

Marek BARTOSIK
Ryszard LASOTA
Franciszek WÓJCIK
Instytut Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka

ULTRASZYBKIE WYŁĄCZANIE ZWARĆ W TRAKCYJNYCH OBWODACH PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie. W artykule opisano nowe typy ultraszybkich wyłączników ograniczających (US WPS), przeznaczonych dla trakcji kolejowej, miejskiej, a także górniczej etc. (do 3000 V_~), w szczególności dla lokomotyw, e. z. t., tramwajów i trolejbusów. Opisano zasady działania i budowy układów wyłączających prądy. US WPS mają bardzo małe wartości prądów ograniczonych i całek Joule'a. Mogą zabezpieczać półprzewodnikowe układy stosowane w napędach pojazdów trakcyjnych. Porównano skuteczność działania US WPS z tradycyjnymi wyłącznikami magnety-wydmuchowymi. Wykazano techniczną i ekonomiczną przewagę US WPS nad wyłącznikami dotychczas stosowanymi.

ULTRA-HIGH-SPEED SHORT-CIRCUIT CURRENT BREAKING IN D. C. TRACTION CIRCUITS

Summary. The article describes new types of ultra-high-speed current-limiting circuit-breakers (US WPS), intended for the rail, urban and also mine traction etc. (up to 3000V_~), especially for trains, tramways and trolley-buses. The structure and principles of operation of the current breaking systems are presented. US WPS have very low values of both cut-off current and Joule integral. They can protect semiconductor power devices used in drive systems of traction vehicles. Short-circuit breaking processes with the use of the US WPS and traditional magnetic blow-out circuit breakers are compared. US WPS will create technical and economical competition to the existing circuit breakers.

1. WSTĘP

Głównym użytkownikiem prądu stałego są wszelkie rodzaje elektrycznej trakcji kolejowej, miejskiej, górnictwa etc. Warunki zwarciove w poszczególnych sieciach są bardzo zróżnicowane, odmienne dla wyłączników podstacyjnych i taborowych. Niniejsza publikacja dotyczy wyłączników taborowych, podstacyjne będą przedmiotem przyszłych prac. 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. W zwarciowych obwodach trakcyjnych, pomijając metro, za typowe można uznać wartości stałej czasowej τ w zakresie 10-30 ms, spodziewanego zwarciowego prądu ustalonego I_{spu} w zakresie 10-60 kA, początkowej stromości wzrostu prądu zwarciowego s_1 w zakresie 0,5-5 A/ μ s. Energie magnetyczne E_M obwodu bardzo silnie zależą od sposobu wyłączania zwarc. Z drugiej strony względy techniczne i ekonomiczne stwarzają silną tendencję do rozwoju nowych systemów napędowych z rozruchem impulsowym oraz hamowaniem z odzyskiem energii. Prócz tego znane są napędy trakcyjne z silnikami prądu przemiennego, przy zasilaniu z sieci prądu stałego za pomocą przekształtników. Bardzo szybki rozwój technik półprzewodnikowych umożliwia realizację takich układów, ale powszechnie stosowane tradycyjne wyłączniki magnetowdmuchowe nie stanowią skutecznego zabezpieczenia elementów półprzewodnikowych. Działają one zbyt wolno, za mało skutecznie ograniczają prądy zwarciove, mają za duże wartości całki Joule'a I^2t . Dlatego podjęto prace nad nowymi, bardziej skutecznymi, ultraszybkimi metodami wyłączania zwarciowych prądów stałych.

2. NOWY PODZIAŁ WYŁĄCZNIKÓW PRĄDU STAŁEGO (WPS)

Wprowadzenie nowej techniki ultraszybkiego wyłączania zwarc stworzyło konieczność usystematyzowania zagadnienia i sprecyzowania niektórych parametrów charakteryzujących proces wyłączania zwarcia. US WPS działają bowiem na zasadzie komutacji wymuszonej, odmiennej niż zasada działania tradycyjnych wyłączników magnetowdmuchowych, dotychczas stosowanych jako klasyczne (K WPS) - nie ograniczające prądu, lub szybkie (S WPS) - o umiarkowanej zdolności do ograniczania prądu. Wyłączanie prądów przez K WPS i S WPS następuje wskutek wzrostu napięcia łuku w komorze gaszeniowej, pochłaniającej energię źródła zasilania i energię magnetyczną obwodu.

Interakcja wyłącznika i obwodu przebiega w powyższych przypadkach odmiennie. Możliwość ograniczania prądu zwarciowego zależy zawsze od wartości spodziewanego zwarciowego prądu ustalonego I_{spu} oraz od parametrów R, L, C obwodu zwarciowego, determinujących początkową stromość wzrostu prądu zwarciowego $s_1 = di/dt \approx I_{spu}/\tau$. Skuteczność ograniczania prądu zwarciowego przez S WPS zależy od szybkości jego zadziałania i szybkości wzrostu napięcia łuku, determinującej stromość dojścia prądu do zera. Skuteczność ograniczania prądu zwarciowego przez US WPS zależy od szybkości jego zadziałania i wymuszonej szybkości komutacji prądu, determinującej stromość jego dojścia do zera. Wielkości te są dla US WPS znacznie większe niż dla S WPS. Miarą szybkości działania wyłącznika jest czas wyłączania t_w od chwili powstania zwarcia do chwili dojścia do zera prądu w układzie wyłączającym. Miarą

skuteczności ograniczania prądu jest prąd ograniczony I_0 , wyrażony współczynnikiem ograniczania prądu $C = I_0/I_{spu}$. Wartości współczynnika C oraz wartości czasu t_w względem stałej czasowej τ przyjęto jako umowne kryteria podstawowego podziału WPS. Zasady tego podziału pokazano w tablicy 1.

Osiągnięcie ultraszybkiego działania wymaga zastosowania bardzo 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 dopuszczalnych wartości tych naprężeń powoduje bardzo szybkie zmniejszanie się trwałości mechanicznej wyłącznika lub nawet jego natychmiastowe uszkodzenie. Możliwości zmniejszania czasu własnego są więc ograniczone najmniejszą dopuszczalną wartością czasu własnego organu ruchomego t_{mr} , wytrzymywaną bez ograniczenia trwałości mechanicznej wyłącznika. Jest on indywidualną cechą charakterystyczną wyłącznika. Można przyjąć, że czasy t_{mr} są rzędu $150 \div 200 \mu s$.

Tablica 1

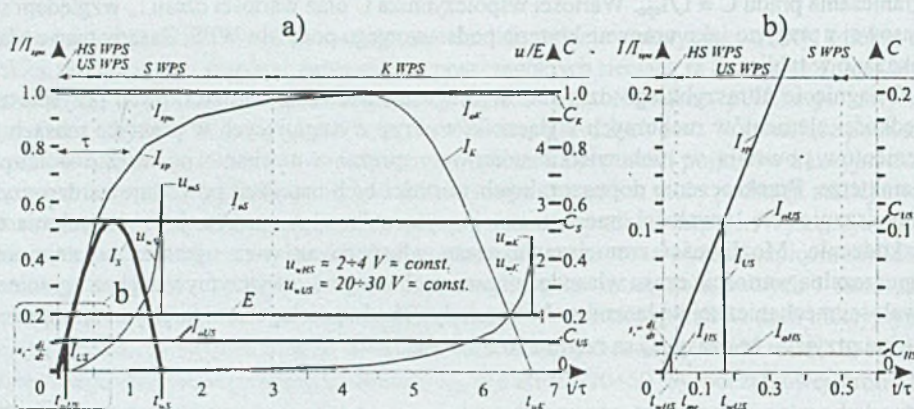
Klasy wyłączników prądu stałego WPS ze względu na szybkość wyłączania zwarć:
 HS - hiperszybkie, US - ultraszybkie, S - szybkie, K - klasyczne (nie ograniczające)

Klasa WPS	HS WPS	US WPS	S WPS	K WPS
Zakres t_{wX}	$0 \leq t_{wHS} < t_{mr}$	$t_{mr} \leq t_{wUS} < -0.5\tau$	$-0.5\tau \leq t_{wS} < -3\tau$	$-3\tau \leq t_{wK} \leq 4$
Zakres C_X	$-0.005 \leq C_{HS} < -0.01$	$-0.01 \leq C_{US} < -0.4$	$-0.4 \leq C_S < -0.95$	$-0.95 \leq C_K \leq 1$

gdzie: $x = HS, US, S, K$ - indeks odpowiadający rodzajowi wyłącznika, $C_X = I_{0X} / I_{spu}$ - współczynnik ograniczania prądu; t_{wX} - czas wyłączania, t_{mr} - minimalny czas reakcji mechanicznej.

Na rys. 1 pokazano przykładowe, stylizowane przebiegi łączeniowe prądów i napięć podczas wyłączania zwarć przez wyłączniki poszczególnych klas opisanych w tablicy 1.

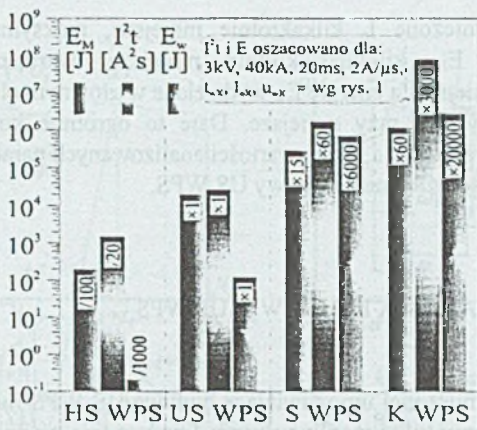
Przebiegi pokazane na rys. 1 sporządzono na podstawie danych dla wybranych wyłączników przyporządkowanych do każdej z klas [6;7;9;10]. Zróżnicowanie typów wyłączników magnetywduchowych w klasach S WPS i K WPS jest duże, więc w tym zakresie występuje znaczny rozrzut parametrów łączeniowych. W zakresie US WPS i HS WPS zjawiska łączeniowe są natomiast wysoce powtarzalne. Dla jasności rysunku rozrzuty te pominięto, co nie ma znaczenia dla uogólnionych wniosków z dalszych rozważań.



Rys. 1. a) Podział wyłączników prądu stałego WPS ze względu na szybkość wyłączania zwarć, b) powiększony i uzupełniony fragment b z rys. a). Klasy WPS: K - klasyczne, S - szybkie, US - ultraszybkie, HS - hiperszybkie; I_{sp} - przykładowy przebieg spodziewanego prądu zwarciowego, I_{spu} - jego wartość ustalona; I_x - przebiegi rzeczywistego prądu zwarciowego, I_{ox} - prądy ograniczone, $C_x = I_{ox}/I_{spu}$ - współczynniki ograniczania prądu, t_{wx} - czasy wyłączania, u_{wx} - przebiegi napięcia na wyłączniku, u_{mx} - przepięcia łączeniowe, gdzie: $x = k, s, us, hs$ - indeksy odpowiadające klasie wyłącznika (tzn. $I_k, I_{ok}, C_k, t_{wk}, u_{wk}, u_{mk}$ - dla K WPS....itd; t - czas, t_{mr} - minimalny czas reakcji mechanicznej, τ - stała czasowa obwodu zwarciowego, $s_1 = di/dt = I_{spu}/\tau$ - początkowa stromość wzrostu prądu zwarciowego, E - napięcie sieci. Przebiegi napięć powrotnych dla HS WPS i US WPS pominięto (patrz rys. 3).

Fig. 1. a) D. C. circuit breakers (WPS) classification with regard to speed of short-circuit current breaking, b) magnified fragment b from Fig. a). Categories of WPS: K - classic, S - high-speed, US - ultra-high-speed, HS - hyper-high-speed; I_{sp} - simplified transient of prospective current, I_{spu} - steady prospective current; I_x - short-circuit current transients, I_{ox} - cut-off currents, $C_x = I_{ox}/I_{spu}$ - current limitation coefficients, t_{wx} - break-times, u_{wx} - WPS voltage transients, u_{mx} - switching overvoltages, where: $x = k, s, us, hs$ - indexes corresponding to WPS category (e. i. $I_k, I_{ok}, C_k, t_{wk}, u_{wk}, u_{mk}$ - for K WPS....etc.); t - time, t_{mr} - minimum mechanical reaction time, τ - time constant of short-circuit, $s_1 = di/dt = I_{spu}/\tau$ - initial rate of short-circuit current rise, E - supply voltage. Transients of recovery voltage for HS WPS and US WPS are omitted (see Fig. 3).

Analiza porównawcza pokazanych na rys. 1 sposobów wyłączania zwarć przez wyłączniki poszczególnych klas pozwala na oszacowanie ogromnych korzyści eksploatacyjnych, jakie niesie ze sobą zastosowanie ultraszybkich metod wyłączania zwarciowych prądów stałych. Do analizy wzięto pod uwagę kilka charakterystycznych wielkości, powszechnie uważanych za determinujące podstawowe właściwości eksploatacyjne wyłączników. Do nich należą: prąd ograniczający I_o , cała Joule'a I^2t , maksymalna wartość energii magnetycznej obwodu E_M podczas wyłączania zwarcia, energia E_w wydzielona w głównym elemencie wyłączającym prąd zwarciowy. Parametry te oszacowano dla przykładowo wybranych granicznych warunków zwarciowych charakterystycznych dla wyłączników taborowych w trakcji kolejowej, z uwzględnieniem podziału wg rys. 1 i literaturowych danych dla wybranych wyłączników [6;7;9]. Wyniki analizy pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowe, szacunkowe wartości maksymalnej energii magnetycznej obwodu zwarcowego E_M , całki Joule'a I^2t oraz energii E_w wydzielanej w głównym elemencie wyłączającym, podczas wyłączania prądu zwarcowego przez WPS klasy HS, US, S i K wg tablicy 1; warunki zwarciove wg opisu na rysunku. Wewnątrz białych prostokątów podano orientacyjne krotności poszczególnych parametrów względem parametrów dla US WPS, przyjętych za podstawowe (tj. $E_{MS} / E_{MUS} > 15.....$ itd.) / n - dzielnik, x n - mnożnik; pozostałe oznaczenia jak na rys. 1.

Fig. 2. Exemplary, estimated values of maximum magnetic energy of short-circuit E_M , Joule integral I^2t and energy E_w dissipated in the main switching element, during short-circuit current breaking by WPS of HS, US, S and K category, according to table 1; short-circuit conditions according to description in this figure. Estimated products of particular parameters to parameters for US WPS, assumed as basic, are given inside of white rectangles (e. i. $E_{MS} / E_{MUS} > 15.....$ etc.) / n - divider, x n - multiplier; other denotations as in Fig. 1.

Problemy eksploatacyjne i możliwości rozwojowe wyłączników magnetowydmuchowych były wielokrotnie opisywane w dostępnej literaturze, więc zostały tutaj pominięte. Wyłączniki te mogą działać jako K WPS lub S WPS. W dalszych rozważaniach K WPS pominięto, gdyż większość trakcyjnych wyłączników magnetowydmuchowych odpowiada klasie S WPS. W szczególnych przypadkach lekkie i szybkie konstrukcje S WPS, pracujące przy relatywnie małych wartościach początkowej stromości wzrostu prądu zwarciovego s_i , mogą nawet wkraczać w zakres US WPS, ale wydaje się, że osiągnęły one kres możliwości technicznych wynikających z zasady ich działania.

Wyłączniki klasy HS WPS w praktyce mogą być budowane tylko przy wykorzystaniu półprzewodnikowych elementów mocy, ponieważ żadne sensowne technicznie układy mechaniczne nie wytrzymują pracy z wymaganymi w tym zakresie przyspieszeniami. Znana jest w tej klasie tylko jedna konstrukcja hybrydowa z układem zestykowym wymiennym jednorazowego użytku (do celów specjalnych) [10]. Do budowy HS WPS w praktyce przydatne są tranzystory IGBT i tyrystory GTO, przy czym szybki postęp w dziedzinie tyrystorów elektrostatycznych wydaje się ostatnio zagrażać popularności GTO. Własności tych elementów pozwalają budować wyłączniki półprzewodnikowe w całym zakresie napięć trakcyjnych. Wady elementów półprzewodnikowych, takie jak duże straty mocy przy przewodzeniu prądu, mała odporność na przepięcia i przeciążenia, brak galwanicznego odcinania obwodu oraz wysoki koszt, są istotnymi ograniczeniami praktycznych zastosowań HS WPS. Zagadnienia te stanowią odrębny problem, są dobrze znane z obszernej literatury i zostały tutaj pominięte. W analizowanych zastosowaniach HS WPS mają znaczenie pomocnicze i dalej je pominięto. Celowe jest jedynie porównanie US WPS i S WPS. Szacunkowe dane przedstawione na rys. 1 i 2 upoważniają do stwierdzenia, że w stosunku do magnetowydmuchowych S WPS, nowe wyłączniki klasy US

WPS mają: prądy ograniczone I_0 kilkakrotnie mniejsze, maksymalne wartości energii magnetycznej obwodu E_M kilkunastokrotnie mniejsze, wartości całki Joule'a $\int i^2 dt$ kilkudziesięciokrotnie mniejsze, a energie E_w wydzielane w głównym elemencie wyłączającym prąd zwarciový kilka tysięcy razy mniejsze. Daje to ogromne korzyści eksploatacyjne, przedstawione w p.4. Dla uzyskania takich wartości analizowanych parametrów konieczne było opracowanie nowych zasad działania i budowy US WPS.

3. NOWE ZASADY DZIAŁANIA I BUDOWY US WPS

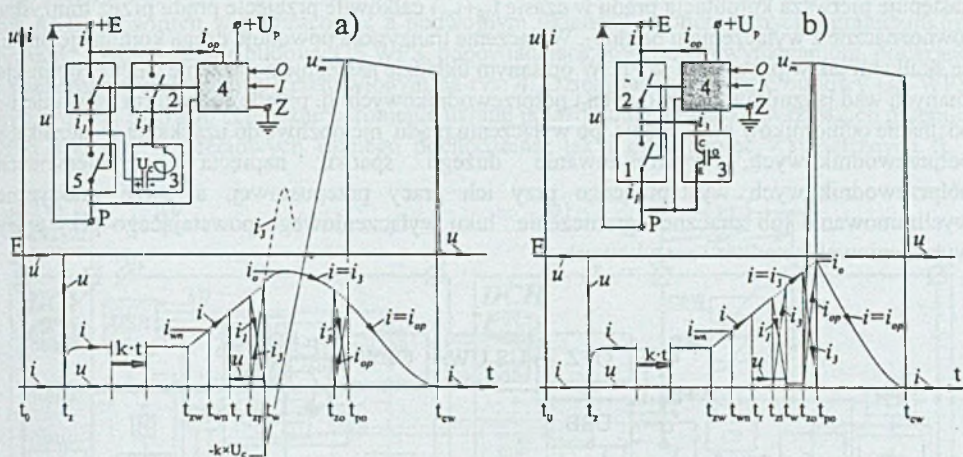
Metoda komutacji wymuszonej umożliwiająca budowę US WPS może być realizowana w praktyce przy wykorzystaniu kilku możliwych zasad wyłączania prądu stałego [10], z których największą przydatność praktyczną mają dwie: wyłączanie za pomocą impulsu przeciwprądu (WPP) oraz wyłączanie za pomocą aktywnego elementu półprzewodnikowego (AEP).

Zasada WPP polega na wymuszonym sprowadzeniu prądu stałego do zera przez impuls prądu o kierunku przeciwnym, zwany przeciwprądem, wytwarzany przez dodatkowe źródło prądu. Może ona być wykorzystywana do budowy US WPS próżniowych (USV), tyrystorowych (UST) lub hybrydowych (USH) próżniowo - tyrystorowych [1;2;6;7;9].

Zasada AEP polega na wymuszonym sprowadzeniu prądu stałego do zera przez w pełni sterowalny element półprzewodnikowy mocy. Może ona być wykorzystywana do budowy US WPS hybrydowych (USH) lub półprzewodnikowych (USP) z tranzystorami IGBT (USI) lub tyrystorami GTO (USG) [5;8;10].

Wobec opisanych w p. 2 wad wyłączników półprzewodnikowych oraz innych uwarunkowań opisanych we wcześniejszych pracach autorów [1;2;5;9], na potrzeby trakcji kolejowej o napięciu 3 kV najlepiej nadaje się zasada WPP wykorzystana w wyłączniku próżniowym USV, a na potrzeby trakcji niskonapięciowej o napięciu do 800 V zasada AEP wykorzystana w wyłączniku hybrydowym USH próżniowo - tranzystorowym. Dla tych dwóch przypadków zasady działania i budowy US WPS pokazano na rys. 3.

Zasada działania wyłącznika próżniowego USV wykorzystującego metodę WPP jest przedstawiona na rys. 3a. Kondensator komutacyjny generatora przeciwprądu 3 jest wstępnie naładowany i ma polaryzację jak na rysunku. Prąd zwarciový $i=i_1$ płynący przez komorę główną 1 wzrasta i osiąga wartość prądu zadziałania i_{zm} , powodując uruchomienie wyłącznika. Po krótkim czasie własnym w chwili t_1 komora 1 się otwiera powodując zapłon łuku, a następnie w chwili t_{zp} komora 2 się zamyka załączając przeciwprąd i_3 płynący w obwodzie 3-1-2. W komorze 1 przeciwprąd i_3 odejmuje się od prądu i_1 , gwałtownie sprowadzając go do zera (pierwsza komutacja prądu w czasie $t_{zp}(t_w)$), ponieważ stromość wzrostu przeciwprądu jest o rząd wielkości większa od stromości wzrostu prądu zwarciového. Po wyłączeniu prądu i_1 w chwili t_w konfiguracja obwodu ulega zmianie, napięcie na kondensatorze ulega odwróceniu ze względu na szeregowo połączenie kondensatora z siecią, napięcie między zaciskami +E i P przeciwdziała wzrostowi prądu. Prąd zwarciový intensywnie maleje pod wpływem wzrastającego napięcia na kondensatorze. Gdy przepięcie łączeniowe osiągnie w chwili t_{z0} próg zadziałania ogranicznika przepięć w systemie 4, zaczyna płynąć prąd i_{op} powodujący drugą komutację prądu w czasie $t_{z0}+t_{p0}$ i prąd główny zostaje przejęty przez ogranicznik rozładowujący energię magnetyczną obwodu i ograniczający przepięcie do wymaganej wartości u_{in} .

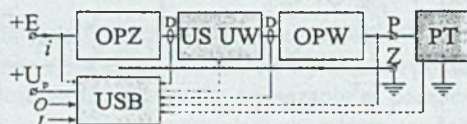


Rys. 3. Schematy blokowe i przebiegi łączeniowe prądów i napięć ilustrujące zasady działania US WPS: a) zasada WPP wyłączania przeciwwądem, b) zasada ASE wyłączania za pomocą aktywnego elementu półprzewodnikowego. Komory próżniowe: 1 - główne, 2 - pomocnicze; zespoły wyłączające: a) 3 - generator przeciwwądem, b) 3 - tranzystor IGBT; 4 - systemy sterowania i zabezpieczeń; 5 - załącznik próżniowy; przyłącza: +E - sieciowe, P - pojazdowe, Z - uziomowe, +Up - napięciowe; sygnały sterujące: O - otwierające, / - zamykające; napięcia: E - sieci, Up - pomocnicze, u - na wyłączniku, um - ograniczone, Uc - kondensatora komutacyjnego. -k*Uc - wsteczne (k < 1); prądy: i - zwarcia, iwn - zadziałania wyzwalacza nadprądowego, i1 - komory 1, i3 - zespołu 3, io - ograniczony, iop - ogranicznika przepięć; chwile: t0 - początkowa, t1 - załączenia prądu, tzw - zwarcia, twn - zadziałania wyzwalacza, tr - rozdzielenia styków komory 1, tzp - załączenia przeciwwądem, tzl - załączenia tranzystora, tw - wyłączenia zwarcia, t20 - zadziałania ogranicznika przepięć, tpo - przejęcia prądu przez ogranicznik, tcw - całkowitego wyłączenia obwodu; t - czas, k-t - zmiana skali czasu (k >> 1).

Fig. 3. Block-schemes with current and voltage transients, showing US WPS principles of operation: a) WPP principles of D. C. breaking by countercurrent, b) ASE principles of D. C. breaking by active semiconductor power device. Vacuum chambers: 1 - main, 2 - auxiliary; breaking systems: a) 3 - countercurrent generator, b) 3 - IGBT transistor; 4 - control systems; 5 - vacuum making switch; terminals: +E - network t., P - vehicle t., Z - earth t., +Up - voltage t.; control signals: O - opening s., / - closing s.; voltages: E - network v., Up - auxiliary v., u - circuit breaker v., um - limited v., Uc - commutation capacitor v., -k*Uc - reverse v. (k < 1); currents: i - short-circuit c., iwn - tripping c., i1 - vacuum chamber 1 c., i3 - block 3 c., io - limited c., iop - overvoltage limiter c.; moments: t0 - initial m., t1 - current switching on m., tzw - short-circuit appearance m., twn - overcurrent trip operation m., tr - contact separation m. in vacuum chamber 1, tzp - countercurrent switching on m., tzl - transistor switching on m., tw - short-circuit current breaking m., t20 - overvoltage limiter operation m., tpo - current taking over m. by overvoltage limiter, tcw - short-circuit total breaking m. t - time, k-t - changed time scale (k >> 1).

Zasada działania próżniowo-tranzystorowego wyłącznika hybrydowego USH wykorzystującego metodę ASE jest przedstawiona na rys. 3b. Hybrydowy układ wyłączający złożony jest z członu zestykowego współpracującego z członem półprzewodnikowym. Człon zestykowy stanowią dwie jednocześnie otwierane komory próżniowe 1 i 2 połączone szeregowo. Człon półprzewodnikowy stanowi tranzystor IGBT. Współpraca tych członów odbywa się w układzie tzw. hybrydy szeregowo-równoległej, w którym komora 1 (wyłączająca) jest zbocznikowana tranzystorem 3 tworzącym układ przejmowania i wyłączania prądu, 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_j do zera. Tranzystor 3 jest załączany impulsowo na bardzo krótki czas w chwili t_{zl} , 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,

następuje pierwsza komutacja prądu w czasie $t_{zp} \approx t_w$ i całkowite przejście prądu przez tranzystor równoznaczne z wyłączeniem prądu i_l . Wyłączenie tranzystora powoduje drugą komutację prądu, ze skutkami jak w przypadku WPP. W opisanym układzie następuje połączenie zalet i eliminacja znanych wad łączników zestykowych i półprzewodnikowych, tj. przede wszystkim galwaniczne odcinanie odbiorników od zasilania po wyłączeniu prądu niemożliwe do uzyskania w łącznikach półprzewodnikowych, wyeliminowanie dużego spadku napięcia na elementach półprzewodnikowych występującego przy ich pracy przepustowej, a także praktyczne wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie łuku wyłączeniowego powstającego przy pracy wyłączeniowej łączników zestykowych.

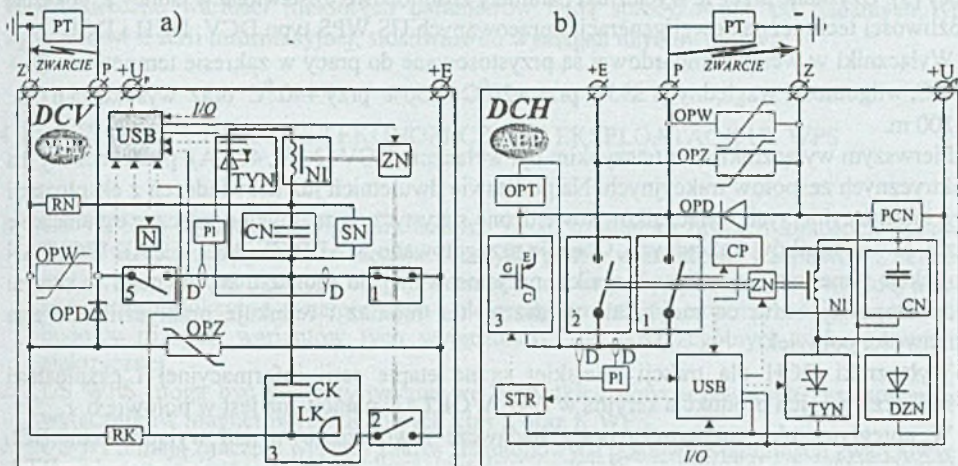


Rys. 4. Podstawowa struktura US WPS. US UW - ultraszybki układ wyłączający (wg rys. 3a lub 3b); ograniczniki napięć: OPZ - zewnętrznych, OPW - wewnętrznych; PT - pojazd trakcyjny, USB - układ sterowania i blokad, D - dyskryminatory prądu; pozostałe oznaczenia jak na rys. 3.

Fig. 4. Basic structure of US WPS. US UW - ultra-high-speed current breaking system (according to Fig. 3a or 3b); overvoltage limiters: OPZ - external, OPW - internal; PT - traction vehicle (receivers), USB - control system, D - overcurrent relays (trips); other denotations as in Fig. 3.

Przy ultraszybkim przerywaniu obwodu istotnym problemem staje się rozładowanie energii magnetycznej zawartej zarówno w indukcyjnościach sieci, jak i odbiorników pojazdowych, głównie silników, niezbędne dla uniknięcia niebezpiecznych przepięć łączeniowych. Mimo iż maksymalna energia E_M jest w przypadku US WPS kilkunastokrotnie mniejsza niż w przypadku S WPS, to praktycznie cała jest zużywana na generowanie przepięć łączeniowych, podczas gdy w wyłącznikach magnetowymuchowych jest w przeważającej części wytracana w postaci ciepła wydzielanego z łuku w komorze gaszeniowej wyłącznika. Konieczne jest zatem stosowanie w przypadku US WPS niezależnych środków ochrony przeciwprzepięciowej, m. in. warystorów tlenkowych [4] o dużej energochłonności oraz o największym napięciu wyładowczym dostosowanym do poziomu zadziałania przeciwprzepięciowej ochrony sieciowej, przy czym odpowiednio skoordynowane układy przeciwprzepięciowe mogą być wykorzystane zarówno od strony sieci, jak i odbiorników trakcyjnych. Niezależnie od tego konieczne jest stosowanie odpowiednich środków ochrony przeciwprzepięciowej półprzewodnikowych elementów mocy.

Dlatego każdy układ wyłączający klasy US WPS, niezależnie od zasady jego działania (WPP lub ASE), powinien współpracować z podwójnym układem autonomicznych ograniczników przepięć. Ogólną zasadę budowy US WPS, odpowiadającą powyższym wymaganiom, pokazano na schemacie blokowym przedstawionym na rys. 4. Dzięki takiej zasadzie budowy US WPS możliwe jest zarówno skuteczne chronienie układu pojazdu trakcyjnego od wszystkich przepięć zewnętrznych, tj. sieciowych różnego pochodzenia, jak i od przepięć wewnętrznych, tj.



Rys. 5. Schematy ideowo-blokowe US WPS: a) typu DCV dla trakcji kolejowej (zasada WPP), b) typu DCH dla trakcji miejskiej (zasada ASE). 1, 2, 3, 5, +E, +Up, P, Z, D, USB, OPZ, OPW, PT - jak na rys. 3 i 4; STR - sterownik tranzystora 3 (b), NI - napęd indukcyjno-dynamiczny, N - napęd załącznika; ograniczniki przepięć: OPZ - zewnętrznych (warystor tlenkowy), OPW - wewnętrznych (warystor tlenkowy), OPD - dioda rewersyjna, OPT - filtr ochrony tranzystora; PI - przekaźnik nadprądowy; CP - czujnik położenia organu ruchomego, ZN - zamek, CN - kondensator napędu, CK - kondensator komutacyjny; RN, RK - oporniki do ładowania CN i CK; LK - dławik komutacyjny, PCN - przetwornica, SN - stabilizator, TYN - tyrystor napędu, DZN - dioda zwrotna napędu, PT - pojazd trakcyjny (odbiorniki); I/O - zewnętrzny zespolony sygnały sterujący załączająco-wyłączający; ---- sprzężenia sterujące elektryczne i światłowodowe.

Fig. 5. Simplified schematic diagrams of US WPS: a) DCV type for rail traction (WPP principle), b) DCH type for urban traction (ASE principle). 1, 2, 3, 5, +E, +Up, P, Z, D, USB, OPZ, OPW, PT - as in Fig. 3 and 4; STR - controller of transistor 3 (b), NI - inductive-dynamic actuating mechanism, N - making switch drive; overvoltage limiters: OPZ - external (MOV type), OPW - internal (MOV type), OPD - reverse diode, OPT - transistor protective filter; PI - overcurrent relay; CP - moving contact position detector, ZN - lock, CN - actuating mechanism capacitor, CK - commutation capacitor; RN, RK - resistors for CN and CK charging; LK - commutation reactor, PCN - voltage converter, SN - voltage stabilizer, TYN - thyristor of NI, DZN - reverse diode of NI, PT - traction vehicle (receivers); I/O - external joint control signal ON/OFF; ---- control connections of light pipe and electrical types.

odbiorników, generowanych przez urządzenia wchodzące w skład elektrycznego układu pojazdu trakcyjnego w różnych stanach łączeniowych, w tym także nie związanych z działaniem wyłącznika ultraszybkiego. To ostatnie zagadnienie nie jest obecnie należycie rozpoznane i nie poświęca mu się w praktyce wystarczającej uwagi, a może być ono powodem nieoczekiwanych awarii. Przykładowo, na podstawie badań własnych zjawisk łączeniowych w układzie elektrycznego zespołu trakcyjnego o napięciu 3 kV, autorzy stwierdzili incydentalne występowanie przepięć wewnętrznych przekraczających 20 kV. Jest to poważne zagrożenie dla izolacji głównej wszystkich podzespołów układu, w tym zwłaszcza silników napędowych.

W Instytucie Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej, przy współpracy z ABB ZWAR w Warszawie i ZAE WOLTAN w Łodzi, opracowano ultraszybkie wyłączniki taborowe dla trakcji kolejowej i miejskiej wyposażone w mikroprocesorowy, elektryczno-światłowodowy system sterowania [7;8;9], wykorzystujące wyżej opisane zasady działania. Budowę wyłączników przedstawiono za pomocą schematów ideowo-blokowych pokazanych na rys. 5. Komory próżniowe współpracują w nich z impulsowym napędem indukcyjno-dynamicznym wielkiej mocy [3]. Uzyskane przez te wyłączniki parametry znamionowe, zestawione w tabeli 2, pokazują możliwości techniczne nowej generacji opracowanych US WPS typu DCV, DCH i DCL.

Wyłączniki w wersji standardowej są przystosowane do pracy w zakresie temperatur $-30 \pm +40^{\circ}\text{C}$, wilgotności względnych $\leq 95\%$ przy $+20^{\circ}\text{C}$ i $\leq 50\%$ przy $+40^{\circ}\text{C}$ oraz wysokości n.p.m. ≤ 1200 m.

Pierwszym wyłącznikiem ultraszybkim był wyłącznik DCV (3 kV, 400 A), przeznaczony dla elektrycznych zespołów trakcyjnych. Na podstawie dwuletnich już doświadczeń z eksploatacji serii informacyjnej tych wyłączników stwierdzono statystycznie znamienne, znaczne ograniczenie liczby awarii silników trakcyjnych. Obecnie przygotowano w ABB ZWAR i w ZAE WOLTAN produkcję panelowej wersji wyłącznika, przystosowanej do montażu wysuwnego w skrzyni podpodłogowej e.z.t., co radykalnie upraszcza ten montaż i redukuje praktycznie do zera możliwości pomyłek.

Wyłączniki DCH dla trakcji miejskiej są na etapie serii informacyjnej i eksploatacji doświadczalnej. Ich produkcja seryjna w ZAE WOLTAN planowana jest w połowie b. r.

W ubiegłym roku rozpoczęto prace badawcze i wdrożeniowe nad wyłącznikami DCL przeznaczonymi dla lokomotyw. Prototypy tych wyłączników, działających na zasadzie WPP, zostaną skierowane na badania pełne jeszcze w tym roku. W IAE PŁ trwają prace studialne nad rodziną ultraszybkich wyłączników podstawcyjnych, również działających na zasadzie WPP.

Tabela 2

Główne parametry znamionowe ultraszybkich wyłączników trakcyjnych

Lp	Parametr	DCV	DCH	DCL**
1	U_i [V]	3000	250; 800	3000
2	U_c [V]	3000	250; 800	3000
3	I_u [A]**	250, 400	250; 400	1000; 1600; 2000
4	I_{cr}/τ [kA/ms]	40/20, 60/30	60 / 20	40 / 20; 60 / 30
5	s_i [A/ μs]	≤ 2	≤ 3	≤ 2
6	i_o [kA]	≤ 4	$\leq 3,6$	≤ 7
7	C/τ [-/ms]	$\leq 0,1/20; \leq 0,07/30$	$\leq 0,05 / 20$	$\leq 0,15/20; \leq 0,1/30$
8	I^2t [A ² s]	$\leq 20 \text{ H } 10^3$	$\leq 10 \text{ H } 10^3$	$\leq 45 \text{ H } 10^3$
9	u_m [kV]	≤ 8	$\leq 2; \leq 3$	≤ 9
10	n_i [1] (łączeni)*	$\gg 1000$	$\gg 1000$	$\gg 1000$
11	n_m [c] (cykli)	> 20000	> 20000	> 20000
12	t_0 [ms]	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
13	t_w [ms]	≤ 2	≤ 1	≤ 3
14	m [kg]	220	ok. 55	ok. 250

gdzie: U_i - napięcie zn. izolacji, U_c - napięcie zn. łączeniowe, I_u - prąd znamionowy ciągły, τ - stała czasowa obwodu zwarcowego, I_{cn} - prąd zn. wyłączalny (przy danej τ), $s_i = di/dt$ - największa stromość prądu zwarcowego, i_o - prąd ograniczony (przy danej s_i), $C = i_o/I_{cn}$ - współczynnik ograniczenia prądu (przy danej τ), I^2t - całka Joule'a, u_m - przepięcie łączeniowe, n_l - trwałość łączeniowa, n_m - trwałość mechaniczna, t_0 - czas własny otwierania (t_{wn}) t_r , wg rys. 3) t_w - czas wyłączania (t_{wn}) t_w , wg rys. 3), m - masa wyłącznika.

Uwagi do tablicy 2: * - trwałość łączeniowa w warunkach zwarcowych (komentarz niżej),

** - ostateczne wartości niektórych parametrów będą sprecyzowane po badaniach typu wyłączników z serii informacyjnej, stosownie do wymagań użytkowników.

4. KORZYŚCI TECHNICZNE I EKONOMICZNE Z EKSPLOATACJI US WPS

1. US WPS 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 i elektrodynamicznych, stworzył nowe możliwości budowy różnych wariantów tych wyłączników dla poszczególnych rodzajów trakcji elektrycznej.
2. US WPS mogą być wykorzystywane we wszystkich dotychczasowych zastosowaniach wyłączników magnetowydmuchowych klas S oraz K WPS.
3. US WPS mają znacznie większy zakres znamionowych prądów wyłączalnych zwarcowych, niż typowe S WPS. Prądy te wzrastają proporcjonalnie do stałej czasowej, ponieważ graniczne możliwości US WPS są determinowane przez początkową stromość wzrostu prądu zwarcowego.
4. Dzięki bardzo małej energii wydzielanej z łuku w komorach próżniowych, kilka tysięcy razy mniejszej niż w przypadku S WPS, możliwe jest uzyskanie przez US WPS bardzo dużej trwałości łączeniowej, szczególnie w warunkach zwarcowych. Erozja łukowa próżniowego układu wyłączającego przestaje być czynnikiem ograniczającym tę trwałość i może ona być zbliżona do trwałości mechanicznej.
5. Bezkonkurencyjna trwałość łączeniowa US WPS w warunkach zwarcowych sprawia, że jeden wyłącznik ultraszybki będzie stanowił eksploatacyjny równoważnik co najmniej dwóch lub więcej wyłączników magnetowydmuchowych. Daje to użytkownikom znaczące korzyści ekonomiczne.
6. Szybkość działania US WPS powoduje niezwykle skuteczne ograniczanie prądów zwarcowych, które są kilkakrotnie mniejsze niż w przypadku S WPS. W typowych warunkach prądy ograniczone nie przekraczają połowy wartości prądu niszczącego silniki trakcyjne w przypadku np. łuku okrężnego na komutatorze. Tak skuteczna ochrona silników przez US WPS spowoduje bardzo znaczące ograniczenie liczby ich awarii. Daje to znaczące oszczędności finansowe, kumulujące się u użytkownika.
7. Maksymalne wartości energii magnetycznej obwodu zwarcowego wyłączanego przez US WPS, kilkunastokrotnie mniejsze niż w przypadku S WPS, mogą być bez trudu opanowywane przez typowe beziskiemnikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali (MOV). Energia ta nie obciąża komór próżniowych. Zastosowanie podwójnego układu autonomicznych ograniczników przepięć zewnętrznych i zwłaszcza wewnętrznych stanowi nową jakość ochrony przeciwprzepięciowej w układach trakcyjnych, ograniczając kompleksowo wszystkie przepięcia, także nie związane z działaniem US WPS. Znacznie zmniejsza to prawdopodobieństwo uszkodzeń izolacji głównej układu, w tym silników trakcyjnych.
8. US WPS, mając wartości całki Joule'a kilkudziesięciokrotnie mniejsze niż S WPS, mogą w praktyce skutecznie zabezpieczać półprzewodnikowe elementy mocy o znamionowych

- prądach ciągłych powyżej 100 A. Jest to równoznaczne z likwidacją bardzo ważnej bariery ograniczającej zastosowania półprzewodnikowych układów w napędach trakcyjnych oraz innych układach przemysłowych prądu stałego.
9. Wyłączniki działające na zasadzie WPP lub AEP nie mają zakresu prądów krytycznych.
 10. Strefa ochronna US WPS nie jest potrzebna. Podczas wyłączania prądu w próżni nie ma kontaktu plazmy łukowej z otoczeniem, brak więc zewnętrznych efektów optycznych, radiacyjnych, akustycznych i termicznych, nie wydzielają się żadne substancje do otoczenia.
 11. Konsekwencją przyjętych zasad działania i budowy wyłączników DCL jest ich neutralność środowiskowa. Zastosowane do budowy wyłączników i ich podzespołów materiały nie zawierają substancji szkodliwych dla środowiska.
 12. Okresowa konserwacja i obsługa w zakresie trwałości łączeniowej nie jest wymagana.
 13. US WPS będą spełniać na poziomie światowym niezbędne wymagania norm polskich i międzynarodowych zarówno z zakresu elektrotechniki, jak i z zakresu ochrony środowiska.
 14. Konkludując można stwierdzić, że wyposażanie taboru trakcyjnego w US WPS będzie bardzo korzystnym rozwiązaniem w istniejących i projektowanych typach pojazdów, a w nowoczesnych napędach trakcyjnych z półprzewodnikowymi układami różnych typów będzie to jedyne rozwiązanie skutecznie zabezpieczające te układy. Dzięki wykorzystaniu nowych zasad działania i budowy opracowane wyłączniki DCV i DCH, a w przyszłości DCL, będą w pełni odpowiadały potrzebom elektrotrakcji, cechując się przy tym zdecydowaną przewagą techniczną i konkurencyjnością ekonomiczną w stosunku do istniejących wyłączników magnetywduchowych.

Technika ultraszybkiego wyłączania zwarciovych prądów stałych znajduje się u progu swego rozwoju. Opisane metody ultraszybkiego wyłączania zwarciovych prądów stałych i wyłączniki DCV, DCH i opracowywany DCL są rozwiązaniami nowymi w skali światowej.

W listopadzie 1996 r. w Brukseli na 45 Światowych Targach Wynalazczości, Badań i Nowatorstwa Przemysłowego BRUSSELS EUREKA '1996, Międzynarodowe Jury wyróżniło wyłącznik DCV 3/400 **ZŁOTYM MEDALEM** w kategorii „Elektrotechnika”.

W listopadzie 1998 r. w Brukseli na 47 Światowych Targach Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA '1998 Międzynarodowe Jury wyróżniło wyłącznik DCH 0.8/400: **ZŁOTYM MEDALEM** w kategorii „Elektrotechnika i Elektronika”. **NAGRODĄ SPECJALNĄ** Ministra Gospodarki oraz **NAGRODĄ SPECJALNĄ** Polskiego Związku Stowarzyszeń Wynalazców i Racjonalizatorów.

LITERATURA

1. Bartosik M.: Theoretical and practical aspects of fault direct current switching off by countercurrent. Proceedings of the International Conference on ECAAA, XI'an, P. R. China, 1989.
2. Bartosik M.: Direct current switching off in vacuum. Proceedings of the VIth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-89, Postconference materials, Łódź, 1989.
3. Bartosik M., Wójcik F.: Napędy impulsowe próżniowych wyłączników trakcyjnych. Materiały Konferencji Naukowej "Rozwój systemów i środków w transporcie" TRANSSYSTEM-89, Warszawa 1989.
4. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Warystory tlenkowe jako wysokoenergetyczne ograniczniki przepięć łączeniowych w trakcji kolejowej. Materiały Konferencji Naukowej TRANSSYSTEM-89, Warszawa 1989.

5. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: Hybrydowe wyłączniki szybkie dla trakcji miejskiej. Materiały Konferencji Naukowej "SEMTRAK'96", Kraków-Zakopane 1996.
6. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: DCV 3/400;250. Ultraszybkie wyłączniki próżniowe prądu stałego. Technika Transportu Szynowego "tts" nr 11, 1996.
7. Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: New generation of D.C. circuit breakers. Proceedings of the IVth International Conference ECAAA/97, XI'an, China, 1997.
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.: Ultraszybkie próżniowe wyłączniki ograniczające typu DCL dla lokomotyw Materiały Konferencji Naukowej "SEMTRAK'98", Kraków-Zakopane 1998.
10. Bartosik M.: Progress in D. C. breaking. Proceedings of the VIIIth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP-97, Part II, Postconference Materials Łódź, 1998.

Recenzent: Dr hab.inż. Eugeniusz Kałuża
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

The article describes new types of ultra-high-speed current-limiting circuit-breakers (US WPS), intended for the rail, urban and also mine traction etc. (up to 3000V_~), especially for trains, tramways and trolley-buses. In relation to high-speed magnetic blow-out c. b. (S WPS), new circuit breakers of US WPS category have cut-off currents I_0 many times lower, maximum values of magnetic energy of short-circuit E_M several times lower, Joule integral values I^2t more than ten times lower, and energies E_w dissipated in the main switching element several thousand times lower. It gives significant advantages in exploitation. In order to gain these parameters, new principles of US WPS operation were worked out. The WPP principle depends on forced reduction of direct current to zero by current impulse of opposite direction called countercurrent, generated by additional source. This principle can be used for the construction of US WPS: vacuum (USV), thyristor (UST) or hybrid (USH) vacuum-thyristor. The AEP principle depends on forced reduction of direct current to zero by fully controlled semiconductor power device. This principle can be used for the construction of US WPS: hybrid (USH) or semiconductor (USP) with IGBT transistors (USI) or GTO thyristors (USG). The structure and principles of operation of the current breaking systems are presented. Short-circuit breaking processes with the use of the US WPS and traditional magnetic blow-out circuit breakers are compared. Due to very low values of both cut-off current and Joule integral, US WPS can protect semiconductor power devices used in drive systems of traction vehicles. Short-circuit breaking processes occurring with the use of the US WPS circuit breakers and conventional magnetic blow-out circuit breakers are compared. US WPS will fully meet the present and future urban traction requirements. Factors decisive for technical and operational predominance of the US WPS circuit breakers over conventional ones are described. US WPS will create technical and economical competition to the existing magnetic blow-out circuit breakers. Described methods of ultra-high-speed short-circuit current breaking and circuit breakers of DCV, DCH and DCL types are the new solution in the world. At 45th World Exhibition of Invention, Research and New Technology

BRUSSELS EUREKA'1996 the DCV circuit breaker was rewarded with the **Golden Medal**. At 47th BRUSSELS EUREKA'1998 the DCH circuit breaker was rewarded with the **Golden Medal**, **Special Prize** of the Minister of Economy and **Special Prize** of the Polish Union of Associations of Inventors and Rationalizers.