

Wyłączanie prądów wstecznych przez ultraszybkie wyłączniki próżniowe

W artykule przeanalizowano wymagania dotyczące ultraszybkich wyłączników próżniowych prądu stałego klasy V, wykorzystujących metodę impulsu przeciwną IPP. Opisano wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych zgodnych oraz wstecznych (występujących m. in. podczas rekuperacji energii), zarówno w obwodach o przewodze indukcyjności jak i rezystancji. Wykazano przydatność metody IPP w dowolnych warunkach łączeniowych w trakcji kolejowej.

1. Wprowadzenie.

Obecny poziom rozwoju techniki łączenia silnych prądów stałych umożliwia konstruowanie klasycznych wyłączników magnetowdmuchowych **WM** relatywnie słabo ograniczających prądy zwarciove.

Po wejściu Polski do UE pojawiła się konieczność stosowania norm unijnych opisujących wymagania i klasyfikujących aparaturę łączeniową, stanowiących podstawę do opracowywania dokumentacji techniczno-ruchowej, warunków technicznego odbioru produkowanej aparatury łączeniowej oraz wykonywania badań. Dwie podstawowe normy krajowe [2, 3] dotyczące trakcyjnych wyłączników prądu stałego zostały zastąpione ponad dziesięcioma normami EN odwołującymi się do wielu innych norm szczegółowych. Przykładowo norma [4], wprowadza trzy typy charakterystyk wyłączeniowych, dzieląc wyłączniki na: wyłączniki quasi-szybkie (**S**), wyłączniki szybkie ograniczające prąd (**H**), wyłączniki bardzo szybkie ograniczające prąd (**V**).

Wyłączniki takie powinny odznaczać się własnościami pokazanymi w tabeli 1.

Większość znanych **WM** można zaliczyć do wyłączników quasi – szybkich klasy **S**, zapewniających przerwanie prądu, ale ograniczenie spodziewanego prądu może nie występować. Tylko część **WM** można zaliczyć do wyłączników szybkich klasy **H**, przy czym ograniczają one prąd z co najwyżej umiarkowaną skutecznością, tj. współczynniki ograniczania prądu $C_o = I_o / I_{Nss}$ są zazwyczaj większe od 0,5 (I_o – prąd ograniczony). W praktyce żaden z **WM** spotykanych

w systemach trakcji kolejowej zasilanej napięciem 3 kV nie spełnia wymagań klasy V.

Osiągnięcie znacznie skuteczniejszego ograniczania zwarciowych prądów stałych stało się możliwe dzięki zastosowaniu w wyłącznikach trakcyjnych nowych zasad działania, wykorzystujących metody komutacji naturalnej **KN** lub wymuszonej **KW**.

- **Komutacja naturalna KN** jest definiowana jako metoda sprowadzania prądu stałego do zera **bez dostarczania energii elektrycznej ze źródła zewnętrznego**, za pomocą układu wyłączającego wykorzystującego zespół naturalnych właściwości poszczególnych podzespołów tego układu i zjawisk w nim występujących podczas wyłączania prądu roboczego, przeciążeniowego lub zwarciowego.
- **Komutacja wymuszona KW** jest definiowana jako metoda sprowadzania prądu stałego do zera **wskutek dostarczania ze źródła zewnętrznego energii elektrycznej**, za pomocą układu wyłączającego wykorzystującego zasadę superpozycji wytworzonego impulsu prądowego oraz wyłączanego prądu roboczego, przeciążeniowego lub zwarciowego.

Spośród kilkunastu sklasyfikowanych możliwości realizacji technicznej obu metod [1], w systemach trakcji kolejowej zasilanej napięciem stałym 3 kV znalazła zastosowanie metoda **KW**, w postaci ultraszybkiego wyłączania silnych prądów stałych w próżni

Tabela 1. Przykładowe wymagania dla wyłączników podstawcyjnych [4].

Klasa wyłącznika	Czas otwierania [ms]	Całkowity czas wyłączenia [ms]	Stosunek I_{Nss} do i_t [-]	di/dt przy $t = 0$ [kA/ms]
S	≤ 15	≤ 30	$\geq 3,5$	$\geq 1,7$
H	≤ 5	≤ 20	≥ 7	≥ 5
V	≤ 1	≤ 4	dowolny	dowolny

I_{Nss} – prąd znamionowy zwarciovy, i_t – prąd nastawczy wyłącznika, di/dt – stromość wzrostu I_{Nss}

za pomocą impulsu przeciwprądu, zwanego dalej zasadą **IPP**.

Przydatne w praktyce w systemach trakcyjnych DC 3 kV są trzy warianty budowy układu wyłączającego UW wykorzystującego zasadę IPP, zależne od rodzaju elementów: głównego, wyłączającego prąd główny oraz pomocniczego, załączającego przeciwprąd:

- UW próżniowy (**UWV**) (dwie komory próżniowe, główna i pomocnicza),
- UW tyrystorowy (dwa tyrystory lub zespoły tyrystorów, główny i pomocniczy),
- UW hybrydowy (komora próżniowa główna i pomocniczy tyrystor lub zespół tyrystorów).

Najbardziej racjonalny z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia jest UW próżniowy. Działające na zasadzie IPP ultraszybkie wyłączniki próżniowe prądu stałego typu **DC** zostały zaakceptowane na podstawie krajowych norm do stosowania w systemie trakcji kolejowej 3 kV i od ponad 10 lat są użytkowane w elektrycznych zespołach trakcyjnych, nadto w lokomotywach, a stosowne certyfikaty posiadają już także próżniowe podstacyjne. Wyłączniki DC w pełni odpowiadają wymaganiom klasy **V**, działając ultraszybko i bardzo skutecznie ograniczając prądy zwarciove, w sposób nieosiągalny dla **WM**. Ogromne walory użytkowe wyłączników DC wynikają z ich parametrów eksploatacyjnych oznaczonych zaciemnionymi polami w tabeli 2.

Metoda **IPP** ma charakter uniwersalny i nie ma teoretycznych ograniczeń jej zastosowania przy dowolnej wartości napięcia i prądu. Dotychczasowe ograniczenia praktyczne w jej stosowaniu wynikały z niewystarczających właściwości elementów układu wyłączającego w stosunku do wymagań technicznych. Dopiero w układach tyrystorowych została ona zastosowana na szeroką skalę. Pomimo wielu cennych zalet, z których najważniejsze to szybkość działania, bardzo mały współczynnik ograniczania prądu zwarciovego, stosunkowo niewielkie energie przepięć łączeniowych, wyłączniki tyrystorowe nie znalazły szerszego zastosowania w obwodach wysokiego napięcia, głównie ze względu na konieczność stosowania wymuszonego odprowadzania ciepła wydzielającego się pod wpływem dużych strat mocy w stanie przewodzenia. Pojawienie się na rynku nowoczesnych komór próżniowych o gwarantowanych przez wiele lat wysokich parametrach technicznych oraz wysokoenergetycznych ograniczników przepięć, otworzyło nowe możliwości wykorzystania tej metody do budowy nowej generacji próżniowych wyłączników prądu stałego.

Metoda IPP w przypadku wyżej opisanych UW tyrystorowych oraz hybrydowych pozwala na budowę wyłączników spolaryzowanych, zdolnych do wyłączania prądu przepływającego tylko w założonym kierunku, zwanego dalej **prądem zgodnym**. Wyłączanie prądu o kierunku przeciwnym, zwanego dalej

Tabela 2. Zestawienie wybranych parametrów ultraszybkich wyłączników typu DC* dla kolei

L. p.	Parametry, jednostki		Wartości parametrów
1	N. z. izolacji	U_{Nm} [V]	3000
2	N. z. łączeniowe	U_{Ne} [V]	3000
3	P. z. ciągły	I_{Ne} [A]	400, 630, 800, 1600, 2500, 3150
4	P. z. wyłączalny / przy s. c.	I_{Nss}/τ_c [kA/ms]	50/10, 80/20, 120/30
5	Początkowa stromość	I_{Nss} s_i [A/ μ s]	≤ 7
6	P. ograniczony / przy s. c. $i_0/\tau_c^{1)}$	[kA/ms]	$(i_t+7,5)/10$; $(i_t+3,75)/20$; $(i_t+2,5)/30$
7	W. o. p. $C_0=i_0/I_{Nss}$ / przy s.c.	$C_0/\tau_c^{2)}$ [-/ms]	0,2/10; 0,125/20; 0,1/30 ⁶⁾
8	Całka Joule'a / przy s. c. $I^2t/\tau_c^{2)}$	[A ² s/ms]	$\leq 120 \times 10^3/10$; $\leq 50 \times 10^3/20$; $\leq 40 \times 10^3/30$
9	Przepięcie łączeniowe	u_m [kV]	≤ 10
10	C. własny otwierania	t_0 [ms]	0,6
11	C. wyłączania / przy s. c. $t_w/\tau_c^{2)}$	[ms/ms]	$\leq 2,5/10$; $\leq 4/20$; $\leq 5/10$
12	P. nastawczy	i_t [A]	400 ÷ 4000
13	Trwałość łączeniowa	$n_l^{3)}$ [H] (łączeń)	10000 (2×5000) ⁴⁾
14	Trwałość mechaniczna	$n_m^{4)}$ [cp] (cykli)	20000 (2×10000) ⁴⁾

N – napięcia, n. z. – n. znamionowe; p – prądy, p. z. - p. znamionowe; s. c. – stała czasowa obwodu; w. o. p. – współczynnik ograniczenia prądu; c – czasy; cp – cykle przestawieniowe z-o (ang. c-o);
Uwagi: ¹⁾ – prąd ograniczony silnie zależny od prądu nastawczego wyzwalacza; ²⁾ – w obwodzie o $I_{Nss} = 50$ kA przy $i_t = 2500$ A; ³⁾ – w warunkach zwarciowych, ⁴⁾ – trwałość mechaniczna jest limitowana trwałością komór próżniowych, po 10000 cp lub 5000 Z-W planowa wymiana komory.

* - dane dla wyłączników DCU, DCN i DCN-L produkowanych przez ZAE WOLTAN Sp. z o.o. na licencji Politechniki Łódzkiej.

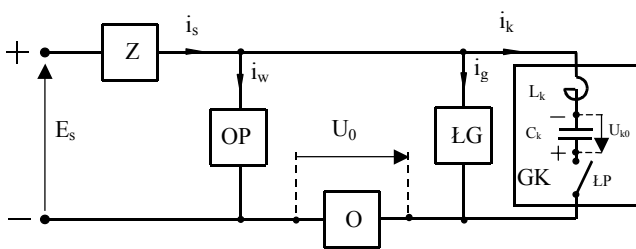
prądem wstecznym, wymaga specjalnych rozwiązań układu wyłączającego.

UW próżniowe (UWV) nie mają tego ograniczenia i są zdolne również do wyłączania tzw. **prądów wstecznych**, tj. prądów płynących w kierunku przeciwnym do typowego dla systemie zasilania trakcji kolejowej. Przepływy prądu wstecznego w **wyłącznikach pojazdowych** występują nie tylko w niektórych przypadkach zwarć w sieci trakcyjnej, ale w szczególności w przypadku hamowania odzyskowego i rekuperacji energii do sieci trakcyjnej. Przedstawiona niżej analiza pracy ultraszybkiego wyłącznika próżniowego w takich warunkach jest więc istotna zarówno z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia. Ze względu na usytuowanie **wyłączników podstawcyjnych** w systemie zasilania trakcji kolejowej, wyłączanie prądu wstecznego przez taki wyłącznik nie ma w praktyce racjonalnego uzasadnienia i nie będzie dalej przedmiotem analizy, choć wyłączniki próżniowe DC z natury rzeczy są do tego zdolne.

2. Metoda IPP jako zasada działania układu wyłączającego próżniowego UWV.

2.1. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych w obwodach o przewodze rezystancji.

Wyłączanie prądu stałego metodą IPP jest wieloetapowe. Przeanalizowane zostało na przykładzie układu wyłączającego UWV złożonego z głównego próżniowego zespołu wyłączającego (ŁG), zbocznikowanej gałęzi komutacyjnej (GK), złożoną z generatora przeciwprądu w postaci naładowanego do napięcia U_{k0} kondensatora C_k połączonego szeregowo z dławikiem L_k oraz próżniowym zespołem pomocniczym (ŁP) załączającym przeciwprąd. UWV jest także wyposażony w ogranicznik przepięć OP. Schemat UWV został pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy UWV w obwodzie prądu stałego wyłączanym metodą IPP. Z – zastępcza impedancja falowa obwodu zwarciovego, O – odbiornik, E_s – napięcie zasilające, U_0 – napięcie na odbiorniku, i_s – prąd sieci, i_g – prąd łącznika głównego, i_k – prąd komutacyjny, i_w – prąd ogranicznika OP. Pozostałe oznaczenia w tekście.

Pod wpływem napięcia U_{k0} na kondensatorze C_k następuje wymuszona komutacja prądu głównego i_g do gałęzi komutacyjnej GK, a po wyłączeniu prądu w ŁG prąd i_k przeładowuje kondensator C_k i jest przejmowany przez OP, będący warystorem tlenkowym o dużej energochłonności i nieliniowej charakterystyce napięciowo – prądowej gwarantującej ograniczenie przepięć na zadanym poziomie, rozładowanie energii

magnetycznej obwodu oraz szybkie sprowadzenie prądu do zera.

Możliwe są dwa przypadki wyłączania:

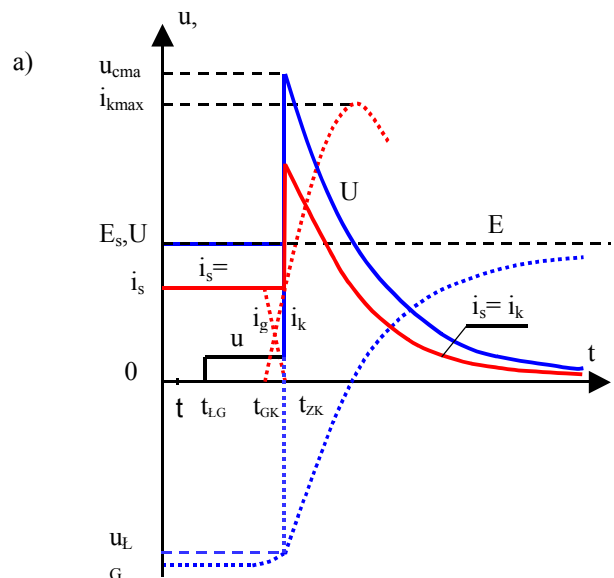
- wyłączanie prądu roboczego odbiornika O gdy prąd $i_s = i_g$ zależy od parametrów odbiornika, a impedancja Z praktycznie nie wpływa na jego wartość,
- wyłączanie prądu zwarciovego gdy odbiornik jest zwarty, a o przebiegu prądu decyduje impedancja falowa Z .

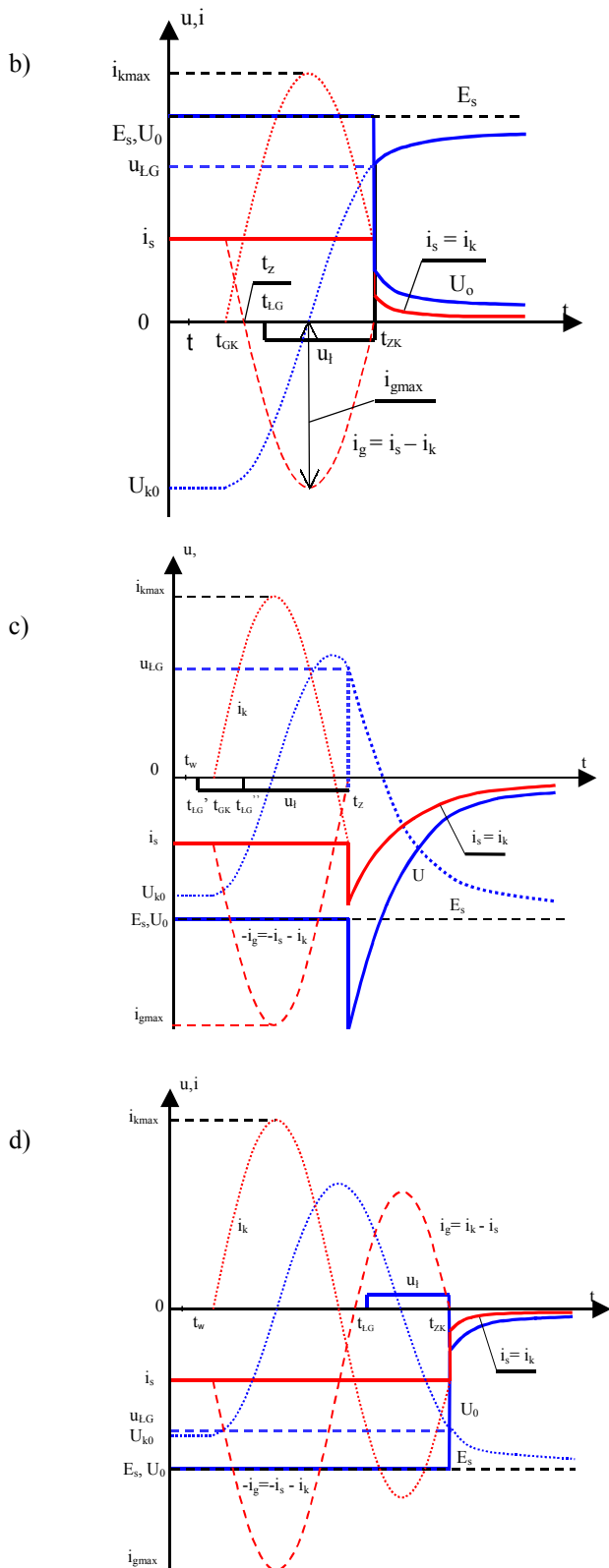
Wyłączanie prądu $i_s = i_g$ w obu przypadkach odbywa w ten sam sposób. Po wystąpieniu sygnału wyłączającego, wg zadanej sekwencji nastąpi otwarcie ŁG i zamknięcie ŁP. W gałęzi komutacyjnej GK zaczyna płynąć prąd i_k . Ponieważ gałąź komutacyjna GK zawiera generator przeciwprądu o dużych możliwościach prądowych, proces komutacji odbywa się w bardzo krótkim czasie i można przyjąć, że w tym przedziale czasowym prąd i_s źródła jest praktycznie stały. A zatem słuszne jest równanie:

$$i_s = i_g + i_k = \text{const} \quad \text{lub}$$

$$i_g = i_s - i_k \quad \text{oraz} \quad \frac{di_g}{dt} = -\frac{di_k}{dt} \quad (1)$$

z którego wynika, że szybkość malenia prądu i_g będzie taka sama jak szybkość wzrostu prądu i_k w gałęzi komutacyjnej GK. W chwili zrównania się prądu sieci z prądem gałęzi komutacyjnej $i_s = i_k$ zostanie osiągnięta zerowa wartość prądu w łączniku głównym $i_g = 0$. W przypadku zastosowania wyłącznika z dwoma komorami próżniowymi i wyboru odpowiedniej sekwencji działania ŁG i ŁP **można uzyskać możliwość wyłączania prądu przepływającego przez ŁG w dowolnym kierunku**. UWV o takich właściwościach umożliwia więc budowę wyłącznika niespolaryzowanego. Współpracę łącznika głównego ŁG z gałęzią komutacyjną GK omówiono na przykładzie wyłączania prądu roboczego w obwodzie o charakterze rezystancyjnym, a charakterystyczne przebiegi prądów i napięć pokazano na rys. 2.





Rys. 2 a ÷ d (c. d.) Współpraca łącznika głównego ŁG z gałęzią komutacyjną GK przy wyłączaniu metodą IPP prądu roboczego w obwodzie o charakterze rezystancyjnym: a) wyłączanie w pierwszym zerze prądu; b) wyłączanie w drugim zerze prądu; c) wyłączanie prądu wstecznego w pierwszym zerze prądu; d) wyłączanie prądu wstecznego w drugim zerze prądu. Chwile: t_w – wystąpienia sygnału wyłączającego t_{LG}' , t_{LG}'' – otwarcia łącznika głównego ŁG, t_{GK} – zamknięcia ŁP i zadziałania gałęzi komutacyjnej GK, t_{ZK} – zakończenia komutacji wymuszonej; U_{k0} – napięcie początkowe na kondensatorze C_k , u_{cmax} – maksymalne napięcie na kondensatorze C_k , u_l – napięcie łuku w ŁG. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 1.

2.1.1. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych zgodnych.

Gałąz komutacyjna GK wytwarza prąd o początkowym kierunku zawsze takim samym, niezależnym od kierunku prądu w wyłącznym obwodzie. Początkowo w obwodzie płynie prąd $i_s = i_g$. Wystąpienie w chwili t_w sygnału wyłączającego skutkuje zadziałaniem gałęzi komutacyjnej GK i pojawieniem się prądu i_k w węzłach obwodu, do których gałąz ta jest dołączona. W zależności od kierunku przepływu prądu obwodu i_s , w początkowej fazie wyłączania prądy i_k oraz i_g mogą mieć w węzle kierunki zgodne - jeżeli dopływają do węzła lub od niego odpływają, albo przeciwnie - gdy jeden z tych prądów dopływa do węzła a drugi od niego odpływa. Na rys. 2 a) pokazano przypadek wyłączania prądu metodą IPP z najczęściej stosowaną sekwencją współpracy gałęzi GK z łącznikiem ŁG, gdy najpierw otwiera się łącznik główny ŁG w chwili t_{LG} , a następnie w chwili t_{GK} wskutek załączenia ŁP pojawia się prąd i_k o kierunku zgodnym z prądem i_g . A zatem wzrost prądu i_k powoduje malenie prądu i_g , w przedziale czasowym $t_{GK} \div t_{ZK}$ następuje wymuszona komutacja prądu z łącznika ŁG do GK. Wzrastający od zera prąd komutacyjny i_k osiąga w chwili t_{ZK} wartość $i_k = i_s$. Wówczas prąd $i_g = 0$, cały prąd sieci płynie przez GK i struktura obwodu ulega zmianie wskutek szeregowego dołączenia kondensatora C_k do obwodu głównego. Jest to wyłączenie w **pierwszym zerze prądu**. Po skokowym wzroście początkowym prądu i_s , spowodowanym występującym na C_k napięciem u_{LG} sumującym się z napięciem źródła E_s , prąd obwodu osiąga wartość zerową wskutek najczęściej aperiodycznego przeładowania kondensatora C_k do napięcia sieci E_s . W takim przypadku maksymalne napięcie u_{cmax} występuje na odbiorniku i nie pobudza do zadziałania ogranicznika przepięć OP, gdyż jest na nim tylko napięcie E_s przy którym prąd $i_w = 0$, tj. OP nie bierze udziału w wyłączaniu prądu.

Druga sekwencja wyłączania prądu metodą IPP polega na tym, że najpierw działa gałąz komutacyjna GK wskutek zamknięcia ŁP w chwili t_{GK} , powodującego wzrost prądu i_k . Po przekroczeniu przez i_k wartości prądu sieci $i_k > i_s$, w chwili t_{LG} otwiera się ŁG, przez który płynie wówczas prąd $i_g = i_s - i_k$ osiągający wartość zerową w chwili t_{ZK} , na zboczu prądu i_k malejącym od wartości maksymalnej i_{kmax} do wartości $i_k = i_s$. Jest to wyłączenie w **drugim zerze prądu**. Jak w poprzednim przypadku struktura obwodu ulega zmianie wskutek szeregowego dołączenia kondensatora C_k do obwodu głównego. Po skokowym zmniejszeniu początkowym prądu i_s spowodowanym najczęście aperiodycznego przeładowania kondensatora C_k do napięcia sieci E_s .

W obu powyższych przypadkach wyłączania istnieją określone różnice w warunkach pracy wybranych podzespołów układu wyłączającego. Przy wyłączaniu w **pierwszym zerze prądu** warunki pracy

łącznika głównego ŁG są łatwe, gdyż w czasie palenia się łuku przepływa przezeń prąd nie większy od prądu sieci $i_g \leq i_s$, natomiast warunki napięciowe i energetyczne dla odbiornika O oraz pozostałych elementów są relatywnie trudne. Przy wyłączaniu w **drugim zerze prądu** warunki pracy łącznika głównego ŁG są cięższe. W każdym przypadku wyłączania przepływa przezeń duży prąd $i_g = i_s - i_k$ w chwili t_{zz} zmieniający kierunek i osiągający dużą wartość maksymalną $i_{gmax} = i_s - i_{kmax}$, tym większą im mniejszy jest wyłączany prąd (rys. 2 b). Jednak po komutacji w chwili t_{zz} warunki energetyczne elementów układu wyłączającego oraz odbiornika są łatwiejsze z przyczyn opisanych wyżej.

2.1.2. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych wstecznych.

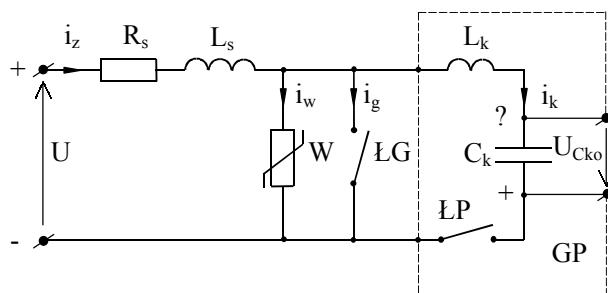
Wyłączanie prądów **wstecznych** pokazano na rys. 2 c) oraz 2 d). Wyłączanie prądu wstecznego w **pierwszym zerze prądu** (rys. 2 c) nastąpi w wytwarzanej przez GK drugiej, ujemnej półfali prądu i_k , na jej ujemnym zboczach malejącym od wartości zerowej do wartości $-i_{kmax}$. Zjawiska łączeniowe oraz narażenia elementów układu wyłączającego i obwodu są dokładnie takie same, jak w przypadku pokazanym na rys. 2 a), ponieważ w obu przypadkach prąd i_g płynący przez ŁG nie zmienia kierunku przepływu. Prąd ten, równy $-i_g = -i_s - i_k$, w chwili t_{zk} osiąga wartość zerową. Zadziałanie ŁG praktycznie nie jest czasowo powiązane z zadziałaniem ŁP i załączeniem GK. Może ono nastąpić zarówno w chwili t_{LG}' , jak również w chwili t_{LG}'' , o ile napęd łącznika ŁG jest dostatecznie szybki. Podobne analogie występują pomiędzy stylizowanymi przebiegami dotyczącymi wyłączania w **drugim zerze prądu** zgodnego (rys. 2 b) oraz wstecznego (rys. 2 d). Różnica zasadnicza, nie wpływająca na zjawiska łączeniowe, dotyczy umiejscowienia chwili t_{LG} , która musi być związana z ujemną półfalą prądu i_k wytworzoną przez GK. Należy dodać, że tylko w pierwszym przypadku wyłączania prądu i_g o kierunku zgodnym z prądem i_k , przez ŁG nie przepływa maksymalna wartość prądu komutacyjnego i_{kmax} wytwarzanego przez GK. W trzech pozostałych przypadkach wyłączania prądu metodą IPP, przed chwilą zera prądu i_g przez ŁG przepływają jedna lub dwie półfale prądu i_{kmax} .

2.2. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych w obwodach o przewodzie indukcyjności.

Wyłączanie prądu metodą IPP obwodów zawierających indukcyjność opisano na przykładzie analizy wyłączania zwarcia, jako przypadku najtrudniejszego, a zarazem najbardziej typowego.

Ogólny schemat zwartego obwodu trakcyjnego jest odwzorowany schematem zastępczym pokazanym na rys. 3. Generatorem przeciwną GP w gałęzi komutacyjnej, załączanym przez ŁP, jest naładowany do napięcia U_{ck0} kondensator C_k połączony szeregowo z dławikiem komutacyjnym o niewielkiej indukcyjności

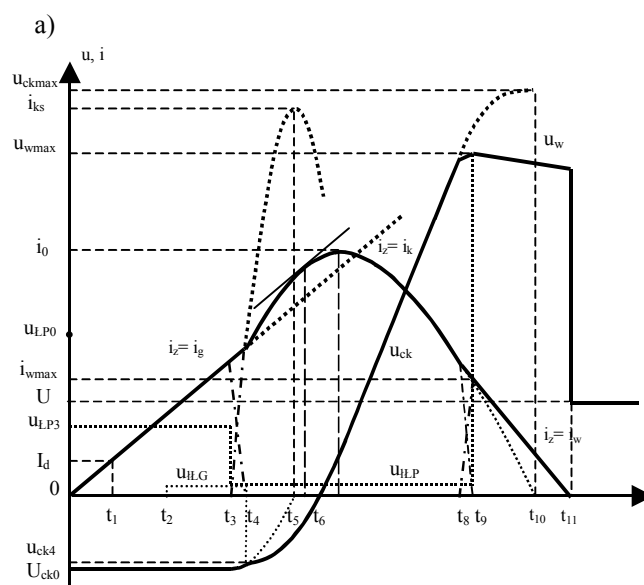
L_k . Obwód główny jest odwzorowany skupioną indukcyjnością L_s oraz rezystancją R_s . Ogranicznik przepięć OP zastąpiono warystorem W o charakterystyce napięciowo – prądowej utrzymującej w szerokich granicach prawie niezmiennie napięcie, niezależne od przepływającego przezeń prądu.

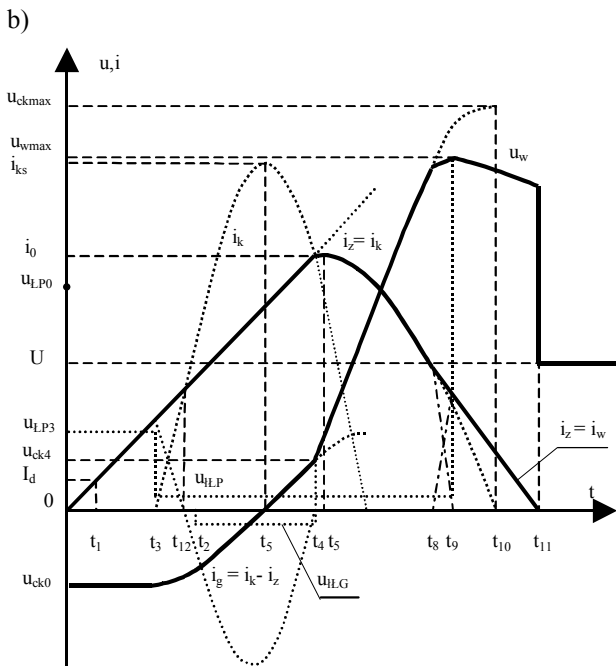


Rys. 3. Schemat ideowo – blokowy zwarciego obwodu prądu stałego wyłączanego metodą IPP. Oznaczenia jak na rys. 1 oraz w tekście.

2.2.1. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych zgodnych.

W stanie początkowym obydwa łączniki ŁG i ŁP są otwarte, a kondensator C_k jest naładowany do napięcia początkowego U_{ck0} . Zamknięcie łącznika ŁG w dowolnej chwili $t = 0$ jest równoznaczne z załączeniem obwodu zwarciego o parametrach R_s, L_s w którym pod wpływem napięcia zasilającego U rozpoczyna wykładniczo wzrastać prąd zwarcioowy i_z o spodziewanej wartości ustalonej $I_{zu} = U/R_s$ i początkowej stromości $s = di_z/dt = U/L_s$. Po osiągnięciu przez prąd i_z zadanej wartości I_d następuje uruchomienie procesu wyłączania zwarcia metodą IPP. Przebiegi prądów i napięć podczas wyłączania zwarcia pokazano na rys. 4 dla przypadków wyłączania w pierwszym lub drugim zerze prądu.





Rys. 4. Stylizowane przebiegi napięć i prądów podczas wyłączania prądu stałego metodą IPP, w obwodzie według rys. 3: a) w pierwszym zerze prądu, b) w drugim zerze prądu. Oznaczenia niżej oraz w tekście.

Oznaczenia do rys. 4 a, b → **napięcia:** U – napięcie zasilające, U_{LP0} – na LP po załączeniu zasilania, U_{LP3} – na LP po załączeniu wyłącznika, U_{ck4} – na kondensatorze C_k w chwili dojścia do zera prądu w LG, U_{ckmax} – maksymalne na kondensatorze C_k w przypadku braku warystora W, u_{wmax} – maksymalne na warystorze W, u_{LG} – napięcie łuku na LG, u_{LP} – napięcie łuku na LP; **prądy:** I_d – nastawczy (zadziałania), i_{ks} – wartość szczytowa i_k , i_{wmax} – maksymalny warystora, i_0 – ograniczony obwodu; **chwile:** t_0 – załączenia obwodu zwartego, t_1 – zadziałania wyzwalacza wyłącznika, t_2 – otwarcia LG, t_3 – zamknięcia LP, t_4 – wyłączenia prądu w LG, t_5 – wystąpienia prądu i_{ks} , t_6 – wystąpienia stromości prądu i_z równej jego stromości początkowej, t_7 – wystąpienia prądu i_0 , t_8 – zadziałania warystora W, t_9 – całkowitego przejścia prądu przez warystor W, t_{10} – wyłączenia obwodu o małej energii bez udziału warystora W, t_{11} – zaniku prądu w warystorze W oraz zakończenia wyłączania obwodu, t_{12} – zmiany kierunku przepływu prądu w łączniku głównym LG. Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3 oraz w tekście.

Przy wyłączaniu zwarcia w **pierwszym zerze prądu**, niepokazany na rys. 3 napęd otwiera łącznik LG i z założonym opóźnieniem zamyka łącznik LP na dowolnie krótki czas. Pojawienie się w obwodzie napięcia na kondensatorze C_k rozpoczyna proces wymuszonego przejmowania prądu i_g z łącznika LG, w którym pali się łuk elektryczny, przez gałąź komutacyjną zawierającą L_k , C_k i LP. Wzrastający ze stromością $s_k = U_{Ck0} / L_k$ prąd i_k zamyka się w obwodzie C_k , LP, U , ^+U , R_s , L_s , L_k , C_k , powodując szybkie malenie do zera prądu i_g , gdyż $di_g/dt = - di_k/dt$. W chwili t_4 osiągnięcia przez prąd i_g wartości zerowej, następuje zmiana struktury obwodu, cały prąd obwodu płynie przez gałąź komutacyjną. Na stykach łącznika głównego LG pojawia się skokowo napięcie U_{ck4} częściowo-

wo rozładowanego kondensatora C_k , mniejsze od napięcia U_{Ck0} . Przy wyłączaniu małych prądów napięcie U_{ck4} jest bliskie napięciu U_{Ck0} , zaś w miarę wzrostu wyłączanego prądu do wartości granicznej napięcie U_{ck4} maleje do wartości bliskich zeru. Parametry gałęzi komutacyjnej U_{Ck0} , C_k , L_k muszą być tak dobrane, aby mogła ona przejść prąd graniczny wyłącznika przed zmianą biegunowości napięcia U_{Ck0} .

W dalszym ciągu procesu wyłączania mogą wystąpić dwa przypadki, w zależności od energii magnetycznej zgromadzonej w obwodzie. Przy dużych energiach zgromadzonych w indukcyjności L_s , kondensator C_k przejmuje tylko część tej energii, gdyż pojawiające się na nim napięcie zostanie ograniczone do poziomu ochrony przeciwprzepięciowej, narzuconego przez silnie nieliniową charakterystykę warystora W. Następuje wówczas szybka komutacja prądu do warystora i całkowity prąd płynie przez obwód ^+U , R_s , L_s , W, U . Utrzymujące się na warystorze W dość wysokie napięcie niewiele zmienia się w szerokich granicach zmian prądu, powodując szybkie malenie do zera prądu i_z , po czym napięcie na warystorze W wraca do poziomu napięcia sieci U . Proces wyłączania obwodu kończy się więc po zaistnieniu czterech etapów wyłączania:

- etapu komutacji wymuszonej napięciem U_{Ck0} w przedziale czasowym $t_3 \div t_4$,
- etapu swobodnego przeładowywania kondensatora C_k w przedziale czasowym $t_4 \div t_7$,
- etapu naturalnej komutacji prądu z C_k do warystora W w przedziale czasowym $t_7 \div t_8$,
- etapu sprowadzania do zera prądu i_z przez warystor W w przedziale czasowym $t_8 \div t_{10}$.

Przy wyłączaniu zwarcia w **drugim zerze prądu** sekwencja działania LG oraz LP jest odwrotna do wyżej opisanej i analogiczna do pokazanej na rys. 2 b, tj. otwarcie LG w chwili t_2 następuje po załączeniu LP w chwili t_3 . Pokazane to zostało na rys. 4 b. Opis poszczególnych etapów wyłączania zwarcia oraz charakterystycznych przedziałów czasowych jest zbliżony do przypadku wyłączania zwarcia w pierwszym zerze prądu. Istotne różnice polegają na innym sposobie przeładowywania się kondensatora C_k oraz na zmianie biegunowości napięcia łuku w LG.

Przypadek ten jest trudniejszy energetycznie dla łącznika LG, gdyż przepływa przezeń maksymalny prąd obwodu komutacyjnego. Dzięki zmianie biegunowości napięcia U_{Ck} na kondensatorze C_k występują jednak łagodniejsze warunki energetyczne dla warystora W. Jak wynika z przebiegów pokazanych na rys. 4, przy wyłączaniu w pierwszym zerze prądu napięcie U_{ck4} dodaje się do napięcia zasilającego, powodując późniejsze dojście do zera prądu głównego, niż to ma miejsce przy wyłączaniu w drugim zerze prądu, gdy napięcie U_{ck4} odejmuje się od napięcia zasilającego. Zmiana biegunowości napięcia łuku dyfuzyjnego w LG jest korzystna z punktu widzenia szybkości odzy-

skiwania wytrzymałości powrotnej próżni [5].

2.2.2. Wyłączanie metodą IPP silnych prądów stałych wstecznych.

Prądy wsteczne w rzeczywistych sieciach trakcji kolejowej występują w kilku szczególnych przypadkach, przy czym ich wyłączanie nie zawsze jest wskazane lub potrzebne. Do takich typowych przypadków można zaliczyć m. in.:

1. przepływ prądu wstecznego przez wyłącznik pojazdowy podczas hamowania odzyskowego pojazdu połączonego z oddawaniem energii do sieci,
2. przepływ prądu wstecznego przez wyłącznik w kabine sekcyjnej w szczególnych przypadkach zasilania odcinka sieci trakcyjnej i położenia pojazdu na odcinku,
3. przepływ prądu wstecznego przez wyłącznik pojazdowy, w przypadku zwarcia w sieci trakcyjnej, wskutek rozładowywania się kondensatora filtru w przypadku pojazdu z napędem prądu przemiennego zasilanym za pomocą przekształtników, etc.

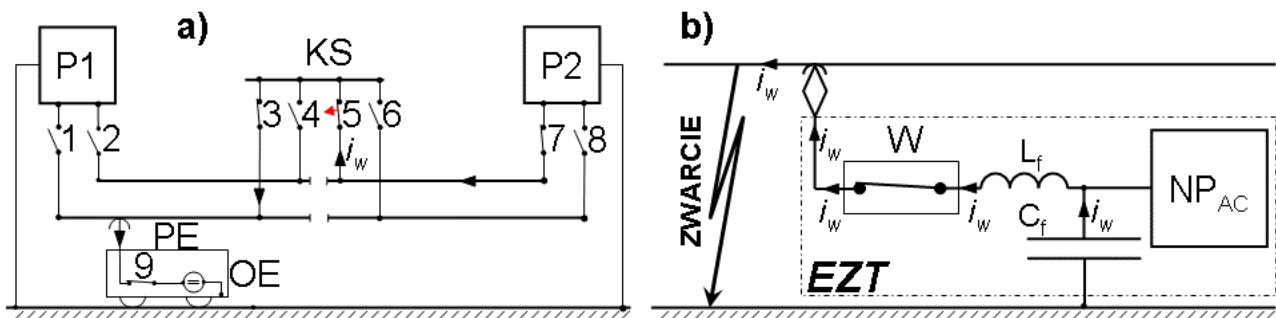
Jakkolwiek wyłączenie prądu wstecznego jest wskazane tylko w ostatnim przypadku, kierując się zasadą przezorności należy przyjąć, że zadziałanie ultraszybkiego wyłącznika próżniowego wykorzystującego metodę IPP może się z różnych przyczyn zdarzyć w dowolnej chwili i w dowolnych warunkach, a więc prądy wsteczne zawsze muszą być wyłączane poprawnie.

Analizę wyłączenia prądów wstecznych przy wykorzystaniu metody IPP przedstawiono dla wyżej opisanych przypadków 2 i 3 (w przypadku 1 i 2 wyłączenie prądu wstecznego ma podobny charakter). Schematy zastępcze dla tych przypadków pokazane zostały na rys. 5.

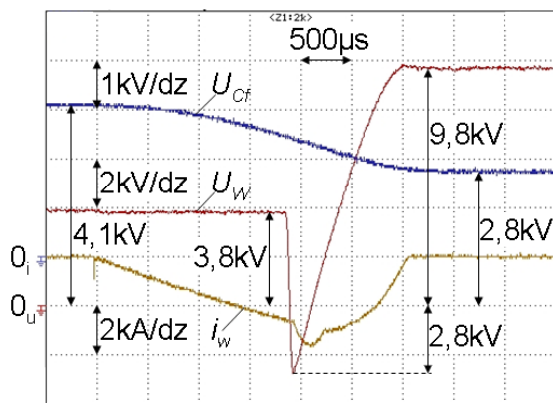
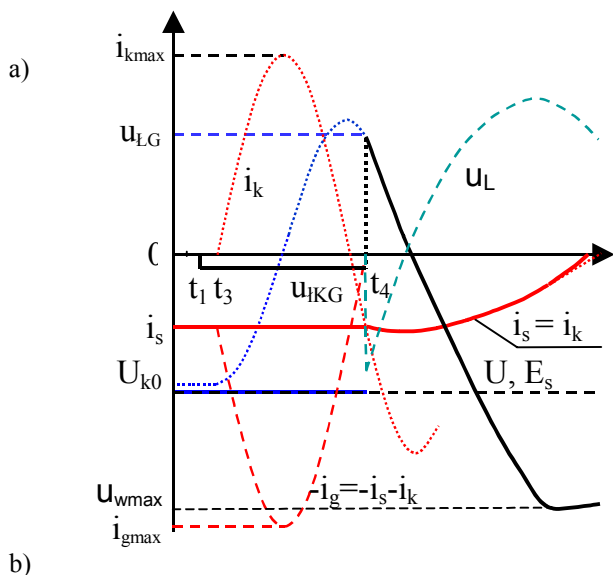
W przypadku pokazanym na rys. 5. a) odcinek trakcyjny zazwyczaj zasilany dwustronnie ma wyłączoną podstację P1, w pobliżu której jest pojazd PE pobierający prąd płynący przez kabinę sekcyjną z podstacji P2. Przy konfiguracji wyłączników pokazanej na rysunku przez zamknięty wyłącznik 5 płynie prąd wsteczny i_w , który dla wyłączników 3 oraz 7 jest prądem zgodnym.

W przypadku uruchomienia procesu wyłączania tego prądu przez wyłącznik 5 będzie wyłączany relatywnie mały prąd roboczy pobierany przez pojazd. Stylizowane przebiegi łączeniowe prądów i napięć dla takiego przypadku zostały pokazane na rys. 6. a).

Jeżeli przy takiej konfiguracji obwodu w części odcinka sieci między podstacją P1 a kabiną KS pojawi się zwarcie, to popłynie prąd zwarciowy, wsteczny tylko w wyłączniku 5, o relatywnie małej stromości zmian i spodziewanej wartości ustalonej wskutek ograniczania tych wielkości przez bierne parametry sieci trakcyjnej. W zależności od nastaw prądowych (tj. prądów zadziałania wyzwalaczy), do działania mogą być pobudzone wyłączniki 3, 5 i 7, a przy zwarciu w pojeździe także wyłącznik 9. W tym ostatnim przypadku zawsze on selektywnie wyłączy zwarcie jako najszybszy i mający najmniejszą nastawę prądową. Przy zbliżonych nastawach prądowych wszystkie wyłączniki mogą być pobudzone do działania, ale tylko najszybszy wyłączy zwarcie, a pozostałe będą pracowały bezłukowo. Wyłącznik 5 wyłączy więc prąd wsteczny tylko wówczas, gdy jego nastawa prądowa będzie mniejsza od nastaw wyłączników 3 i 7. Przebiegi łączeniowe prądów i napięć będą wówczas jakościowo podobne do przebiegów pokazanych na oscylogramie wg rys. 6. b), charakteryzujących przedstawiony na schemacie wg rys. 5. b) przypadek wyłączania prądu wstecznego podczas zwarciaowego rozładowywania się kondensatora C_f filtru napędu NP_{AC} przy zwarciu w sieci trakcyjnej poza analizowanym pojazdem.



Rys. 5. Uproszczone schematy zastępcze obwodów w przypadkach występowania przepływu prądów wstecznych: a) przez wyłącznik w kabine sekcyjnej, b) przez wyłącznik pojazdu ze sterowanym przekształtnikowo napędem AC w przypadku zwarcia w sieci trakcyjnej. PE – pojazd z odbiornikami OE; EZT – pojazd z napędem NP_{AC} ; j. w.; 1 ÷ 9, W – wyłączniki; P1, P2 – podstacje; KS – kabina sekcyjna; filtr: L_f – dławik, C_f – kondensator; i_w – prądy wsteczne.



Rys. 6. Przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy wyłączaniu metodą IPP prądów wstecznych w obwodzie o przewodzie indukcyjności: a) stylizowane przebiegi łączeniowe prądów i napięć dla przypadku wyłączania prądu roboczego w układzie wg rys. 5. a); b) oscylogram przebiegów łączeniowych prądów i napięć przy wyłączaniu prądu wstecznego podczas rozładowywania się kondensatora C_f filtru napędu NP_{AC} przy zwarciu w sieci trakcyjnej, w układzie wg rys. 5. b); wyłączenie w pierwszym zerze prądu; konfiguracja wyłącznika jak na rys. 3. U_w – napięcie na wyłączniku W, U_{Cf} – napięcie na kondensatorze C_f , U_L – napięcie na dławiku L_f , t_z – chwila wystąpienia zwarcia, 0_i , 0_u – zera prądów lub napięć (wg. rys. 5.b). Pozostałe oznaczenia jak na rys. 3, 4, 5 oraz w tekście.

Po uruchomieniu wyłącznika wykorzystującego metodę IPP, w chwili t_1 następuje otwarcie komory KG i zapłon łuku o napięciu u_{IKG} . W chwili t_3 następuje zamknięcie komory KP i załączenie oscylacyjnego prądu i_k sumującego się z prądem i_s w komorze KG, przez którą przepływa duży prąd szczytowy i_{gmax} . Narażenie energetyczne komory KG jest wówczas duże. Kondensator komutacyjny podczas przepływu półfali prądu i_k przeladowuje się. Po sprowadzeniu w chwili t_4 prądu i_s do zera następuje zmiana konfiguracji obwodu, w którym pojawia się szeregowo dołączony kondensator C_k o napięciu u_{LG} . Przy znacznej indukcyjności obwodu i zawartej w niej energii magnetycznej, kondensator komutacyjny jest dalej prze-

ładowywany, aż do osiągnięcia wartości u_{wmax} napięcia zadziałania ogranicznika przepięć, w którym następuje rozładowanie pozostałej energii magnetycznej. Następnie (poza zakresem rys. 6. a) napięcie na kondensatorze komutacyjnym powraca do wartości U_{k0} .

W przypadku pokazanym na rys. 5. b) oraz 6. b), po wystąpieniu zwarcia w chwili t_z sekwencja działania wyłącznika jest podobna. Ponieważ wartości L_f oraz C_f są duże, szybkość wzrostu prądu wstecznego nie jest zbyt duża. Po wyłączeniu w chwili t_4 prądu wstecznego w komorze KG oraz zmianie konfiguracji obwodu, napięcie na wyłączniku wzrasta aż do osiągnięcia wartości napięcia zadziałania ogranicznika przepięć (wskutek doładowywania kondensatora komutacyjnego energią elementów L_f i C_f filtru) i ostatecznego wyłączenia prądu wstecznego w chwili t_{10} .

3. Wnioski.

Metoda IPP jako zasada działania ultraszybkich wyłączników próżniowych prądu stałego nie ma teoretycznych ograniczeń stosowalności w dowolnych warunkach łączeniowych spotykanych w sieciach trakcji kolejowej zasilanej napięciami stałymi o wartościach do 3 kV.

Literatura.

- [1]. Bartosik M.: *Direct current switching off in vacuum. Proceedings of the VIth International Conference on Switching Arc Phenomena. SAP-89, Postconf. materials, Łódź, Poland, 1989.*
- [2]. PN-69/E-06120 – *Pojazdy trakcyjne. Aparaty elektryczne prądu stałego. Ogólne wymagania i badania.*
- [3]. PN-74/E-06121 – *Aparatura trakcyjna. Wyłączniki szybkie prądu stałego. Wspólne wymagania i badania.*
- [4]. PN-EN 50123: – *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. 50123-1 – Aparatura łączeniowa prądu stałego. Wymagania ogólne. 50123-2 – Aparatura łączeniowa prądu stałego. Wyłączniki prądu stałego.*
- [5]. Załucki Z.: *Wytrzymałość i izolacja elektryczna próżni. Rozprawa habilitacyjna. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 180, Poznań, 1986.*