

# Wyznaczanie prądów krytycznych wyłączników szybkich prądu stałego

Artur ROJEK<sup>1</sup>

## Streszczenie

Wyłączniki szybkie prądu stałego, stanowią podstawowe zabezpieczenie w przypadku wystąpienia zwarcia lub przeciążenia. Przed dopuszczeniem do eksploatacji są poddawane badaniom, których zakres obejmuje m.in. wyznaczenie wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych. Zgodnie z przepisami obowiązującymi w Polsce, badania te przeprowadza się według normy PN-E-06121 [3]. Norma ta podaje odmienne wymagania w zakresie badań prądów krytycznych niż normy europejskie PN-EN 50123-1 [4] (dla wyłączników podstacyjnych) i PN-EN 60077-3 [6] (dla wyłączników taborowych). Polska norma podaje maksymalny czas łukowy (500 ms) towarzyszący wyłączeniu prądów krytycznych, natomiast normy europejskie nie określają żadnego wymagania czasowego w tym zakresie. Inne różnice pomiędzy wymaganiami normy polskiej i norm europejskich dotyczą napięcia podczas badań, stałej czasowej obwodu oraz liczby powtórzeń.

Badania wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych przeprowadzono dla kilku typów wyłączników szybkich. Z uwagi na to, że normy nie narzucają wartości prądów krytycznych, a jedynie nakazują wyznaczenie ich wartości, wszystkie badania zakończyły się wynikiem pozytywnym. Wartości prądów krytycznych badanych wyłączników zawierały się w przedziale od około 20 A do 300 A. Wyniki badań wykazały, że wartość prądów krytycznych, wyłączanych w czasie poniżej 500 ms, jest zależna od konstrukcji wyłącznika szybkiego, zastosowanego urządzenia wspomagającego przejście łuku elektrycznego ze styków głównych do komory gaszeniowej oraz kierunku przepływu prądu przez wyłączniki niespolaryzowane.

**Słowa kluczowe:** wyłącznik szybki, prąd krytyczny, czas łukowy, wydmuch elektromagnetyczny

## 1. Wstęp

Wyłączniki szybkie prądu stałego są głównymi urządzeniami wyłączającymi prądy zwarciove w kolejowych systemach elektrotrakcyjnych. Znajdują zastosowanie w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych i taborze kolejowym. Większość producentów wyłączników szybkich skupia się na parametrach związanych z wartościami prądów znamionowych oraz łącznością prądów zwarciowych i przeciążeniowych. Analiza ogólnie dostępnych materiałów o wyłącznikach szybkich produkowanych w Europie<sup>2</sup> wykazuje, że żaden z producentów nie przedstawia w swoich katalogach i materiałach handlowych informacji o zdolności wyłączenia prądów o małej wartości przez oferowane przez nich aparaty. W przypadku konieczności wyłączenia prądu o małej wartości staje się niezwykle istotne to, czy i w jakim czasie prąd ten zostanie wyłączony.

Dla każdego wyłącznika istnieje określona wartość lub przedział wartości prądu, przy których czas jego wyłączenia jest najdłuższy. Wartość ta lub przedział wartości są okre-

ślane mianem prądów krytycznych. Wartości prądu krytycznego oraz czas jego wyłączenia są zależne od konstrukcji wyłącznika szybkiego, a w szczególności od zastosowanych w nim rozwiązań wspomagających wydłużanie i gaszenie łuku elektrycznego.

W latach 2012–2015 w Instytucie Kolejnictwa przeprowadzono badania 9 typów wyłączników szybkich prądu stałego produkowanych przez 3 firmy z kraju oraz Europy. Wyłączniki te były przeznaczone do pracy w systemie 3 kV DC oraz w układzie zasilania metra w systemie 750 V DC.

## 2. Funkcje i zasada działania wyłączników szybkich prądu stałego

Wyłączniki szybkie prądu stałego są przeznaczone do załączania i wyłączania zarówno prądów roboczych, jak również przeciążeniowych i zwarciowych. Aparaty te są podstawowym zabezpieczeniem przed przepływem nadmiernych wartości prądu w obwodach sieci trakcyjnej oraz zasilanych

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

<sup>2</sup> www.abmicro.com.pl [dostęp: 01.06.2015 r.], www.gepowercontrols.com [dostęp: 01.06.2015 r.], www.microelettrica.com [dostęp: 01.06.2015 r.], www.secheron.com [dostęp: 01.06.2015 r.], www.woltan.com.pl [dostęp: 01.06.2015 r.].

z niej pojazdów. W systemie 3 kV DC prądy wyłączane przez wyłączniki szybkie mogą osiągać wartości przekraczające 50 kA, w systemach o niższym napięciu wartości prądów zwarcio- wych mogą osiągać poziom 100 kA i dlatego wyłączniki muszą być wyposażone w układy umożliwiające zgaszenie łuku o dużej energii. Dodatkowo prądy zwarcio- we muszą być wyłączone w jak najkrótszym czasie, aby zminimalizować ryzyko uszkodzenia przez wyłączniki chronionych elementów systemu zasilania trakcji elektrycznej.

Zasadniczą częścią wyłączników szybkiego prądu stałego jest komora łukowa, której zadaniem jest ograniczenie przestrzeni palenia się łuku oraz jego szybkie chłodzenie i dejonizacja. Wyjątek stanowią wyłączniki, w których w celu wyłączenia prądu stałego stosuje się metodę przeciwprądu (np. wyłączniki ultraszybkie z komorami próżniowymi lub elementami energoelektronicznymi), lecz w przypadku wyłączników tego typu nie można mówić o prądach krytycznych, gdyż czas wyłączenia prądu nie jest zależny od jego wartości. Po otwarciu styków wyłącznika zapala się łuk, który pod wpływem pola elektromagnetycznego jest kierowany na rożki łukowe w komorze.

W komorze łuk jest wydłużany i chłodzony, a w niektórych typach komór również dzielony. Komora łukowa ma wewnętrzne przegrody o właściwościach dejonizacyjnych, w które łuk jest wprowadzany przez oddziaływujące na niego siły. Przegrody te powodują, że łuk ma znacznie większą długość i większą powierzchnię chłodzenia. Konsekwencją tego jest szybki wzrost rezystancji i napięcia łuku, co powoduje szybkie ograniczenie wartości prądu przepływającego przez wyłącznik. Im szybsze jest wydłużenie łuku, tym krótszy jest czas wyłączenia prądu. Przy bardzo małych prądach wydłużanie łuku elektrycznego następuje tylko w naturalny sposób, wynikający z ukształtowania rożków łukowych i zjawisk termicznych. Z tego względu, aby przyspieszyć proces wyłączenia w wyłącznikach szybkich, stosuje się rozwiązania wspomagające szybkość wydłużania łuku. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie cewki wydmuchowej. Cewka wydmuchowa jest włączona w obwód główny wyłącznika, co powoduje, że płynie przez nią prąd główny wyłącznika. Cewka wytwarza pole elektromagnetyczne, którego kierunek działania powoduje szybsze skierowanie łuku na rożki łukowe w komorze. Wytworzone przez cewkę wydmuchową natężenie pola jest proporcjonalne (w granicach prostoliniowej charakterystyki cewki) do wartości wyłączanego prądu.

### 3. Występowanie prądów krytycznych

Podczas normalnej eksploatacji urządzeń zasilania i pojazdów trakcyjnych nie jest możliwe uniknięcie wyłączenia małych i bardzo małych wartości prądu przepływającego przez wyłącznik szybki. W przypadku podstacji, takie wyłączenia mogą wystąpić podczas wyłączeń manewrowych lub gdy zadziałanie wyłącznika jest wymuszone przez system automatyki (np. zabezpieczenie podnapięciowe). Źródłami powstawania małych wartości prądu płynącego przez wy-

łącznik szybki zasilacza w podstacji jest niski pobór prądu przez pojazd trakcyjny podczas postoju (np. zasilanie tylko potrzeb własnych pojazdów trakcyjnych), zasilanie pojazdu trakcyjnego znajdującego się daleko od podstacji oraz prądy wyrównawcze płynące między podstacjami o różnych wartościach napięć wyjściowych.

Wyłącznik taborowy będzie narażony na wyłączenie małych wartości prądów każdorazowo, gdy będzie on otwierany w czasie, gdy z sieci trakcyjnej będą zasilane tylko obwody pomocnicze lokomotywy lub składu pociągu.

Wyłączanie prądów krytycznych wiąże się ze stosunkowo długotrwałym paleniem łuku na stykach wyłącznika. Czas palenia się łuku przy wyłączeniu prądów o małej wartości jest od kilkunastu do kilkudziesięciu razy dłuższy niż przy wyłączeniu prądów zwarcio- wych i może dochodzić do kilku, a nawet kilkunastu sekund. W tym czasie na działanie łuku są narażone styki wyłącznika, rożki łukowe i komora łukowa. Powoduje to znaczną degradację tych elementów.

Innym niezwykle istotnym zagadnieniem jest bezpieczeństwo przeciwporażeniowe. Przy wyłączeniu prądów krytycznych w odłączanym układzie, przez długi (często nieokreślony czas), występuje wysokie napięcie. W skrajnych przypadkach może dojść do niebezpiecznych sytuacji, na przykład w czasie załączania uziemienia, otwierania odłącznika lub próby wysunięcia wózka z wyłącznikiem. Ze względu na długi czas wyłączenia, działania te mogą spowodować porażenie prądem pracowników obsługi lub przeniesienie się łuku na inne elementy rozdzielnic i dlatego niezwykle istotna jest znajomość wartości prądów krytycznych i czasów ich wyłączenia przez eksploatowany wyłącznik szybki.

### 4. Wymagania prawne i normatywne w zakresie wyłączenia prądów krytycznych

Wyłączniki szybkiego prądu stałego przeznaczone do podstacji trakcyjnych i kabin sekcyjnych są dopuszczane do eksploatacji na podstawie zapisów ustawy o transporcie kolejowym [16]. Artykuł 22f tej ustawy stanowi, że warunkiem dopuszczenia do eksploatacji typów budowli i typów urządzeń mających wpływ na poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego (do których został zakwalifikowany wyłącznik szybki) jest uzyskanie świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu dla ich pierwszego egzemplarza.

Podstawowym dokumentem określającym wymagania i zakres badań wyłączników szybkiego prądu stałego przeznaczonych do eksploatacji w urządzeniach stacjonarnych jest rozporządzenie w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych [15]. Zakres badań wyłączników szybkiego prądu stałego przeznaczonych do podstacji i kabin sekcyjnych obejmuje między innymi wyznaczenie wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych.

Wyłączniki taborowe są składnikami interoperacyjności na podstawie zapisów TSI dla podsystemu Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski [14]. Ponadto, zgodnie z zapisami

artykułu 23e Ustawy o transporcie kolejowym [16] przeprowadza się badania zgodności z polską infrastrukturą.

Badania podstawowych i taborowych wyłączników szybkich przeprowadza się zgodnie z normami określonymi w liście Prezesa UTK w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei [2].

Podstawowym dokumentem określającym wymagania i zakres badań wyłączników szybkich prądu stałego przeznaczonych do podstacji trakcyjnych i kabin sekcyjnych jest norma PN EN 50123-2 [5], powołująca się na zapisy normy PN-EN 50123-1 [4]. Kompletny zakres badań wyłączników szybkich jest opisany w [10 i 11]. Normy te wymagają określenia wartości prądów krytycznych wyłącznika na podstawie prób przy napięciu znamionowym wyłącznika, w obwodzie o stałej czasowej nie mniejszej niż 10 ms lub zawierającym indukcyjność minimum 50 mH. Badania należy przeprowadzać dla wartości prądu: 400, 200, 100, 50 i 25 A. W wyłączniku C do normy PN-EN 50123-1 [4] dla wyłączników spolarzowanych nie określono liczby wyłączeń dla każdej wartości prądu, a dla wyłączników niespolarzowanych badania należy przeprowadzać w seriach po 10 wyłączeń. Norma nie określa czasu pomiędzy wyłączeniami, co ma duże znaczenie dla uzyskiwanych wyników.

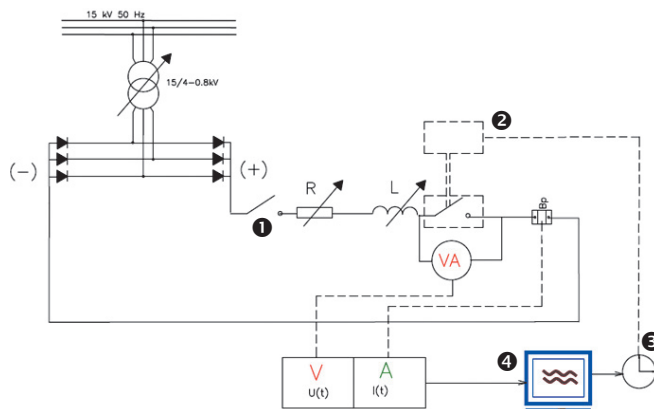
Normy te nie wymagają wprost, aby wyłącznik wyłączał swoje prądy krytyczne. Wymagają jedynie określenia zakresu prądów krytycznych dla wyłącznika. Dlatego też producent wyłączników może zadeklarować, że aparat jest zgodny z normą EN 50123-2 (PN-EN 50123-2), bez względu na to jak szybko wyłącznik swoje prądy krytyczne wyłącza lub nie wyłącza. Producent jest zobowiązany udzielić informacji na zapytanie klienta dotyczących tylko wyłączenia prądów krytycznych. Konsekwencją tych zapisów jest brak ogólnodostępnych informacji podawanych przez producentów wyłączników szybkich na temat wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych przez produkowane przez nich aparaty.

Wymagania dla wyłączników taborowych i zakres ich badań reguluje norma PN-EN 60077-3 [6]. Zgodnie z tą normą, należy przeprowadzać badania wyłączalności prądów krytycznych w zakresie od prądu znamionowego do 0, w układzie o stałej czasowej 15 ms. Podobnie jak w przypadku wyłączników podstawowych, unormowania nie określają wymagań dotyczących wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych przez wyłączniki zainstalowane w taborze. Również w tym przypadku producent może uzyskać certyfikat zgodności z normą PN-EN 60077-3 pomimo tego, że wartość prądów krytycznych będzie wynosiła kilkaset amperów, a ich wyłączenie będzie trwało kilka czy kilkanaście sekund. Norma PN-EN 60077-3 nie określa również ile prób należy przeprowadzać dla każdej badanej wartości prądu. Jest to istotne ze względu na występowanie dużych różnic wyników poszczególnych prób, co będzie szerzej omówione w dalszej części artykułu.

Zgodnie z listem Prezesa UTK [2], badania wartości prądów krytycznych i czasu ich wyłączenia wyłączników do podstacji i kabin sekcyjnych oraz taborowych, przeprowadza się zgodnie z normą PN-E-06121:1974 [3]. Zgodnie z zapisami tej normy, próby należy przeprowadzać przy zasilaniu układu pomiarowego napięciem równym 1,25 wartości napięcia znamionowego, a stała czasowa obwodu probierczego powinna wynosić  $20 \pm 3$  ms przy indukcyjności w obwodzie nie większej niż 0,5 H. Norma PN-E-06121 zaleca przeprowadzenie szeregu wyłączeń prądu o wartościach malejących, od wartości prądu znamionowego i określenie zakresu wartości prądu, dla których występuje najdłuższy czas gaszenia łuku. Po określeniu średniej wartości prądów krytycznych, należy przeprowadzić 20 wyłączeń w odstępach 30 sekund. Wynik próby uznaje się za pozytywny, jeżeli w żadnej z prób czas palenia się łuku nie przekraczał 500 ms, a wyłącznik po próbie nadaje się do dalszej eksploatacji. Tak więc zapisy normy PN-E-06121:1974 [3] w zakresie prądów krytycznych różnią się znacznie od norm PN-EN 50123-1 [4] i PN-EN 60077-3 [6]. Konsekwencją tego jest konieczność przeprowadzania badań w zakresie prądów krytycznych nawet w przypadku, gdy na wyłącznik szybki jest wystawiony certyfikat zgodności z normą PN-EN 50123-1 [4] lub PN-EN 60077-3 [6].

## 5. Badania

Badania prawie wszystkich typów wyłączników szybkich w zakresie wartości i czasów wyłączenia prądów krytycznych przeprowadzono w Laboratorium Zwarciovym Zakładu Elektroenergetyki IK, a w jednym przypadku w laboratorium producenta wyłącznika szybkiego. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-E-06121:1974 [3], czyli przy napięciu 1,25 wartości napięcia znamionowego. W zależności od typu wyłącznika, wartość napięcia wynosiła 1 lub 4 kV DC. Układ pomiarowy<sup>3</sup> przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do określania wartości i czasu wyłączenia prądów krytycznych przez wyłącznik szybki: 1) wyłącznik bezpieczeństwa, 2) sterownik, 3) sterownik czasowy, 4) komputer pomiarowy

<sup>3</sup> Jeśli nie określono inaczej, rysunki pochodzą z prac IK [1, 7, 8, 9, 12]. Brak przyporządkowania źródła rysunku do konkretnej pracy ma na celu uniknięcie skojarzenia przedstawionego wyniku z typem wyłącznika lub producentem.

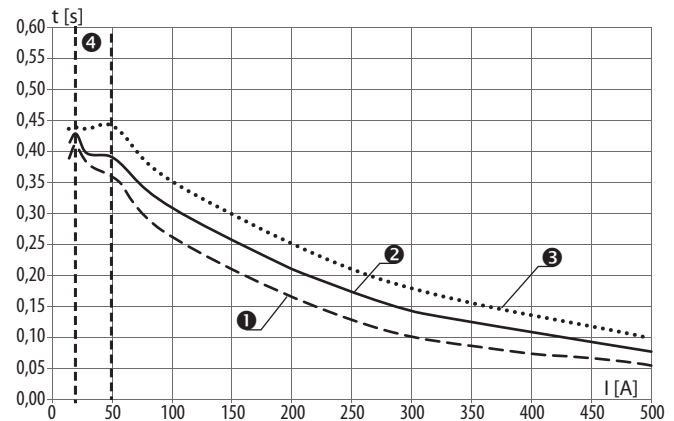
Dla napięcia 1 kV wartość stałej czasowej obwodu piorczego wynosząca 20 ms była utrzymywana dla wartości prądów  $I \geq 40$  A, natomiast dla mniejszych wartości prądu stała czasowa była mniejsza. Wynikało to z dopuszczalnej maksymalnej wartości indukcyjności w obwodzie wynoszącej 500 mH. W przypadku badań przy napięciu 4 kV stała czasowa obwodu miała wartość 20 ms dla prądów  $I \geq 160$  A. W zależności od typu wyłącznika (spolaryzowany lub niespolaryzowany), badania łączalności prądów krytycznych były przeprowadzane przez dwudziestokrotne wyłączenie prądu płynącego w jednym lub obydwu kierunkach przez badany wyłącznik.

Czas łukowy określano na podstawie zarejestrowanego przebiegu napięcia na zaciskach wyłącznika szybkiego. Czas łukowy mierzone od chwili rozwarcia styków głównych wyłącznika, czemu towarzyszy powstanie napięcia na jego zaciskach, do momentu zaniku przepięcia łączeniowego.

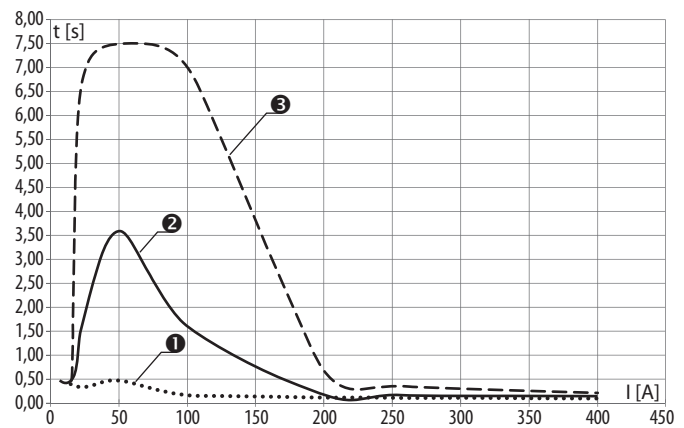
Czasy łukowe 20 wyłączeń nie są w pełni powtarzalne. Mogą się one różnić między sobą od kilku milisekund do kilku sekund. Jest to spowodowane wieloma czynnikami, które mogą mieć znaczący wpływ na przebieg wyłączenia małych wartości prądu. Do tych czynników należą: budowa styków i rożków łukowych wyłącznika, oddziaływanie pola elektromagnetycznego, jonizacja przestrzeni łukowej, zanieczyszczenia komory produktami poprzednich wyłączeń, temperatura komory itp. Z tego względu dla każdej serii prób wyznacza się wartość minimalną, maksymalną oraz średnią. Przykładowe wykresy czasu wyłączenia prądów krytycznych w zależności od ich wartości dla dwóch różnych typów wyłączników przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

Wyłącznik typu **A** jest wyposażony w dużą cewkę wydmuchową, dzięki czemu wytwarza ona znaczne wartości pola elektromagnetycznego wprowadzającego łuk elektryczny do komory gaszeniowej. Konstrukcja tego wyłącznika ułatwia szybkie przemieszczenie się łuku ze styków głównych na rożki łukowe w komorze. Dzięki temu, wartość prądów krytycznych wyłącznika typu **A** zawiera się w przedziale 20–50 A, a różnice minimalnego i maksymalnego czasu łukowego nie przekraczają 100 ms w całym zakresie badanych wartości prądu.

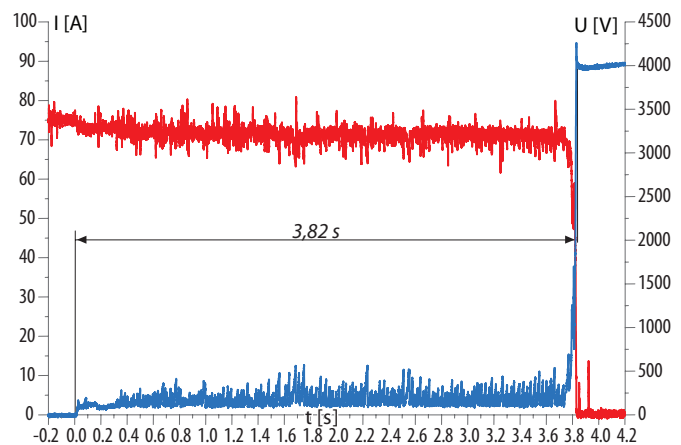
Wyłącznik typu **B** jest również wyposażony w cewkę wydmuchową, lecz znacznie mniejszą niż w wyłączniku typu **A**. Cewka wyłącznika typu **B** działa dobrze dla wartości prądu powyżej około 180 A, jednak przy przepływie prądu poniżej tej wartości nie jest w stanie wytworzyć pola elektromagnetycznego odpowiedniej wartości, niezbędnej do szybkiego wprowadzenia łuku do komory. W takim przypadku łuk pali się pomiędzy stykami, aż do czasu ich zniszczenia lub rozpoczęcia jego przemieszczania na skutek zjawisk termicznych. Zjawisko to ilustruje rysunek 4, na którym jest widoczna mała wartość napięcia na zaciskach wyłącznika utrzymująca się przez około 3,7 s. Oznacza to, że przez ten czas łuk palił się między stykami wyłącznika, a dopiero później przemieścił się na rożki w komorze łukowej, gdzie nastąpił proces jego gaszenia.



Rys. 2. Czasy wyłączenia wyłącznika typu **A** [10, 11, 13] w zależności od wartości prądu: 1) minimalny, 2) średni, 3) maksymalny, 4) zakres prądów krytycznych



Rys. 3. Czasy wyłączenia wyłącznika typu **B** [10, 11, 13] w zależności od wartości prądu: 1) minimalny, 2) średni, 3) maksymalny

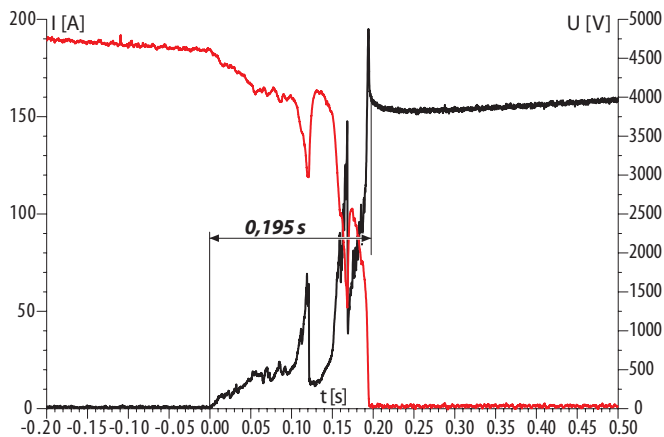


Rys. 4. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu **B** i wyłączanego prądu o wartości około 75 A: — prąd wyłącznika, — napięcie na zaciskach wyłącznika [13]

Prąd krytyczny wyłącznika typu **B**, zgodnie z zapisami normy PN-E-06121:1974 [3] ma wartość około 200 A. Przebieg wyłączenia prądu o zbliżonej wartości przedstawiono na rysunku 5. Widoczne na tym rysunku przebiegi prądu i napięcia zmieniają się skokowo. Jest to spowodowane tym, że badany wyłącznik wyposażony był w dwie pary styków – główne i opalne. Napięcie łuku elektrycznego zainicjowanego pomiędzy

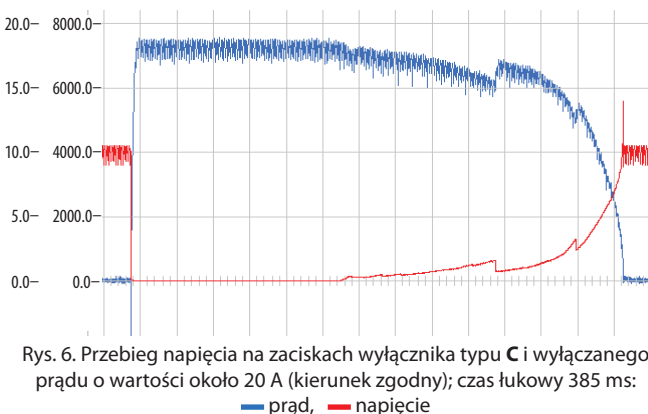


stykami głównymi osiąga coraz większe napięcie wynikające ze wzrostu jego długości, a następnie maleje, gdy łuk przechodzi na styki opalne, a jego długość maleje. Zastosowanie podwójnych styków wydłuża czas wyłączenia prądów o małej wartości. Zwiększenie wartości wyłączanego prądu ma wpływ na wydajniejszą pracę cewki wydmuchowej oraz szybszy przebieg zjawisk termicznych, czego konsekwencją jest znaczne skrócenie czasu łukowego.



Rys. 5. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu B i wyłączanego prądu o wartości około 190 A: — prąd wyłącznika, — napięcie na zaciskach wyłącznika 13

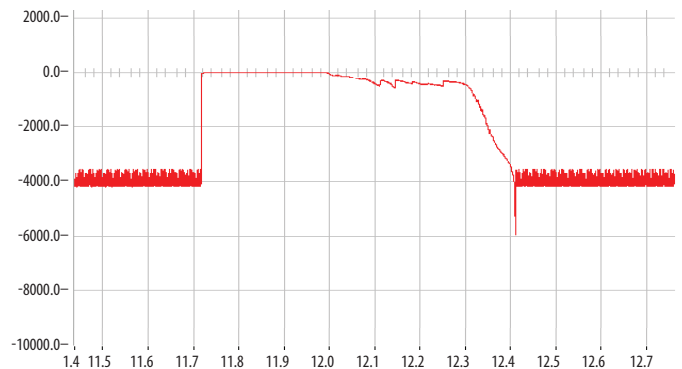
Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu wyłączanego przez wyłącznik szybki typu C o konstrukcji bardzo zbliżonej do wyłącznika typu B, lecz z większą i wydajniejszą cewką wydmuchową. Zwiększenie cewki powoduje, że wartość prądu krytycznego zmniejszyła się do poziomu poniżej 20 A. Ponieważ wyłącznik typu C, podobnie jak typu B, jest wyposażony w dwie pary styków, na rysunku 6 są widoczne skokowe zmiany napięcia i prądu.



Rys. 6. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu C i wyłączanego prądu o wartości około 20 A (kierunek zgodny); czas łukowy 385 ms: — prąd, — napięcie

Wyłącznik typu C jest wyłącznikiem niespolaryzowanym, co oznacza, że może on wyłączać prąd bez względu na kierunek przepływu. Ponieważ budowa wyłącznika nie jest symetryczna względem kierunku przepływu prądu, czas łukowy w czasie wyłączania prądu o kierunku przeciwnym jest znacznie dłuższy niż dla kierunku zgodnego, jak na rysunku 6. Powoduje to, że prąd krytyczny dla kierunku przeciwnego ma wyższą wartość niż dla zgodnego. W przypadku wyłączania

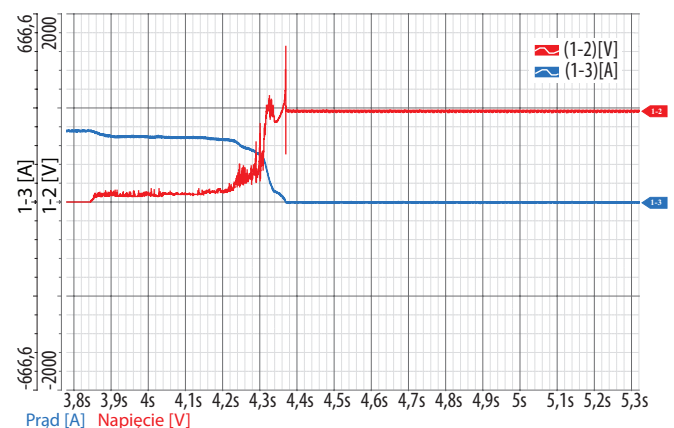
prądu w kierunku przeciwnym, czas łukowy podczas wyłączania prądu o wartości około 20 A znacznie przekroczył 500 ms. Dopiero zwiększenie prądu do wartości około 80 A pozwoliło na skrócenie czasu łukowego poniżej wymaganych 500 ms. Przykładowy przebieg napięcia w czasie wyłączania prądu 80 A płynącego w kierunku przeciwnym przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu C podczas wyłączania prądu o wartości około 80 A (kierunek przeciwny); czas łukowy 414 ms

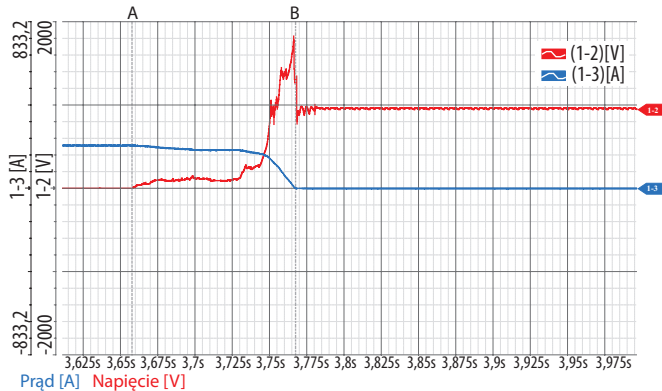
Jak ważne jest wyposażenie wyłącznika szybkiego w urządzenie wspomagające przesunięcie łuku ze styków do komory łukowej (np. cewki wydmuchowej) wykazało badanie dwóch innych typów wyłączników szybkiego prądu stałego. Wyłączniki te miały odmienną konstrukcję napędu i komory łukowej od wyłączników wcześniej opisanych. Przeprowadzono badania dwóch typów wyłączników. Podstawowa różnica między nimi dotyczyła wydmuchu elektromagnetycznego. Wyłącznik typu D nie miał układu magnetowydmuchowego, natomiast wyłącznik typu E był wyposażony w urządzenie magnetowydmuchowe z magnesami trwałymi. Inna różnica pomiędzy tymi wyłącznikami dotyczyła jedynie wartości prądu znamionowego.

Ze względu na brak układu wspomagającego przesunięcie łuku ze styków do komory łukowej w wyłączniku typu D, prąd krytyczny wyłączany w czasie poniżej 500 ms wynosił 300 A. Przy niższych wartościach prądów czas łukowy przekraczał dopuszczalną wartość, co ilustruje rysunek 8.



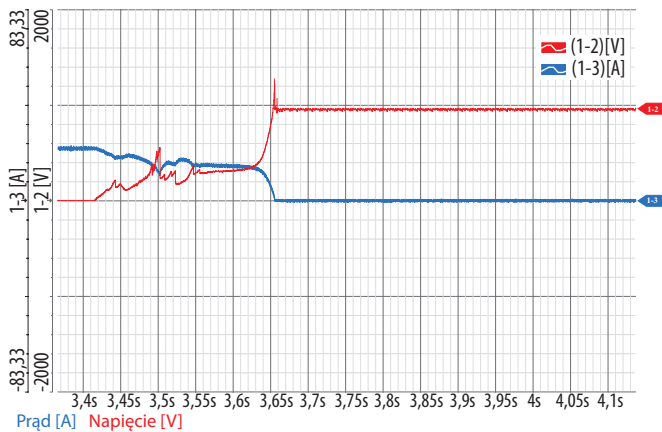
Rys. 8. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu D i wyłączanego prądu o wartości około 250 A; czas łukowy 535 ms: — prąd, — napięcie

Zastosowanie układu magnetowdmuchowego z magnesami trwałymi znacznie poprawiło proces wyłączenia prądów o małej wartości. Czas łukowy skrócił się około pięciokrotnie. Doskonale obrazuje to rysunek 9, na którym przedstawiono przebiegi napięcia i wyłączanego prądu o wartości 250 A (jak na rys. 8) przez wyłącznik typu E z urządzeniem magnetowdmuchowym z magnesami trwałymi.



Rys. 9. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu E i wyłączanego prądu o wartości około 250 A; czas łukowy 109 ms: — prąd, — napięcie

Zastosowanie w wyłączniku szybkim typu E urządzenia magnetowdmuchowego umożliwiło zmniejszenie poziomu prądów krytycznych do wartości 25 A. Przykładowe przebiegi zarejestrowane w czasie wyłączenia prądu o tej wartości przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Przebieg napięcia na zaciskach wyłącznika typu E i wyłączanego prądu o wartości około 25 A; czas łukowy 231 ms: — prąd, — napięcie

Pomimo rozbieżności pomiędzy wartościami prądów krytycznych, badania wszystkich typów wyłączników zakończyły się wynikiem pozytywnym. Zapisy norm i aktów prawnych nie określają dopuszczalnych wartości prądów krytycznych

lecz nakładają obowiązek określenia ich poziomu. Z tego względu badania te nie mogą zakończyć się z wynikiem negatywnym. Producent jest zobowiązany podać wartości prądów krytycznych i czasy ich wyłączenia, a użytkownik wyłącznika szybkiego określa, czy parametry te są odpowiednio do funkcji pełnionej przez wyłącznik oraz wartości minimalnych prądów, które mogą być wyłączane w czasie eksploatacji wyłącznika. Część użytkowników decyduje się na zakup wyłączników szybkich, których wartości prądów krytycznych jest duża, jednocześnie wyposażając pojazd trakcyjny lub obiekt zasilania w inne aparaty przeznaczone do wyłączania prądów o małej wartości, np. styczniki.

## 6. Podsumowanie

Wartość prądów krytycznych i czas ich wyłączenia są czynnikami wpływającymi na bezpieczeństwo użytkownika wyłączników szybkich prądu stałego i ich trwałość. Długotrwałe palenie się łuku elektrycznego, którego temperatura wynosi kilka tysięcy Kelvinów, powoduje szybkie niszczenie styków wyłącznika oraz innych jego elementów narażonych na oddziaływanie łuku.

Przykładowe wyniki badania kilku typów wyłączników w zakresie wyłączenia prądów o małej wartości wykazują, że w celu szybkiego wyłączenia prądów o małej wartości, wyłącznik szybki prądu stałego musi być wyposażony w urządzenie magnetowdmuchowe. Urządzeniem takim może być cewka wdmuchowa włączona w obwód główny wyłącznika lub urządzenie z magnesami trwałymi. Istotne jest, aby urządzenie magnetowdmuchowe miało odpowiednią wydajność przy niskich wartościach wyłączanego prądu, umożliwiającą jak najszybsze skierowanie łuku elektrycznego z przestrzeni międzystykowej do komory gaszeniowej wyłącznika.

W przypadku wyłączników niespolaryzowanych, przeznaczonych do wyłączenia prądu bez względu na kierunek jego przepływu, wartości prądów krytycznych dla kierunku zgodnego są niższe niż dla kierunku przeciwnego. Jest to spowodowane niesymetryczną budową wyłączników w stosunku do kierunku przepływu prądu.

Czasy wyłączenia j małej prądu przez wyłącznik bez odpowiedniego układu magnetowdmuchowego mogą się znacznie różnić dla poszczególnych wyłączeń. Przy braku strumienia magnetycznego kierującego łuk ze styków do komory gaszeniowej, zwiększanie się długości łuku odbywa się w sposób naturalny, na co ma wpływ wiele czynników, w tym temperatura komory, stopień jonizacji powietrza, zanieczyszczenia i temu podobne.

## Bibliografia

1. Kruczek W.: *Badanie, nadzór i próby eksploatacyjne wyłączników szybkich typu UR60-81s i UR40-81s firmy Sécheron*. Praca IK nr 2784/12, Warszawa 2014.
2. List Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolejowego. Prezes UTK, 25 stycznia 2013.
3. PN-E-06121:1974: Aparatura trakcyjna. Wyłączniki szybkie prądu stałego. Wspólne wymagania i badania.
4. PN-EN 50123-1:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Wymagania ogólne.
5. PN-EN 50123-2:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Aparatura łączeniowa prądu stałego – Wyłączniki prądu stałego.
6. PN-EN 60077-3:2002: Zastosowania kolejowe – Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego – Część 3: Elementy elektrotechniczne – Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego.
7. Przybylska M.: *Badanie wyłącznika szybkiego prądu stałego typu Gerapid 4207 1X2, 4200A, 900V*. Praca IK nr 5192/12, Warszawa 2012.
8. Przybylska M. i inni: *Badania wyłącznika BWS*. Praca IK nr 3902/12, Warszawa 2012.
9. Przybylska M., Kruczek W.: *Badania dwóch typów wyłączników taborowych na zgodność z normą EN 60077 oraz jednego typu wyłącznika podstacyjnego na zgodność z normą EN 50123*. Praca IK nr 2709/12, Warszawa 2012.
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, zeszyt 159, Warszawa 2013.
11. Rojek A.: *Badania wyłączników szybkich prądu stałego na zgodność z normami*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 89 NR 7/2013.
12. Rojek A.: *Badanie koordynacji zabezpieczeń oraz wyznaczanie wartości i czasu wyłączania prądów krytycznych*. Praca IK nr 5407/12, Warszawa 2014.
13. Rojek A.: *Zdolność łączeniowa prądów krytycznych wyłączników szybkich 3 kV DC*. XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2012, Zakopane 2012.
14. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej. Dz.U. UE L 356 z 2014.
15. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych. Dz. U. 2014, poz. 720.
16. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Dz.U. 2013, poz. 1596 z późn. zmianami.