POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA APARATÓW ELEKTRYCZNYCH K-26 ZAKŁAD APARATURY ELEKTRYCZNEJ WOLTAN Sp. z o.o.

NOWOCZESNE WYŁĄCZNIKI TRAKCYJNE PRĄDU STAŁEGO. INFORMACJE SYNTETYCZNE.

Podstawowe skrótowce stosowane w tekście: PS;
DC – prąd stały.
NNS, SNS, WNS – (odpowiednio) niskie, średnie, wysokie napięcie/a stałe.
WPS – wyłącznik/i prądu stałego.
MWPS; WM – magnetowydmuchowy/e wyłącznik/i prądu stałego.
KWPS, SWPS, UWPS, HWPS – (odpowiednio) klasyczne, szybkie, ultraszybkie, hiperszybkie WPS.
AEP – metoda (zasada) wyłączania DC aktywnym elementem półprzewodnikowym (m. komutacji naturalnej).
WPP – metoda (zasada) wyłączania DC przeciwprądem (m. komutacji wymuszonej).
UV, UH – (odpowiednio) próżniowy/e, hybrydowy/e UWPS. ***Inne*** *– zdefiniowane bezpośrednio w tekście.*

Informacje ograniczono do zakresu wg wniosku, właściwego dla trakcyjnych WPS i zastosowań pokrewnych. Pominięto problematykę WNS stosowanych przy przesyłaniu wielkich mocy na duże odległości, lub też w liniach sprzęgowych systemów prądu przemiennego, a także SNS i NNS w innych zastosowaniach specjalnych PS (przemysłowych, morskich , lotniczych etc.).

1. ZAKRES ZASTOSOWAŃ I WARUNKI PRACY WPS

Głównym użytkownikiem niskich napięć stałych (NNS) w zakresie do 1500 V są wszelkie rodzaje elektrycznej trakcji miejskiej i górniczej, a nadto różnego rodzaju systemy przemysłowe (napędowe, przekształtnikowe etc.). Napięcie 3000 V, traktowane zazwyczaj jako napięcie średnie (SNS), jest wykorzystywane głównie w elektrycznej trakcji kolejowej, a nadto w niektórych urządzeniach napędowych i w elektrotermii. Odrębną grupę stanowią zastosowania specjalne w technice okrętowej, wojskowej, lotniczej, kosmicznej itp. W tym zakresie wyłączniki prądu stałego (WPS) są zazwyczaj konstruowane dla określonego zakresu stosowalności. Poszukiwania nowych rozwiązań technicznych WPS są więc wymuszane przede wszystkim przez wzrastające wymagania podstawowych użytkowników prądu stałego, jakim są różne systemy trakcji elektrycznej.

Wzrastające potrzeby transportowe stwarzają tendencję do wzrostu przyspieszeń i prędkości pojazdów trakcyjnych, a więc i mocy trakcyjnych pojazdów silnikowych. Wymaga to wzrostu mocy podstacji zasilających i stosowania układów wzmacniania sieci dla ograniczania spadków napięć. Występuje także tendencja do przechodzenia po stronie prądu przemiennego na coraz wyższe napięcia zasilania systemów trakcyjnych. Te czynniki powodują zwiększenie mocy zwarciowych i stromości wzrostu prądów zwarciowych po stronie prądu stałego. Parametry zwarciowe poszczególnych typów obwodów są bardzo zróżnicowane. W obwodach NNS i SNS można napotkać stałe czasowe w zakresie 5÷30 ms, spodziewane ustalone prądy zwarciowe w zakresie 10÷150 kA, początkowe stromości wzrostu prądu zwarciowego w zakresie 0,5÷15 A/μs, energie magnetyczne obwodu w zakresie 5÷30 kJ. Zarazem w różnych

krajach prowadzone są prace nad napędami trakcyjnymi z rozruchem impulsowym oraz hamowaniem z odzyskiem energii, czy też nad napędami wykorzystującymi silniki prądu przemiennego, zasilane z sieci prądu stałego za pośrednictwem przekształtników. Powszechnie stosowane w zakresie NNS i SNS magnetowydmuchowe wyłączniki prądu stałego (MWPS) nie stanowią w tych warunkach dostatecznie skutecznego zabezpieczenia, w szczególności układów półprzewodnikowych. MWPS działają zbyt wolno, za mało skutecznie ograniczają prądy zwarciowe, mają za duże wartości całki Joule'a (I^2t).

Dlatego zrealizowano wielostronny program prac nad nowymi, bardziej skutecznymi, ultraszybkimi metodami wyłączania zwarciowych prądów stałych. Wiele z tych metod ma obecnie dobre podstawy teoretyczne. W dalszych rozważaniach uwzględnione zostały tylko te metody, których **przydatność do celów praktycznych została zweryfikowana eksperymentalnie co najmniej w skali laboratoryjnej, ew. jednostkowej, lub poprzez podjęcie produkcji przemysłowej wyłączników.**

2. PODZIAŁ WPS POD WZGLĘDEM SZYBKOŚCI DZIAŁANIA

Wyłączanie prądów zwarciowych przez MWPS następuje wskutek wzrostu rezystancji łuku $R_ł$ w komorze gaszeniowej, pochłaniającej energię źródła zasilania i energię magnetyczną obwodu. Gdy po rozpoczęciu wyłączania zwarcia rezystancja łuku wzrośnie dostatecznie, by dla każdej następnej chwili t był spełniony warunek: $\mathbf{R_ł > U_z / i(t) - R_z}$, gdzie U_z jest napięciem zasilającym, i(t) przebiegiem prądu, R_z rezystancją zwarciową, to pochodna prądu di/dt będzie zawsze ujemna aż do dojścia prądu do zera.

MWPS spełniają swoją rolę jako wyłączniki klasyczne (KWPS), działające relatywnie wolno i praktycznie nie ograniczające prądów zwarciowych, lub szybkie (SWPS) ograniczające prądy zwarciowe. Problemy eksploatacyjne i możliwości rozwojowe tych wyłączników są znane i zostały tutaj pominięte. MWPS osiągnęły kres możliwości technicznych wynikających z zasady ich działania.

Dla skuteczniejszego ograniczania prądów zwarciowych stworzyło to konieczność wykorzystania znacznie szybszych metod wyłączania obwodów prądu stałego. Dane literaturowe pozwoliły na sklasyfikowanie pięciu różnych zasad działania UWPS, przedstawionych w tablicy 1.

Metody te mają różne znaczenie poznawcze i aplikacyjne, a w tablicy zostały zaprezentowane w kolejności wynikającej z ich przydatności technicznej.

Wszystkie metody mają jedną wspólną cechę: wymuszają bardzo szybkie sprowadzenie prądu zwarciowego do zera. W obwodzie zwarciowym pozostaje wówczas nierozładowana energia magnetyczna generująca wysokie przepięcia łączeniowe.

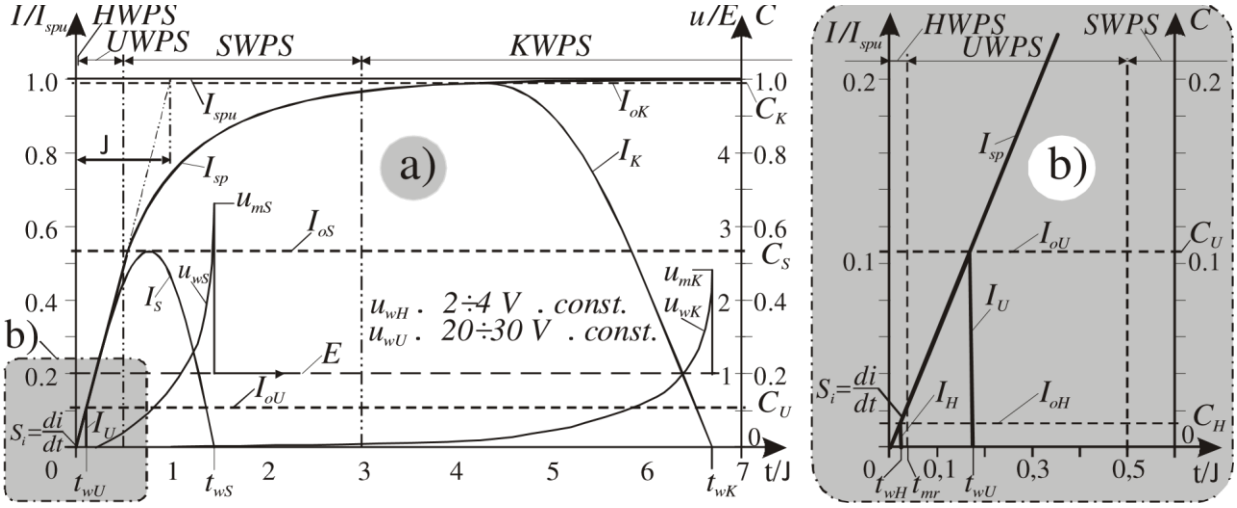
Wymaga to stosowania skutecznych układów ograniczania przepięć o dużej energochłonności.

Tablica 1.

WYBRANE METODY ULTRASZYBKIEGO WYŁĄCZANIA SILNYCH PRĄDÓW STAŁYCH				
Lp	Metoda wyłączania za pomocą:	Symbol metody	Charakterystyka metody	Element wyłączający i zakres napięć
1	impulsu przeciwprądu	**WPP**	Wymuszone sprowadzenie do zera prądu stałego w elemencie wyłączającym za pomocą impulsu prądu o kierunku przeciwnym, uzyskanego z dodatkowego źródła.	Komora próżniowa, zakres NNS i SNS

2	aktywnego elementu półprzewodnikowego	**AEP**	Wymuszone sprowadzenie do zera prądu stałego w elemencie wyłączającym wskutek przejęcia tego prądu i wyłączenia go przez	Komora próżniowa, zakres NNS
			równolegle dołączony, w pełni sterowalny, półprzewodnikowy element mocy.	
3	impulsu pola magnetycznego	WPM	Wymuszone sprowadzenie do zera prądu stałego w elemencie wyłączającym wskutek przejęcia tego prądu przez równolegle dołączony kondensator, wywołane wzrostem napięcia łuku uzyskanym za pomocą impulsu zewnętrznego pola magnetycznego.	Komora próżniowa, zakres SNS
4	impulsu przeciwnapięcia	WPN	Wymuszone sprowadzenie do zera prądu stałego w elemencie wyłączającym za pomocą impulsu napięcia o kierunku przeciwnym do napięcia zasilania, uzyskanego z dodatkowego źródła.	Komora próżniowa lub tyrystor, zakres NNS
5	układu pasywnej komutacji	UPK	a) interakcja rezonansowego obwodu LC i łuku elektrycznego o silnie nieliniowej charakterystyce U-I, palącego się w strumieniu sprężonego gazu, b) interakcja niestabilnego łuku dyfuzyjnego między stykami wolframowymi i obwodu o parametrach własnych L i C, powodująca ucinanie prądu stałego.	a) komora pneumatyczna lub sześciofluorkowa, zakres SNS b) komora próżniowa zakres NNS

Porównanie przebiegów łączeniowych prądów i napięć podczas wyłączania zwarcia przez WPS o różnych zasadach oraz szybkościach działania pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Zasady podstawowej klasyfikacji WPS. KWPS - klasyczne WPS, SWPS - szybkie WPS, UWPS - ultraszybkie WPS, HWPS - hiperszybkie WPS; I_{sp} - przykładowy przebieg prądu spodziewanego, I_{spu} - ustalony prąd spodziewany; I_o - prądy ograniczone: I_{oK} - dla KWPS, I_{oS} - dla SWPS, I_{oU} - dla UWPS, I_{oH} - dla HWPS; I - przebiegi prądu zwarciowego: I_K - dla KWPS, I_S - dla SWPS, I_U - dla UWPS, I_H - dla

HWPS; $C=I_o/I_{spu}$ - współczynniki ograniczania prądu: C_K - dla KWPS, C_S - dla SWPS, C_U - dla UWPS, C_H - dla HWPS; t - czas; t_w - czas wyłączania: t_{wK} - dla KWPS, t_{wS} - dla SWPS, t_{wU} - dla UWPS, t_{wH} - dla HWPS; E – napięcie sieci trakcyjnej, u_w – napięcia na wyłącznikach: u_{wK} – klasycznym, u_{wS} – szybkim, u_{wU} – ultraszybkim, u_{wH} – hiperszybkim; τ - stała czasowa obwodu zwarciowego; $s_i=di/dt=I_{spu}/\tau$ - początkowa stromość wzrostu prądu zwarciowego; t_{mr} - minimalny czas reakcji organu ruchomego wyłącznika wytrzymywany bez ograniczenia jego trwałości mechanicznej.

Osiągnięcie ultraszybkiego działania wyłączników wymaga zastosowania dużych przyspieszeń i prędkości elementów ruchomych wyłączników. Przy występujących w praktyce masach tych elementów powstają w nich wielkie udarowe naprężenia mechaniczne, często o falowym charakterze. Przekroczenie wartości naprężeń dopuszczalnych dla stosowanych materiałów konstrukcyjnych powoduje bardzo szybkie zmniejszanie się trwałości mechanicznej wyłącznika lub jego zniszczenie. Czas t_{mr} jest indywidualną cechą charakterystyczną wyłącznika. Można przyjąć, że czasy t_{mr} są zazwyczaj rzędu 150÷200 μs. Klasyfikację WPS pod względem szybkości wyłączania oraz charakterystyczne przedziały czasów wyłączania i współczynników ograniczania prądu zestawiono w tablicy 2 *(oznaczenia jak na rys. 1).*

Tablica 2. Podział WPS pod względem szybkości wyłączania determinującej ograniczanie prądów zwarciowych

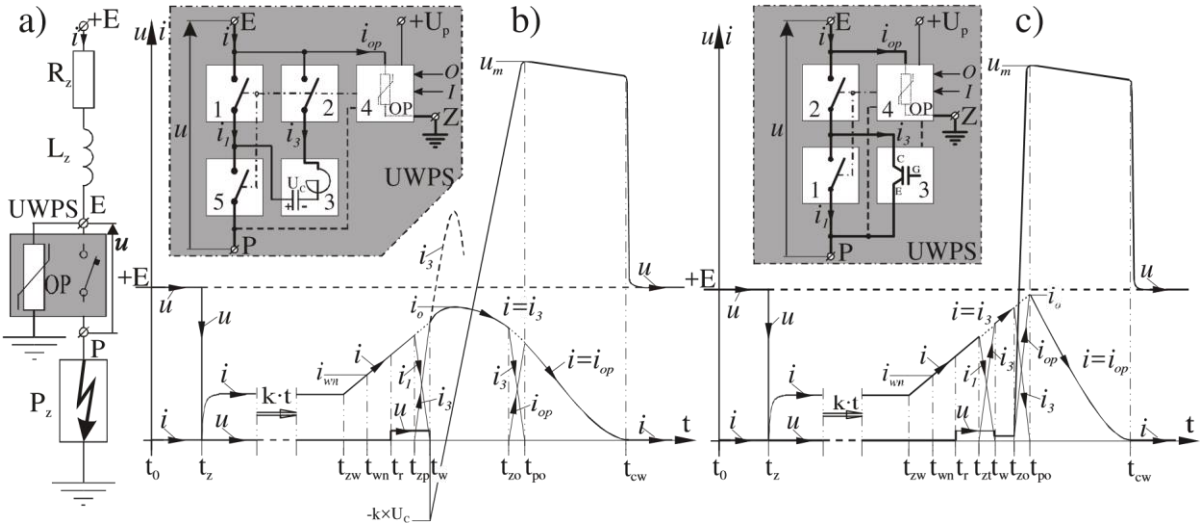
Lp.	Klasa WPS	Symbol	Czas wyłączania t_w	Współczynnik C ograniczania prądu	Cechy konstrukcyjne
1	Klasyczne	**K**WPS	$\sim 3\tau \le t_{wK} \le \infty$	$\sim 0{,}95 \le C_K \le 1$	MWPS, napęd zwykły
2	Szybkie	**S**WPS	$\sim 0{,}5\tau \le t_{wS} \le \sim 3\tau$	$\sim 0{,}4 \le C_S \le \sim 0{,}95$	MWPS, napęd szybki
3	Ultraszybkie	**U**WPS	$t_{mr} \le t_{wU} \le \sim 0{,}5\tau$	$\sim 0{,}05 \le C_U \le \sim 0{,}4$	Próżniowe lub hybrydowe, napęd impulsowy wielkiej mocy
4	Hiperszybkie	**H**WPS	$0 \le t_{wH} \le t_{mr}$	$\sim 0{,}01 \le C_H \le \sim 0{,}05$	Półprzewodnikowe

Skuteczność ograniczania prądu zwarciowego przez MWPS zależy od szybkości jego zadziałania i szybkości wzrostu napięcia łuku, od wartości prądu I_{os} oraz od parametrów RLC obwodu zwarciowego determinujących początkową stromość wzrostu prądu zwarciowego $s_i = di/dt \approx I_{spc}/\tau$. Miarą szybkości działania wyłącznika jest czas t_w. Miarą skuteczności ograniczania prądu jest współczynnik ograniczania prądu $C = I_o/I_{spu}$. Zależy on bardzo silnie od wartości s_i, determinowanej przez wartości stałej czasowej obwodu zwarciowego τ oraz ustalonego prądu spodziewanego I_{spu}. Dlatego wartości tego współczynnika oraz wartości czasu wyłączania t_w względem stałej czasowej τ przyjęto jako umowne kryteria podstawowego podziału WPS.

Ze względu na zakres wniosku, przedmiotem dalszych informacji będą tylko metody WPP i AEP (poz. 1 i 2 tablicy 1), coraz szerzej wykorzystywane w praktyce. W analizowanych zastosowaniach HWPS mają znaczenie pomocnicze i dalej zostały pominięte.

3. ULTRASZYBKIE METODY WPP I AEP

Ultraszybkie wyłączniki prądu stałego (UWPS) wykorzystują dwie różniące się zasady działania WPP i AEP, całkowicie odmienne niż w MWPS. Interakcja wyłącznika i obwodu przebiega w obydwu przypadkach w sposób zbliżony, choć wykazuje istotne różnice. Przedstawiono to na rys. 2, pokazującym przebiegi łączeniowe prądów i napięć podczas wyłączania zwarciowych prądów stałych.



Rys. 2. Schematy blokowe UWPS i przebiegi łączeniowe prądów i napięć ilustrujące zasady WPP i ASE działania wyłączników: a) schemat obwodu z UWPS; b) zasada WPP wyłączania przeciwprądem, c) zasada ASE wyłączania za pomocą aktywnego elementu półprzewodnikowego. P_z – pojazd trakcyjny (odbiorniki) z oznaczonym ↓ miejscem zwarcia, OP – ograniczniki przepięć; Rz, Lz – rezystancja i indukcyjność obwodu zwarciowego; komory próżniowe: 1 - główne, 2 - pomocnicze; zespoły wyłączające: b) 3 - generator przeciwprądu, c) 3 - tranzystor IGBT; 4 - systemy sterowania i zabezpieczeń (zaznaczono obwody OP); 5 - załącznik próżniowy; przyłącza: E - sieciowe, P – pojazdowe (odbiornikowe), Z - uziomowe, $+U_p$ - napięciowe; sygnały sterujące: *O* - otwierający, *I* - zamykający; napięcia: +E - sieci, $+U_p$ - pomocnicze, *u* - na wyłączniku, u_m - ograniczone, U_c - kondensatora komutacyjnego, $-k\times U_c$ - wsteczne (k < 1); prądy: *i* - zwarciowy, i_{wn} - zadziałania wyzwalacza nadprądowego, i_1 - komory 1, i_3 - zespołu 3, i_o - ograniczony, i_{op} - ogranicznika przepięć; chwile: t_0 - początkowa, t_z - załączenia prądu, t_{zw} - zwarcia, t_{wn} - zadziałania wyzwalacza, t_r - rozdzielenia styków komory 1, t_{zp} - załączenia przeciwprądu, t_{zt} - załączenia tranzystora, t_w - wyłączenia zwarcia, t_{zo} - zadziałania ogranicznika przepięć, t_{po} - przejęcia prądu przez ogranicznik, t_{cw} - całkowitego wyłączenia obwodu; t - czas, k·t - zmiana skali czasu (k » 1).

Wyłączanie prądu stałego za pomocą impulsu przeciwprądu (WPP) jest bezpośrednio przydatne do wielu zastosowań praktycznych w całym zakresie napięć i może być wykorzystywane m. in. do budowy UWPS próżniowych (**UV**) dla potrzeb trakcji kolejowej o napięciu 3 kV.

Schemat blokowy UV wykorzystującego metodę WPP oraz przebiegi łączeniowe prądów i napięć przedstawiono na rys. 2b. Kondensator komutacyjny w generatorze przeciwprądu 3 jest wstępnie naładowany i ma polaryzację przeciwną do napięcia zasilającego. Płynący przez komorę główną 1 prąd zwarciowy $i = i_1$ wzrasta i osiąga wartość prądu zadziałania i_{wn}, powodując uruchomienie wyłącznika. Po krótkim czasie własnym w chwili t_r komora 1 otwiera się powodując zapłon łuku, a następnie w chwili t_{zp} komora 2 zamyka się załączając przeciwprąd i_3 płynący w obwodzie 3-1-2. W komorze 1 przeciwprąd i_3 odejmuje się od prądu i_1, sprowadzając go do zera.

Po wyłączeniu prądu i_1 w chwili t_w konfiguracja obwodu ulega zmianie, napięcie na przeładowywanym kondensatorze ulega odwróceniu i wzrasta, powodując intensywne malenie prądu zwarciowego. Gdy przepięcie łączeniowe osiągnie w chwili t_{zo} próg zadziałania ogranicznika przepięć w systemie 4, zaczyna płynąć prąd i_{op}. W czasie $t_{zo}\div t_{po}$ prąd główny zostaje przejęty przez ogranicznik OP, rozładowujący energię magnetyczną obwodu i ograniczający przepięcie do wymaganej wartości u_m.

Wyłączanie prądu stałego za pomocą aktywnego elementu półprzewodnikowego (AEP) jest bezpośrednio przydatne dla potrzeb trakcji niskonapięciowej i może być wykorzystywane m. in. do budowy UWPS hybrydowych (**UH**). Do budowy UH w praktyce przydatne są tranzystory IGBT i tyrystory GTO, przy czym szybki postęp w dziedzinie tyrystorów elektrostatycznych wydaje się ostatnio zagrażać popularności GTO.

Sens techniczny ma budowa zestykowo - półprzewodnikowych wyłączników hybrydowych o takiej konstrukcji, która oprócz uzyskania wymaganych parametrów zwarciowych pozwoli na połączenie znanych zalet i eliminację wad elementów zestykowych i półprzewodnikowych. Przede wszystkim należy przy pracy przepustowej wyeliminować duży spadek napięcia na elementach półprzewodnikowych oraz praktycznie wyeliminować łuk wyłączeniowy powstający przy pracy wyłączeniowej zestyków. Nadto należy zapewnić galwaniczne odcięcie odbiorników od zasilania po wyłączeniu prądu. Jest to możliwe tylko w układzie tzw. hybrydy szeregowo - równoległej, w której jeden zestyk jest zbocznikowany przyrządem półprzewodnikowym mocy tworzącym układ przejmowania i wyłączania prądu, a drugi zestyk szeregowy umożliwia galwaniczne odcięcie odbiornika od źródła zasilania. Przydatność praktyczną mają w tym przypadku zestyki pracujące w powietrzu lub w próżni.

Schemat blokowy UH próżniowo - tranzystorowego wykorzystującego metodę AEP oraz przebiegi łączeniowe prądów i napięć przedstawiono na rys. 2c.

Hybrydowy układ wyłączający złożony jest z próżniowego członu zestykowego współpracującego z tranzystorem IGBT. Dwie jednocześnie otwierane komory próżniowe 1 i 2 są połączone szeregowo. Komora 1 (wyłączająca) jest zbocznikowana tranzystorem 3 , który przejmuje i wyłącza prąd, a komora 2 (odcinająca) umożliwia galwaniczne odcięcie odbiornika od źródła zasilania.

Przebieg wyłączania zwarcia jest podobny do opisanego dla WPP, choć inny jest sposób sprowadzania prądu i_1 do zera. Tranzystor 3 jest załączany impulsowo na bardzo krótki czas w chwili t_{zt}, gdy przerwa zestykowa w obydwu komorach próżniowych osiągnie wartość niezbędną do wyłączenia prądu. Ponieważ napięcie łuku w komorze 1 jest znacznie większe od napięcia przewodzenia tranzystora 3, w czasie $t_{zp} \div t_w$ następuje całkowite przejęcie prądu przez tranzystor równoznaczne z wyłączeniem prądu i_1. Wyłączenie tranzystora powoduje wzrost napięcia ze skutkami jak w przypadku WPP, tj. prąd tranzystora zostaje przejęty przez ogranicznik OP. W opisanym układzie następuje wspomniane wyżej połączenie zalet i eliminacja wad łączników zestykowych i półprzewodnikowych.

Przy wyłączaniu zwarć przez UWPS istotnym problemem staje się rozładowanie energii magnetycznej zawartej zarówno w indukcyjnościach sieci jak i odbiorników, niezbędne dla uniknięcia niebezpiecznych przepięć łączeniowych. Mimo, iż maksymalna energia E_M jest w przypadku UWPS kilkunastokrotnie mniejsza niż w przypadku MWPS, to praktycznie cała jest zużywana na generowanie przepięć łączeniowych, podczas gdy w MWPS jest w przeważającej części wytracana w postaci ciepła wydzielanego z łuku w komorze gaszeniowej wyłącznika. Konieczne jest zatem stosowanie w UWPS niezależnych środków ochrony przeciwprzepięciowej o dużej energochłonności.

Przedstawione rozważania pozwalają stwierdzić, że podstawowe znaczenie dla niezawodnej pracy UWPS i dla ich właściwości eksploatacyjnych mają trzy główne podzespoły wyłączników:

- wyłączająca komora próżniowa i właściwości próżni w warunkach wyłączaniu prądu stałego,

- impulsowy napęd wyłączającej komory próżniowej, - przekaźnik lub wyzwalacz nadmiarowo – prądowy. Problemy te zostały przedstawione w p. 4.

Nadto niezwykle istotne są problemy systemu ograniczania przepięć, a także załączania przeciwprądu.

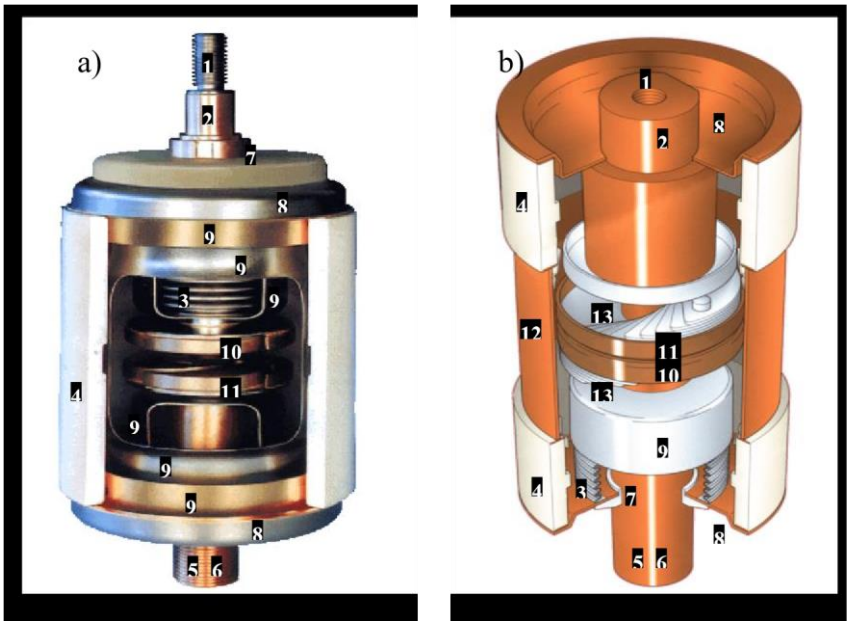
Powszechnie stosowane w układach przeciwprzepięciowych warystory z tlenków metali, współpracujące z układami diod rewersyjnych i filtrów, pozwalają rozwiązać ten problem w każdych warunkach.

Jest również możliwe wykorzystanie kilku metod załączania przeciwprądu, m. in. za pomocą łącznika pomocniczego w postaci komory próżniowej lub tyrystora (przydatne w praktyce), a także trygatronu próżniowego lub zestyku pracującego w powietrzu (przydatne raczej w technice laboratoryjnej). Ze względu na zakres wniosku, zagadnienia te dalej nie będą analizowane.

4. GŁÓWNE PODZESPOŁY UWPS

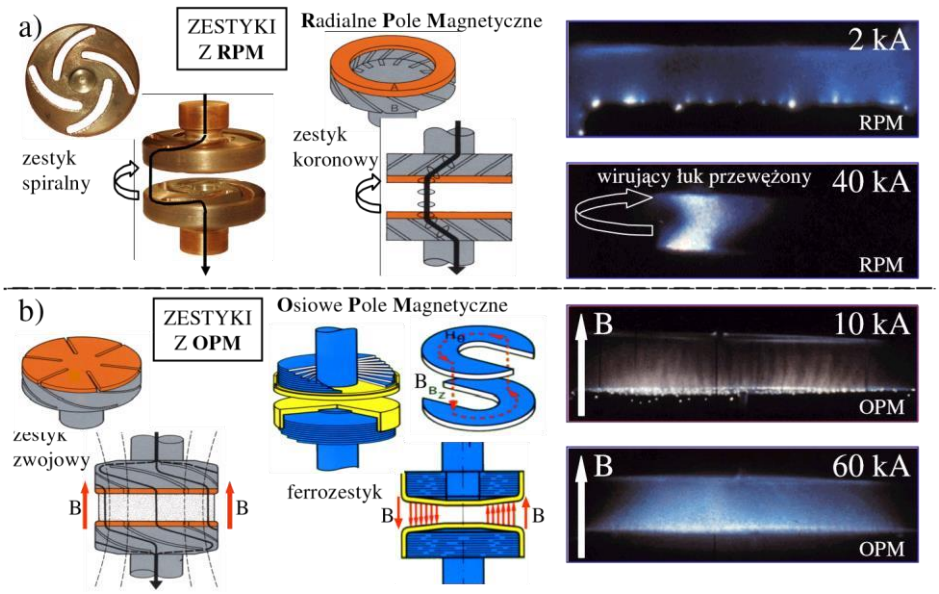
4.1. KOMORY PRÓŻNIOWE DO WYŁĄCZANIA PRĄDU STAŁEGO

W UWPS mogą być wykorzystywane przemysłowe komory próżniowe spełniające określone warunki. Warunkiem koniecznym jest stworzenie w komorze wyłączającej możliwości występowania tylko dyfuzyjnej formy łuku próżniowego. Zależy to m. in. od wartości prądu, układu geometrycznego styków, ich materiału oraz od przestrzennego rozkładu i natężenia pola magnetycznego w przerwie zestykowej. Przykładowe komory próżniowe przydatne do wykorzystania w UWPS pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Komory próżniowe dla UWPS: a) komora z zestykiem spiralnym i polem radialnym, b) komora z ferrozestykiem i polem osiowym. 1 - przyłącza napędów, 2 - przyłącza elektryczne obwodów do styków ruchomych, 3 – mieszki, 4 - izolatory, 5 – przyłącza zespołowe komór (elektryczne 5 razem z zawieszeniem 6), 7 – prowadnice, 8 - pokrywy, 9 – ekrany, 10 - styki ruchome, 11 - styki nieruchome, 12 - stalowy korpus cylindryczny, 13 - podkowiaste elementy stalowe kształtujące pole magnetyczne.

Formy łuku próżniowego oraz wpływ pola magnetycznego radialnego i osiowego na łuk pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Zestyki komór próżniowych dla UWPS: a) zestyki spiralny i koronowy generujące pole radialne ze składową styczną do zestyku, nie mającą wpływu na łuk dyfuzyjny i powodującą obwodowe wirowanie łuku przewężonego; b) zestyk zwojowy oraz ferrozestyk, generujące pole osiowe zwiększające prąd graniczny przemiany łuku dyfuzyjnego w łuk przewężony.

Własności łuku dyfuzyjnego mają podstawowe znaczenie dla wykorzystania komór próżniowych w UWPS. Przy dużych prądach pojawiający się łuk przewężony z aktywną anodą stwarza ryzyko niewyłączenia zwarcia przy dużych stromościach sprowadzania prądu stałego do zera.

4.2. MAKROSKOPOWE WŁAŚCIWOŚCI PRÓŻNIOWEGO ŁUKU DYFUZYJNEGO

Podstawowe warunki występowania łuku dyfuzyjnego

$$\textbf{a)}\ i_ł \le i_g \approx \sim 9\ \text{kA}, \qquad \textbf{b)}\ D/d > 2 \qquad \textbf{c)}\ d \ge d_k \qquad (1)$$

gdzie: $i_ł$ - prąd łuku, i_g – graniczny prąd łuku dyfuzyjnego, D - średnica styków, d - odległość styków, $d_k \approx (0{,}1 \div 0{,}3)$ mm - odległość krytyczna styków, przy której dla d↑ stadium przejściowe przechodzi w łukowe. Jak wynika z rys. 4b, graniczny prąd łuku dyfuzyjnego i_g może być większy w osiowym polu magnetycznym.

Najważniejsze cechy łuku dyfuzyjnego Średnie napięcie łuku jest zawarte w granicach: $u_a = (10 \div 27)$ V ≈ const, przy stanie elektrod: katoda - aktywna, anoda – pasywna. Środowiskiem wyładowczym są pary metalu emitowane z katody. Struktura wyładowania jest wielokanałowa, struktura każdego kanału to stożek plazmy o kącie wierzchołkowym ω_K przy katodzie. Przepływ plazmy w kanale jest dyfuzyjny (bezzderzeniowy). Prąd i_a każdego kanału łukowego i liczba kanałów *n* są zawarte w granicach:

$$\textbf{a)}\ i_{a0} < i_a < i_{am}, \qquad \textbf{b)}\ n \approx i_ł / i_{am} \qquad (2)$$

gdzie: i_{a0} - prąd progowy istnienia plamki katodowej, i_{am} - prąd rozpadu plamki katodowej; dla i_a↓ przy $i_a < i_{a0}$ kanał zanika, dla i_a↑ przy $i_a > i_{am}$ kanał dzieli się na dwa kanały; ***n*** - liczba jednocześnie istniejących kanałów; $i_ł$ - prąd łuku.

Parametry u_a, i_{a0} oraz i_{am} są cechami materiału katody. Ruch kanałów jest szybki, bezładny, po całej powierzchni styków. Erozja styków jest równomierna, brak lokalnych ognisk termicznych na anodzie. Wytrzymałość powrotna próżni

Jeżeli materiał styków nie zawiera składników niskotopliwych i jeżeli jest:

$$\omega_A > \omega_k \text{ oraz } p_A < p_k \quad (3), \text{ to jest:} \quad \rho_{t+} < \rho_k \text{ oraz } d_s > d \quad (4),$$

gdzie: ω_A – kąt bryłowy tworzony przez powierzchnię anody względem środka katody, ω_k - jego wartość krytyczna, p_A - gęstość mocy doprowadzanej do powierzchni anody, p_k - jej wartość krytyczna, ρ_{t+} - początkowa gęstość plazmy połukowej, ρ_k - wartość krytyczna gęstości plazmy, poniżej której średnia droga swobodna atomów d_s staje się większa od odległości styków d.

Wówczas wytrzymałość powrotna przerwy zestykowej w komorze próżniowej:

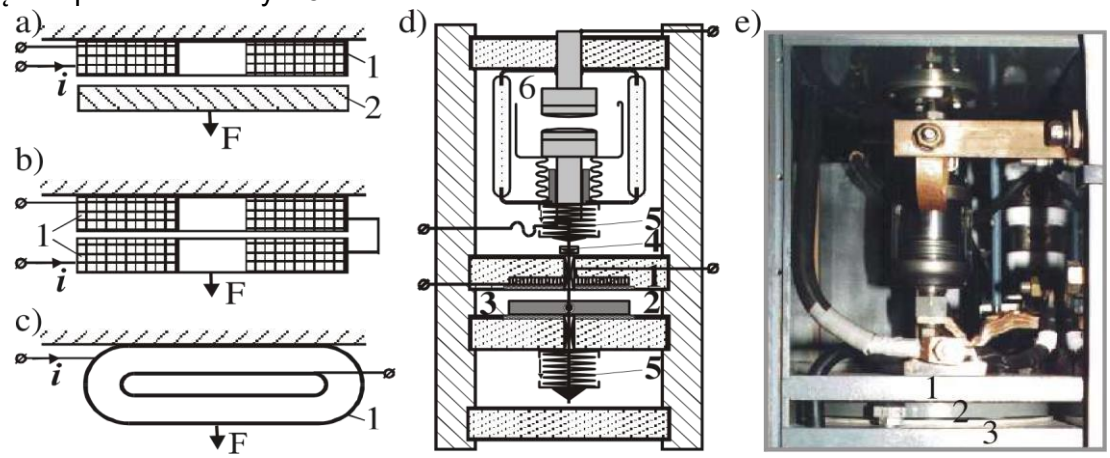
$$u_{zt+} = u_{ps} = K\,d \qquad (5)$$

gdzie: u_{zt+} - początkowa wytrzymałość powrotna, u_{ps} - statyczna wytrzymałość elektryczna zimnej przerwy próżniowej, K - statyczne natężenie przeskoku w próżni.

W takich warunkach po chwili dojścia prądu do zera wytrzymałość powrotna skokowo wzrasta do wytrzymałości statycznej zimnej przerwy próżniowej. Wyłączanie prądu stałego może więc się odbywać przy relatywnie małych odległościach styków, jeśli wartość prądu nie jest zbyt duża. Przy typowych dla większości obwodów trakcyjnych początkowych stromościach wzrostu prądu zwarciowego do 5 kA/ms osiągnięcie wartości i_g następuje po niespełna 2 ms. Czas ten determinuje parametry kinetyczne organu ruchomego członu zestykowego.

4.3. ULTRASZYBKI NAPĘD WYŁĄCZNIKA

Dla uzyskania możliwie małych czasów własnych organów ruchomych UWPS niezbędne jest stosowanie impulsowych napędów NI wielkiej mocy. Zasady działania i budowę takich napędów pokazano na rys. 5



Rys.5. Napędy impulsowe: a – c – zasady działania, d) budowy, d) komora próżniowa z NID. Opis w tekście.

Szczególnie przydatne są tu napędy indukcyjno – dynamiczne NID, w których metalowy dysk 2 pracujący jako zwój zwarty jest odrzucany od cewki napędowej 1 przez którą przepływa impuls wielkoprądowy wytwarzany przez rozładowanie kondensatora (rys. 5a), albo napędy elektrodynamiczne dwucewkowe (rys. 5b) lub z jedną cewką rozprężną (rys. 5c). Badania wykazały, że w praktyce do współpracy z komorami próżniowymi najlepiej nadają się napędy indukcyjno – dynamiczne NID jako najbardziej niezawodne, charakteryzujące się prostotą budowy i relatywnie dużą trwałością mechaniczną. NID potrafią krótkotrwale wytwarzać wielkie siły nadające organom ruchomym UWPS, w zależności od ich masy, przyspieszenia nawet rzędu $10^4 \div 10^6$ m/s^2.

Zasady budowy NID i sposób współpracy z komorą próżniową pokazano na rys. 5d. Dysk połączony jest z komorą prostym prętem napędowym ze sprzęgnikiem 4 oraz zamkiem 5 utrzymującym komorę 6 w stanie otwarcia. Napęd prostowodowy styku ruchomego jest najkorzystniejszy dla komory próżniowej ze względu na minimalizację udarowych narażeń mechanicznych podczas pracy wyłączeniowej. Przykładowe wykonanie fragmentu próżniowego członu wyłączającego pokazano na rys 5e. W komorach próżniowych stosowanych w UWPS wymagana jest przerwa zestykowa tylko do 2mm. Zastosowano bezprzechyłowy system współpracy styku ruchomego komory 6 z NID, wymuszającym duże przyspieszenie początkowe i dużą średnią prędkość organu ruchomego, rzędu 1 ÷ 2 m/s.

Dzięki temu czas własny otwierania wyłącznika jest rzędu 0,5 ms. Czasy wyłączania są bardzo krótkie, do 3 ms.

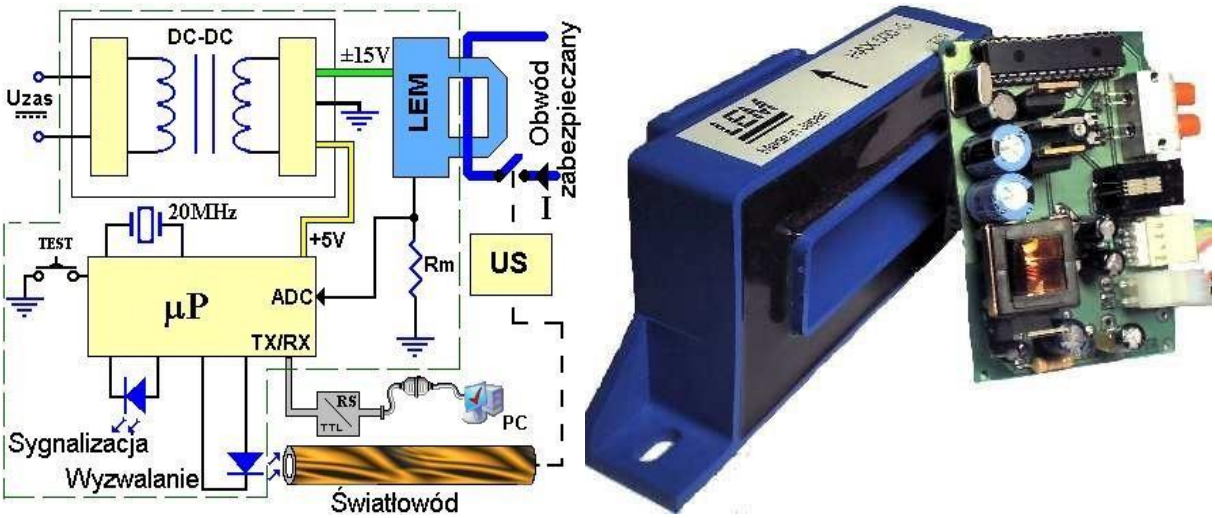
4.4. PRZEKAŹNIK NADPRĄDOWY WYŁĄCZNIKA PIW

W próżniowych UWPS stosowane były dotychczas przekaźniki nadprądowe z czujnikiem kontaktronowym, montowane na szynie włączonej w tor główny wyłącznika. Charakteryzują się one dużą skutecznością i niezawodnością działania, ale ich wadą jest zbyt mała szybkość selektywność działania. Zwykle w obwodach dopuszcza się występowanie krótkotrwałych przeciążeń i żeby uniknąć w tych przypadkach niepotrzebnego zadziałania wyłącznika trzeba zwiększyć wartość prądu zadziałania przekaźnika. Powoduje to wydłużenie czasu reakcji wyłącznika na prądy zwarciowe i zwiększenie wartości prądu ograniczonego, co w przypadku UWPS wykorzystujących zasadę WPP stwarza konieczność zwiększania energii generatora przeciwprądu niezbędnej do wyłączenia zwarcia.

Szybki rozwój IT stworzył nowe możliwości wyeliminowania tych wad za pomocą mikroprocesorowego, wielofunkcyjnego przekaźnika nadprądowego PIW, o znacznie lepszych możliwościach kształtowania charakterystyk czasowo – prądowych w zakresie prądów przeciążeniowych i zwarciowych. Dostępne są na rynku odpowiednie elementy i podzespoły. Opracowanie nowego oprogramowania odpowiadającego potrzebom elektrotrakcji jest wyłącznie problemem merytorycznym, nie technicznym. Można także wykorzystać do tego celu sterownik programowalny z odpowiednimi podzespołami wykonawczymi.

Wykorzystanie progowo – stromościowej metody detekcji zwarć przez PIW umożliwia: identyfikację prądu zwarciowego za pomocą analizy stromości wzrostu prądu, natychmiastowe zadziałanie po przekroczeniu przez prąd zwarciowy wartości prądu nastawczego, opóźnione zadziałanie w zakresie przeciążeń, w dużym zakresie czasów nastawczych, komputerową regulację wszystkich parametrów nastawczych z zewnętrznego PC.

Wczesne wykrywanie krytycznych stromości prądu jest pożądane dla znacznego zmniejszenia prądu ograniczonego, szczególnie w przypadkach gdy początkowe stromości wzrostu prądu zwarciowego są duże (rzędu ≥ 5 A/μs). Taki PIW musi być przystosowany do współpracy ze sterownikami opisanych w p. 5 UWPS typu UV lub UH. Musi współpracować z każdym wyłącznikiem o wyposażeniu uzupełnionym o odpowiednie elementy wykonawcze. W wyłącznikach przewidywanych do retrofitu w zakresie niniejszego wniosku PIW tego typu został opracowany i wykonany z uwzględnieniem najnowszych wówczas technologii stosowanych takich w układach na świecie. Podstawowym elementem PIW jest mikroprocesor firmy MicroChip. W pojedynczym układzie scalonym znajduje się jednostka centralna, pamięć programu, pamięć danych, 10-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe, asynchroniczny interfejs szeregowy oraz układ zabezpieczeń. Dzięki dużej integracji bloków funkcjonalnych w jednym układzie scalonym, uzyskano dobre parametry dynamiczne procesu rejestracji i przetwarzania wejściowego sygnału prądowego. Nadto PIW wyposażono w konwerter poziomów dla standardu RS232 oraz interfejs światłowodowy. Schemat blokowy i zdjęcie PIW pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy przekaźnika oraz jego zdjęcie wraz z czujnikiem prądu.

Przekaźnik jest urządzeniem w pełni konfigurowalnym. Nastawie podlegają poziomy prądów, czasy opóźnień, parametry czujnika, parametry impulsu wyzwalającego oraz ograniczenia stromościowe di/dt. Ze względu na dość dużą liczbę nastaw i skomplikowane obliczenia związane z wyznaczaniem logarytmicznych charakterystyk przeciążeniowych, całość konfiguracji odbywa się za pośrednictwem komputera PC. Wszystkie parametry przekaźnika zapisywane są na stałe w pamięci mikroprocesora. Za pomocą komputera można również śledzić na bieżąco wartości prądu płynącego w obwodzie. W tablicy 3 przedstawiono podstawowe dane techniczne przekaźnika.

Tablica 3. Dane techniczne przekaźnika PIW.

Lp	Parametr	Jednostka	Wartość parametru		
			min	typowa	max
1	Okres pomiarowy	µs	-	25	-
2	Szybkość reakcji na prąd zwarciowy	µs	30	-	50
3	Szybkość reakcji na stromość prądu zwarciowego	µs	65	75	90
4	Zasilanie (możliwy zakres projektowy)	V_{DC}	24	110	400
5	Czas trwania impulsu wyzwalającego	s	0.01	0.05	99
6	Czas opóźnienia impulsu wyzwalającego	-	100µs	-	835s
7	Błąd licznika czasu	%	-	2	4
8	Czas wymiany informacji w trybie monitorowania	ms	-	14	-
9	Zakres pracy stromościowej di/dt (Δt=25µs)	A/µs	-	5	10

Oprogramowanie konfiguracyjne zostało napisane w języku wysokiego poziomu i współpracuje z systemem Windows (9x,2000,XP). Wymiana informacji odbywa się kanałem szeregowym z prędkością 19200Bd.

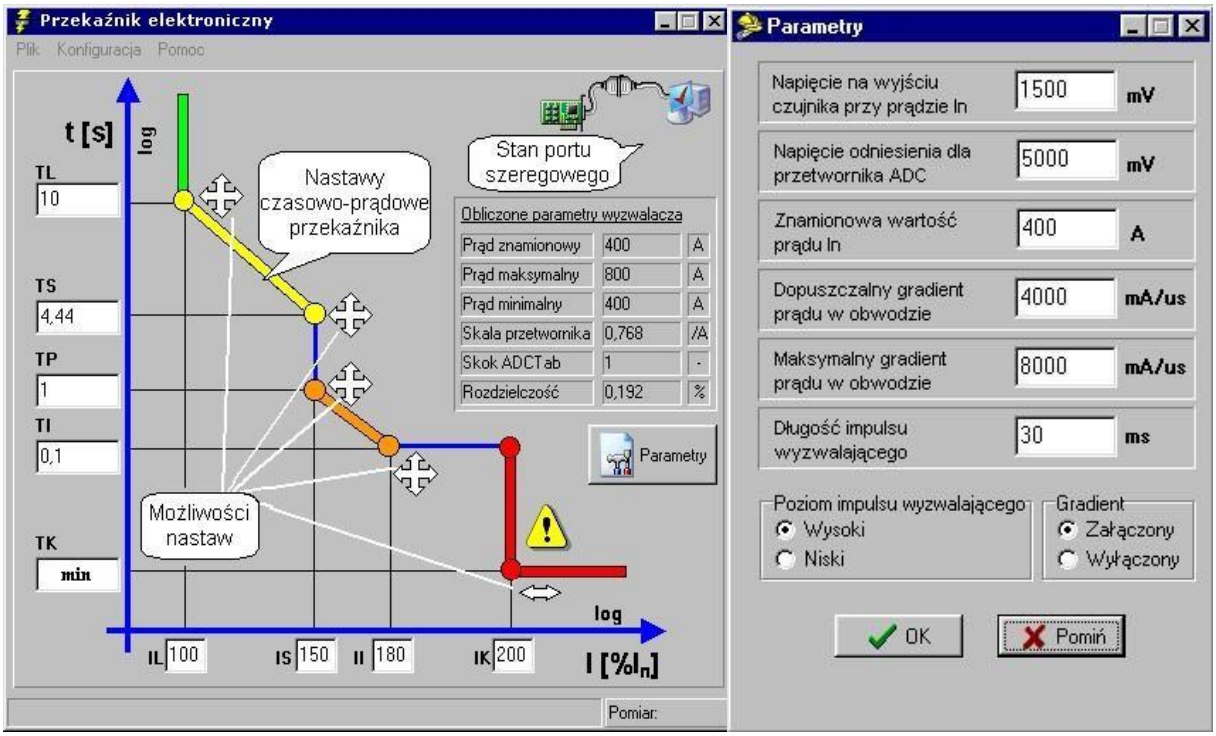
Program umożliwia: wprowadzanie danych dla czujnika prądu,

dobór skali prądu poprzez zmiany skali przeliczenia napięcia z

czujnika na prąd, zmiany wartości napięcia odniesienia dla przetwornika, zmiany długości i poziomu trwania impulsu wyzwalającego, zmiany minimalnej i maksymalnej wartości di/dt identyfikującej zwarcie, wybór trybu pracy (załączenie/wyłączenie trybu pracy stromościowej), zmiany (pięciopunktowe) nastaw przeciążeniowych charakterystyk czasowo – prądowych, zapis (odczyt) danych do pliku danych konfiguracyjnych.

Wprowadzenie kolejnych parametrów jest kontrolowane przez program i w momencie wykrycia błędu pojawia się odpowiedni komunikat, np. przy podaniu wartości prądu I_k poza zakresem pomiarowym czujnika itp.

Na rys. 7 przedstawiony został wygląd podstawowych okien oprogramowania konfiguracyjnego.



Rys. 7. Graficzny interfejs oprogramowania konfiguracyjnego.

►Oczekiwane efekty retrofitu PIW.

- Planowany retrofit PIW będzie realizowany przy zachowaniu wszystkich przydatnych dotychczas cech funkcjonalnych i przy możliwie małych zmianach wymagań manipulacyjnych i oglądu zewnętrznego, do których przyzwyczajeni są użytkownicy.

- Pojawiły się w międzyczasie nowe mikroprocesory o lepszych parametrach i zabezpieczeniach, zwłaszcza o dużej odporności na zakłócenia; alernatywę tworzą sterowniki programowalne; decyzje mogą zostać podjęte w wyniku badań przeprowadzonych w trakcie 1. etapu EPR.

- Oprogramowanie wymaga nowego opracowania wobec zmian topologii wyłącznika i retrofitu wielu podzespołów wyłącznika. Szczególnie trudnym przypadkiem dla

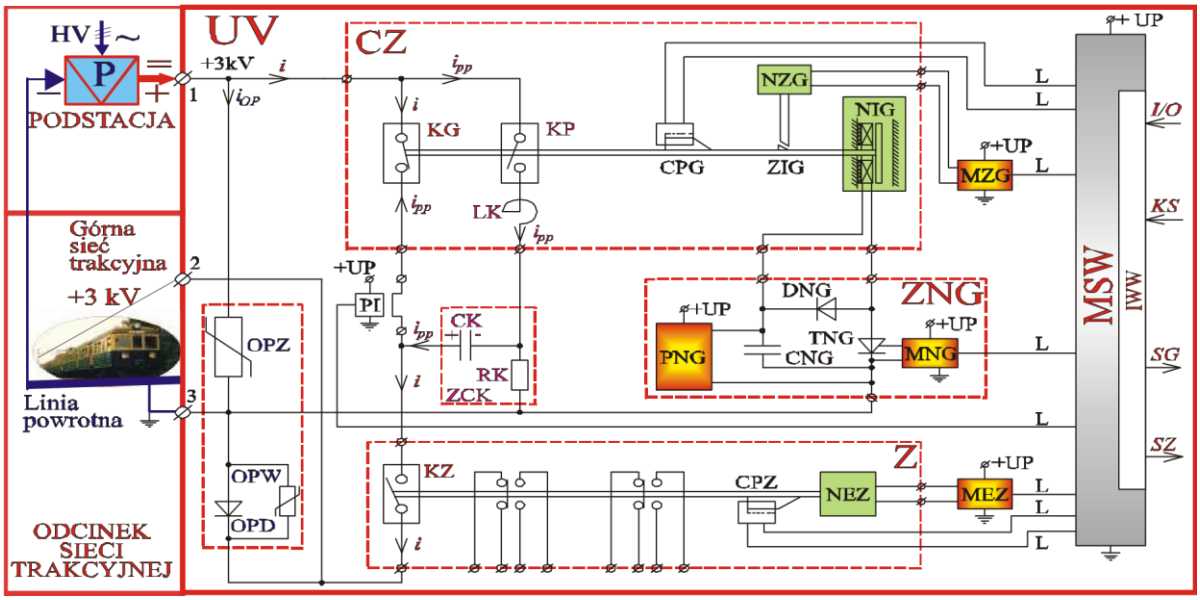
każdego wyłącznika, jakkolwiek rzadkim, jest załączanie obwodu zwartego. Zastosowanie nowego algorytmu stromościowego identyfikacji zwarć, jak wykazały prace przygotowawcze do projektu, przy stromościach początkowych wzrostu prądu zwarciowego rzędu ≤ 2 kA/ms, pozwoli uzyskać skrócenie czasu wyłączania i zmniejszenie prądu ograniczonego w stosunku do wcześniejszych rozwiązań, w tym z przekaźnikiem kontaktronowym, a nadto poprawę selektywności działania.

- Oczekiwane czasy reakcji na przekroczenie wartości nastawczych prądu to ok. 30 μs, a na przekroczenie stromości jego wzrostu to ok. 85μs.

- Elastyczność konfiguracyjna PIW przewyższy możliwości analogicznych układów dotychczas stosowanych.

5. OGÓLNA BUDOWA I DZIAŁANIE WYŁĄCZNIKÓW TYPU UV ORAZ UH

Budowę i działanie UWPS typu UV opisano na przykładzie próżniowego wyłącznika SN o schemacie blokowym pokazanym na rys. 8 (układ z komutacją wymuszoną).

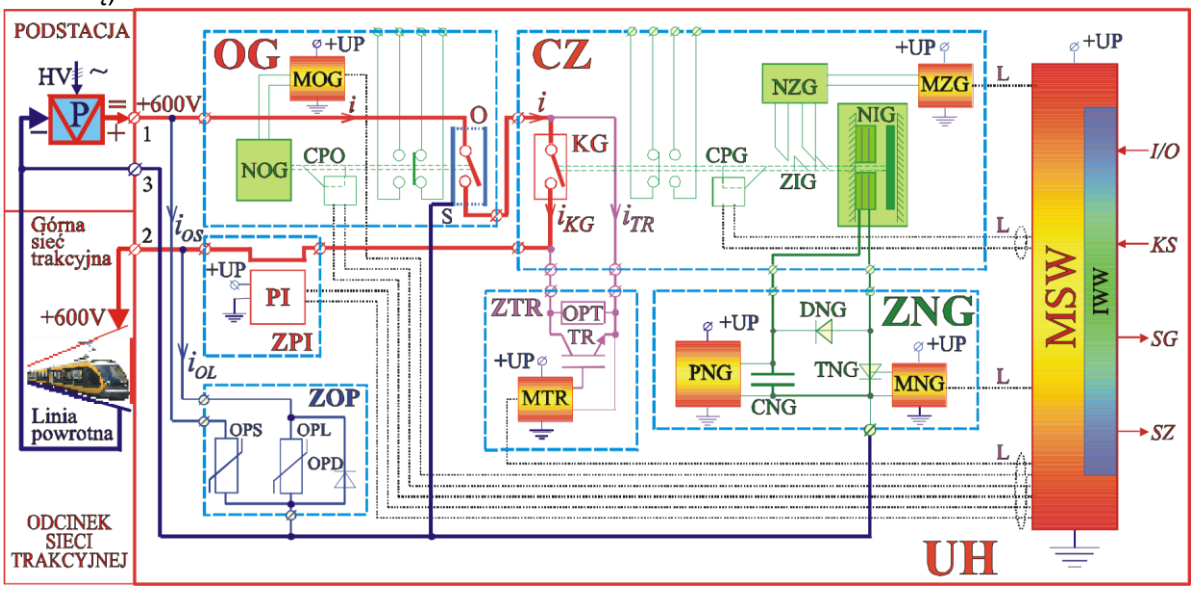


Rys. 8. Uproszczony schemat ideowo blokowy wyłącznika UV. CZ - człon zestykowy: KG - komora próżniowa główna (wyłączająca), KP - komora próżniowa pomocnicza (załączająca przeciwprąd), NIG - napęd indukcyjno - dynamiczny, ZIG - zamek napędu NIG, NZG - napęd zamka ZIG, CPG - czujnik położenia członu CZ; ZNG - zespół zasilania napędu NIG: CNG - kondensator, PNG - przetwornica do ładowania kondensatora CNG, DNG - dioda, TNG - tyrystor; Z - załącznik: KZ - komora próżniowa załączająca (obwód główny), NEZ - napęd elektromagnesowy załącznika, CPG - czujnik położenia załącznika Z; ZCK - zespół kondensatora komutacyjnego: CK - kondensator komutacyjny, RK - opornik do ładowania kondensatora CK; LK - dławik komutacyjny; ograniczniki przepięć: OPZ - zewnętrznych, OPW - wewnętrznych, OPD - układ diod rewersyjnych; MSW - mikroprocesorowy sterownik wyłącznika, IWW - interfejs wejście / wyjście, , PI - przekaźnik nadprądowy; UP - napięcie pomocnicze, *i* - prąd główny, i_{pp} - przeciwprąd, i_{OP} - prąd wyładowczy ogranicznika przepięć; L - łącza światłowodowe; 1, 2, 3 - zaciski przyłączowe główne; sygnały: *I/O* - zespolony s. sterujący załącz/wyłącz, *KS* - s. kasowania sygnału wyłączenia zwarcia *SZ*, *SG* - s. stanu gotowości.

W stanie początkowym komora załączająca KZ oraz komora KP są otwarte, a komora KG zamknięta. Kondensator CK ładuje się do napięcia sieci trakcyjnej, a kondensator CNG do napięcia roboczego o kontrolowanej wartości, przygotowując wyłącznik do pracy. Po podaniu sygnału załączającego *I* następuje zamknięcie załącznika Z, który załącza obwód główny. Prąd zwarciowy *i* wzrasta, po zadziałaniu przekaźnika nadprądowego PI napęd NIG otwiera komorę KG oraz zamyka z zadanym opóźnieniem komorę KP załączającą przeciwprąd i_{pp} sprowadzający prąd *i* w komorze KG do zera. Zamek ZIG napędu NIG członu zestykowego CZ blokuje komory w tym położeniu przez zadany czas.

Kondensator CNG jest ponownie ładowany przez przetwornicę PNG bezpośrednio po zadziałaniu napędu NIG. Po przejęciu całego prądu zwarciowego przez obwód przeciwprądu KP - LK - CK na kondensatorze CK występuje przepięcie łączeniowe, likwidowane przez ograniczniki przepięć OPZ, OPW i OPD. Następnie z zadanym opóźnieniem bezprądowo otwiera się komora załączająca KZ, po czym otwiera się zamek ZIG napędu NIG członu zestykowego CZ powodując otwarcie komory KP, zamknięcie komory KG oraz ponowne naładowanie kondensatora CK. Wówczas wyłącznik jest przygotowany do kolejnego załączenia obwodu. Niezależnie od warunków układowych i sposobu sterowania, wyłączanie prądu przebiega podobnie w każdych warunkach obwodowych.

Budowę i działanie UWPS typu UH opisano na przykładzie hybrydowego wyłącznika próżniowo - tranzystorowego NN o schemacie blokowym pokazanym na rys. 9 (układ z komutacją naturalną).



Rys. 9. Schemat blokowy wyłącznika hybrydowego próżniowo – tranzystorowego.
Zaciski przyłączowe: 1 - z. wejściowy, 2 - z. wyjściowy, 3 - z. uziomowy; OG - zespół odcinacza: O - łącznik powietrzny, S - uziemiony ekran, NOG - napęd elektromagnesowy; CZ zespół wyłączający: KG - komora próżniowa, NIG - napęd indukcyjno - dynamiczny, NZG napęd elektromagnesowy zamka ZIG; czujniki położenia: CPO - napędu NOG, CPG - napędu NIG; ZNG - zasilacz napędu NIG: PNG - przetwornica, CNG - kondensator, DNG - dioda, TNG - tyrystor; ZTR zespół tranzystora: TR - tranzystor IGBT, OPT - ogranicznik przepięć; ZPI - zespół przekaźnika nadprądowego PI; ZOP - zespół ograniczników przepięć: OPD - diodowy o. p., OPL - o. p. zewnętrznych, OPS - o. p. wewnętrznych; MSW - mikroprocesorowy sterownik wyłącznika ze światłowodową transmisją sygnałów, IWW - interfejs wejście / wyjście, L - światłowody; sterowniki: MOG - s. napędu NOG, MZG - s. napędu NZG, MNG - s. napędu NIG, MTR - s. tranzystora TR; zewnętrzne sygnały sterujące: *I/O* - zespolony s. ZAŁ/WYŁ, *I* - s.

załączający, *O* - s. wyłączający, *SG* - s. stanu gotowości, *SZ* - s. wyłączenia zwarcia, *KS* - s. kasowania s. *SZ*; P - podstacja trakcyjna; prądy: *i* - p. główny, i_{OL} oraz i_{OS} - p. ograniczników przepięć, i_{KG} - p. komory próżniowej, i_{TR} - p. tranzystora; napięcia: +600 V, $U_=$ - n. zasilające, UP - n. pomocnicze, HV - wysokie n.; u_A - n. łuku w komorze KG,

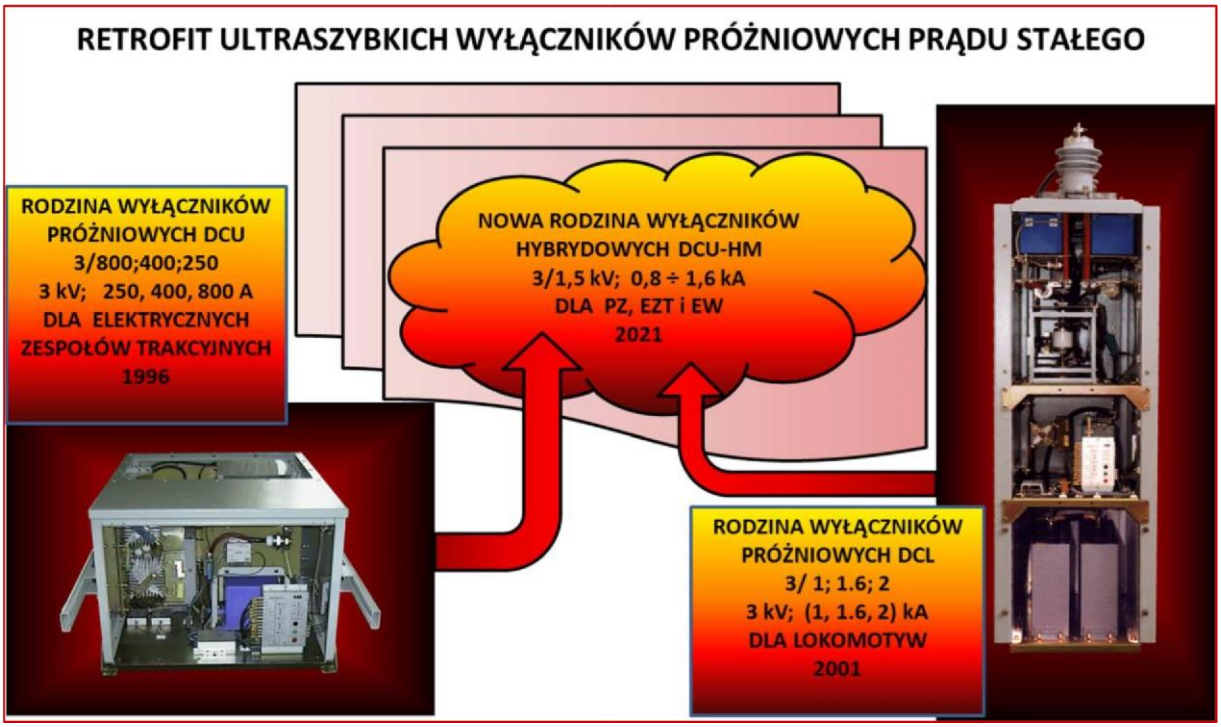
W stanie początkowym komora KG i odcinacz O są otwarte, a zamek ZIG zamknięty. Jeśli do wyłącznika dołączone jest napięcie pomocnicze UP, przetwornica PNG ładuje kondensator CNG do napięcia roboczego o wartości stabilizowanej, przygotowując wyłącznik do pracy. Bezpośrednio po podaniu sygnału załączającego *I* sterownik MSW uruchamia napęd NOG zamykający odcinacz O oraz, z zadanym opóźnieniem, napęd NZG zamka ZIG powodujący jego otwarcie, zamknięcie się komory KG oraz załączenie obwodu głównego. W przypadku całkowitego lub częściowego zwarcia odbiorników prąd zwarciowy *i*, płynąc przez główny tor prądowy od zacisku przyłączowego 1 do zacisku przyłączowego 2, powoduje zadziałanie przekaźnika nadprądowego PI, wskutek czego sterownik MSW załącza tyrystor TNG uruchamiając napęd indukcyjno - dynamiczny otwierający komorę KG. Po osiągnięciu przez styk ruchomy komory próżniowej KG wymaganej odległości styków determinującej wytrzymałość powrotną, czujnik położenia CPG wysyła impuls powodujący uruchomienie przez sterownik MSW sterownika tranzystora MTR, który impulsowo załącza tranzystor TR. Tranzystor ten przejmuje cały prąd zwarciowy na krótki czas wystarczający do zgaszenia łuku i wzrostu wytrzymałości powrotnej w komorze próżniowej KG, po czym jest wyłączany.

Wzrastające przepięcie łączeniowe powoduje przejęcie prądu głównego przez system ograniczników przepięć OPS i OPL oraz rozładowanie energii magnetycznej zawartej w indukcyjnościach podstacji oraz sieci trakcyjnej. Energia magnetyczna ewentualnie zawarta w odbiornikach, zwłaszcza w silnikach trakcyjnych jest rozładowywana przez diodę rewersyjną OPD. Po zadanym czasie bezprądowo otwiera się odcinacz O. Otwarcie wyłącznika w warunkach roboczych następuje po podaniu do sterownkia SMP sygnału wyłączającego *O*. Wyłączanie prądu przebiega wówczas analogicznie. W przypadku odwrotnej biegunowości sieci tranzystor TR i dioda OPD wymagają odpowiedniego przełączenia.

6. ZASTOSOWANIA

UWPS są wynikiem połączenia nowych zasad działania i nowych koncepcji budowy układów wyłączających. W szczególności szybki postęp w dziedzinie warystorów z tlenków metali, półprzewodnikowych elementów mocy oraz impulsowych napędów wielkiej mocy, zwłaszcza indukcyjno - dynamicznych, stworzył nowe możliwości budowy UWPS. Mogą one być wykorzystywane we wszystkich dotychczasowych zastosowaniach MWPS. Skrajnie szybkie działanie UWPS powoduje niezwykle skuteczne ograniczanie prądów zwarciowych bez niebezpiecznych przepięć łączeniowych, eliminowanych przez autonomicznie działające ograniczniki przepięć.

Na rys. 10 przedstawiono nową generację UWPS oraz zakres podstawowych parametrów znamionowych charakteryzujących każdą z rodzin wyłączników oraz zamierzony wynik retrofitu.



Rys. 10. Nowa rodzina wyłączników hybrydowych DCU-HM 3/1,5 kV; 0,8 ÷ 1,6 kA dla PZ, EZT i EW jako wynik retrofitu.

W stosunku do typowych wyłączników magnetowydmuchowych, UWPS typu DCU i DCL w przybliżeniu mają graniczny zwarciowy prąd wyłączalny znacząco większy przy dużych stałych czasowych (przykładowo 100 kA przy 20 ms; 150 kA przy 30 ms), czas otwierania - ponad 5 - krotnie mniejszy, czas wyłączania - ponad 10 - krotnie mniejszy, prąd ograniczony - ponad 3 - krotnie mniejszy, współczynnik ograniczania prądu - ponad 3 - krotnie mniejszy, maksymalną energię magnetyczną obwodu - ponad 10 - krotnie mniejszą, całkę Joule'a - ponad 30 - krotnie mniejszą, energię łuku wydzielaną w wyłączniku - ponad 3000 - krotnie mniejszą.

Szczegółowe oszacowanie ww. i innych wskaźników **po retroficie**, dla DCU-HM w różnych warunkach układowych, podano w cz. III, p. 3 wniosku. Przewaga techniczna DCU-HM nad WM zwiększy się szczególnie **w typowych warunkach sieciowych** istniejących w liniach PKP.

Przy tak małych wartościach energii łuku erozja łukowa komór próżniowych i styków praktycznie nie ogranicza trwałości łączeniowej nawet w warunkach zwarciowych. Wyłączniki magnetowydmuchowe zazwyczaj mogą wyłączyć zwarcie tylko kilkadziesiąt razy, a prąd roboczy 500 ÷ 1000 razy. UWPS mogą wyłączyć zwarcie ponad 10000 razy, tj. ich zwarciowa trwałość łączeniowa jest i po retroficie pozostanie w DCU-HM zbliżona do trwałości mechanicznej. Jeżeli okaże się możliwe technicznie i opłacalne ekonomicznie wykorzystanie komór próżniowych o większej trwałości mechanicznej (do 30 000 cykli przestawieniowych), to odpowiednie wskaźniki ulegną zmianom, zawsze korzystnym dla UWPS. Są komory próżniowe o takiej trwałości dla wyłączników AC, ale warunki dodatkowe dla DC to zestyki z polem osiowym (zapewniającym występowanie tylko łuku dyfuzyjnego, patrz wyżej p. 4.1 rys. 4). Ze względu na małe wartości całki Joule'a UWPS skutecznie zabezpieczają elementy półprzewodnikowe o prądach ciągłych $I_{th} \geq 250$ A. Jest to równoznaczne z pokonaniem ważnej bariery ograniczającej zastosowania półprzewodnikowych układów w napędach trakcyjnych oraz innych układach przemysłowych prądu stałego. Po retroficie skuteczność tej ochrony znacząco się zwiększy ($I^2t \leq 70\ 000\ A^2s$), tj. skutecznie mogą być zabezpieczane elementy półprzewodnikowe o prądach ciągłych $I_{th} \geq 150$ A.

Relatywnie niskie i praktycznie niezmienne poziomy ograniczania przepięć, w połączeniu z małymi wartościami prądu ograniczonego sprawiają, że w przypadku użycia UWPS liczba awarii oraz ich skutki znacząco zmaleją. UWPS nie mają zakresu prądów krytycznych i nie wymagają strefy ochronnej. Do ich budowy użyto neutralnych środowiskowo materiałów i najlepszych jakościowo podzespołów dostępnych na rynku. Dlatego są one bezobsługowe w granicach trwałości mechanicznej. Są również bezkonkurencyjne pod względem neutralności środowiskowej. Wyłączniki spełniają na poziomie światowym wszystkie wymagania właściwych norm krajowych i międzynarodowych zarówno z zakresu elektrotechniki, jak i ochrony środowiska.

UWPS w pełni odpowiadają potrzebom elektrotrakcji, cechując się przy tym zdecydowaną przewagą techniczną i konkurencyjnością ekonomiczną w stosunku do istniejących wyłączników magnetowydmuchowych.

Oszczędności z tytułu ich eksploatacji będą się kumulowały głównie u użytkowników. W zakresie konkurencyjnych MWPS można odnotować w minionych latach relatywnie niewielki postęp, nie noszący jednak cech innowacji przełomowej, niemożliwej do osiągnięcia przy znanej zasadzie ich działania. Jest wynikiem postępu w zakresie materiałów elektrotechnicznych i uproszczeń konstrukcyjnych dla obniżenia ceny sprzedaży. Towarzyszy temu lobbing mający na celu wymuszanie traktowania tej ceny jako głównego kryterium konkurencyjności rynkowej (patrz cz. III, p. 2 wniosku), przy marginalizowaniu kryteriów merytorycznych.

Program realizacji ultraszybkich wyłączników próżniowych był współfinansowany przez KBN, ABB Zwar S.A. oraz ZAE WOLTAN Sp. z o.o. Wyłączniki są produkowane od 1996 r., stopniowo zdobywały pozycję na rynku. Obecnie jest w eksploatacji ok. 450 wyłączników.

* * * * *

UZUPEŁNIENIA INFORMACJI

Niżej zamieszczono dotyczące ultraszybkich wyłączników próżniowych i hybrydowych DC:

►**PODSTAWOWE PUBLIKACJE** *(obce i własne, w układzie alfabetycznym, poz. 1 ÷ 68).*

►**PATENTY** *(w układzie chronologicznym, poz. P1 ÷ P9) i* znaki towarowe.

►**RAPORTY BADAWCZE** *(w układzie chronologicznym, poz. R1 ÷ R11).*

►**WYKAZ WYBRANYCH NORM TRAKCYJNYCH** *(w 2 grupach, w układzie numerycznym, poz. N1 ÷ N18).*

►**OGÓLNE INFORMACJE O ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKACH TRAKCYJNYCH,** → w nim: **MIĘDZYNARODOWE I KRAJOWE NAGRODY DLA ULTRASZYBKCH WYŁĄCZNIKÓW TRAKCYJNYCH PODSTAWOWE PUBLIKACJE, RAPORTY I NORMY DOTYCZĄCE ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH I HYBRYDOWYCH DC**

PUBLIKACJE
(w układzie alfabetycznym).

1. Anshuman Shukla, Georgios D. Demetriades. A Survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 2, April 2015, pp. 627 – 641.
2. Bartosik M., Dmuchowski P., Lasota R., Wójcik F.: *Nowa generacja układów sterowania dla ultraszybkich wyłączników próżniowych prądu stałego*. Materiały konferencyjne: XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i V Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2008, Zakopane.
3. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Arcless DC hybrid circuit breaker. Proceedings of the 8th International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Łódź, Poland, 1997, pp. 115-119.
4. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *DCV 3/400;250. Ultraszybkie wyłączniki próżniowe prądu stałego*. Technika Transportu Szynowego "tts" nr 11, 1996.
5. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Direct current-limiting vacuum circuit breaker. Proceedings of the XIIth Symposium "Electrical Phenomena in Vacuum" ZEP-91, Scientific Fascicles, Elektryka ", No. 39, Technical University of Poznań, 1991.
6. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Modern DC circuit breakers. Technika Transportu Szynowego tts nr 9/2006.
7. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: New generation of D.C. circuit breakers. 3rd International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications (IC-ECAAA), Xian, P.R. China, 1997, pp. 349353.
8. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Niskonapięciowe wyłączniki hybrydowe typu DCH. Technika Transportu Szynowego ***tts***, nr 2, 1997.
9. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Nowa generacja ultraszybkich wyłączników ograniczających do pojazdów trakcji elektrycznej prądu stałego*. Technika Transportu Szynowego "tts", nr 7-8, 2000.
10. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Nowa generacja wyłączników prądu stałego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej "Elektryka", nr 44, 1997.
11. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Nowoczesne wyłączniki prądu stałego. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo – Technicznej „ŁĄCZNIKI '06". Pieczyska k / Koronowa, 16 – 18.05.2006.
12. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Próżniowy wyłącznik ograniczający DCV 3/400 dla trakcji kolejowej*. Materiały Konferencji Naukowej "SEMTRAK'96", Kraków-Zakopane, 1996.
13. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Series of ultra-high speed direct current vacuum circuit breakers DCV for railway traction. Technika Transportu Szynowego "tts" (Rail Transport Engineering), No. 6, 1994 (PL).
14. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Short-circuits switching off in traction circuits with the use of countercurrent. Proceedings of the Conference "Contribution of Science to Further Development of Electric Traction in Poland". Committee of Electrotechnics of Polish Academy of Sciences, Institute of Electrotechnics of Technical University of Warsaw, Warsaw, 1985 (PL).
15. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: The fastest all over the world ultra - high - speed d. c. hybrid circuit - breakers of DCH type for urban traction vehicles. Proceedings of the IXth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP&SAT'2001.
16. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *The most effective all over the world ultra - high - speed D. C. vacuum circuit - breakers of DCL type for locomotives*. Proceedings of the IXth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Part I, Conference Materials Łódź, Poland, 2001.
17. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Tramwajowe niskonapięciowe wyłączniki hybrydowe typu DCH. Technika Transportu Szynowego tts, No. 2, 1997, pp. 19-23.

18. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Ultra - high - speed d. c. vacuum circuit - breakers of DCV/DCU type for rail traction units*. Proceedings of the IXth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Part I, Conference Materials Łódź, Poland, 2001.

19. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Ultraszybkie wyłączanie zwarć w trakcyjnych obwodach prądu stałego*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej "Pojazdy Szynowe nowych generacji", EURO - TRANSPORT'99, Katowice, 1999. Technika Transportu Szynowego "tts", nr 5, 1999.

20. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Warystory tlenkowe jako wysokoenergetyczne ograniczniki przepięć łączeniowych w trakcji kolejowej*. Materiały Konferencji naukowej „Rozwój Systemów i Środków w Transporcie" TRANSSYSTEM'89, Warszawa, 1989.

21. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Wyłączanie przeciwprądem zwarć w obwodach trakcyjnych*. Materiały konferencji naukowej "Wkład nauki w dalszy rozwój trakcji elektrycznej w Polsce". Komitet Elektrotechniki PAN, Instytut Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1985 r.

22. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Wyłącznik hybrydowy DCH 0,8/400 dla trakcji miejskiej*. Technika Transportu Szynowego "tts", nr 1/2, 1999.

23. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Wyłączniki hybrydowe prądu stałego DCHT dla pojazdów trakcji miejskiej i zastosowań pokrewnych. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo–Technicznej, Łączniki 2012, Pieczyska k / Koronowa, 6–8.06.2012, pp. 7-26.

24. Bartosik M., Lasota R.,Wójcik F.: *Arcless D. C. hybrid circuit breaker*. Proceedings of the VIIIth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Łódź, Poland, 1997.

25. Bartosik M., Wójcik F.: *Switching arc energies in D.C. vacuum circuit breaker at countercurrent switching off.* Proceedings of the VIth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-89, Łódź, Poland, 1989.

26. Bartosik M., Wójcik F.: *Wybrane aspekty pracy komór próżniowych wyłączników ograniczających prądu stałego*. III Ogólnopolska Konferencja Naukowo - Techniczna "Elektrotechnika, elektronika i automatyka w transporcie szynowym" SEMTRAK-86, Kraków-Janowice, 1986r.

27. Bartosik M.: Direct current switching off in vacuum. Proceedings of the 6th International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-89, Postconference materials, Łódź, Poland, 1989, pp. 57-65.

28. Bartosik M.: *Progress in D. C. breaking*. Proceedings of the VIIIth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Part II, Postconference Materials Łódź, Poland, 1998.

29. Bartosik M.: *Theoretical and practical aspects of fault direct current switching off by countercurrent*. Proceedings of the International Conference on Electrical Contacts Arcs, Apparatus and Their Applications ECAAA/89, XI'an, China, 1989.

30. Bartosik M.: *Wybrane zjawiska przy wyłączaniu prądów przemiennych i stałych przez próżniowe i hybrydowe łączniki specjalne*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej „Elektryka", nr 29, 1985.

31. Bartosik Marek, Borkowski Piotr, Wójcik Franciszek: Nowa rodzina wyłączników DCHT dla tramwajów i trolejbusów. Konferencja Naukowo – Techniczna Aparatura Łączeniowa, Łączniki 2014, Fojutowo k/Tucholi, 7–9.05.2014 r. Materiały Konferencyjne, Stowarzyszenie Elektryków Polskich o/Bydgoszcz, 2014, pp. 69-90.

32. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: „Hybrydowy wyłącznik hiperszybki dla pojazdów trakcji miejskiej." Rozdział w monografii Politechniki Krakowskiej: Elektrotechnika w zastosowaniach trakcyjnych. Praca zbiorowa, red. Jagiełło Adam. Kraków, 2014, pp. 19-34.

33. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: Ultra-High-Speed D.C. Hybrid CircuitBreakers of DCNT Type for Substations of Urban and Mine Traction. Proc. of the 10th International Conference on Switching Arc Phenomena. Łódź, 2005, pp. 360-364

34. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: Uniwersalny wyłącznik próżniowy prądu przemiennego i stałego. Łączniki 2010. Bydgoszcz 2010.
35. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: Wielosystemowy wyłącznik trakcyjny do pojazdów kolejowych. TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO, 2010, nr 9.
36. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: Wielosystemowy wyłącznik trakcyjny dla lokomotyw. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK '2010. Kraków 2010.
37. Bartosik Marek, Lasota Ryszard, Wójcik Franciszek: Wyłączanie prądów wstecznych przez ultraszybkie wyłączniki próżniowe. POJAZDY SZYNOWE, 2009, rocznik, nr 4.
38. Ber P.: *System zasilania elektroenergetycznego w metrze*. Technika transportu szynowego ***tts*****,** nr 10/1995.
39. Bonhomme H., Defosse G., Kaczmarek B.: *The super high – speed circuit breaker*. ACEC – Review, No. 4, 1987.
40. Chang Peng, Alex Q. Huang, Xiaoqing Song, Current commutation in a medium voltage hybrid DC circuit breaker using 15 kV vacuum switch and SiC devices. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, 15-19 March 2015, DOI: 10.1109/APEC.2015.7104661, pp. 2244-2250.
41. Chen Ke, Jiang Daozhuo, Du Yi, Fan Yu, Zhou Yang, Parameter designing of the DC hybrid circuit breaker. IEEE 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, Hunan, 15-16 June 2014, DOI:10.1109/ISDEA.2014.160, pp. 706-709.
42. Dirk Bösche, Ernst-Dieter Wilkening, Hendrik Köpf, Michael Kurrat. Breaking Performance Investigation of Hybrid DC Circuit Breakers: An Experimental Approach. IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, CA, 11-14 Oct. 2015, DOI:10.1109/HOLM.2015.7355084, pp. 117-123.
43. Drążek Z., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Zasilanie dwustronne w trakcji miejskiej*. Technika transportu szynowego ***tts***, nr 02/1996.
44. Giziński Z.: *Tyrystorowy GTO układ regulacji tramwaju 116N*. Technika transportu szynowego ***tts***, nr 3/1998.
45. Greenwood A. N., Barkan P., Kracht W. C.: HVDC vacuum circuit breakers. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 91, No. 4, 1972, pp. 1575 - 1588.
46. Hasan S., Lipski T., Pikoń M., Wittstock J., Żyborski J.: *A hybrid current limiting device for DC circuit protection*. Proceedings of the International Conference on "Power Electronics, Motion Controls and Associated Applications" PEMC'94, Warsaw, Poland, 1994.
47. Instytut Elektrotechniki. Oferta handlowa – IV. Wyroby elektrotechniczne. *Szybkie wyłączniki trakcyjne typu WST-3*. http://ww.w.iel.waw.pl/strony/oferta.htm (z 4.6.2010).
48. J. Zyborski, T. Lipski, J. Czucha, S. Hasan. Hybrid Arcless Low-Voltage AC/DC Current Limiting Interrupting Device. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 1182-1187.
49. Jean-Marc Meyer and Alfred Rufer, Fellow, IEEE. A DC Hybrid Circuit Breaker With UltraFast Contact Opening and Integrated Gate-Commutated Thyristors (IGCTs). IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006, pp. 646-651.
50. Jesper Magnusson, Ara Bissal, Goran Engdahl, Juan A. Martinez-Velasco. Design Aspects of a MediumVoltage Hybrid DC Breaker. 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2014 October 12-15, Istanbul, pp. 1-6.
51. Kimblin C. W. et al.: Development of a current limiter using vacuum arc commutation. EPRI EL-393 Research Project 564-1, USA, 1977.
52. Lasota R.: *Niskonapięciowe łączniki hybrydowe prądu stałego*. Rozprawa doktorska. Łódź, 1985.

53. Lasota Ryszard, Sobieraj Tomasz: *Elektroniczny przekaźnik nadprądowy dla systemów zabezpieczeń trakcji elektrycznej*. XI Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie. Kraków, 2004.

54. Luhui Liu, Jinwu Zhuang, Chen Wang, Zhuangxian Jiang, JinWu, and Bo Chen. A Hybrid DC Vacuum Circuit Breaker for Medium Voltage: Principle and First Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 30, No. 5, oct. 2015, pp. 2096-2101.

55. Maciołek T., Mierzejewski L., Szeląg A.: *Wyłączanie zwarć w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy*. Technika transportu szynowego tts nr 3/2001.

56. Mierzejewski L., Szeląg A., Drążek Z.: *Metoda symulacyjna obliczenia obciążeń sieci tramwajowej*. Technika transportu szynowego ***tts***, nr 1-2/2002.

57. Mierzejewski L., Szeląg A., Drążek Z.: *Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej* (1). Technika transportu szynowego ***tts***, nr 7 – 8/2001.

58. Mierzejewski L., Szeląg A., Drążek Z.: Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układu zasilania trakcji tramwajowej (2). Technika transportu szynowego ***tts***, nr 09/2001.

59. Mierzejewski L., Szeląg A.: *Układy zasilania zelektryfikowanego transportu miejskiego*. Technika transportu szynowego tts nr 11/1999.

60. Noman Ahmed, Lennart Ängquist, Shahid Mahmood, Antonios Antonopoulos, Lennart Harnefors, Staffan Norrga, Hans-Peter Nee. Efficient Modeling of an MMC-Based Multiterminal DC System Employing Hybrid HVDC Breakers IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 4, 2015, pp. 1792-1801.

61. P. van Gelder J.A. Ferreira. Zero volt switching hybrid DC circuit breakers. IEEE Industry Applications Conference 08-12.10.2000, Rome, (Vol. 5), DOI:10.1109/IAS.2000.882581, pp. 2923-2927.

62. Pasek Z., Mastny V.: Sprawność pewnej klasy napędów elektrodynamicznych do aparatów elektrycznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, Z. 94. Warszawa, 1964.

63. Rojek A.: *Nowe i najnowsze rozwiązania urządzeń w układzie zasilania trakcji elektrycznej w Polsce*. Technika transportu szynowego ***tts***, nr 7 – 8/2003.

64. Schumacher R., Scherrans T. Stephen A.: *Projektowanie zasilania trakcji miejskiej w warunkach modernizacji taboru*. Technika transportu szynowego ***tts***, nr 1/1998.

65. T. Senda, T. Tamagavwa, K. Higuchi, T. Horiuchi, S. Yanabu. Development of HVDC circuit breaker based on hybrid interruption scheme. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 3, March 1984, pp. 545-552.

66. Wójcik F. Ultraszybkie wyłączanie silnoprądowych obwodów prądu stałego. Politechnika łódzka, Zeszyty Naukowe Nr 1071, Rozprawy Naukowe, Z. 396, Łódź, 2010. Rozprawa habilitacyjna (Habilitation thesis).

67. Zheng Ganhao, Study on DC circuit breaker. IEEE 5th International Conference on Intelligent Systems
Design and Engineering Applications, Hunan, 15-16 June 2014, DOI: 10.1109/ISDEA.2014.208, pp. 942945.

68. Żyborski J., Lipski T., Czucha J., Partyka R., Pikoń M., Piotrowski J.: *Arcless current limiting and interrupting hybrid device for disturbance arc and other protections*. Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications (IC-ECAAA), Xi'an, P.R. China, 1997.

[P]. PATENTY Z ZAKRESU ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH I HYBRYDOWYCH DC

(w układzie chronologicznym).

►PŁ jest właścicielem 9 patentów i 3 znaków towarowych z zakresu ultraszybkich wyłączników DC dla elektrotrakcji kolejowej i miejskiej.

Patenty (UPRP):

[P1]. nr 113847, kl. H01H 33/36: Człon łączeniowy główny łącznika elektrycznego, 1982;

[P2]. nr 150328, kl. H03K 17/00: Układ łączeniowy główny łącznika hybrydowego, 1992;

[P3]. nr 180267, kl. H01H33/66: Wyłącznik prądu stałego, 2000;

[P4]. No. PCT/PL00/00062, IPC H01H 33/59: DC circuit - breaker, 2001 (*International application, zgłoszenie w 15 krajach, ale procedura ograniczona do poziomu krajowego (brak środków*);

[P5]. nr 188814, Int. Cl. HO1H33/66, HO1H3/46: Wyłącznik hybrydowy prądu stałego, 2005;

[P6]. nr 193189, kl. H01H 33/66, Wyłącznik prądu stałego, 2007;

[P7]. nr 197617, kl. H01H 33/16; HO1H 3/28: Wyłącznik hybrydowy prądu stałego, 2008;

[P8]. nr 206742. Int. Cl. H01H 33/66 (20006.01). Wielkoprądowy wyłącznik prądu stałego, 2010;

[P9]. nr P-407024, [WIPO ST 10/C PL407024]: Wyłącznik hybrydowy prądu stałego, 2014;

Znaki towarowe (UPRP): 1) **DCU**, 2) **DCH**, 3) **DCN**; kl. 09- wyłączniki elektryczne, 2000/2001.

[R]. RAPORTY BADAWCZE Z ZAKRESU ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKÓW PRÓŻNIOWYCH I HYBRYDOWYCH DC

(w układzie chronologicznym).

[R1]. Praca zbiorowa. Typoszereg łączników trakcyjnych próżniowych i zestykowych - prace przygotowawcze. [R2]. Oprac. KAE PŁ nr 1276, IX/1986.

[R3]. Praca zbiorowa. Trakcyjne styczniki i wyłączniki pojazdowe. Analiza technicznoekonomiczna.

Założenia, wymagania, typoszeregi. Oprac. KAE PŁ nr 1296, VI/1987.

[R4]. Praca zbiorowa. Materiały na XXVI Krajowy Zjazd Komunikacji Miejskiej, Warszawa, 1996.

[R5]. CHHOS/AR3405.00E Kat. ABB. Ogranicznik przepięć z rezystorem tlenkowo-cynkowym POLIM H-4,2 ND.

[R6]. Praca zbiorowa.Test Report “Short-circuit testing of the DCV3/400 ultra-high-speed circuit-breaker”, Industrial Automatics, 05-300 Minsk Mazowiecki, Warszawa 40/1; tests carried out under the supervision of CNTK with the participation of representatives of the Institute of Electrical Apparatus, Technical University of Lodz, September 1996 (PL).

[R7]. Projekt celowy KBN nr 8 8258 94 C/1809, 1994-1996. Raporty roczne i końcowy. (DCV/DCU) [R8]. Projekt celowy KBN nr 8 T10A 045 96 C/3245, 1997-1999. Raporty roczne i końcowy. (DCH)

[R9]. Projekt celowy KBN nr 8 T10A 080 98 C/3810, 1997-2001. Raporty roczne i końcowy. (DCL)

[R10]. Projekt celowy KBN nr 8 T10A 128 99 C/4689, 1999-2002. Raporty roczne i końcowy. (DCN-T)
[R11]. Projekt celowy KBN nr 10 T10 036 2000 C/5320, 2002-2004. Raporty roczne i końcowy. (DCN; DCN-L) **[N1-18]. WYKAZ WYBRANYCH NORM TRAKCYJNYCH w tym:**

[N1-N5] normy wcześniejsze (nieznowelizowane, traktowane jako **uzupełniające**): PN-92/E-04600; PN-73/E-05108; PN-69/E-06120; PN-74/E-06121; PN-93/E-50441, [idt. IEC 50 (441)-1984].

* * * * *

[N6-N18] normy obowiązujące: PN-EN 50121-3-2; PN-EN 50123-1; PN-EN 50123-2; PNEN 50123-5; PNEN 50124-1; PN-EN 50153; PN-EN 50155; PN-EN 50163; PN-EN 60068-1 (także: 60068-2-1; 60068-2-2; 600682-52); PN-EN 60077-1 (także: 60077-2). PN-EN 600773; PN-EN 60529; Karta UIC 550/1997.

SPECYFIKACJA SZCZEGÓŁOWA NORM
(w grupach jw. w układzie numerycznym).

[N1]. PN-92/E-04600. Próby środowiskowe. Postanowienia ogólne i wytyczne.
[N2]. PN-73/E-05108. Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Trakcja elektryczna i spalinowo - elektryczna.
Dopuszczalne poziomy zakłóceń. Ogólne wymagania i badania.
[N3]. PN-69/E-06120. Pojazdy trakcyjne. Aparaty elektryczne prądu stałego. Ogólne wymagania i badania. [N4]. PN-74/E-06121. Aparatura trakcyjna. Wyłączniki szybkie prądu stałego. Wspólne wymagania i badania [N5]. PN-93/E-50441. Słownik terminologiczny elektryki. Aparatura łączeniowa, sterownicza i bezpieczniki.
[idt. IEC 50 (441)-1984].

* * * * *

[N6]. PN-EN 50121-3-2. Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna.
Część 3-2: Tabor; aparaty.
[N7]. PN-EN 50123-1. Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Aparatura łączeniowa prądu stałego.
Wymagania ogólne.
[N8]. PN-EN 50123-2. Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Aparatura łączeniowa prądu stałego.
Wyłączniki prądu stałego.
[N9]. PN-EN 50123-5. Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Aparatura łączeniowa prądu stałego. Część 5: Ograniczniki przepięć i ograniczniki niskonapięciowe do specyficznego zastosowania w systemach prądu stałego.

[N10]. PN-EN 50124-1. Zastosowania kolejowe. Koordynacja izolacji. Część 1: Podstawowe wymagania, odstępy izolacyjne powietrzne i powierzchniowe, odległości dla wyładowań pełzających dla całego wyposażenia elektrycznego i elektronicznego.
[N11]. PN-EN 50153. Zastosowania kolejowe. Tabor. Środki ochrony przed zagrożeniami elektrycznymi.

[N12]. PN-EN 50155. Zastosowania kolejowe. Wyposażenie elektroniczne stosowane w taborze.
[N13]. PN-EN 50163. Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilające systemów trakcyjnych.
[N14]. PN-EN 60068-1. Badania środowiskowe. Część 1: Postanowienia ogólne i wytyczne. Także: 60068-2-1; 60068-2-2; 60068-2-52.
[N15]. PN-EN 60077-1. Zastosowania kolejowe. Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego. Część 1: Podstawowe zasady eksploatacji i zasady ogólne. Także: 60077-2.
[N16]. PN-EN 60077-3. Zastosowania kolejowe. Wyposażenie elektryczne taboru kolejowego. Część 3: Elementy elektrotechniczne. Zasady dotyczące wyłączników napięcia stałego.
[N17]. PN-EN 60529. Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (kod IP).
[N18]. Karta UIC 550. Power Supply Installations For Passenger Stock. 1997.

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA APARATÓW ELEKTRYCZNYCH K-26 ZAKŁAD APARATURY ELEKTRYCZNEJ WOLTAN Sp. z o.o.

OGÓLNE INFORMACJE O ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKACH TRAKCYJNYCH

W PŁ KAE jest prowadzony wieloletni cykl badawczy i wdrożeniowy w zakresie **wyłączania silnych prądów stałych** w próżni za pomocą przeciwprądu, przejmowania takich prądów z zestyków w powietrzu i w próżni za pomocą aktywnego elementu półprzewodnikowego, **synchronizowanego wyłączania silnych prądów przemiennych** oraz metod ograniczania wysokoenergetycznych przepięć łączeniowych. Stworzone zostały teoretyczne i eksperymentalne podstawy **ultraszybkiego wyłączania** zwarciowych prądów stałych oraz synchronizowanego wyłączania zwarciowych prądów przemiennych.

Wyniki prac pozwoliły na opracowanie nowych zasad budowy i działania ultraszybkich wyłączników prądu stałego oraz synchronizowanych ultraszybkich wyłączników prądu przemiennego, przeznaczonych dla trakcji elektrycznej.

Na licencjach PŁ KAE wdrożono do produkcji nową generację ultraszybkich wyłączników próżniowych **DC** prądu stałego, przeznaczonych dla podstacji i pojazdów trakcji kolejowej i miejskiej (łącznie typoszereg 16 wielkości zróżnicowanych napięciowo i prądowo). Producentem wyłączników jest obecnie ZAE WOLTAN Sp. z o.o. w Łodzi, wcześniej współpracująca w tym zakresie z ABB Zwar S.A. Nie ma odpowiedników konstrukcyjnych żadnej z rodzin wyłączników na rynkach światowych. Ich cechą charakterystyczną była nader rzadko spotykana w praktyce ogromna, jakościowa przewaga techniczna nad wyłącznikami starego typu. Wyłączniki mają parametry nieosiągalne dla klasycznych wyłączników trakcyjnych typu WM. Są to obecnie najszybciej działające i najskuteczniej ograniczające prądy zwarciowe trakcyjne wyłączniki prądu stałego na świecie. Ta supernowoczesna technika może mieć coraz większe znaczenie dla rozwoju trakcji elektrycznej kolejowej i miejskiej oraz ew. innych rodzajów urządzeń (trakcja górnicza, metro, urządzenia przemysłowe etc.), pod warunkiem wygrywania walki o rynek z konkurencją (nie zawsze rzetelną).

Uwarunkowania rynkowe w Polsce umożliwiły dotychczas skuteczne wejście na polski rynek kolejowy wyłącznikom dwóch kategorii wyłączników: głównie DCU i (w mniejszym zakresie) DCL, obecnie reprezentujących poziom sprzed 15 ÷ 20 lat, więc zdezaktualizowanych wskutek szybkiego postępu technicznego w zakresie kolejnictwa i pojawienia się nowych potrzeb i wymagań. Stwarza to konieczność retrofitu wyłączników opisanego w cz. III p. 1, umożliwiającego spełnienie tych wymagań i zwiększenie skuteczności walki z konkurencją producentów WM na kolejowych rynkach krajowym i zagranicznym, w połączonym zakresie przeznaczenia DCU + DCL, tj. w zakresie PZ, EZT i EW (do ok.5 MW).

Na licencjach PŁ KAE wdrożono również do produkcji nową generację wysokonapięciowych, synchronizowanych, próżniowych wyłączników ultraszybkich **SVB** (25 kV, 50 (60) Hz, z mutacją 15 kV, 16,7 Hz) dla podstacji i pojazdów kolei dużych prędkości. Po badaniach certyfikacyjnych na liniach zagranicznych wyłączniki będą oferowane na rynku polskim – dla ujęcia w stadium projektowym budowy nowych, wydzielonych linii kolei dużych prędkości (do 350 km/h), zasilanych napięciem przemiennym 25 kV / 50 Hz, najpierw na trasie: Warszawa – Łódź – węzeł Kalisz – Poznań – granica zachodnia, z odgałęzieniem: węzeł Kalisz – Wrocław – granica zachodnia, (włączenie do europejskiego systemu kolei dużych prędkości via Berlin, Drezno).

W styczniu 2010 r. zakończono prace nad najnowszym wyłącznikiem **uniwersalnym DWT**. Wyłącznik jest przeznaczony dla trójsystemowych pojazdów trakcji kolejowej zasilanych napięciem stałym albo przemiennym (A.C. 25 kV / 50(60) Hz; 15 kV / 16.7 Hz; D.C. 3 kV). Prądy stałe są wyłączane w próżni za pomocą przeciwprądu, tj. impulsu prądu o kierunku przeciwnym. Prądy przemienne są wyłączane w próżni synchronicznie, tj. zestyk wyłącznika jest otwierany bezpośrednio przed naturalnym zerem prądu. Otwieranie zestyku wyłącznika jest ultraszybkie, tj. z możliwie dużym przyspieszeniem początkowym i prędkością. Ultraszybki napęd otwiera komorę próżniową w czasie ok. 500 mikrosekund, a prąd stały albo przemienny jest wyłączany w czasie ok. 2 – 3 milisekund. Wyłącznik jest wyposażony w wielofunkcyjny, autonomiczny układ dwustronnego ograniczania przepięć w każdym z systemów A.C. lub D.C. **Wszystkie wyłączniki spełniają wymagania notyfikowanych przez Polskę odpowiednich norm europejskich z zakresu trakcji kolejowej i miejskiej, elektrotechniki, kompatybilności elektromagnetycznej oraz ochrony środowiska, a także stosownych decyzji Komisji Europejskiej z zakresu interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei.**

Korzyści ekonomiczne powstające wskutek wprowadzania wyłączników do eksploatacji w pojazdach trakcyjnych i systemach ich zasilania kumulują się głównie u ich użytkowników. **Wszystkie wyłączniki serii DC zostały wdrożone poprzez projekty celowe wspierane finansowo przez KBN (później MN i I, MN i SW), w przypadku wyłączników SVB** *(AC)* **także przez Ministra Gospodarki (Program Wieloletni PW004). a w przypadku wyłączników DWT** *(AC/DC)* **poprzez projekt rozwojowy sfinansowany przez MN i SW.**

Światowe i krajowe kręgi specjalistów bardzo wysoko oceniały tę nadal najnowocześniejszą w skali światowej technikę ultraszybkiego wyłączania silnych prądów. Twórcy wyłączników serii DC, SVB i DWT uzyskali kilkadziesiąt nagród i wyróżnień międzynarodowych i krajowych.

MIĘDZYNARODOWE I KRAJOWE NAGRODY DLA ULTRASZYBKCH WYŁĄCZNIKÓW TRAKCYJNYCH

{RE}: *kategorie DCU i DCL wyłączników planowane jako bazowe do* ***scalenia i retrofitu*** *w celu uzyskania nowej kategorii wyłączników DCU-HM, przeznaczonej dla połączonych zakresów stosowalności DCU i DCL.*

{RE}

WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE DCV/DCU DLA ELEKTRYCZNYCH ZESPOŁÓW TRAKCYJNYCH

1. **ZŁOTY MEDAL** na 45 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA,1996.
2. **DYPLOM i PUCHAR PRZEWODNICZĄCEGO KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH** "Za krzewienie nauki polskiej w świecie", Warszawa, 1996.
3. **NAGRODA MINISTRA EDUKACJI NARODOWEJ** za stworzenie podstaw teoretycznych, budowę i wdrożenie rodziny ultraszybkich wyłączników prądu stałego, Warszawa, 1998.
4. **GŁÓWNA NAGRODA "ZŁOTE KOŁO"** za najlepszy produkt dla potrzeb Polskich Kolei Państwowych na II Ogólnopolskiej Wystawie Przemysłu "KOLEJ NA KOLEJ", 1999.

WYŁĄCZNIKI HYBRYDOWE DCH DLA TRAMWAJÓW I TROLEJBUSÓW

5. **ZŁOTY MEDAL** na 47 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 1998.
6. **NAGRODA SPECJALNA MINISTRA GOSPODARKI** na 47 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 1998.
7. **NAGRODA SPECJALNA POLSKIEGO ZWIĄZKU STOWARZYSZEŃ WYNALAZCÓW I RACJONALIZATORÓW** na 47 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 1998.
8. **DYPLOM PRZEWODNICZĄCEGO KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH**, Warszawa, 1999.
9. **MEDAL INTERTECHNOLOGY'99** na II Międzynarodowych Targach Wynalazczości, Nowych Technologii i Wzornictwa Przemysłowego INTERTECHNOLOGY, 1999.
10. **DYPLOM i PUCHAR PREZYDENTA MIASTA ŁODZI** na II Międzynarodowych Targach Wynalazczości, Nowych Technologii i Wzornictwa Przemysłowego INTERTECHNOLOGY, 1999.
11. **DYPLOM i STATUETKA MARSZAŁKA WOJEWÓDZTWA ŁÓDZKIEGO** na II Międzynarodowych Targach Wynalazczości, Nowych Technologii i Wzornictwa Przemysłowego INTERTECHNOLOGY, 1999.

WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE DCL DLA LOKOMOTYW {RE}

12. **ZŁOTY MEDAL Z WYRÓŻNIENIEM** na 48 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 1999.
13. **NAGRODA SPECJALNA I PUCHAR POLSKIEGO ZWIĄZKU STOWARZYSZEŃ WYNALAZCÓW I RACJONALIZATORÓW** na 48 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 1999.
14. **LIST GRATULACYJNY PREZESA RADY MINISTRÓW RP** z dnia 10.01.2000.
15. **NAGRODA SPECJALNA "ZŁOTE KOŁO"** za najlepsze urządzenie potrzeb Polskich Kolei Państwowych na V Ogólnopolskiej Wystawie "KOLEJ NA KOLEJ" - Energetyka Kolejowa, 2000.
16. **MEDAL PREZESA STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH** za najlepszy wyrób elektrotechniczny na 73 Targach Technologii Przemysłowych i Dóbr Inwestycyjnych w Poznaniu, 2001.

NOWA GENERACJA ULTRASZYBKICH WYŁĄCZNIKÓW PRĄDU STAŁEGO TYPU DCU, DCH, DCL

17. **NAGRODA im. C. JAWORSKIEGO ZA WYBITNE OSIĄGNIĘCIA W DZIEDZINIE TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ** na III Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 1999.

18. **NAGRODA GOSPODARCZA PREZYDENTA RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ** w kategorii ***"Wynalazek w dziedzinie produktu lub technologii"*** - 12.06.2000.

WYŁĄCZNIKI HYBRYDOWE DCN – T DLA PODSTACJI TRAKCJI MIEJSKIEJ

19. **NOMINACJA DO GRAND PRIX** na 50 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2001.
20. **ZŁOTY MEDAL Z WYRÓŻNIENIEM** na 50 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2001.
21. **NAGRODA MINISTRA ADMINISTRACJI I SPRAW PUBLICZNYCH KRÓLESTWA BELGII** na 50 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2001.
22. **NAGRODA SPECJALNA POLSKIEGO ZWIĄZKU STOWARZYSZEŃ WYNALAZCÓW I RACJONALIZATORÓW** na 50 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2001.
23. **KRZYŻ KAWALERSKI ORDERU WYNALAZCZOŚCI KRÓLESTWA BELGII** na 50 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2001.
24. **PUCHAR I DYPLOM MINISTRA NAUKI - PRZEWODNICZĄCEGO KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH**, Warszawa 2002.
25. **ZŁOTY MEDAL** (indywidualnie) na III Międzynarodowej Wystawie INVESTTECHNOLOGY'2002.
26. **MEDAL SPECJALNY** (zespołowo) na III Międzynarodowej Wystawie INVESTTECHNOLOGY'2002.
27. **NAGRODA SIEMENSA**, Warszawa, 2002.
28. **WIELKI MEDAL HONOROWY STOWARZYSZENIA WYNALAZCÓW I PRZEMYSŁOWCÓW FRANCJI,** CONCOURS LÉPINE, Paris 2002.

WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE DCN / DCN–L DLA PODSTACJI KOLEJOWYCH I LOKOMOTYW CIĘŻKICH

29. **NOMINACJA DO GRAND PRIX** na 51 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2002.
30. **ZŁOTY MEDAL Z WYRÓŻNIENIEM** na 51 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2002.
31. **NAGRODA SPECJALNA MINISTRA GOSPODARKI** na 51 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2002.
32. **NAGRODA SPECJALNA POLSKIEGO ZWIĄZKU STOWARZYSZEŃ WYNALAZCÓW I RACJONALIZATORÓW** na 51 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2002.
33. **KRZYŻ KOMANDORSKI ORDERU WYNALAZCZOŚCI KRÓLESTWA BELGII** na 51 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA, 2002.
34. **NAGRODA GŁÓWNA SITK RP im. Prof. CZESŁAWA JAWORSKIEGO** na Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 2003.
35. **I NAGRODA** na XI Ogólnopolskiej Wystawie "KOLEJ NA KOLEJ" - Elektrotrakcja 2003.
36. **PUCHAR ZA NAJLEPSZY WYRÓB** na 11 Ogólnopolskiej wystawie firm produkujących dla PKP pod hasłem " Kolej na Kolej" Elektrotrakcja, 2003.

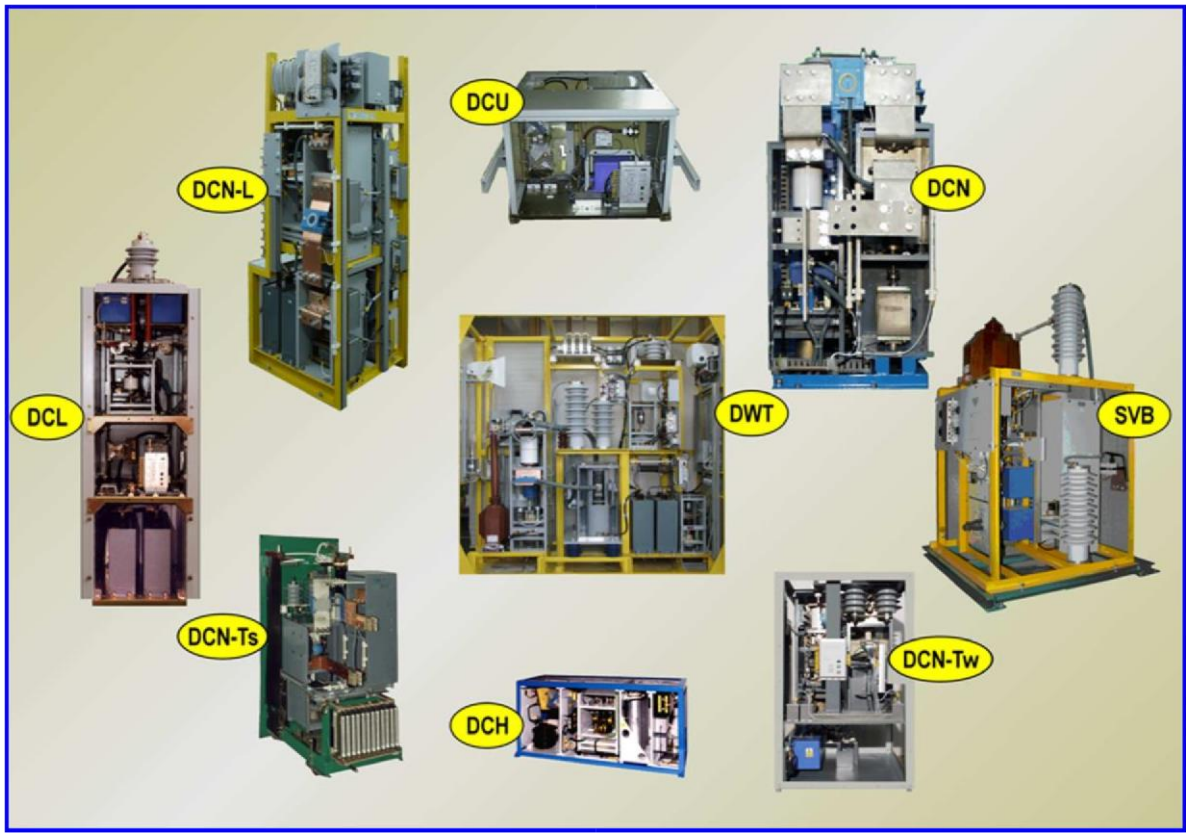
37. **MEDAL** OKOLICZNOŚCIOWY na 11 Ogólnopolskiej wystawie firm produkujących dla PKP pod hasłem " Kolej na Kolej" Elektrotrakcja, 2003.
38. **NAGRODA GŁÓWNA SITK RP im. Prof. CZESŁAWA JAWORSKIEGO** na Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 2007.
39. **ZŁOTY MEDAL MIĘDZYNARODOWYCH TARGÓW POZNAŃSKICH** w kategorii *Najlepszy Wyrób,* na 80. MTP Innowacje – Technologie – Maszyny Polska 2008.
40. **NAGRODA GOSPODARCZA WOJEWODY ŁÓDZKIEGO** w 2008 roku w kategorii *Wynalazek w dziedzinie produktu lub technologii* za opracowanie ultraszybkich wyłączników próżniowych prądu stałego dla podstacji i lokomotyw trakcji kolejowej.

DWUSYSTEMOWE WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE SVB (25kV/50(60)Hz; 15kV/16,7Hz) DLA KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

41. **SPECJALNE WYRÓŻNIENIE W KONKURSIE im. inż. ERNESTA MALINOWSKIEGO** na Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 2007.
42. **ZŁOTY MEDAL Z WYRÓŻNIENIEM** na 56 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik Brussels Eureka – Innova Energy, 2007.
43. **NAGRODA MINISTRA GOSPODARKI RP** na 56 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik Brussels Eureka – Innova Energy, 2007.
44. **NAGRODA MINISTRA NAUKI, NOWYCH TECHNOLOGII I WSPÓŁPRACY Z ZAGRANICĄ RZĄDU WALONII** na 56 Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik Brussels Eureka – Innova Energy, 2007.
45. **NAGRODA MINISTRA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO ZA MIĘDZYNARODOWE OSIĄGNIĘCIA WYNALAZCZE**, Warszawa, 2008.
46. **ZŁOTY MEDAL MIĘDZYNARODOWYCH TARGÓW POZNAŃSKICH** w kategorii *Transfer Wyników Badań Naukowych Do Praktyki Gospodarczej*, na 80. MTP Innowacje – Technologie – Maszyny Polska 2008.

UNIWERSALNE (AC / DC) WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE DWT DLA LOKOMOTYW WIELOSYSTEMOWYCH

47. **SPECJALNE WYRÓŻNIENIE W KONKURSIE im. prof. C. JAWORSKIEGO** na 8. Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 2009.
48. **ZŁOTY MEDAL Z WYRÓŻNIENIEM** na 58. Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS INNOVA - BRUSSELS EUREKA, 2009.
49. **NAGRODA WICEPREMIERA BELGII – MINISTRA ZATRUDNIENIA I RÓWNYCH SZANS** na 58. Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS INNOVA - BRUSSELS EUREKA, 2009.
50. **KRZYŻ WIELKI OFICERSKI ORDERU WYNALAZCZOŚCI KRÓLESTWA BELGII** na 58. Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS INNOVA - BRUSSELS EUREKA, 2009.
51. **NAGRODA MINISTRA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO ZA MIĘDZYNARODOWE OSIĄGNIĘCIA WYNALAZCZE**, Warszawa, 2010.



Rodzina ultraszybkich próżniowych lub hybrydowych wyłączników trakcyjnych DC i AC.