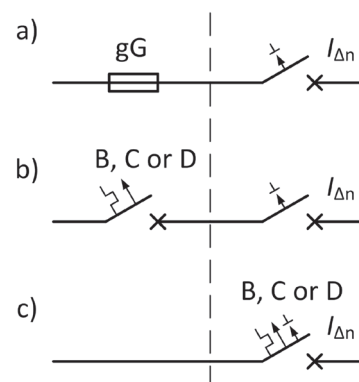


Fig. 1. Circuits with residual current operated circuit breakers:

a) RCCB with back-up fuse, b) RCCB with back-up overcurrent circuit breaker, c) RCBO that does not require back-up protection

The Joule integral that a residual current operated circuit breaker withstands should not be lower than I^2t_w integral of the fuse or circuit breaker that provides its back-up protection. The withstood peak current should not be lower than the cut-off current i_o of the back-up fuse or overcurrent circuit breaker. It can be concluded on the basis of Tab. 1 that a RCCB with rated continuous current $I_n = 25$ A and rated conditional short-circuit current 6 kA should withstand peak current up to $i_s = 1.7$ kA and Joule integral up to $I^2t = 3.7$ kA²s. The values required by standard [1] seem to be quite low, and there is a risk of exceeding them, which can damage the RCCB.

Manufacturers can deliver RCDs that withstand higher peak currents and Joule integrals than those shown in Tab. 1. They

$I_{nc}, I_{\Delta c}$ [A]		I_n [A]									
		≤ 16	≤ 20	≤ 25	≤ 32	≤ 40	≤ 63	≤ 80	≤ 100	≤ 125	
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						
1,000	i_s [kA]	0.65	0.75	0.9	1.18						
	I^2t [kA ² s]	0.50	0.90	1.5	2.7						
1,500	i_s [kA]	1.02	1.1	1.25	1.5	1.9	2.1				
	I^2t [kA ² s]	1.0	1.5	2.4	4.1	9.75	22				
3,000	i_s [kA]	1.1	1.2	1.4	1.85	2.35	3.3	3.5	3.8	3.95	
	I^2t [kA ² s]	1.2	1.8	2.7	4.5	8.7	22.5	26	42	72.5	
4,500	i_s [kA]	1.15	1.3	1.5	2.05	2.7	3.9	4.3	4.8	5.6	
	I^2t [kA ² s]	1.45	2.1	3.1	5.0	9.7	28	31	45	82.0	
6,000	i_s [kA]	1.3	1.4	1.7	2.3	3.0	4.05	4.7	5.3	5.8	
	I^2t [kA ² s]	1.6	2.4	3.7	6.0	11.5	25	31	48	65.0	
10,000	i_s [kA]	1.45	1.8	2.2	2.6	3.4	4.3	5.1	6	6.4	
	I^2t [kA ² s]	1.9	2.7	4.0	6.5	12	24	31	48	60.0	

Tab. 1. Peak currents i_s and Joule integrals I^2t withstood by RCCB circuit breaker [1], where: I_n – rated continuous current of RCCB, I_{nc} – rated conditional short-circuit current of RCCB, $I_{\Delta c}$ – rated conditional residual short-circuit current of RCCB


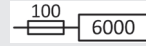
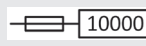
then specify the highest allowable initial short-circuit current at the RCD installation point and add a graphic fuse symbol if back-up protection is necessary (Tab. 2).

It is therefore assumed that RCCB is back-up protected with a fuse, not with an overcurrent circuit breaker. In practice, the fuse is often replaced by an overcurrent circuit breaker, unfortunately, usually without performing necessary additional analyses. The fuse can be replaced with an overcurrent circuit breaker provided that it reduces the short-circuit current no more than the required fuse, and the overcurrent circuit breaker's Joule integral does not exceed the corresponding Joule integral of the fuse [3, 4].

3. Overcurrent circuit breakers tests

To assess exposure of RCCB with overcurrent circuit breaker back-up protection, laboratory tests of cut-off currents and Joule integrals of selected overcurrent circuit breakers were carried out. Overcurrent circuit breakers with characteristics B, C and D were tested – a total of ten devices from three manufacturers. The test scope included recording of the foregoing parameters at short-circuit currents $1\div 5$ kA and short-circuit power factor $\cos\varphi = 0.4\div 0.85$ (depending on the short-circuit current). The test bench diagram is shown in Fig. 2.

The bench consists of high current segment, which includes switchgear: disconnector OW, operating switch WR, shorting switch ZZ circuit, choke D, resistor R, high current transformer TW, and tested circuit breaker OB. The expected short-circuit current and test circuit parameters are adjusted by the control units, i.e. choke D and resistor R. The tested device current is measured using high-current shunt BW, and the voltage is measured using voltage divider DN. Current and voltage waveforms were recorded by Tektronix devices: TDS 5034B oscilloscope and A6907 optoisolator.

Graphic designation	Designation description
	Short-circuit current capacity 6 kA with back-up fuse gG with rated current $I_{nb} \leq 63$ A
	Short-circuit current capacity 6 kA with back-up fuse gG with rated current $I_{nb} \leq 100$ A
	Short-circuit current capacity 10 kA with back-up fuse gG with rated current $I_{nb} \leq 63$ A

Tab. 2. Sample designations of RCCB short-circuit current capacity

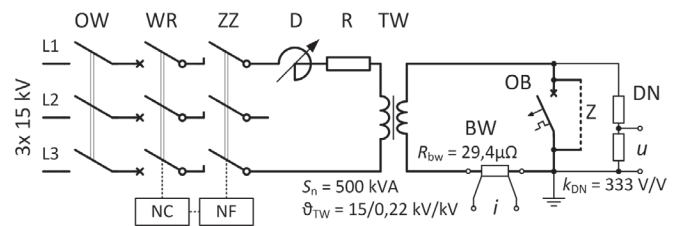


Fig. 2. Overcurrent circuit breaker test bench

Each test of a selected overcurrent circuit breaker included a calibration test and a test of a pre-set short-circuit current breaking. The calibration test was aimed at determining the test circuit parameters, which shall allow obtaining the desired short-circuit current including aperiodic component – I_k and peak short-circuit current – i_p . The test consisted of a metallic short circuit made with clamp Z installed in place of the tested overcurrent circuit breaker. Short-circuit phase angle ψ_Z was adjusted by phase controller NF.

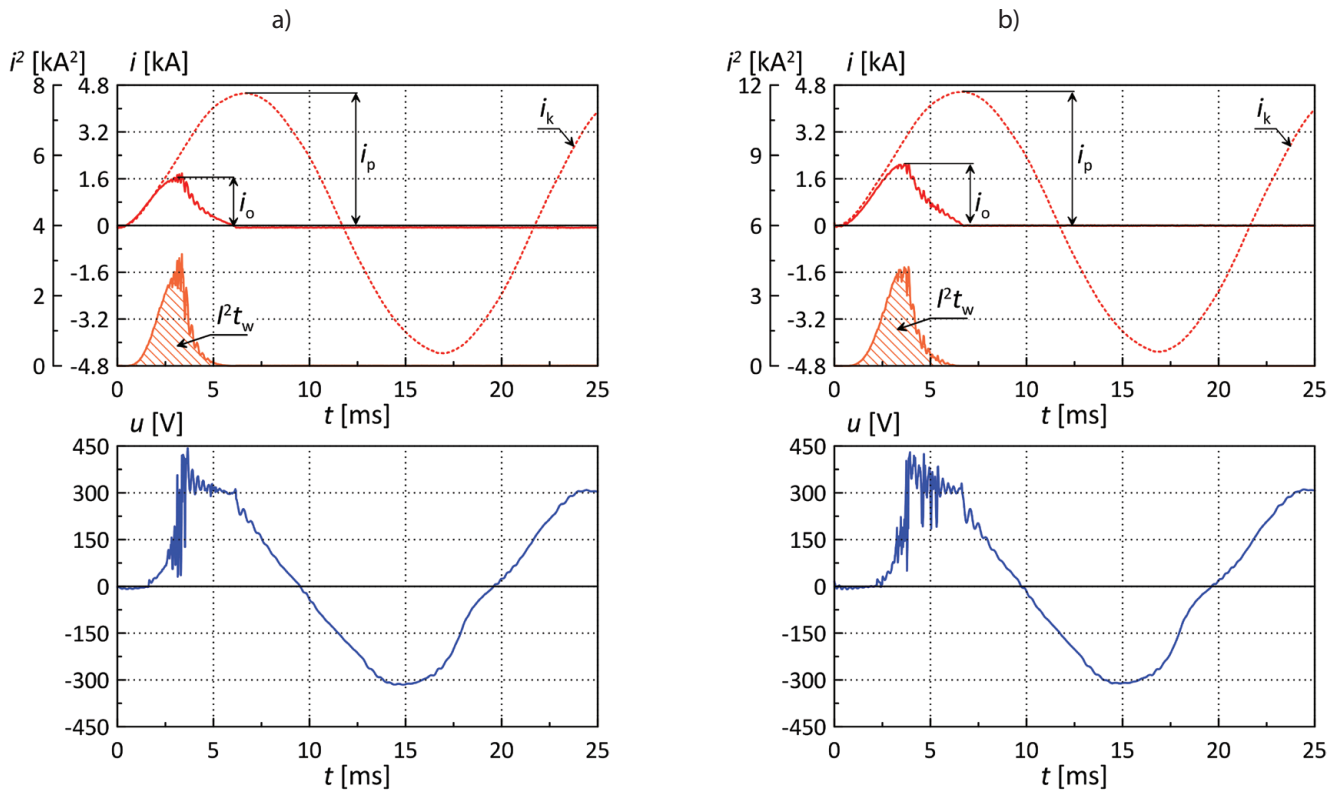


Fig. 3. Short-circuit current breaking by overcurrent circuit breaker; $i_k = 3.1$ kA, $i_p = 4.5$ kA, a) C16 circuit breaker, $i_o = 1.8$ kA, $I^2t_w = 4.8$ kA²s, b) D20 circuit breaker, $i_o = 2.1$ kA, $I^2t_w = 7.9$ kA²s

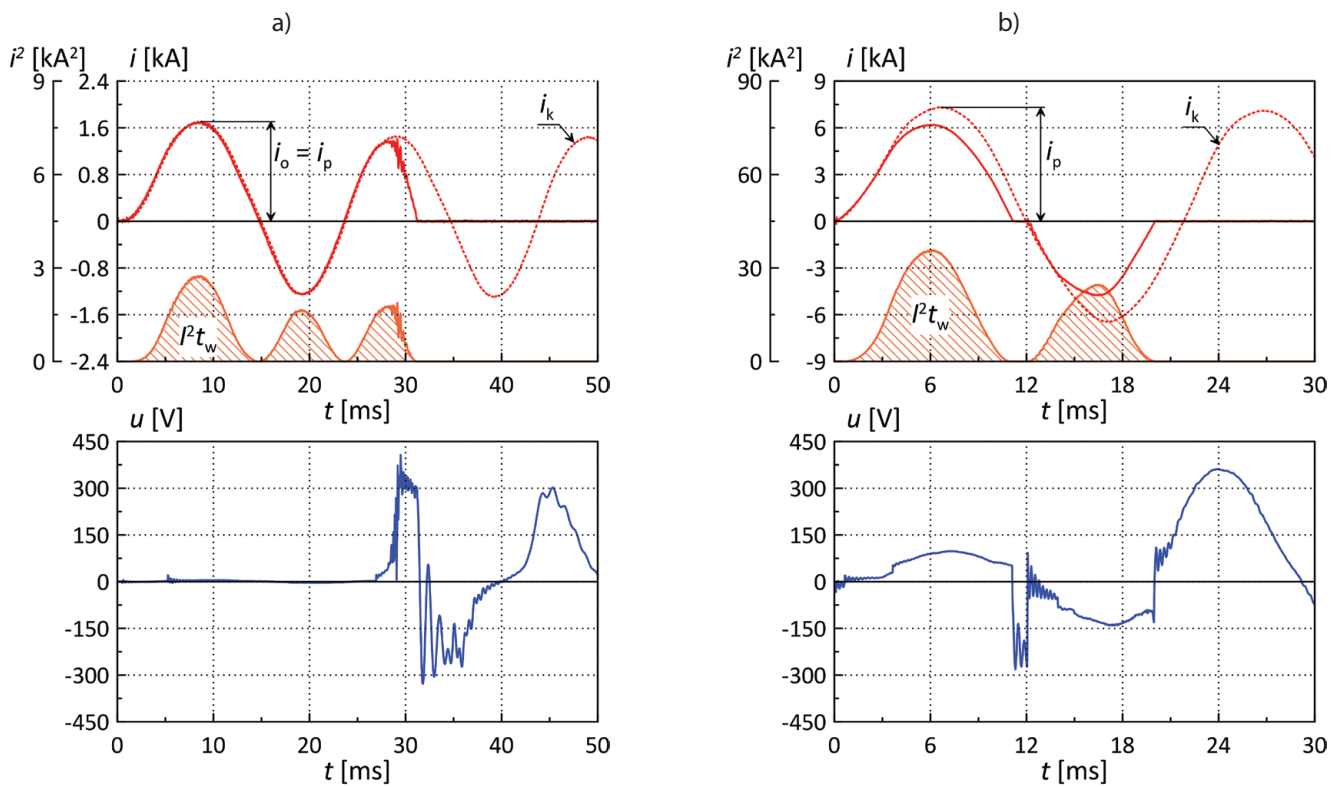


Fig. 4. Short-circuit current breaking by overcurrent circuit breaker; a) D40 circuit breaker, $i_k = 1.0$ kA, $i_p = 1.7$ kA, $i_o = 1.7$ kA, $I^2t_w = 31.3$ kA²s, b) C100 circuit breaker, $i_k = 4.8$ kA, $i_p = 7.1$ kA, $i_o = 6.0$ kA, $I^2t_w = 144.6$ kA²s; no short-circuit current reduction

Switch-on angle ψ_z of shorting switch ZZ was selected so as to obtain the highest possible peak current (current i_p), at a specific value of the prospective short-circuit current I_k . The test duration t_z was adjusted by time controller NC.

For each circuit breaker three tests of breaking short-circuit current I_k pre-set at the calibration test were performed. At each breaking test waveforms were recorded of the current switched-off by the circuit breaker, and the voltage on its terminals. On the basis of the recorded waveforms cut-off current i_o and Joule integral I^2t_w were determined. The Joule integral was calculated after the following formula:

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

where:

t_w short-circuit duration from its start until zero current.

Sample waveforms of the short-circuit current switching-off by overcurrent circuit breakers are shown in Fig. 3 and 4. The area below i^2 waveform (hatched area) equals Joule integral I^2t_w .

4. Analysis and evaluation of test results

4.1. Analysis and evaluation of test results vs. requirements of the relevant standard [1]

On the basis of the tests described in the previous section charts were plotted (Fig. 5–7) of cut-off current i_o and Joule integral I^2t_w as functions of prospective short-circuit current I_k . Each chart contains a horizontal line, representing, according to Tab. 1, the maxima of peak current and Joule integral I^2t , which the residual current operated circuit breaker with no integral overcurrent protection, with the specified rated continuous current can withstand. Fig. 5 shows results of the tests of overcurrent circuit breakers B16, C16 and D20. These results were compared with the maximum peak currents and Joule integrals allowable for residual current operated circuit breakers with rated continuous currents $I_n = 16, 25$ and 40 A. It follows from comparison of the cut-off current tests results for overcurrent circuit breakers B16 and C16 with the maximum peak current allowable for RCD with $I_n = 16$ A (Fig. 5a) that the proper coordination requirement is met only for prospective short-circuit current $I_k = 1$ kA (cut-off currents of circuit breakers B16 and C16 do not exceed the value allowable for the RCD). Unfortunately, for this prospective short-circuit current ($I_k = 1$ kA) the maximum allowable Joule integral was exceeded. Thus, at current $I_k = 1$ kA B16 and C16 circuit breakers do not back-up protect RCD with $I_n = 16$ A, even if the rated continuous currents of the overcurrent circuit breaker and the RCD are the same. It is only slightly better in the case of RCD with $I_n = 25$ A. RCD with $I_n = 40$ A is back-up protected by circuit breaker B16 and C16 throughout the tested range of prospective short-circuit currents. Circuit breaker D20 is inadequate if the prospective short-circuit current reaches $I_k = 5$ kA.

Also analyzed was the effectiveness of back-up protection of the same RCDs ($I_n = 16, 25$, and 40 A) by overcurrent circuit

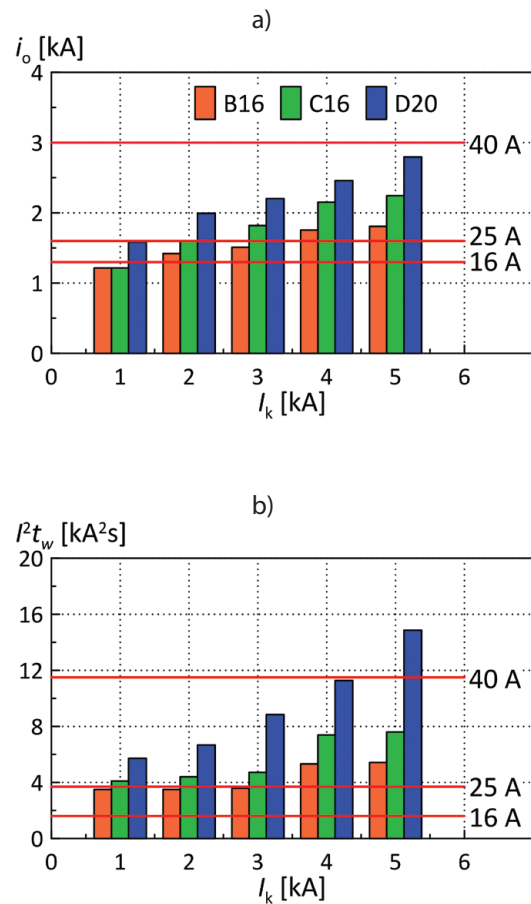


Fig. 5. Cut-off currents i_o (a) and Joule integrals I^2t_w (b) of circuit breakers B16, C16, D20, and the maximum peak current and Joule integral allowable for residual current operated circuit breakers with $I_n = 16, 25$, and 40 A

breakers with rated continuous currents even lower than in Fig. 5 ($I_n = 10$ A). It turns out that none of the overcurrent circuit breakers provides back-up protection for RCD with rated continuous current $I_n = 16$ A. At the prospective short-circuit current $I_k = 1$ kA Joule integrals I^2t_w of these overcurrent circuit breakers exceeds the maximum allowable for RCD with $I_n = 16$ A (Fig. 6b). Also problematic is back-up protection of RCD with $I_n = 25$ A, and even $I_n = 40$ A.

As regards the latter, at prospective short-circuit current $I_k = 5$ kA, overcurrent circuit breaker D10 cannot be applied.

The tests of overcurrent circuit breakers B25, D40 and D50 (Fig. 7) showed that B25 provides back-up protection for all three tested RCDs ($I_n = 40, 63$ and 80 A) when prospective short-circuit current is equal to $I_k = 1 \div 3$ kA.

The worst case is for circuit breaker D50 – at currents $I_k = 4$ and 5 kA it does not provide effective back-up protection even for RCD with $I_n = 80$ A. The maximum allowable Joule integrals are exceeded.

In view of the requirements of standard [1], it may turn out that the rated continuous current of an overcurrent circuit breaker

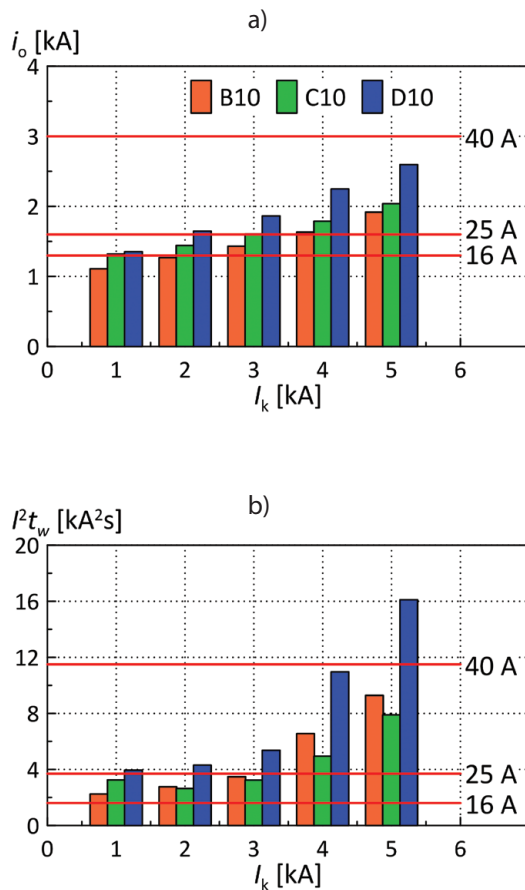


Fig. 6. Cut-off currents i_o (a) and Joule integrals $I^2 t_w$ (b) of overcurrent circuit breakers with characteristics B, C, D and rated current $I_n = 10$ A, and the maximum peak current and Joule integral allowable for residual current operated circuit breakers with $I_n = 16, 25$, and 40 A

providing back-up protection for RCD will be much smaller than the other one. The smaller it is, the larger the prospective short circuit current will be, and this can lead to economically unjustified solutions.

4.2. Analysis and evaluation of test results vs. device manufacturers' specifications

Manufacturers can deliver RCDs that withstand higher peak currents and Joule integrals than specified in standard [1]. The RCDs are then designated as reported in Tab. 2. RCD with short-circuit current capacity 6 kA if provided with back-up protection by a fuse with a gG fuse-link with rated current 63 A was analyzed.

According to standard [5], the Joule integral of gG63 fuse element is $I^2 t_w = 21,200$ A²s. It was found on the basis of catalogue data [6] that at prospective short-circuit current $I_k = 6$ kA (the maximum allowable for the tested RCD) the fuse cut-off current is $i_o = 4.2$ kA. Thus, RCD back-up protected by gG63 fuse will certainly withstand thermal ($I^2 t_w = 21,200$ A²s) and electrodynamic ($i_o = 4.2$ kA) exposures. Replacing the gG63 fuse with an overcurrent circuit breaker was considered. Fig. 8 is a graph of cut-off current and

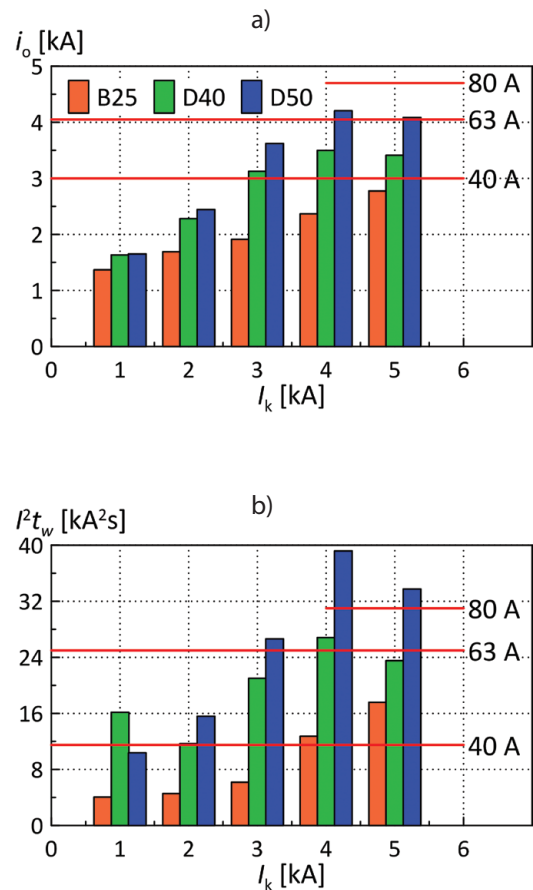


Fig. 7. Cut-off currents i_o (a) and Joule integrals $I^2 t_w$ (b) of overcurrent circuit breakers B25, D40, D50, and the maximum peak current and Joule integral allowable for residual current operated circuit breakers with $I_n = 40, 63$, and 80 A

Joule integral of B-type overcurrent circuit breakers (manufacturer's specification) as functions of the prospective short-circuit current. In each graph a horizontal line is plotted, representing the foregoing parameters for gG63 fuse (gG fuse with the highest rated current that warrants RCD back-up protection).

It follows from the graphs in Fig. 8 that at prospective short-circuit current ca. $I_k = 4.2$ kA, there are no restrictions in the use of B-type overcurrent circuit breakers. In place of the gG63 fuse a B-type overcurrent circuit breaker with rated current up to 63 A can be used. There are some restrictions at prospective short-circuit currents over $I_k = 4.2$ kA; then the overcurrent circuit breaker's rated current should be lower than 63 A.

Specified in Tab. 3 are cut-off currents i_o and Joule integrals $I^2 t_w$ for selected overcurrent circuit breakers at prospective short-circuit current $I_k = 5$ kA. Marked with the gray background are values higher than for gG63 fuse. At short-circuit current $I_k = 5$ kA B-type circuit breakers are suitable with rated currents not higher than $I_n = 32$ A [7]. At $I_k = 6$ kA these will be circuit breakers with rated currents not higher than $I_n = 20$ A (Fig. 8). If such a circuit breaker back-up protects a RCD with rated current, for example,

$I_n = 63$ A, it will not allow fully utilising its rated continuous current capacity.

Comparison of overcurrent circuit breakers with the same rated continuous current (Tab. 3), but different characteristics (B, C or D), shows that thermal and electrodynamic exposure is the largest with D-type circuit breakers.

5. Final conclusions

The studies and analyses show that the replacement of a fuse with an overcurrent circuit breaker as back-up protection of a residual current operated circuit breaker without integral overcurrent protection in each case should be preceded by a thorough analysis. The use of an overcurrent circuit breaker with the same continuous current rating as that of the replaced fuse does not warrant proper coordination. At a relatively high prospective short-circuit current even an overcurrent circuit breaker rated significantly less than the replaced fuse can contribute to damage of the back-up protected RCD. Proper coordination is hampered by the fact that many overcurrent circuit breaker manufacturers do not provide cut-off current characteristics. Therefore, assessment of the respective exposure is difficult without additional laboratory tests.

Back-up protection device	Cut-off current i_o [kA]	Joule integral I^2t_w [A ² s]
gG63 fuse	4.2	21,200
manufacturer's specification		
Overcurrent circuit breaker B25	3.8	20,000
Overcurrent circuit breaker B32	3.6	21,000
Overcurrent circuit breaker B40	4.1	24,000
Overcurrent circuit breaker B50	4.15	27,000
Overcurrent circuit breaker B63	4.35	27,000
Overcurrent circuit breaker C40	4.1	23,500
Overcurrent circuit breaker C50	4.45	25,000
Overcurrent circuit breaker C63	4.45	29,000
Overcurrent circuit breaker D40	4.25	30,000
Overcurrent circuit breaker D50	4.6	40,000
Overcurrent circuit breaker D63	4.7	44,000
measurements		
Overcurrent circuit breaker D40	3.41	23,500
Overcurrent circuit breaker D50	4.08	33,700

Tab. 3. Cut-off currents and Joule integrals of selected devices as specified by manufacturer and measured (for expected short-circuit current $I_k = 5$ kA)

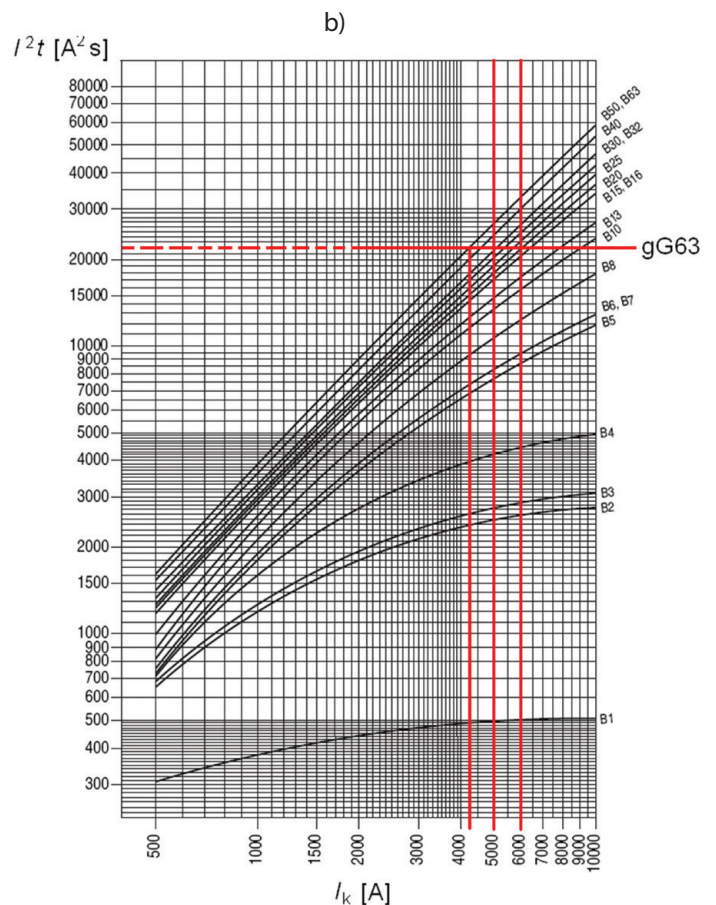
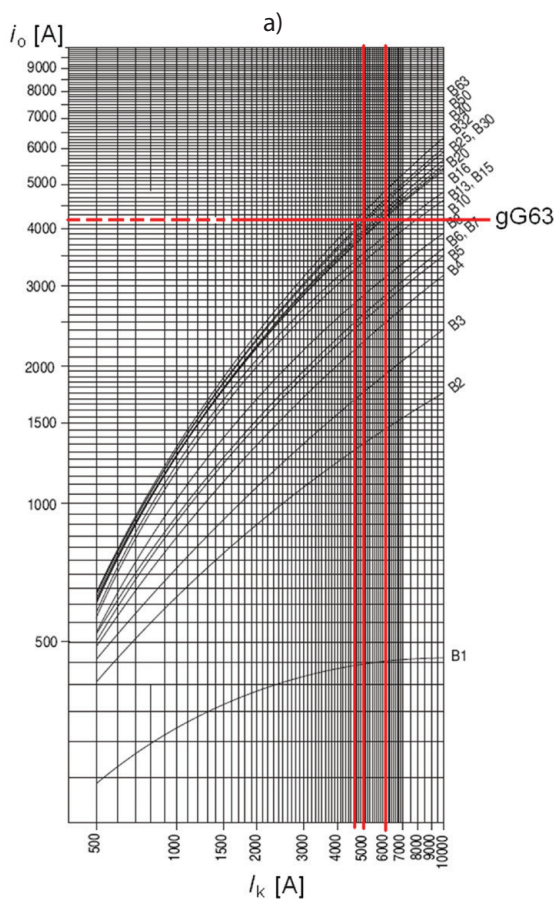


Fig. 8. Cut-off current i_o (a) and Joule integral I^2t_w (b) of B-type overcurrent circuit breakers [6]

REFERENCES

1. PN-EN 61008-1:2007P Residual current operated circuit breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCB) – Part 1: General rules.
2. IEC TR 60755:2008 General requirements for residual current operated protective devices. 2nd edition.
3. Instalacje elektryczne i teletechniczne. Poradnik monterów i inżynierów elektryków [Electrical and communication installations. Fitter and electrical engineer manual], Verlag Dashöfer, Part 5. Zabezpieczenia w instalacjach elektrycznych [Protective devices in electrical installations], Warsaw 2005.
4. Musiał E., Czapp S., Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji [Residual current operated circuit breakers. Review and description of state of the art designs] (2), Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych 2008, No. 109, pp. 3–44.
5. PN-HD 60269-2:2010E Low-voltage fuses – Part 2: Supplementary requirements for fuses for use by authorized persons (fuses mainly for industrial application). Examples of standardized systems of fuses A to J.
6. Supplementary Protectors/Miniature Circuit Breakers. Technical Data Catalog, Numbers 1492-SP Series C, Rockwell Automation Publication 1492-TC010D-EN-P – April 2011.
7. Czapp S., Kowalak D., Borowski K., Narażenia cieplne i elektrodynamiczne wyłączników różnicowoprądowych przy ich dobezpieczeniu wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi, Referat konferencyjny [Thermal and Electrodynamical Risk of Residual Current Devices in the Case of Back-Up Protection by Overcurrent Circuit Breakers, Conference paper], XVI International Conference „Present-Day Problems of Power Engineering” APE’13, Jurata 12–14.06.2013, in: Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2013, No 33 [The Scientific Papers of Faculty of Electrical and Control Engineering], s. 115–118.

Stanisław Czapp

Gdańsk University of Technology
 e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl

A graduate of Gdańsk University of Technology (1996). An employee of the Faculty of Electrical and Control Engineering of his alma mater. His research activity is related to electrical installations and devices, electric lighting, and in particular protection against electric shock. Author and co-author of many articles and papers, and unpublished studies such as designs and expert evaluations and opinions. SEP Association of Polish Electrical Engineers expert in section 08 Electrical installations and devices.

Daniel Kowalak

Gdańsk University of Technology
 e-mail: daniel.kowalak@pg.gda.pl

Graduated from the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology (2006). A research assistant at his alma mater. His research interests include high voltage technology, plasma physics, arc faults and protection against their effects, electric switching arc, and design of electrical apparatus.

Kornel Borowski

Gdańsk University of Technology
 e-mail: kornel.borowski@pg.gda.pl

Graduated with Master's degree in electrical power engineering from the Faculty of Electrical and Control Engineering of Gdańsk University of Technology (2012). Postgraduate Ph.D. student at the Power Engineering Department of his alma mater. His Ph.D. thesis relates to issues of automatic protections and measurements in power systems. For eight years a designer of power and communication installations.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 67–73. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Narażenia cieplne i elektrodynamiczne wyłączników różnicowoprądowych przy ich dobezpieczeniu wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi

Autorzy

Stanisław Czapp
Daniel Kowalak
Kornel Borowski

Słowa kluczowe

zabezpieczenia różnicowoprądowe, prądy zwarciove, dobezpieczenie

Streszczenie

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

1. Wstęp

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

Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego (ang. *residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection*, RCCB) mają niewielką zdolność wyłączenia prądu różnicowego – nie mniejszą niż 10-krotna 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 przy zwarciu między przewodami czynnymi (L-L, L-N).

Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym (ang. *residual current operated circuit-breakers with integral overcurrent protection*, RCBO) mają zdolność wyłączenia porównywalną z wyłącznikami

nadprądowymi. Producent podaje informację o prądzie znamionowym zwarciowym umownym, np. 6 kA (symbol graficzny [6000]), do którego nie jest wymagane dobezpieczenie. Wyłączniki takie mają też podany typ charakterystyki, jak wyłączniki nadprądowe, np. B16 [1, 2].

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

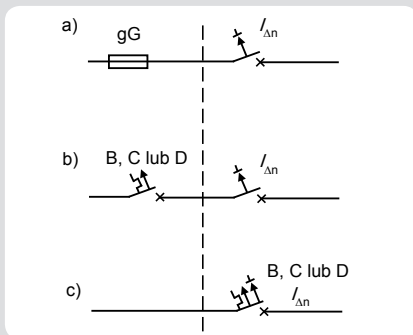
2. Wymagania norm przedmiotowych

Norma przedmiotowa [1] wymaga, aby wyłączniki różnicowoprądowe RCCB

wytrzymały prąd szczytowy i_s oraz całkę Joule'a I^2t , których wartości podano w tab. 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 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 tab. 1 można stwierdzić, że wyłącznik ten powinien wytrzymać prąd szczytowy do $i_s = 1,7$ kA oraz całkę Joule'a do $I^2t = 3,7$ kA²s.



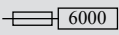
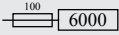
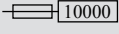
Rys. 1. Obwody z wyłącznikiem różnicowoprądowym: a) RCCB dobezpieczonym bezpiecznikiem, b) RCCB dobezpieczonym wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym, c) RCBO niewymagającym dobezpieczenia

I_{nc} $I_{\Delta c}$ [A]		I_n [A]									
		≤ 16	≤ 20	≤ 25	≤ 32	≤ 40	≤ 63	≤ 80	≤ 100	≤ 125	
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	0,90	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]	1,0	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	3,8	3,95	
	I^2t [kA ² s]	1,2	1,8	2,7	4,5	8,7	22,5	26	42	72,5	
4500	i_s [kA]	1,15	1,3	1,5	2,05	2,7	3,9	4,3	4,8	5,6	
	I^2t [kA ² s]	1,45	2,1	3,1	5,0	9,7	28	31	45	82,0	
6000	i_s [kA]	1,3	1,4	1,7	2,3	3,0	4,05	4,7	5,3	5,8	
	I^2t [kA ² s]	1,6	2,4	3,7	6,0	11,5	25	31	48	65,0	
10 000	i_s [kA]	1,45	1,8	2,2	2,6	3,4	4,3	5,1	6	6,4	
	I^2t [kA ² s]	1,9	2,7	4,0	6,5	12	24	31	48	60,0	

Tab. 1. Wytrzymywane przez wyłącznik różnicowoprądowy RCCB wartości prądu szczytowego i_s i całki Joule'a I^2t [1], gdzie: I_n – prąd znamionowy ciągły wyłącznika różnicowoprądowego, I_{nc} – prąd znamionowy zwarciovy umowny wyłącznika różnicowoprądowego, $I_{\Delta c}$ – prąd znamionowy różnicowy zwarciovy umowny wyłącznika różnicowoprądowego

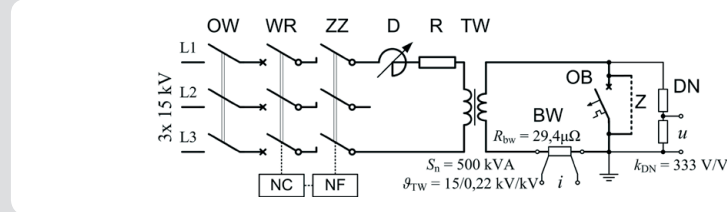
Wartości wymagane przez normę [1] wydają się dość niskie i zachodzi ryzyko ich przekroczenia, co może prowadzić do uszkodzenia wyłącznika różnicowoprądowego. Producenci mogą wykonać wyłączniki różnicowoprądowe wytrzymałe większy prąd szczytowy i całkę Joule'a niż podane w tab. 1. Podają oni wtedy największy dopuszczalny prąd zwarcia początkowy w miejscu zainstalowania wyłącznika różnicowoprądowego i dodają symbol graficzny bezpiecznika, jeśli dobezpieczenie jest konieczne (tab. 2).

Zakłada się zatem, że wyłącznik różnicowoprądowy jest dobezpieczony bezpiecznikiem, a nie wyłącznikiem nadprądowym. W praktyce bezpiecznik często zastępuje się wyłącznikiem nadprądowym – niestety,

Oznaczenie graficzne	Opis oznaczenia
	Obciążalność zwarcia 6 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym $I_{nb} \leq 63$ A
	Obciążalność zwarcia 6 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym $I_{nb} \leq 100$ A
	Obciążalność zwarcia 10 kA przy dobezpieczeniu bezpiecznikiem gG o prądzie znamionowym $I_{nb} \leq 63$ A

Tab. 2. Przykładowe oznaczenia obciążalności zwarcia wyłączników RCCB

zazwyczaj bez wykonania dodatkowych, niezbędnych analiz. Bezpiecznik można zastąpić wyłącznikiem nadprądowym, pod warunkiem że ograniczy on prąd zwarcia



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań wyłączników nadprądowych instalacyjnych

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 [3, 4].

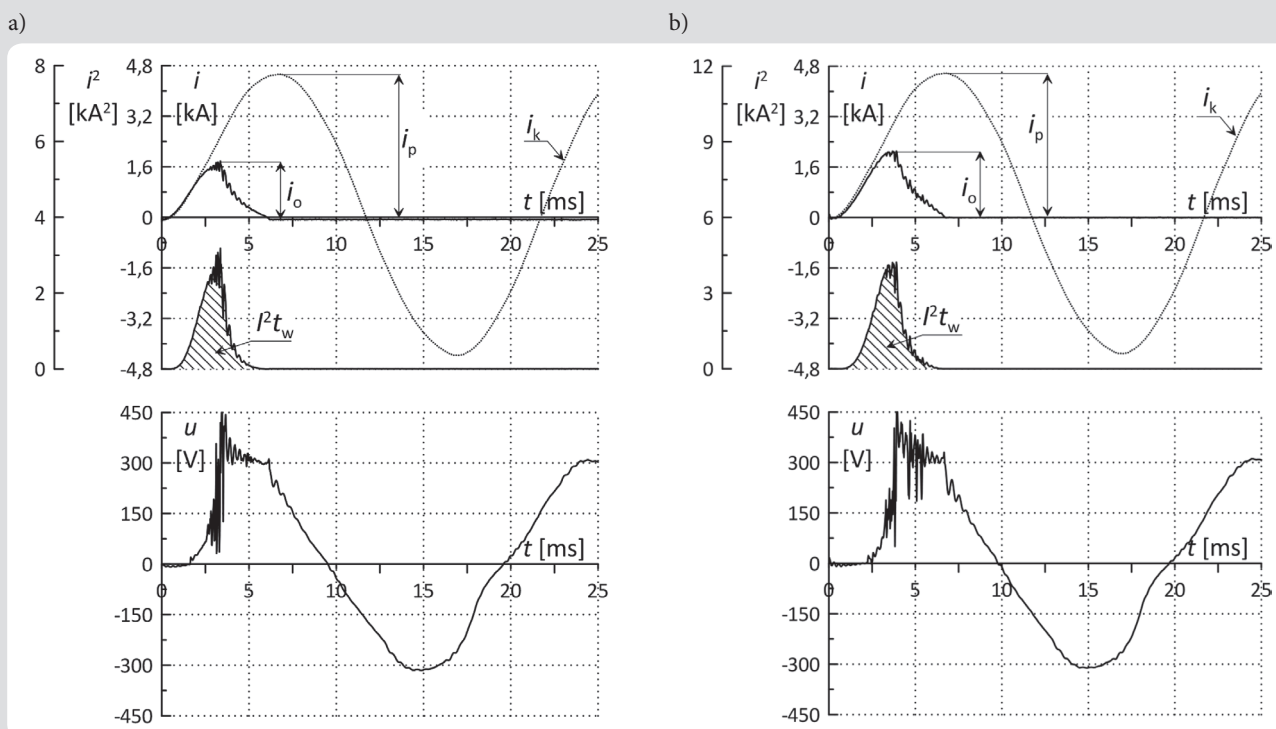
3. Badania wyłączników nadprądowych

Żeby 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 rejestrację wspomnianych parametrów przy prądach zwarcia o wartościach 1–5 kA i współczynniku mocy obwodu zwarcia mieszczącym się w przedziale $\cos \varphi = 0,4–0,85$ (w zależności od wartości prądu zwarcia). Schemat stanowiska badawczego przedstawia rys. 2.

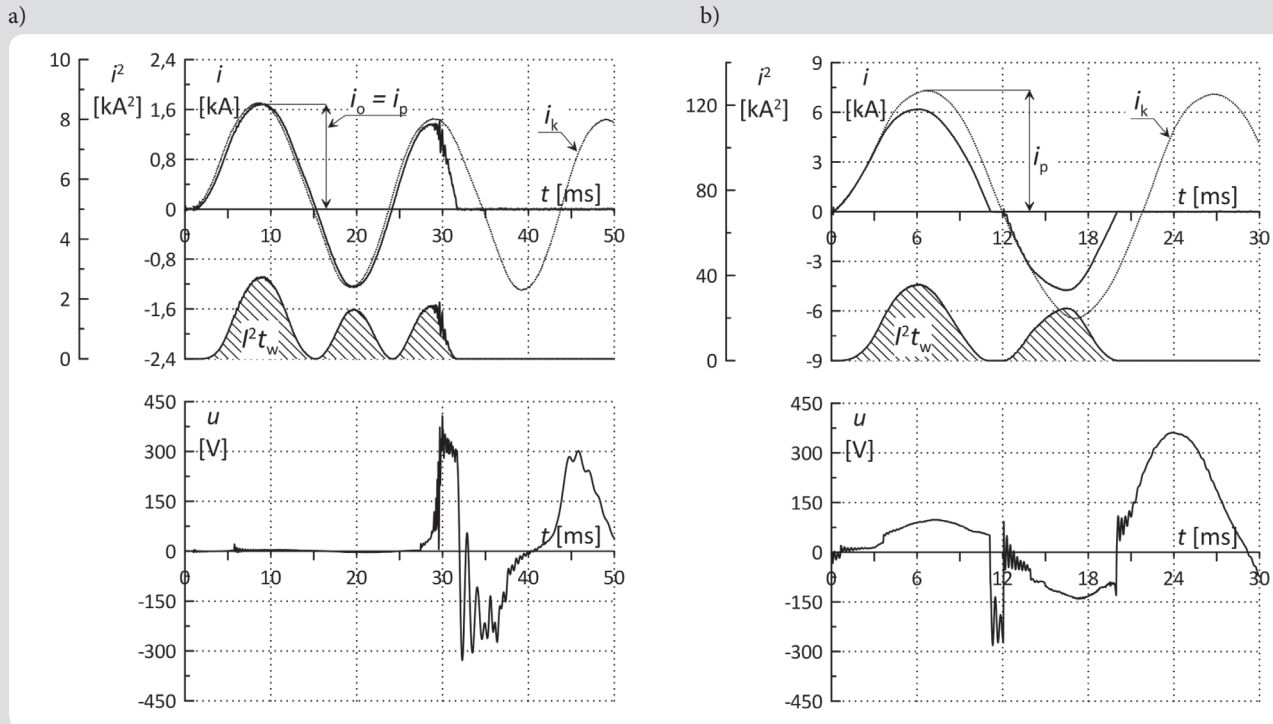
Stanowisko składa się z części wieloprądowej, w skład której wchodzi aparatura łączeniowa: odłącznik OW, wyłącznik roboczy WR, załącznik zwarcia ZZ, dławik D, rezystor R, transformator

wieloprądowy TW oraz badany wyłącznik OB. Regulacja spodziewanego prądu zwarcia oraz parametrów obwodu probierczego realizowana jest poprzez zmianę wartości elementów regulacyjnych, tj. dławika D i rezystora R. Pomiar prądu płynącego przez badany aparat realizowano z wykorzystaniem bocznika wieloprądowego BW, natomiast pomiar napięcia z wykorzystaniem dzielnika napięciowego DN. Rejestrację przebiegów prądu i napięcia przeprowadzono za pomocą oscyloskopu typu TDS 5034B firmy Tektronix oraz optoizolatora typu A6907 firmy Tektronix.

W skład każdej próby obejmującej badanie wybranego wyłącznika instalacyjnego wchodziła próba kalibracyjna oraz próba wyłączenia określonego prądu zwarcia. Celem próby kalibracyjnej było określenie parametrów zespołu probierczego, które pozwoliły uzyskać żądane wartości prądu zwarcia (wartość skuteczną spodziewanego prądu zwarcia z uwzględnieniem składowej nieokresowej – I_k oraz prąd zwarcia udarowy – i_p). Próbę tę realizowano poprzez wykonanie zwarcia metalicznego zworą Z, instalowaną w miejsce badanego wyłącznika nadprądowego. Regulację kąta fazowego Ψ_Z załączenia zwarcia realizowano za pomocą nastawnika



Rys. 3. Wyłączenie prądu zwarcia przez wyłącznik nadprądowy instalacyjny; $I_k = 3,1$ kA, $i_p = 4,5$ kA, a) wyłącznik C16, $i_o = 1,8$ kA, $I^2 t_w = 4,8$ kA²s, b) wyłącznik D20, $i_o = 2,1$ kA, $I^2 t_w = 7,9$ kA²s



Rys. 4. Wyłączanie prądu zwarcowego przez wyłącznik nadprądowy instalacyjny; a) wyłącznik D40, $I_k = 1,0$ kA, $i_p = 1,7$ kA, $i_o = 1,7$ kA, $I^2t_w = 31,3$ kA²s
b) wyłącznik C100, $I_k = 4,8$ kA, $i_p = 7,1$ kA, $i_o = 6,0$ kA, $I^2t_w = 144,6$ kA²s; brak ograniczania prądu zwarcowego

fazowego NF. Kąt Ψ_Z załączenia załącznika zwarcowego ZZ dobiegano tak, aby uzyskać największą z możliwych wartości szczytowej prądu (prąd i_p), przy określonej wartości spodziewanego prądu zwarcowego I_k . Czas próby t_z regulowano za pomocą nastawnika czasowego NC.

Dla każdego wyłącznika instalacyjnego przeprowadzono po trzy próby wyłączania prądu zwarcowego I_k nastawionego w trakcie prób kalibracyjnych. Podczas próby wyłączania rejestrowano przebiegi prądu wyłączanego 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.

Przykładowe przebiegi wyłączania prądu zwarcowego przez wyłączniki nadprądowe instalacyjne zamieszczono na rys. 3 i 4. Pole pod przebiegiem i^2 (zakresowany obszar) jest równe całce Joule'a wyłączenia I^2t_w .

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 wykresy (rys. 5–7) przedstawiające wartości prądu ograniczonego i_o i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w w funkcji spodziewanego prądu

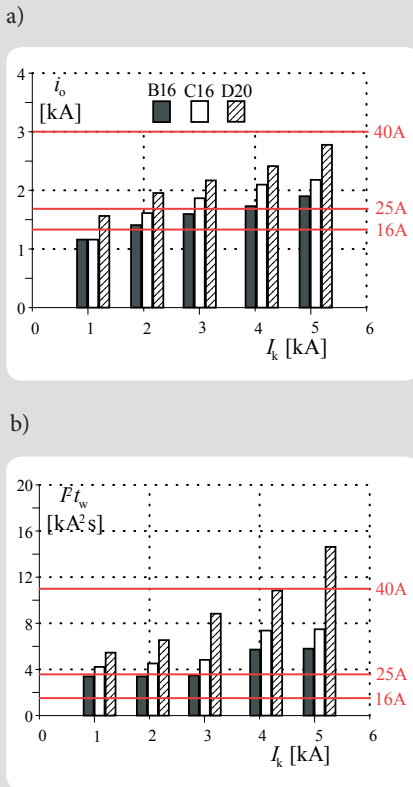
zwarcowego I_k . Każdy wykres zawiera linię poziomą przedstawiającą, zgodnie z tab. 1, największą wartość prądu szczytowego i_s i całki Joule'a I^2t , którą przetrzyma wyłącznik różnicowoprądowy bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego o określonym prądzie znamionowym ciągłym.

Na rys. 5 przedstawiono 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. 5a), to okazuje się, że warunek poprawnej koordynacji jest spełniony tylko dla spodziewanego prądu zwarcowego $I_k = 1$ kA (prąd ograniczony wyłączników B16 i C16 nie przekracza wartości dopuszczalnej dla wyłącznika różnicowoprądowego). Niestety, dla tego spodziewanego prądu zwarcowego ($I_k = 1$ kA) jest przekroczona największa dopuszczalna wartość całki Joule'a. Zatem wyłączniki B16 i C16 już przy prądzie $I_k = 1$ kA nie zabezpieczają 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 zabezpieczany przez wyłączniki B16 i C16 w całym badanym zakresie spodziewanych prądów zwarcowych. Wyłącznik D20 jest nieodpowiedni, jeżeli spodziewany prąd zwarcowy osiąga wartość $I_k = 5$ kA.

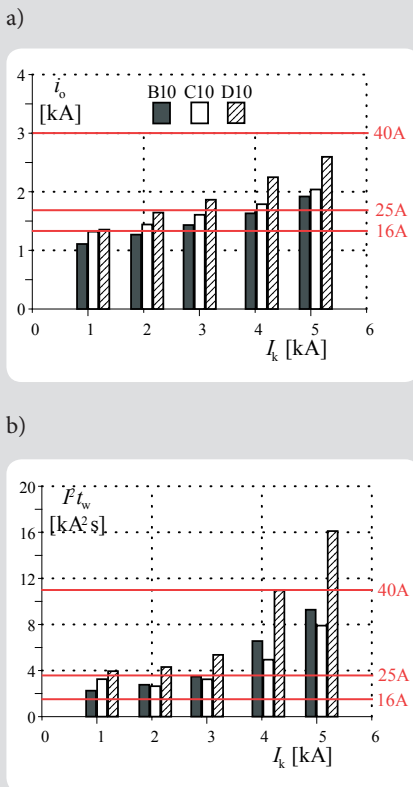
Analizowano również skuteczność dobezpieczenia tych samych wyłączników różnicowoprądowych ($I_n = 16, 25$ i 40 A) przy zastosowaniu wyłączników nadprądowych instalacyjnych o jeszcze mniejszych niż na rys. 5 prądach znamionowych ciągłych ($I_n = 10$ A). Okazuje się, że żaden z wymienionych wyłączników nadprądowych nie stanowi dobezpieczenia wyłącznika różnicowoprądowego o prądzie znamionowym ciągłym $I_n = 16$ A. Już przy spodziewanym prądzie zwarcowym $I_k = 1$ kA całka Joule'a wyłączenia I^2t_w tych wyłączników nadprądowych przekracza wartość dopuszczalną dla wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 16$ A (rys. 6b). Problematyczne jest też dobezpieczenie wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 25$ A, a nawet o $I_n = 40$ A. W przypadku tego ostatniego, przy spodziewanym prądzie zwarcowym $I_k = 5$ kA, nie może być zastosowany wyłącznik nadprądowy D10. Badania wyłączników instalacyjnych B25, D40 i D50 (rys. 7) wykazały, że wyłącznik B25 stanowi dobezpieczenie wszystkich trzech rozważanych wyłączników różnicowoprądowych ($I_n = 40, 63$ i 80 A) nawet przy spodziewanym prądzie zwarcowym równym $I_k = 5$ kA.

Pozostałe wyłączniki instalacyjne (D40 i D50) są skutecznym dobezpieczeniem tylko przy prądach $I_k = 1$ i 2 kA. Co gorsza, wyłącznik instalacyjny D50 przy prądach $I_k = 4$ i 5 kA nie jest skutecznym dobezpieczeniem nawet wyłącznika różnicowoprądowego o $I_n = 80$ A. Przekroczono są największe dopuszczalne wartości całki Joule'a.

Biorąc pod uwagę wymagania normy [1], może się okazać, że wyłącznik nadprądowy instalacyjny dobezpieczający wyłącznik

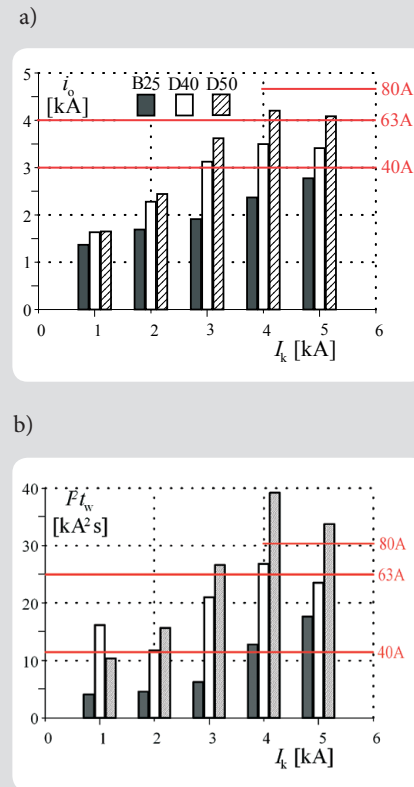


Rys. 5. Prądy ograniczone i_0 (a) i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników B16, C16, D20 oraz największy dopuszczalny prąd szczytowy i całka Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o $I_n = 16, 25$ i 40 A

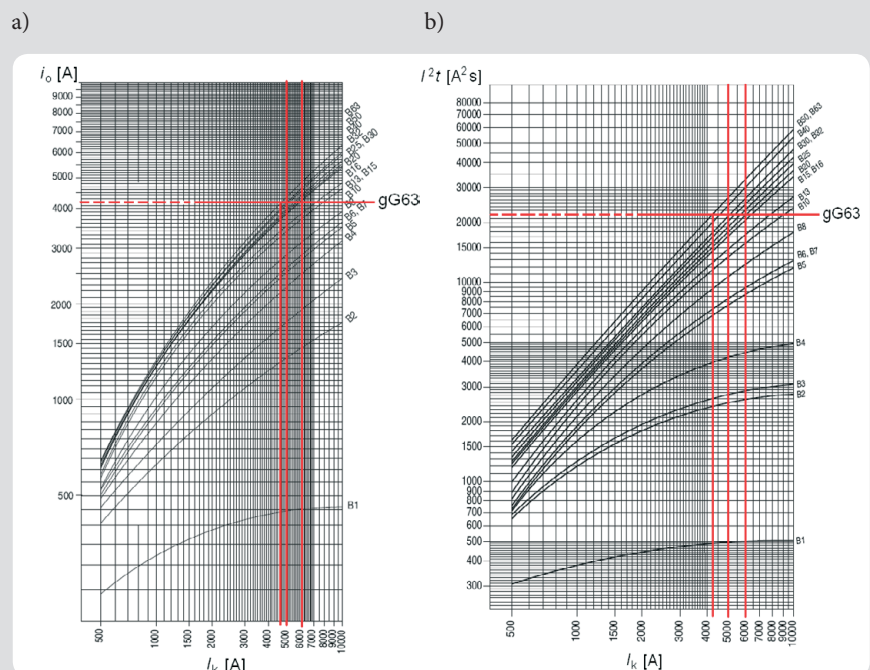


Rys. 6. Prądy ograniczone i_0 (a) i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników o charakterystykach B, C, D i prądzie znamionowym $I_n = 10$ A oraz największy dopuszczalny prąd szczytowy i całka Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o $I_n = 16, 25$ i 40 A

różnicowoprądowy będzie charakteryzował się prądem znamionowym ciągłym znacznie mniejszym niż ten drugi. Tym mniejszym, im większy jest spodziewany prąd zwarcia w rozpatrywanym obwodzie, a to może prowadzić do rozwiązań ekonomicznie niezasadnych.



Rys. 7. Prądy ograniczone i_0 (a) i całki Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników B25, D40, D50 oraz największy dopuszczalny prąd szczytowy i całka Joule'a dla wyłączników różnicowoprądowych o $I_n = 40, 63$ i 80 A



Rys. 8. Prąd ograniczony i_0 (a) i całka Joule'a wyłączenia I^2t_w (b) wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B [6]

4.2. Analiza i ocena wyników badań w świetle danych producentów aparatów. Producenci mogą dostarczać wyłączniki różnicowoprądowe, które wytrzymują większy prąd szczytowy i całkę Joule'a, niż podaje norma [1]. Wyłączniki są wtedy oznaczane, jak podano w tab. 2. Przeanalizowano wyłącznik różnicowoprądowy o obciążalności zwarcia 6 kA pod warunkiem dobezpieczenia go bezpiecznikiem z wkładką topikową typu gG o prądzie znamionowym 63 A.

Zgodnie z normą [5] całka Joule'a wyłączenia wkładki typu gG63 wynosi $I^2t_w = 21\ 200\ A^2s$. Na podstawie danych katalogowych [6] stwierdzono, że przy spodziewanym prądzie zwarcia $I_k = 6\ kA$ (największym dopuszczalnym dla rozpatrywanego wyłącznika różnicowoprądowego) prąd ograniczony tej wkładki wynosi $i_0 = 4,2\ kA$. Zatem wyłącznik różnicowoprądowy dobezpieczony bezpiecznikiem z wkładką gG63 z pewnością wytrzyma narazenia cieplne ($I^2t_w = 21\ 200\ A^2s$) i elektrodynamiczne ($i_0 = 4,2\ kA$) [7].

Rozważano zastąpienie bezpiecznika z wkładką gG63 wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym. Na rys. 8 przedstawiono wykres prądu ograniczonego i wykres całki Joule'a, wyłączenia wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B (dane producenta), w funkcji spodziewanego prądu zwarcia. Na każdym wykresie naniesiono linię poziomą, przedstawiającą wspomniane parametry dla wkładki gG63 (wkładki gG o największym prądzie znamionowym, gwarantującym dobezpieczenie wyłącznika różnicowoprądowego).

Z wykresów na rys. 8 wynika, że do spodziewanego prądu zwarcia o wartości ok. $I_k = 4,2\ kA$, nie ma ograniczeń w stosowaniu wyłączników nadprądowych instalacyjnych typu B. W miejsce bezpiecznika z wkładką gG63 mogą być zastosowane wyłączniki typu B o prądzie znamionowym do 63 A. Powyżej spodziewanego prądu zwarcia

Urządzenie dobezpieczające	Prąd ograniczony I_0 [kA]	Całka Joule'a wyłączenia $I^2 t_w$ [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

Tab. 3. Deklarowane przez producenta oraz zmierzone prądy ograniczone i całki Joule'a wyłączenia wybranych zabezpieczeń (dla spodziewanego prądu zwarciovego $I_k = 5$ kA)

$I_k = 4,2$ kA występują ograniczenia, wówczas prąd znamionowy wyłączników nadprądowych powinien być mniejszy niż 63 A. W tab. 3 przedstawiono wartości prądu ograniczonego I_0 i całki Joule'a wyłączenia $I^2 t_w$ dla wybranych wyłączników nadprądowych przy spodziewanym prądzie zwarciovym $I_k = 5$ kA. Szarym tłem zaznaczono wartości większe niż dla wkładki topikowej 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. 8). Jeżeli wyłączniki te będą dobezpieczać wyłączniki różnicowoprądowe np. o $I_n = 63$ A, to nie pozwolą na pełne wykorzystanie ich prądu znamionowego ciągłego. Jeżeli porównać wyłączniki nadprądowe o tych samych prądach znamionowych ciągłych (tab. 3), ale innych charakterystykach (B, C lub D), to widać, że największe narażenia cieplne i elektrodynamiczne pochodzą od wyłączników typu D.

5. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że zastąpienie bezpiecznika wyłącznikiem nadprądowym instalacyjnym, jako zabezpieczenia wyłącznika różnicowoprądowego bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego, każdorazowo powinno być poprzedzone dogłębną analizą. Zastosowanie wyłącznika nadprądowego o identycznym jak bezpiecznik prądzie znamionowym ciągłym nie gwarantuje właściwej koordynacji. 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.

Bibliografia

1. PN-EN 61008-1:2007P Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego

zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne.

2. IEC TR 60755:2008 General requirements for residual current operated protective devices. 2nd edition.
3. Instalacje elektryczne i teletechniczne. Poradnik monterów i inżynierów elektryków, Verlag Dashöfer, Część 5. Zabezpieczenia w instalacjach elektrycznych, Warszawa 2005.
4. Musiał E., Czapp S., Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji (2), *Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych* 2008, nr 109, s. 3–44.
5. PN-HD 60269-2:2010E 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.
6. Supplementary Protectors/Miniature Circuit Breakers. Technical Data Catalog, Numbers 1492-SP Series C, Rockwell Automation Publication 1492-TC010D-EN-P – April 2011.
7. Czapp S., Kowalak D., Borowski K., Narażenia cieplne i elektrodynamiczne wyłączników różnicowoprądowych przy ich dobezpieczaniu wyłącznikami nadprądowymi instalacyjnymi, Referat konferencyjny, XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE '13, Jurata 12–14.06.2013, w: *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2013, nr 33), s. 115–118.

Stanisław Czapp

dr hab. inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: stanislaw.czapp@pg.gda.pl

Absolwent Politechniki Gdańskiej (1996). Jest pracownikiem Wydziału Elektrotechniki i Automatyki swojej macierzystej uczelni. Jego działalność naukowa jest związana z instalacjami i urządzeniami elektrycznymi, oświetleniem elektrycznym, a w szczególności ochroną przed porażeniem prądem elektrycznym. Jest autorem lub współautorem wielu artykułów i referatów oraz opracowań niepublikowanych o charakterze projektów, ekspertyz i opinii. Jest rzeczoznawcą SEP w dziale 08 Instalacje i urządzenia elektryczne.

Daniel Kowalak

dr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: daniel.kowalak@pg.gda.pl

Absolwent Politechniki Gdańskiej, Wydział Elektrotechniki i Automatyki (2006). Zatrudniony jest na stanowisku asystenta na swojej macierzystej uczelni. Obszar jego zainteresowań naukowych to: technika wysokich napięć, fizyka plazmy, zwarcia łukowe i ochrona przed ich skutkami, elektryczny łuk łączeniowy i projektowanie aparatów elektrycznych.

Kornel Borowski

mgr inż.

Politechnika Gdańska

e-mail: kornel.borowski@pg.gda.pl

Ukończył studia magisterskie na kierunku elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2012). Doktorant w Katedrze Elektroenergetyki swojej macierzystej uczelni. W ramach realizacji pracy doktorskiej zajmuje się problematyką związaną z automatyką zabezpieczeniową i pomiarami w instalacjach elektroenergetycznych. Od ośmiu lat projektant instalacji elektroenergetycznych i teletechnicznych.