

Badanie wpływu czasu łukowego zestykowego na czas wyłączenia prądu przez wyłączniki szybkie

Artur ROJEK¹

Streszczenie

Wyłączniki szybkie poddaje się wielu badaniom i testom laboratoryjnym. Dokumenty normalizacyjne określają między innymi takie parametry wyłączników, jak czas własny i czas łukowy, których suma stanowi czas wyłączenia prądu. Czas własny w dużym stopniu zależy od budowy wyłącznika szybkiego – sposobu jego wyzwalania i mechanizmu otwierającego styki. Czas łukowy jest również uzależniony od budowy wyłącznika. Na jego długość ma wpływ konstrukcja styków, parametry komory łukowej i sposób gaszenia łuku oraz metody wydmuchu magnetycznego.

Czas występowania łuku o niskiej wartości określa się jako czas łukowy zestykowy. Normy, według których przeprowadza się badania wyłączników szybkich nie charakteryzują oraz nie obejmują swoim zakresem tego parametru, choć jest on istotnym czynnikiem wpływającym na szybkość wyłączenia prądu i stopień jego ograniczania.

Słowa kluczowe: wyłącznik szybki, czas własny, czas łukowy, przepięcie łączeniowe

1. Wstęp

Wyłącznikom szybkim stosowanym w podstacjach trakcyjnych oraz w taborze stawia się wiele wymagań, dotyczących parametrów elektrycznych i mechanicznych oraz wytrzymałości i niezawodności. Nieprawidłowe działanie wyłączników szybkich może być przyczyną powstania uszkodzeń i zniszczeń infrastruktury kolejowej, perturbacji w ruchu pociągów, a w skrajnych przypadkach może zagrażać zdrowiu i życiu ludzi.

Jednym z podstawowych parametrów wyłączników szybkich, które istotnie wpływają na poziom ochrony zdrowia i życia ludzkiego w przypadku wystąpienia zwarć w dostępnych elementach, jest czas wyłączenia prądu [1, 2].

Przed dopuszczeniem do eksploatacji, wyłączniki szybkie są poddawane wielu badaniom oraz testom laboratoryjnym. Podstawowymi dokumentami odniesienia, dotyczącymi badań wyłączników szybkich, są normy PN-EN 50123-1 [5] i EN 50123-2 [6] dla wyłączników przeznaczonych do pracy w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych oraz norma EN 60077-3 [9], której zapisy powinny być czytane wraz z normami EN 60077-1 [7] i EN 60077-2 [8], określająca wymagania i badania wyłączników taborowych.

Problematyce wyłączników szybkich prądu stałego i wyłączalności zwarć poświęcono wiele publikacji, m.in. [3, 4, 12–14]. Badania wyłączników opisano w publikacjach [10–14]. Tylko w niektórych publikacjach opisano problem czasu wyłą-

czania oraz zależności tego czasu od parametrów wyłącznika, jak i parametrów obwodu, w którym wyłącznik pracuje.

Podstawowym celem artykułu jest określenie wpływu konstrukcji wyłącznika szybkiego oraz parametrów obwodu zwarcowego na czas jego wyłączenia, a w szczególności na czas łukowy zestykowy, natomiast dodatkowym celem jest określenie i porównanie innych parametrów wyłączników poddawanych badaniom.

W artykule opisano badania zwarcowe czterech wyłączników szybkich DC o różnych konstrukcjach, pracujących w różnych konfiguracjach obwodu zwarcowego, w którym zmieniano parametry tak, aby otrzymać różne wartości stałej czasowej obwodu oraz spodziewanego prądu zwarcia.

2. Parametry wyłączników szybkich DC

Normy PN-EN 50123-2 [6] i PN-EN 60077-3 [9] definiują wiele parametrów charakteryzujących wyłączniki szybkie prądu stałego. Są to:

- czas własny t_r ,
- czas łukowy t_{ar} ,
- całkowity czas wyłączenia t_b ,
- prąd ograniczony $I_{cut\ off}$,
- napięcie łuku u_{ar} ,
- maksymalne napięcie łuku \hat{U}_{arc} .

¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: arojek@ikolej.pl.

Definiują również następujące parametry obwodu:

- stała czasowa obwodu t_c ,
- napięcie zasilania U_d ,
- stromość narastania prądu di/dt ,
- wartość prądu ustalonego I_{SS} ,
- wartość maksymalna prądu I_{SS}' .

Niektóre z wymienionych parametrów w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 1.

Czas wyłączenia t_b jest to czas liczony od chwili przekroczenia przez prąd poziomu nastawy wyzwalacza do momentu, w którym wyłączany prąd przestaje przepływać. Czas wyłączenia t_b jest sumą czasu własnego t_i i czasu łukowego t_a . Czas własny t_i jest definiowany jako czas, który upływa od chwili przekroczenia przez prąd nastawy wyzwalacza do chwili rozpoczęcia rozwierania styków przez wyłącznik. Z kolei czas łukowy t_a to czas liczony od momentu rozwierania styków do całkowitego wyłączenia prądu.

Czas własny t_i w dużym stopniu zależy od budowy wyłącznika szybkiego – sposobu jego wyzwalania i mechanizmu otwierającego styki. Czas łukowy t_a również jest uzależniony od budowy wyłącznika. Na jego długość wpływa konstrukcja styków, parametry komory łukowej i sposób gaszenia łuku oraz metody wydmuchu magnetycznego.

Podczas trwania czasu łukowego t_a łuk elektryczny nie rozwija się jednostajnie, a napięcie łuku u_a nie rośnie liniowo. Po rozwarcie styków wyłącznika następuje między nimi zapłon łuku. Łuk ten jest krótki i ma dużą średnicę, co powoduje, że jego napięcie jest niskie. Łuk przemieszcza się do komory łukowej, w której znacznie zwiększa się jego długość, zmniejsza się średnica i następuje dejonizacja. Od chwili rozwarcia styków, do momentu wejścia łuku do komory łukowej, napięcie łuku jest niskie i praktycznie nie powoduje ograniczenia prądu zwarcia. Według autora publikacji [15], okres występowania łuku o niskiej

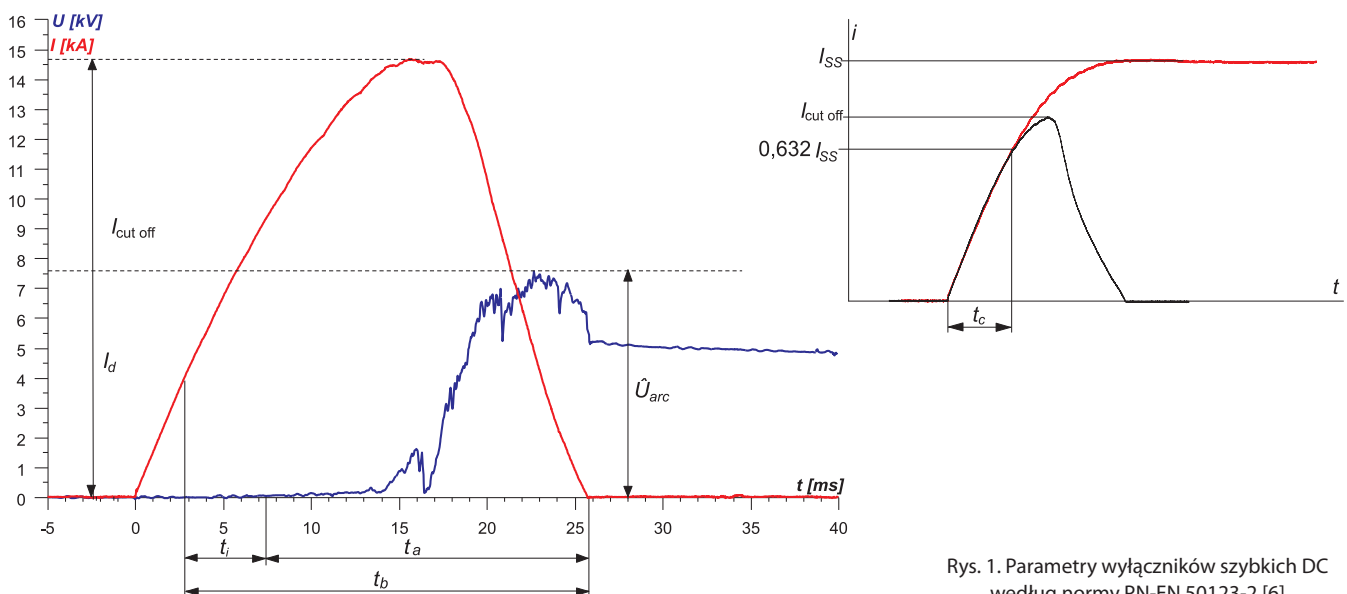
wartości określa się jako czas łukowy zestykowy t_s . Normy PN-EN 50123-1 [5], PN-EN 50123-2 [6] i PN-EN 60077-3 [9] nie charakteryzują oraz nie obejmują swoim zakresem tego parametru, choć jest on istotnym czynnikiem wpływającym na szybkość wyłączenia prądu i stopień jego ograniczania. Długość czasu łukowego zestykowego t_s oraz czas własny t_i wyłącznika mają istotny wpływ na koordynację zabezpieczeń zwarcia w układzie pojazd trakcyjny – podstacja trakcyjna [12].

Na potrzeby badań i analiz wyników przedstawionych w następnych rozdziałach artykułu, czas łukowy zestykowy t_s zdefiniowano jako czas od chwili rozwarcia styków wyłącznika (zapłonu łuku pomiędzy stykami) do chwili osiągnięcia przez łuk napięcia $u_a = 0,1 U_d$ (napięcia zasilania obwodu) [11]. Ponieważ w wielu przypadkach napięcie łuku u_a waha się podczas wyłączenia prądu, następuje jego wzrost i spadek, warunek $u_a = 0,1 U_d$ uznaje się za spełniony, jeżeli nie nastąpi spadek wartości napięcia łuku poniżej $0,1 U_d$. Przytoczoną definicję czasu łukowego zestykowego t_s przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 2.

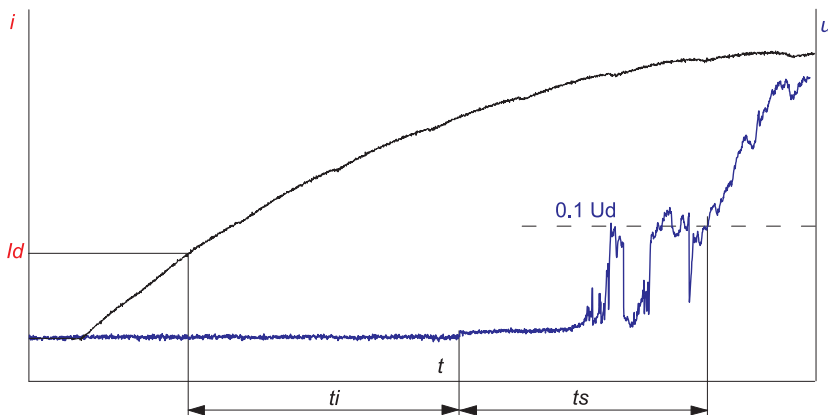
3. Układ pomiarowy

Podczas badań, opisanych m.in. w [10, 15] układ pomiarowy był zasilany z 6-pulsowego zespołu prostownikowego, złożonego z transformatora prostownikowego o mocy 4,4 MVA i prostownika diodowego o prądzie znamionowym 1700 A w III klasie przeciążalności. Układ składał się także z zestawu dławików i rezystorów. Zabezpieczeniem był wyłącznik bezpieczeństwa.

Badane wyłączniki szybkie były połączone równolegle. W każdej gałęzi równoległej, szeregowo z wyłącznikiem był umieszczony stycznik. Zadaniem styczników było określenie, przez który wyłącznik szybki będzie przepływał prąd

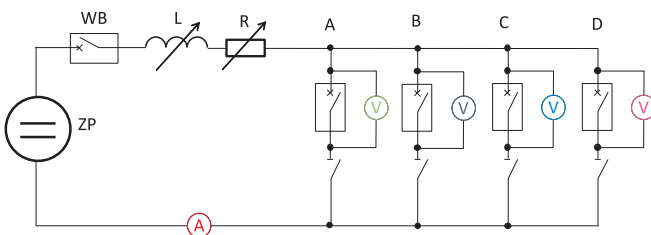


Rys. 1. Parametry wyłączników szybkich DC według normy PN-EN 50123-2 [6]



Rys. 2. Definicja czasu łukowego zestykowego t_s
[opracowanie własne]

w określonej próbie. Dodatkowo styczniki zabezpieczają przed przenoszeniem się przepięcia łączeniowego z badanego wyłącznika na pozostałe wyłączniki. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego: ZP – zespół prostownikowy, WB – wyłącznik bezpieczeństwa, L – indukcyjność obwodu, R – rezystancja obwodu [opracowanie własne]

Do badań wybrano wyłączniki szybkie, przeznaczone do stosowania w obiektach zasilania (podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych) w systemie 3 kV DC, które są dopuszczone do eksploatacji w Polsce (Prezes Urzędu Transportu Kolejowego wydał świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu). Aby uniemożliwić przypisanie wyników do konkretnego typu wyłącznika, zostały oznaczone jako wyłączniki: A, B, C i D. Wszystkie badane wyłączniki są magnetowydmuchowymi wyłącznikami szybkimi prądu stałego. Część z nich, oprócz styków głównych, jest wyposażona również w styki opalne².

W układzie pomiarowym rejestrowano pomiar prądu oraz napięcie na każdym z wyłączników. Przed przystąpieniem do badań, dokonano pomiaru nastawy wyzwalaczy wyłączników szybkich za pomocą testera TWS-6000. W założeniu wszystkie wyłączniki szybkie powinny mieć taką samą nastawę, lecz ze względu na różne parametry wyłączników (prąd znamionowy, zakres możliwych nastaw) przyjęto, że różnica nastawy każdego z wyłączników nie może być większa niż 5% wartości zakładanej 2000 A. Dodatkowo, układy

służące do nastawiania poziomu wyzwalania działają z małą precyzją – dokładnością kilkudziesięciu amperów.

Na podstawie skalowania wyzwalaczy wyłączników szybkich za pomocą testera TWS-6000 ustalono, że nastawy wyłączników szybkich są następujące:

- A – 1925 A,
- B – 2100 A,
- C – 2065 A,
- D – 2025 A.

4. Wyniki badań

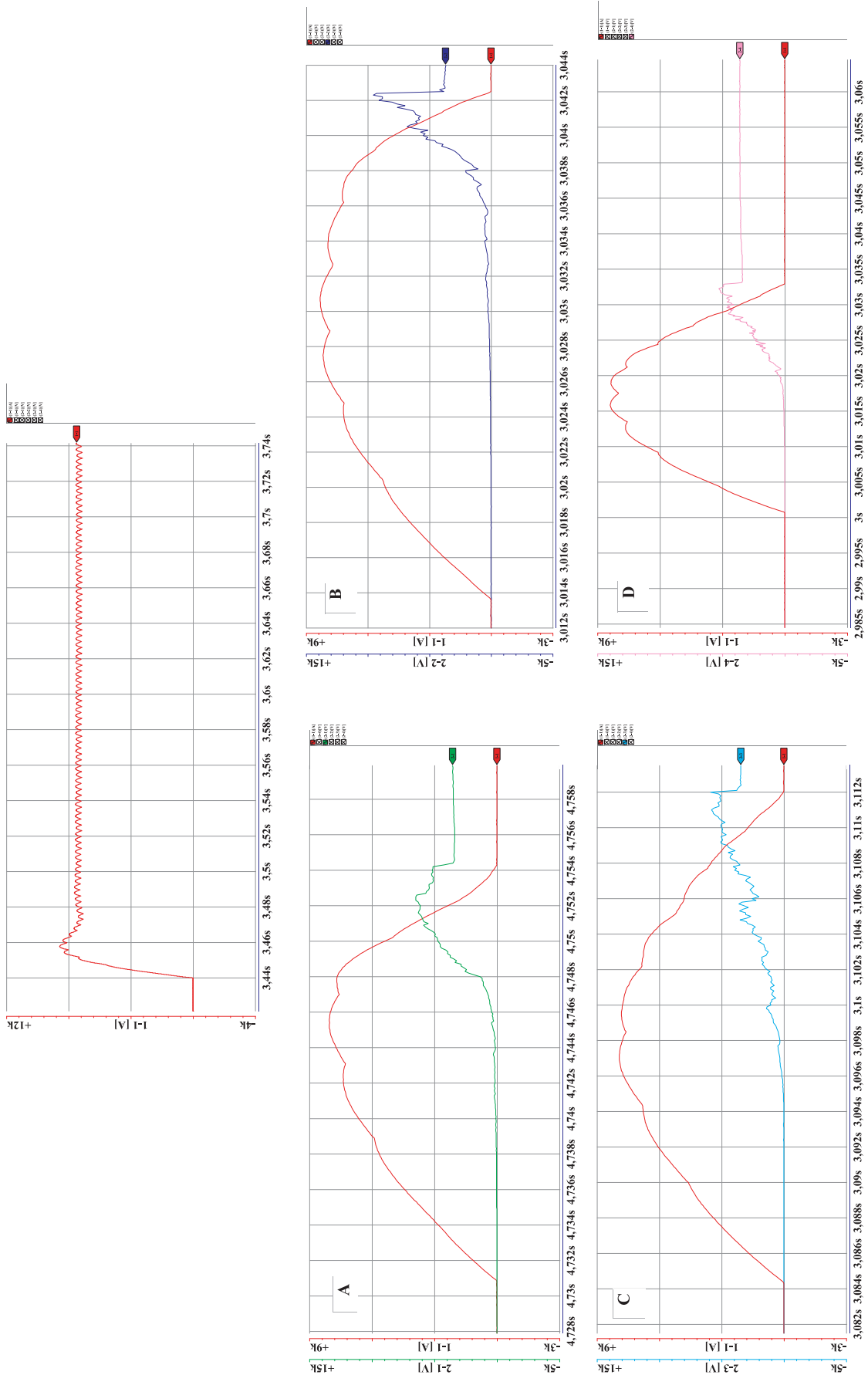
Badania przeprowadzono dla czterech wartości stałej czasowej obwodu, przy napięciu 3,6 kV. Ze względu na możliwość tylko skokowych zmian wartości rezystancji i indukcyjności w obwodzie, stałe czasowe wynosiły około 5, 10, 15 i 20 ms.

Zmieniając wartości rezystancji i indukcyjności, zmieniano wartość prądu szczytowego (ustalonego) oraz stromość narastania prądu. Badania prowadzono w ten sposób, że w obwodzie o określonych parametrach wykonywano pomiar prądu ustalonego, a następnie indywidualnie badano proces wyłączenia każdego z wyłączników szybkich.

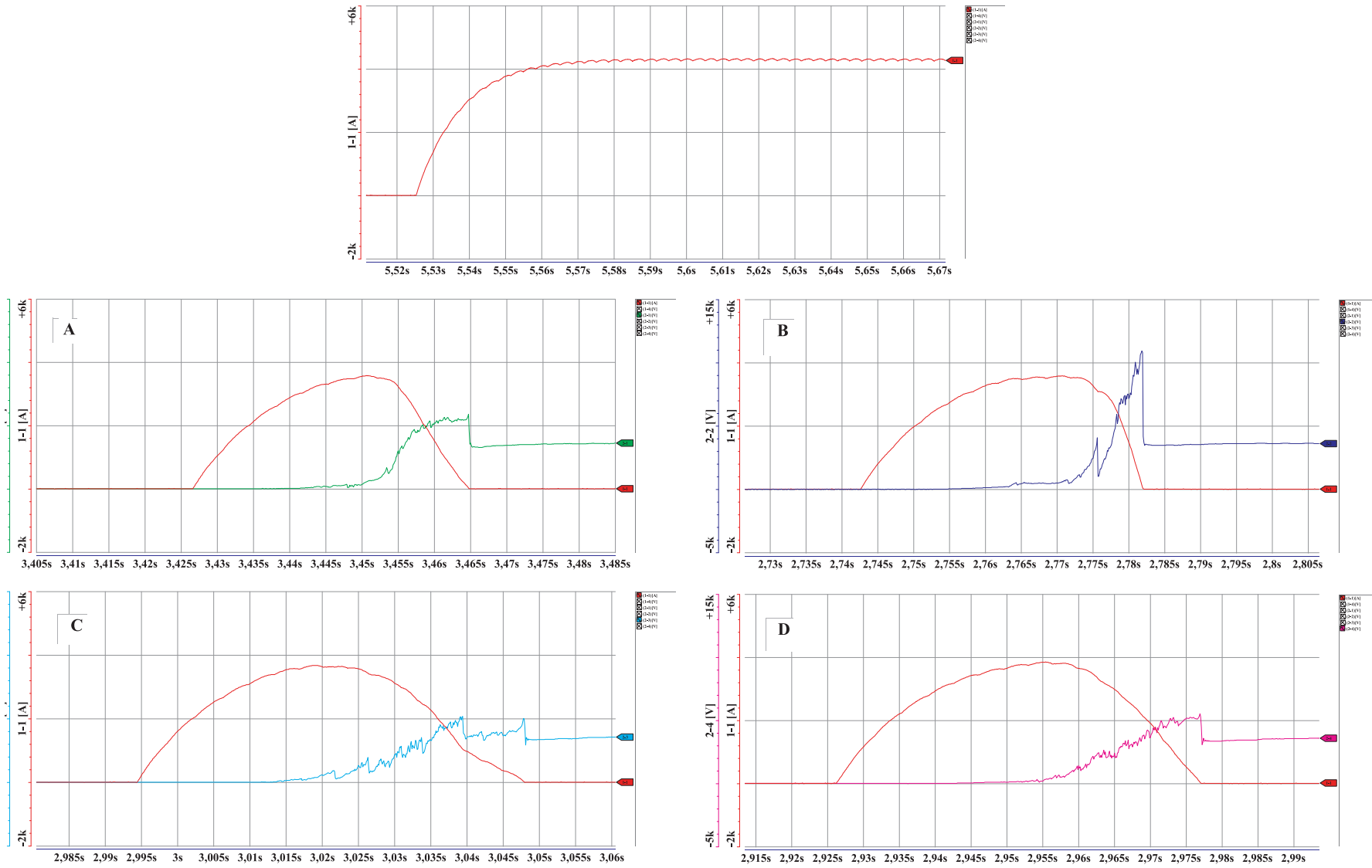
Podczas całego procesu badań, na tych samych kanałach pomiarowych rejestrowano wartości prądu i napięć, a przebiegi napięć i prądów we wszystkich próbach oznaczono tymi samymi kolorami (rys. 4–7), odpowiednio:

- prąd w obwodzie – kanał 1.1, przebieg czerwony,
- napięcie na zaciskach wyłącznika A – kanał 2.1, przebieg zielony,
- napięcie na zaciskach wyłącznika B – kanał 2.2, przebieg niebieski,
- napięcie na zaciskach wyłącznika C – kanał 2.3, przebieg jasnoniebieski,
- napięcie na zaciskach wyłącznika D – kanał 2.4, przebieg różowy.

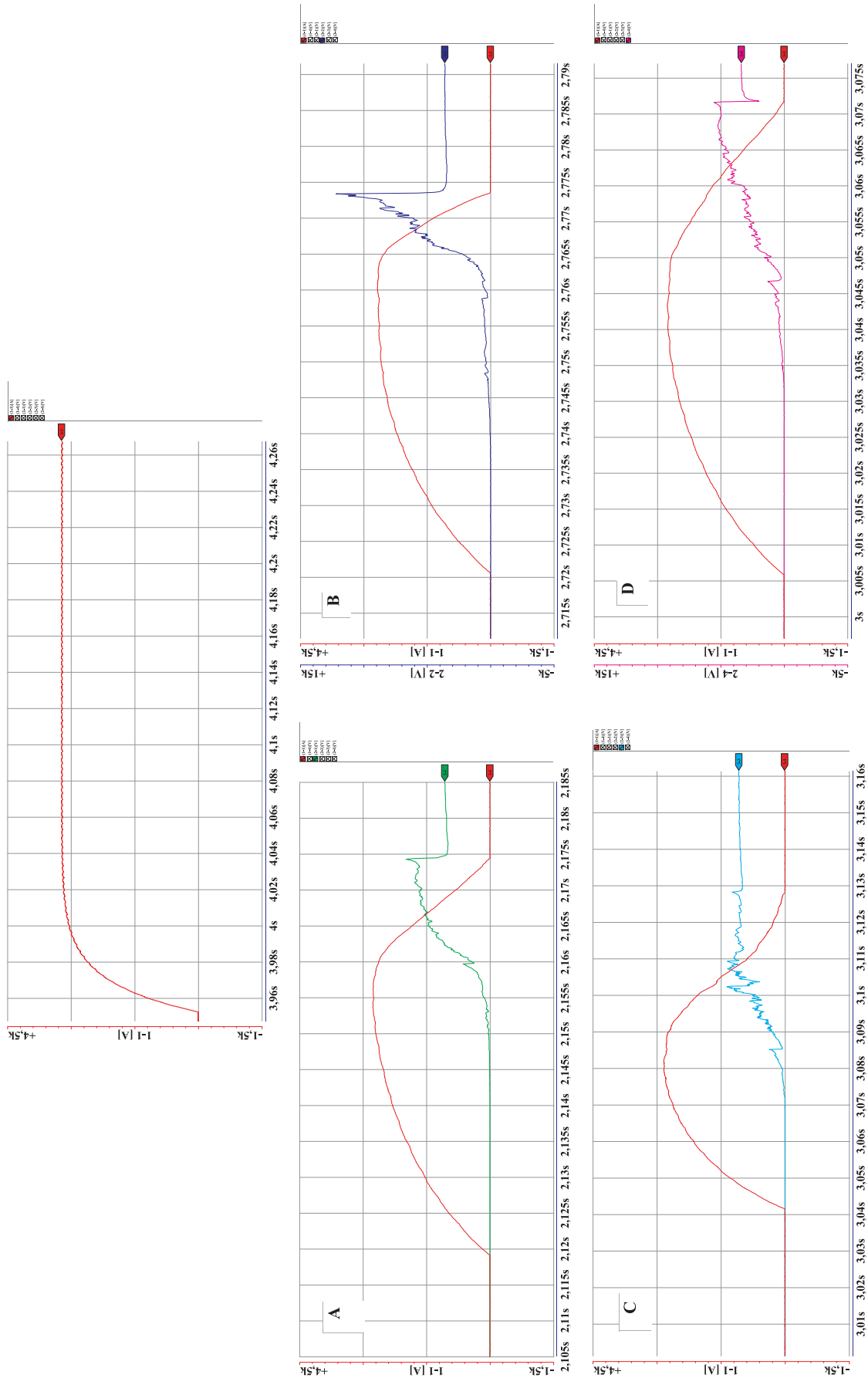
² Styki opalne w wyłącznikach są stykami pomocniczymi, ograniczającymi przepływ prądu i tworzenie się łuku elektrycznego na stykach roboczych.



Rys. 4. Przebiegi zwarciowe przy stałej czasowej obwodu 5,8 ms [opracowanie własne]



Rys. 5. Przebiegi zwarcie przy stałej czasowej obwodu 11,2 ms [opracowanie własne]



Rys. 6. Przebiegi zwarciowe przy stałej czasowej obwodu 16,2 ms [opracowanie własne]

Na podstawie wyników prób, w których uzyskiwano prąd ustalony w obwodzie, wyznaczano następujące parametry obwodu:

- prąd ustalony I_{SS} ,
- prąd maksymalny \hat{I}_{SS} ,
- rzeczywistą wartość stałej czasowej t_{cr} ,
- stromość narastania prądu di/dt .

Na podstawie przebiegów zarejestrowanych w próbach, w których prądy były wyłączane przez badane wyłączniki szybkie, dla każdego z wyłączników określono:

- czas własny t_f ,
- czas łukowy zestykowy t_s ,
- czas łukowy t_a ,
- czas wyłączenia t_b ,
- maksymalne napięcie łuku \hat{U}_{arc} ,
- stromość opadania prądu w czasie wyłączenia di/dt_b .

Łącznie przeprowadzono 155 prób, co przekłada się na 31 prób przypadających na każdy wyłącznik. Podczas badań wyłączany był prąd o wartościach w przedziale od 2123 A do 8604 A. Przykładowe przebiegi przedstawiono

na rysunkach 4–7, na których pokazano przebiegi prądów zwarcia oraz wyłączanie zwarcia przez badane wyłączniki A, B, C i D. Parametry wyłączeń zestawiono w tablicy 1.

Na podstawie wyników badań przeprowadzono analizę zależności czasu łukowego zestykowego t_s od parametrów obwodu, czyli:

- $t_s = f(t_{cr})$,
- $t_s = f(di/dt)$,
- $t_s = f(\hat{I}_{SS})$.

Wyniki badań pokazujące te zależności przedstawiono na rysunkach 8–10.

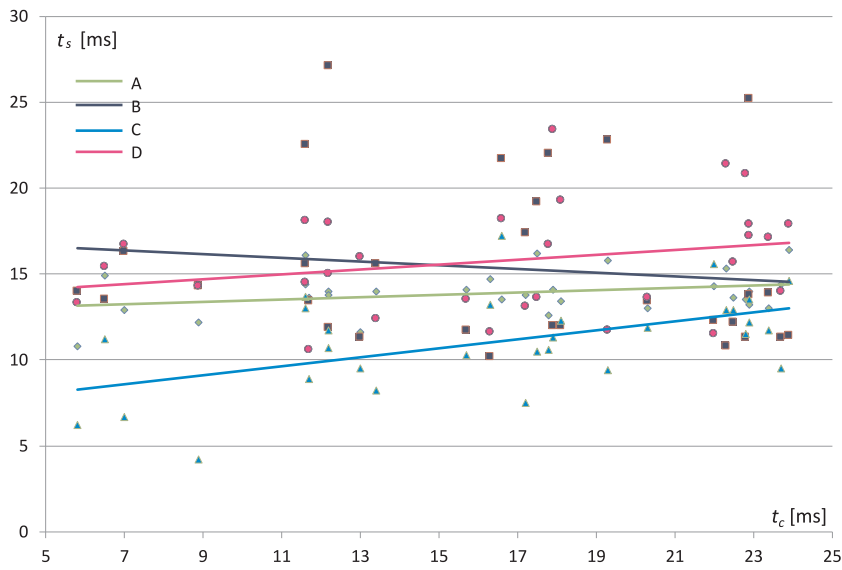
Z przedstawionych na rysunkach 8–10 wykresów jednoznacznie wynika, że czas łukowy zestykowy t_s jest zależny od konstrukcji wyłącznika szybkiego. Z uzyskanych wyników trudno jest określić zależność czasu łukowego zestykowego t_s od stałej czasowej obwodu t_{cr} . Wynika to ze zbyt dużego rozrzutu wartości uzyskanych z pomiarów. W przypadku zależności czasu łukowego zestykowego t_s od stromości narastania prądu di/dt oraz od wartości maksymalnej wyłączanego prądu \hat{I}_{SS} możliwe jest aproksymowanie wyników pomiarów za pomocą wybranej funkcji.

Tablica 1

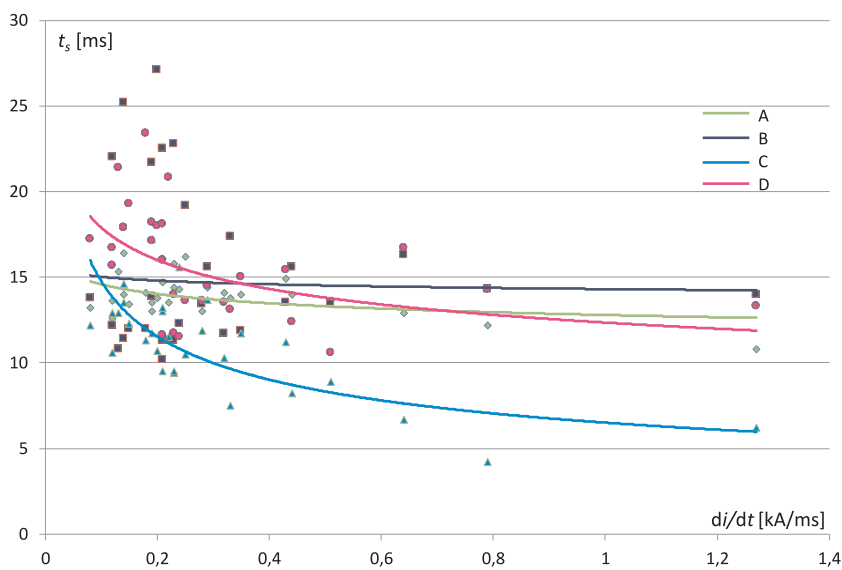
Parametry prądu zwarciego i wyłączeń

Lp.	WS	I_{SS}	\hat{I}_{SS}	t_c	di/dt	$I_{cut\ off}$	t_s	t_a	t_b	\hat{U}_{arc}	Rys.
		[A]	[A]	[ms]	[kA/ms]	[A]	[ms]	[ms]	[ms]	[kV]	
1	—	7416	8604	5,8	1,27	—	—	—	—	—	4
2	A	7416	8604	5,8	1,27	8072	10,8	19,4	21,4	6,54	
3	B	7416	8604	5,8	1,27	8340	14,0	23,1	26,7	9,57	
4	C	7416	8604	5,8	1,27	7943	6,2	20,0	25,5	5,91	
5	D	7416	8604	5,8	1,27	8406	13,3	25,2	30,0	5,31	
6	—	4304	4344	11,2	0,35	—	—	—	—	—	5
7	A	4304	4344	11,2	0,35	3591	14	28,8	31	5,92	
8	B	4304	4344	11,2	0,35	3597	11,9	29,4	31,3	10,96	
9	C	4304	4344	11,2	0,35	3687	11,7	37,2	45,6	5,20	
10	D	4304	4344	11,2	0,35	3864	15	36,6	43,3	5,56	
11	—	3226	3226	16,2	0,19	—	—	—	—	—	6
12	A	3226	3226	16,2	0,19	2775	13,5	33,1	39,8	6,65	
13	B	3226	3226	16,2	0,19	2685	21,7	35,4	52,8	12,23	
14	C	3226	3226	16,2	0,19	2849	17,2	58,6	69,4	4,54	
15	D	3226	3226	16,2	0,19	2773	18,2	42,1	49,7	5,55	
16	—	2123	2123	21,9	0,08	—	—	—	—	—	7
17	A	2123	2123	21,9	0,08	1981	13,2	40,4	94,6	7,14	
18	B	2123	2123	21,9	0,08	1819	13,8	43,2	76,9	11,34	
19	C	2123	2123	21,9	0,08	2123	12,2	67,5	132,0	4,98	
20	D	2123	2123	21,9	0,08	2014	17,2	51,1	109,0	6,00	

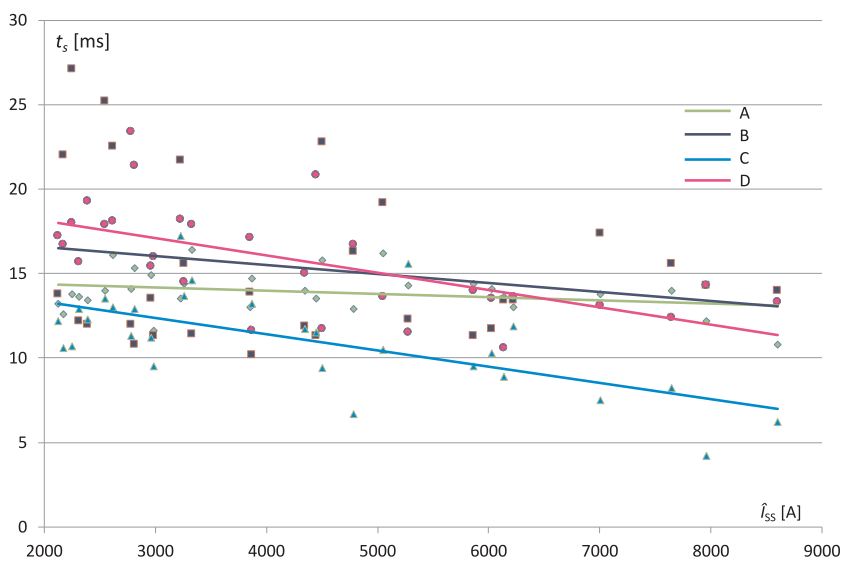
[Opracowanie własne].



Rys. 8. Wartości czasu łukowego zestykowego t_s w zależności od stałej czasowej obwodu t_c [opracowanie własne]



Rys. 9. Wartości czasu łukowego zestykowego t_s w zależności od stromości narastania prądu di/dt [opracowanie własne]



Rys. 10. Wartości czasu łukowego zestykowego t_s w zależności od prądu maksymalnego I_{ss} [opracowanie własne]

Zależność czasu łukowego zestykowego t_s od stromości narastania prądu di/dt aproksymowano funkcją potęgową w postaci:

$$t_s = di / dt^{-a} \quad (1)$$

Z rysunku 9 wynika, że największy wpływ di/dt na wartość t_s występuje dla wyłącznika C. W tym przypadku wykładnik potęgi wynosi $-0,355$. Również dla wyłącznika D jest wyraźny spadek wartości t_s wraz ze wzrostem di/dt (wykładnik potęgi $-0,161$). Najmniejszy wpływ stromości narastania prądu w obwodzie na t_s występuje dla wyłącznika B, dla którego wykładnik potęgi wynosi $-0,021$.

Aproksymacja zależności czasu łukowego zestykowego t_s od maksymalnego prądu \hat{I}_{SS} jest liniowa. Największy wpływ maksymalnego prądu \hat{I}_{SS} na t_s stwierdzono w wyłącznikach C i D, W, w których wzrost \hat{I}_{SS} o 1000 A powo-

duje spadek t_s o około 1 ms. Najmniejszy wpływ \hat{I}_{SS} na wartość t_s zanotowano dla wyłącznika A, gdzie wzrost prądu \hat{I}_{SS} o 1000 A wywołuje spadek t_s o około 0,2 ms.

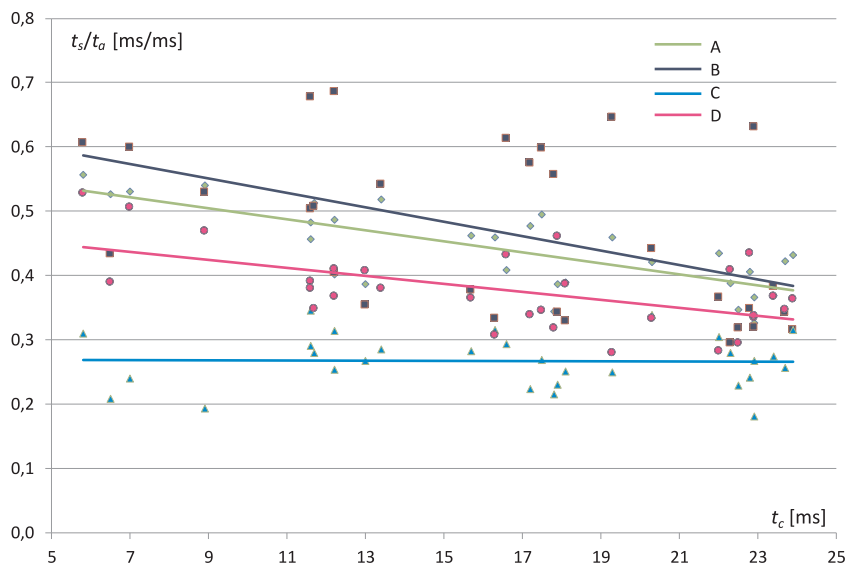
Z uwagi na fakt, że czas łukowy zestykowy t_s jest częścią czasu łukowego t_a , przeprowadzono analizy zależności stosunku tych czasów od parametrów obwodu. Analizom poddano zależności:

- $t_s/t_a = f(t_a)$,
- $t_s/t_a = f(di/dt)$,
- $t_s/t_a = f(\hat{I}_{SS})$.

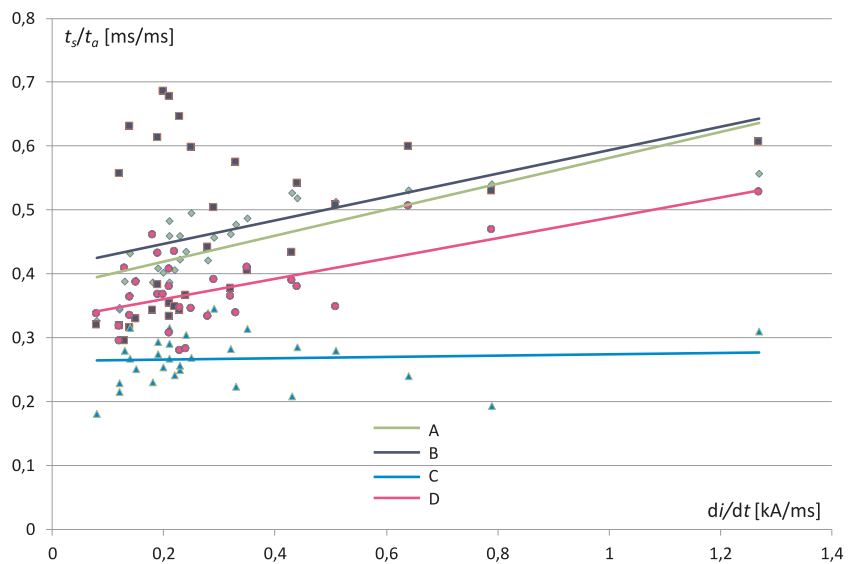
Wyniki badań pokazujące te zależności przedstawiono na rysunkach 11–13.

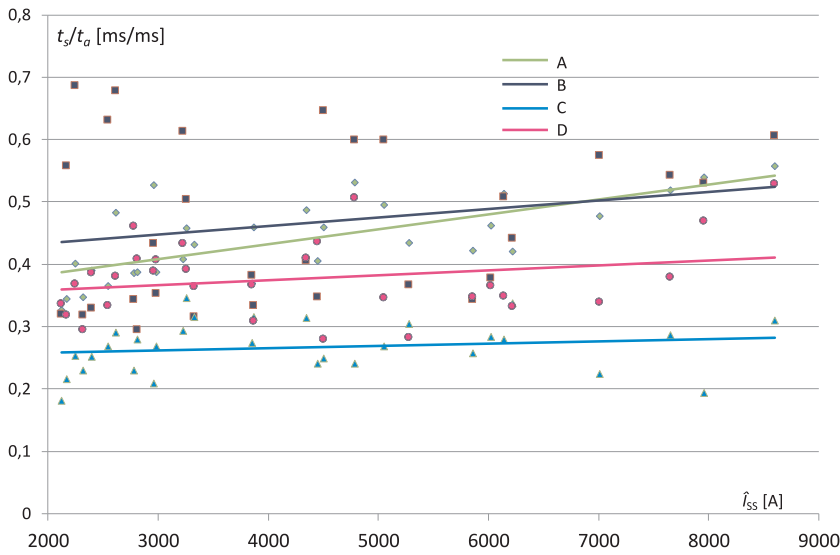
Na podstawie wyników pomiarów określono, że czas łukowy zestykowy t_s może stanowić od 18% (C) do 69% (D) czasu łukowego t_a . Zestawienie maksymalnych i minimalnych stosunków t_s/t_a dla badanych typów wyłączników

Rys. 11. Stosunek czasu łukowego zestykowego t_s do czasu łukowego t_a w zależności od stałej czasowej obwodu t_c [opracowanie własne]



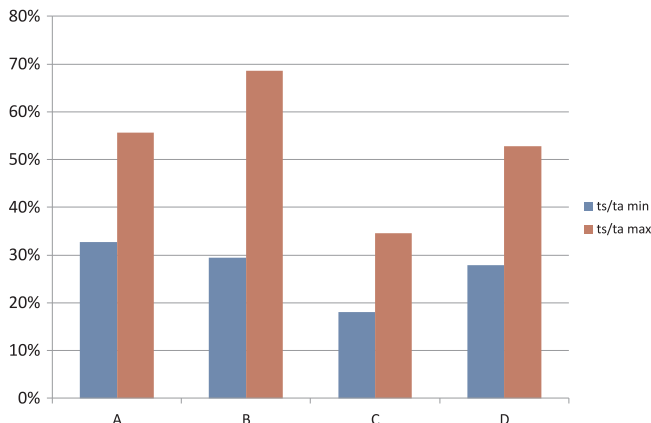
Rys. 12. Stosunek czasu łukowego zestykowego t_s do czasu łukowego t_a w zależności od stromości narastania prądu di/dt [opracowanie własne]





Rys. 13. Stosunek czasu łukowego zestykowego t_s do czasu łukowego t_a w zależności od prądu maksymalnego \hat{I}_{ss} [opracowanie własne]

szybkich przedstawiono na rysunku 14. Z rysunków 11–14 wynika, że wyłącznik B ma największy rozrzut tych wartości.



Rys. 14. Minimalny i maksymalny stosunek czasu łukowego zestykowego t_s do czasu łukowego t_a dla badanych wyłączników szybkich [opracowanie własne]

Z uzyskanych wyników badań wynika, że parametry obwodu mają najmniejszy wpływ na stosunek t_s/t_a . Wzrost wartości prądu maksymalnego \hat{I}_{ss} oraz di/dt powodują zwiększenie się stosunku t_s/t_a . Ponieważ stała czasowa obwodu t_c jest odwrotnie proporcjonalna do di/dt , wzrost t_c powoduje spadek stosunku t_s/t_a . Wpływ parametrów obwodu na t_s/t_a jest najmniejszy w przypadku wyłącznika C (rys. 11–13). Jednocześnie dla wyłącznika C wielkość t_s/t_a przyjmuje najniższe wartości (rys. 14). W przypadku wyłącznika C stosunek t_s/t_a w zależności od parametrów obwodu zmienia się następująco:

- $t_s/t_a = f(t_c) - 0,02\%/1 \text{ ms}$,
- $t_s/t_a = f(di/dt) - 1,07\%/1 \text{ kA/ms}$,
- $t_s/t_a = f(\hat{I}_{ss}) - 0,36\%/1000 \text{ A}$.

Parametry obwodu największy wpływ mają na działanie wyłącznika B. W tym przypadku długość czasu łukowego

zestykowego t_s w stosunku do t_a zmienia się następująco:

- $t_s/t_a = f(t_c) - 1,12\%/1 \text{ ms}$,
- $t_s/t_a = f(di/dt) - 18,31\%/1 \text{ kA/ms}$,
- $t_s/t_a = f(\hat{I}_{ss}) - 2,38\%/1000 \text{ A}$.

Parametry obwodu mają wpływ na czas łukowy t_a wyłącznika. Teoretycznie, przy założeniu stałej długości łuku, czas ten można wyznaczyć z zależności na napięcie łuku u_a :

$$u_a = U_d - Ri + \Delta u_a \tag{2}$$

$$\Delta u_a = -L \frac{di}{dt} \tag{3}$$

Po przekształceniu wzoru (3) do postaci:

$$dt = \frac{-L}{\Delta u_a} di \tag{4}$$

i scałkowaniu w granicach od $i = i_{\max}$ do $i = 0$ otrzymuje się:

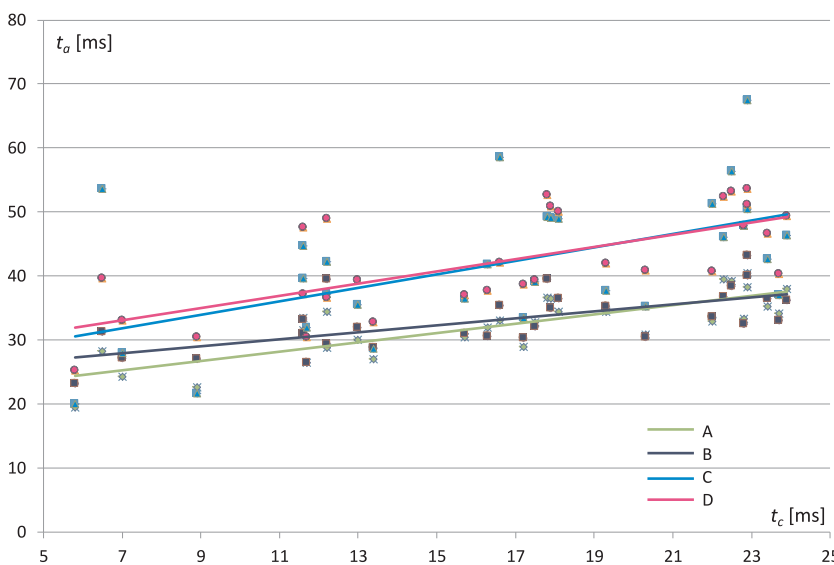
$$t_a = L \int_{i=i_{\max}}^{i=0} -\frac{di}{\Delta u_a} = -L \frac{i_{\max}}{U_d} \int_{\frac{i}{i_{\max}}=1}^{\frac{i}{i_{\max}}=0} \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i}{i_{\max}}\right) = \frac{L}{R} \int_0^1 \frac{U_d}{\Delta u_a} d\left(\frac{i}{i_{\max}}\right) = t_c t_{aN} \tag{5}$$

gdzie:

$t_c = L/R$ – stała czasowa obwodu,

t_{aN} – stała gaszenia łuku w zależności od konstrukcji wyłącznika.

W warunkach rzeczywistych, gdzie długość łuku jest zmienna w czasie, wyznaczenie czasu łukowego t_a na podstawie tych zależności nie jest możliwe. Z tego powodu, na podstawie pomiarów, wyznaczono zależność czasu łukowego t_a badanych wyłączników od stałej czasowej obwodu t_c , którą przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Wartość czasu łukowego t_a w zależności od stałej czasowej obwodu t_c [opracowanie własne]

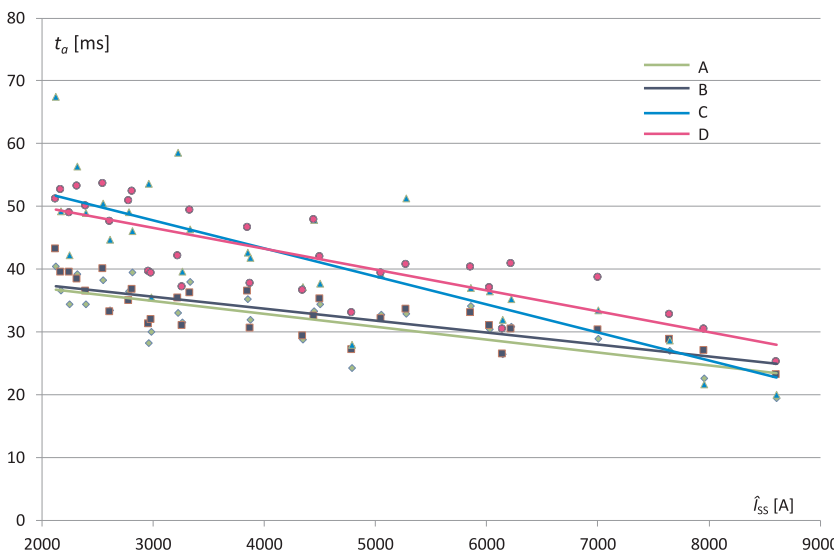
Po aproksymacji wyników pomiarów funkcją liniową określono, że dla wszystkich badanych wyłączników współczynnik kierunkowy prostej jest różny od 1. Oznacza to, że t_{aN} dla tych wyłączników nie jest wartością stałą, a czas łukowy t_a nie zmienia się proporcjonalnie do stałej czasowej obwodu t_c .

Stała czasowa obwodu t_c ma największy wpływ na czas łukowy t_a wyłącznika C, a najmniejszy wyłącznika B, gdzie współczynniki kierunkowe prostych wynoszą odpowiednio 1,05 i 0,55.

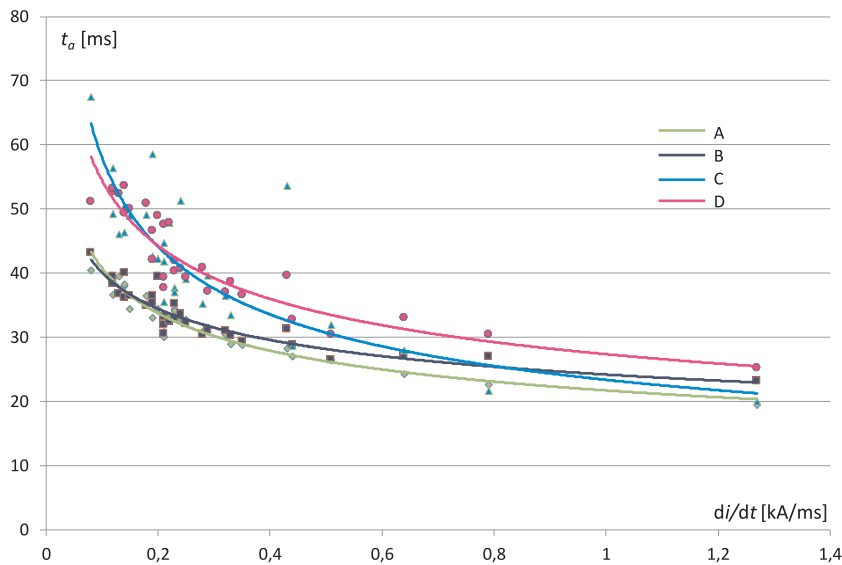
Czas łukowy t_a jest zależny również od wartości wyłączanego prądu oraz zmian tego prądu, z tego względu wyznaczono zależność czasu łukowego t_a od wartości prądu maksymalnego \hat{I}_{SS} oraz od di/dt . Wyniki analiz przedstawiono na rysunkach 16 i 17.

Porównując odpowiednio rysunki 11–13 z rysunkami 15–17 oraz 9 i 10 można stwierdzić, że np. spadek $t_s = f(\hat{I}_{SS})$ jest znacznie mniejszy niż spadek $t_a = f(\hat{I}_{SS})$, czego skutkiem jest wzrost stosunku $t_s/t_a = f(\hat{I}_{SS})$. Dla wyłącznika C są to wartości odpowiednio 1 ms/1000 A i 4,5 ms/1000 A, a dla wyłącznika B 0,5 ms/1000 A i 1,9 ms/1000 A.

Analizując rysunki 15–17, można stwierdzić, że ze względu na czas łukowy istnieją dwie grupy badanych wyłączników: wyłączniki A i B mają krótszy czas łukowy, wyłączniki C i D dłuższy czas łukowy. Czas łukowy zależny jest od wartości napięcia łączeniowego, im jest ono wyższe, tym czas jest krótszy. Ponieważ wszystkie wyłączniki były badane w tym samym obwodzie (z tą samą wartością indukcyjności L), poziom napięcia łączeniowego jest zależny od zmian spadku prądu w obwodzie podczas wyłączania di/dt_b .



Rys. 16. Wartość czasu łukowego t_a w zależności od prądu maksymalnego \hat{I}_{SS} [opracowanie własne]



Rys. 17. Wartość czasu łukowego t_a w zależności od stromości narastania prądu di/dt [opracowanie własne]

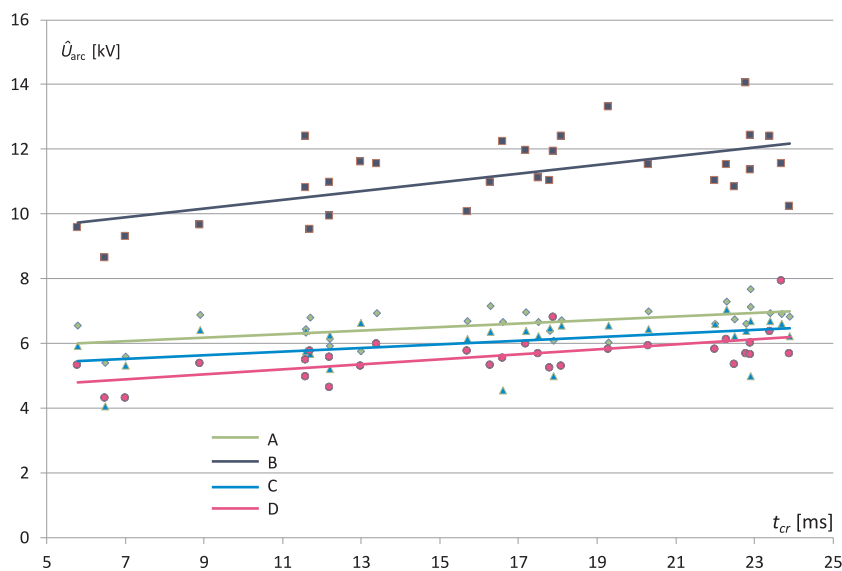
Na rysunku 18 przedstawiono wartości maksymalnego napięcia na wyłączniku \hat{U}_{arc} w funkcji stałej czasowej obwodu t_{cr} . Wynika z niego, że wyłącznik B ma znacznie wyższe wartości \hat{U}_{arc} od pozostałych wyłączników. Wartości napięcia łuku \hat{U}_{arc} dla tego wyłącznika są większe od 7,25 kV, co może zagrażać izolacji innych urządzeń pracujących w podstacji trakcyjnej lub zasilanych z sieci trakcyjnej.

Napięcie maksymalne \hat{U}_{arc} występuje przy maksimum di/dt_b w czasie wyłączania prądu. Wartości zmian prądu di/dt_b są zależne głównie od konstrukcji komory łukowej wyłącznika i zastosowanych systemów wydmuchu magnetycznego (cewek wydmuchowych). Szybkie, skokowe wydłużenie łuku oraz gwałtowny odbiór energii z łuku powoduje występowanie dużych wartości di/dt_b . Należy zauważyć, że krótkotrwałe występowanie dużych wartości di/dt_b nie musi się przekładać na skrócenie czasu łukowego t_a .

5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań czterech typów wyłączników szybkiego prądu stałego A, B, C i D można sformułować następujące wnioski.

1. Czas łukowy zestykowy t_s jest zależny od konstrukcji wyłącznika szybkiego. Charakter zmian wartości t_s w funkcji parametrów obwodu ($t_{cr}, di/dt, \hat{I}_{SS}$) zależy m.in. od konstrukcji komory łukowej i rożków wprowadzających do niej łuk. Wyłączniki C i D mające podobne rozwiązania komory łukowej charakteryzowały się podobnymi zmianami czasu łukowego zestykowego t_s w funkcji parametrów obwodu.
2. Czas łukowy zestykowy t_s może stanowić prawie 70% czasu łukowego t_a . W tym czasie następuje ograniczenie prądu na średnim poziomie do 1,4% dla wyłącznika A, 3,5% dla B, 2,0% dla C i 1,9% dla D.



Rys. 18. Wartość maksymalnego napięcia na wyłączniku \hat{U}_{arc} w zależności od stałej czasowej obwodu t_{cr} [opracowanie własne]

3. Spośród badanych typów wyłączników, wyłącznik B ma największe napięcie łuku \hat{U}_{arc} , którego wartości przekraczają poziomy dopuszczalny w Polsce. Jest to związane z dużymi wartościami chwilowych zmian prądu di/dt_b , i ma wpływ na czas łukowy t_a .
4. Wyłączniki o konstrukcji komory łukowej umożliwiają zmiany prądu di/dt_b w mniejszym zakresie, lecz przez dłuższy czas mogą charakteryzować się czasem łukowym t_a porównywalnym z czasem wyłącznika B przy mniejszych wartościach napięcia łuku \hat{U}_{arc} . Przykładem jest wyłącznik A.
5. W rzeczywistych wyłącznikach szybkich, w których łuk podczas wyłączenia ma zmienną długość, nie można wyznaczyć analitycznie czasu łukowego t_a . Ze względu na działanie układów wydmuchowych, których wydajność zależna jest od przepływającego prądu, czas t_a jest zależny od parametrów obwodu.

Bibliografia

1. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: DCN 3/1600, 2500, 3150 – wieloprądowe wyłączniki próżniowe prądu stałego. TTS Technika Transportu Szynowego, 2003, nr 10, s. 55–59.
2. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Nowa generacja ultraszybkich wyłączników ograniczających do pojazdów trakcyjnej elektrycznej prądu stałego. TTS Technika Transportu Szynowego, 2000, nr 7–8, s. 80–88.
3. Maciołek T., Mierzejewski L., Szeląg A.: Wyłączanie zwarć w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy, TTS Technika Transportu Szynowego 3/2001, s. 40–47.
4. Mierzejewski L., Szeląg A.: Research of short circuits and overvoltages in DC electric traction circuits with single-stage transformations 110/3 kV, IVth International Conference MET'99, Warszawa, 1999, pp. 58–60.
5. PN-EN 50123-1:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 1: Wymagania ogólne.
6. PN-EN 50123-2:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Część 2: Wyłączniki prądu stałego.
7. PN-EN 60077-1:2018-01: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 1: Podstawowe warunki eksploatacji i zasady ogólne.
8. PN-EN 60077-2:2018-01: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 2: Podzespoły elektrotechniczne – Zasady ogólne.
9. PN-EN 60077-3:2002: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 3: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego.
10. Rojek A., Sidorowicz M.: *Researches and tests of high-speed circuit breakers for rolling stock and substations in 3 kV DC traction power system*. Problemy Kolejnictwa, 2013, z. 159, s. 7–26.
11. Rojek A., Skrzyniarz M.: *Contact arc time – important parameter of DC high-speed circuit-breakers*, MATEC Web Conferences. Volume 294, 2019, 2nd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2019), p. 7.
12. Rojek A., Zbieć A.: *Koordinacja zabezpieczeń zwarciovych w układzie pojazd trakcyjny – podstacja trakcyjna*. Problemy Kolejnictwa, 2012, z. 159, s. 27–46.
13. Rojek A.: *Czasy wyłączenia magnetowdmuchowych wyłączników szybkich prądu stałego*, Problemy Kolejnictwa, 2015, z. 169, s. 53–60.
14. Rojek A.: *Parameters of DC high-speed circuit-breakers*, MATEC Web of Conferences 180, 06006 (2018).
15. Wójcik F.: *Analiza możliwości poprawy skuteczności działania wyłączników magnetowdmuchowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, nr 5, s. 186–192.