

Marek Bartosik, Ryszard Lasota, Franciszek Wójcik

# Wielosystemowy wyłącznik trakcyjny do pojazdów kolejowych

**Budowa wielosystemowych lokomotyw dużej mocy i prędkości do transkontynentalnego prowadzenia pociągów pasażerskich lub towarowych jest obecnie możliwa dzięki nowoczesnej technice napędów przekształtnikowych, wykorzystujących półprzewodnikowe elementy mocy i silniki asynchroniczne. W krajach Europy występują cztery podstawowe systemy zasilania trakcji kolejowej: 3 kV i 1,5 kV prądu stałego oraz 15 kV 16,7 Hz i 25 kV 50 Hz (marginalne, inne systemy [3] pominięto). Dąży się do wyeliminowania wymiany lokomotyw na granicy systemów zasilania, jest to bowiem równoznaczne ze skróceniem czasu podróży i zmniejszeniem kosztów. Obecnie w krajach Unii Europejskiej eksploatowanych jest ponad 1000 lokomotyw wielosystemowych.**

Komisja Europejska konsekwentnie dąży do stworzenia jednolitej europejskiej sieci kolejowej poprzez standaryzację poszczególnych systemów kolejowych, co zarazem jest wysoce korzystne szczególnie dla producentów lokomotyw, w tym wielosystemowych. Przykładem zaawansowanej standaryzacji i unifikacji w tym zakresie jest stworzenie przez Bombardier Transportation platformy TRAXX [1, 2, 3], obejmującej standardowe zespoły o jednakowych głównych rozwiązaniach technologicznych i technicznych, pozwalające na skonfigurowanie czterech wersji lokomotyw w zależności od potrzeb użytkowników. Podstawowe wyposażenie lokomotywy TRAXX przedstawiono na rysunku 1 [1].

Oczywistymi zaletami takiego rozwiązania jest jednolitość obsługi, zaopatrzenia i serwisu, łatwość adaptacji konfiguracji lokomotywy do ewentualnych zmian potrzeb rynkowych – nawet do przekształcenia pierwotnej wersji w inną, wreszcie zwiększenie niezawodności i jakości, skrócenie terminów montażu i dostaw, a nade wszystko wydłużenie serii produkcyjnych zespołów

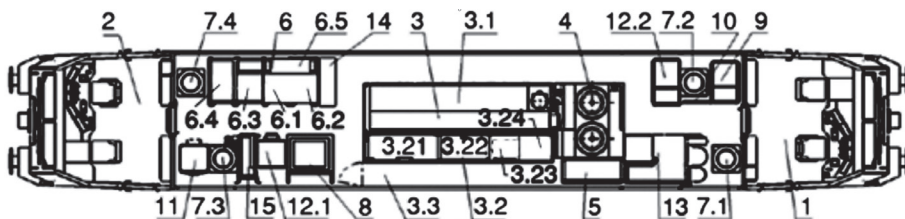
i zmniejszenie kosztów równoznaczna ze wzrostem konkurencyjności. Polska podjęta już użytkowanie nowoczesnych lokomotyw wielosystemowych typu E186, serii EU43, będącej częścią rodziny TRAXX [1]. Jak wynika z rysunku 1, standaryzacja i unifikacja platformy TRAXX nie objęła wyłączników głównych 3.21 i 3.23 lokomotyw, co było jednym z impulsów do podjęcia prac nad uniwersalnym wyłącznikiem trakcyjnym UWT, docelowo zdolnym do pracy w dowolnym systemie trakcyjnym AC lub DC. W dostępnej literaturze nie napotkano informacji o takich wyłącznikach.

## Geneza i ogólne zasady działania wyłączników UWT

W latach 1978–1992, w wyniku wieloletniego cyklu badań podstawowych, w KAE PŁ opracowano teoretyczne i eksperymentalne podstawy synchronicznego wyłączania (WS) silnych prądów przemiennych [4], wyłączania przeciwprądem (WPP) w próżni silnych prądów stałych [5, 6] oraz ultraszybkiego działania próżniowych i hybrydowych układów wyłączających [7, 8]. Umożliwiło to podjęcie w latach 1992–2004 wieloletniego cyklu prac badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych nad nową generacją DC ultraszybkich wyłączników próżniowych prądu stałego wykorzystujących zasadę WPP, przeznaczonych do podstacji i pojazdów trakcji kolejowej, a także hybrydowych (próżniowo-tranzystorowych) do podstacji i pojazdów trakcji miejskiej (tutaj pominięte). Wyłączniki mają parametry nieosiągalne dla klasycznych, magnetywomuchowych wyłączników trakcyjnych. Są to obecnie najszybciej działające i najskuteczniej ograniczające prądy zwarcio-we trakcyjne wyłączniki prądu stałego na świecie [9, 10]. Między innymi opracowano wyłączniki podstacyjne DCN z mutacją tablorową DCN-L do lokomotyw.

Wobec znanych zamierzeń wprowadzenia w Polsce nowego systemu kolei dużych prędkości o napięciu przemiennym, w latach 2005–2008 opracowano w KAE PŁ nową generację wysokonapięciowych, synchronizowanych, próżniowych wyłączników ultraszybkich SVB (25 kV 50 (60) Hz, z mutacją 15 kV 16,7 Hz) do podstacji i pojazdów kolei dużych prędkości [11, 12]. Po badaniach certyfikacyjnych na liniach zagranicznych wyłączniki będą oferowane na rynku polskim – dla ujęcia w stadium projektowym polskich kolei dużych prędkości.

Te dwie, pozornie całkiem różne techniki wyłączania w próżni zwarć w trakcyjnych systemach DC i AC, mają wspólne cechy. W obu przypadkach wyłączanie odbywa się w próżni, stosowane mogą być określone typy wyłącznikowych komór próżniowych, produkowanych przemysłowo do potrzeb elektroenergetyki, a ponadto wymagane jest ultraszybkie otwieranie komory próżniowej



Rys. 1. Rozmieszczenie elementów wyposażenia lokomotywy wielosystemowej typu E 186 serii EU43 [1]

1, 2 – przedziały maszynisty; 3 – blok wysokiego napięcia: 3.1 – podwójny przekształtnik, 3.2 – rama urządzeń w.n., 3.21 – wyłącznik AC, 3.22 – filtr wyższych harmonicznych, 3.23 – wyłącznik DC, 3.24 – zasilanie szyny zbiorczej pociągu; 3.3 – zamykany korytarz przedziału w.n., 4 – dwukanałowa wieża chłodnicza, 5 – rama układu ssawnego, 6 – szafa urządzeń pomocniczych: 6.1, 6.2 – przetwornice napięć pomocniczych, 6.3 – urządzenia rozdzielcze, 6.4 – przekształtnik, 6.5 – transformator napięć pomocniczych; 7.1÷7.4 – wentylatory silników trakcyjnych, 8 – opornik hamowania, 9 – szafa urządzeń n. n. (110 V), 10 – tablica automatyki (110 V), 11 – szafa układów elektronicznych; 12.1, 12.2 – szafy systemu automatycznego hamowania; 13 – szafa systemu pneumatycznego; 14 – szafa narzędziowa i wyposażenia specjalnego, 15 – przedział urządzeń p. poz.

wyłączającej prąd główny. Główny zespół łączeniowy jest więc w obu przypadkach jednobiegunowym, próżniowym łącznikiem z ultraszybkim napędem impulsowym i bezprzechyłowym, zamkowym organem ruchomym o trwałym stanie zamknięcia [10, 12]. Różnice występują w zakresie napięć i prądów znamionowych.

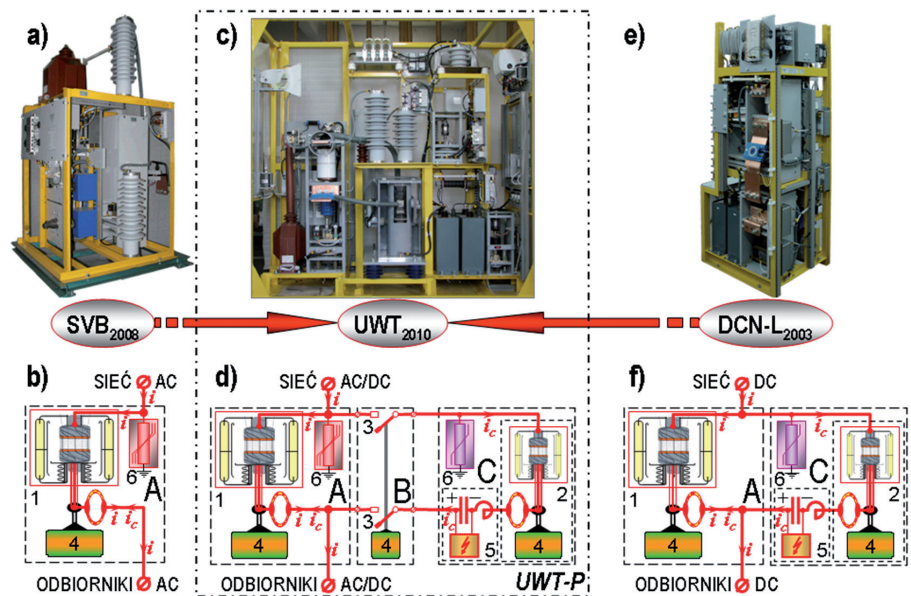
Wobec silnych tendencji do standaryzacji i unifikacji, występujących między innymi w przypadku platformy TRAXX, naturalną rzeczą było uznanie celowości użycia w obu przypadkach tego samego zespołu wyłączającego, o odpowiednich dla wszystkich systemów trakcyjnych parametrach elektrycznych i mechanicznych, z uniwersalnym systemem sterowania.

W styczniu 2010 r. zakończono prace nad wyłącznikiem uniwersalnym UWT, powstałym w wyniku połączenia właściwych zasad działania i budowy wspomnianych wyłączników DCN L oraz SVB (rys 2).

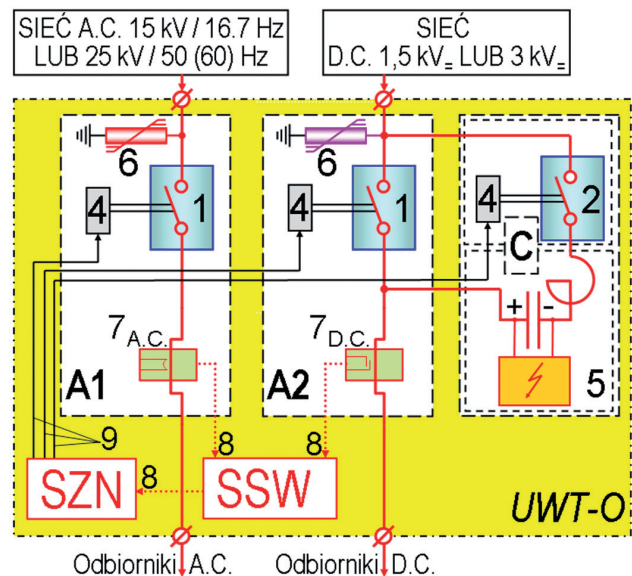
Na rysunku 2c, d, pokazano wyłącznik UWT w wersji podstawowej UWT-P, w pełni zintegrowanej. Taka wersja wyłącznika nie zawsze będzie odpowiednia do potrzeb znanych rozwiązań lokomotyw wielosystemowych. Przyjmując znaną definicję lokomotywy wielosystemowej jako pojazdu dostosowanego do poboru energii z więcej niż jednego systemu zasilania [3], w praktyce należy brać pod uwagę wiele wariantów tych lokomotyw, o zróżnicowanych konfiguracjach układów głównych i sposobach ich przełączania. Lokomotywy dwu-, trój- i czterosystemowe mają między innymi zróżnicowane: wyposażenie dachowe (liczbę i rodzaj pantografów, odłączniki pantografowe), styczniki konfiguracyjne, rodzaje silników, metody ich rozruchu i sposoby regulacji prędkości obrotowej, uzwojenia wtórne transformatora systemów AC bywają wykorzystywane jako dławiki wejściowe systemów DC etc. Tylko wymieniona platforma TRAXX w zależności od potrzeb umożliwia skonfigurowanie czterech wersji lokomotyw: TRAXX AC (15 i 25 kV AC), TRAXX MS (15 i 25 kV AC oraz 1,5 i 3 kV DC), TRAXX DC (3 kV DC), TRAXX DE (spalinowo – elektryczna) [2]. Istnieją przypadki uzasadniające potrzebę separacji torów prądowych głównych wyłącznika UWT dla systemów AC oraz DC – wówczas jest to wyłącznik w wersji opcjonalnej, częściowo zintegrowanej (rys. 3).

W wersji UWT-O integracja nie obejmuje zespołów łączeniowych A oraz ograniczników przepięć. Wyłącznik w tej wersji jest wyposażony w dwa niezależne zespoły łączeniowe A1 oraz A2, przeznaczone odpowiednio do pracy w systemach AC albo DC. Dołączanie do właściwego obwodu lokomotywy każdego z zespołów jest realizowane za pomocą systemu konfiguracyjnego lokomotywy (pantografów, odłączników i styczników konfiguracyjnych).

Oba zespoły mają różne komory próżniowe i izolację główną oraz jednakowe napędy i zamki. Masy organów ruchomych są zbliżone. Ponieważ zespoły A1 i A2 nigdy nie pracują równocześnie, ich zamki i napędy mogą być zasilane z tych samych zasob-



Rys. 2. Geneza i ogólne zasady budowy uniwersalnego (AC/DC) ultraszybkiego wyłącznika próżniowego UWT (c, d) dla lokomotyw wielosystemowych w wersji podstawowej UWT-P (w pełni zintegrowanej) a, b – ultraszybki próżniowy wyłącznik synchronizowany SVB prądu przemiennego; e, f – ultraszybki próżniowy wyłącznik DCN-L prądu stałego wyłączanego przeciwprądem; A – uniwersalny próżniowy zespół łączeniowy AC/DC; B – zespół próżniowych rozłączników konfiguracyjnych DC; C – pomocniczy zespół łączeniowy DC; 1 – główna komora próżniowa; 2 – pomocnicza komora próżniowa; 3 – rozłączniki konfiguracyjne; 4 – układy napędowe; 5 – generator przeciwprądu; 6 – ograniczniki przepięć;  $i$  – prąd główny;  $i_c$  – przeciwprąd; zespół B: w systemach AC w stanie otwarcia; w systemach DC w stanie zamknięcia



Rys. 3. Ogólne zasady budowy ultraszybkiego wyłącznika próżniowego UWT w wersji opcjonalnej UWT-O, częściowo zintegrowanej A1 – próżniowy zespół łączeniowy AC, A2 – próżniowy zespół łączeniowy DC, 7 – analizatory prądu, 8 – tory pomiarowe, 9 – tory zasilania napędów, SSW – system sterowania wyłącznika, SZN – system zasilania napędów; C oraz 1÷6 – jak na rysunku 2

ników energii. Zróżnicowane muszą być ograniczniki przepięć, bo poziom ochrony przeciwprzepięciowej jest inny dla każdego systemu trakcyjnego. Zasady działania obu wersji wyłącznika UWT są takie same.

## Wyłączanie zwarców w systemach AC oraz DC przez wyłącznik UWT

Zasadę wyłączania synchronizowanego prądu przemiennego WS przedstawiono na rysunku 4.

Na rysunku 4a pokazano przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączaniu zwarcia w systemie AC 25 kV 50 Hz, natomiast na rysunku 4b – w systemie AC 15 kV 16,7 Hz. Na rysunkach 4a i 4b skale napięć, prądów oraz czasów są jednakowe. W obu przypadkach przebiegi przedstawiono dla wyłączania granicznych prądów zwarciovych określonych w wymaganiach norm.

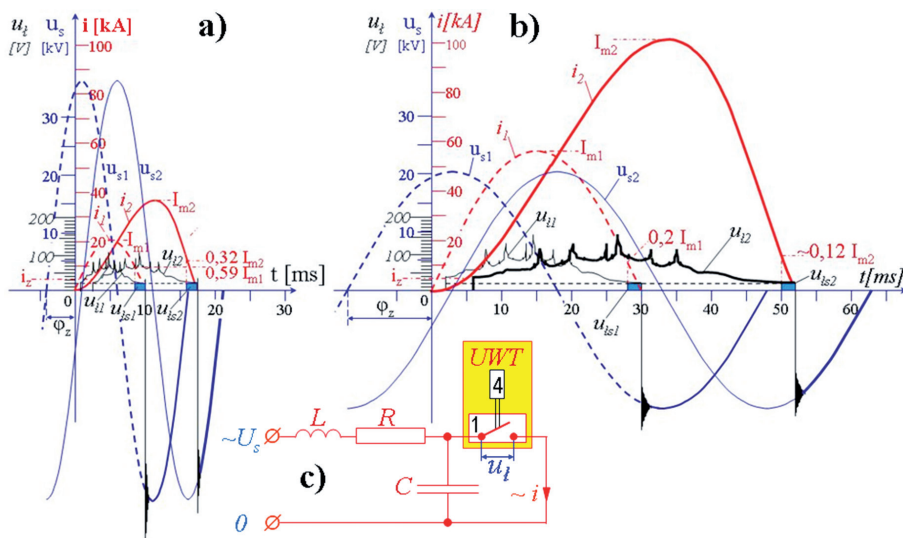
**Prądy przemiennie** są wyłączane w próżni synchronicznie przez zespoły A według rysunku 2b, d (przy zespole B próżniowych rozłączników konfiguracyjnych 3 według rysunku 2d w stanie otwarcia), tj. zestyk komory 1 jest otwierany bezpośrednio przed naturalnym zerem prądu, w którym następuje wyłączenie zwarcia. Przebieg prądu zwarciovego zależy w znany sposób od chwili wystąpienia zwarcia względem przebiegu spodziewanego prądu zwarciovego. Tylko przy zwarciu w chwili zera prądu spodziewanego wyłączana jest sinusoidalna półfala prądu symetrycznego  $i_1$ . W pozostałych przypadkach występuje składowa nieokresowa deformująca sinusoidę prądu, powodująca wzrost amplitudy prądu zwarciovego i wydłużenie czasu trwania półfali tego prądu, w granicznym przypadku do wartości pokazanych na rysunku 4a oraz 4b (prądy niesymetryczne  $i_2$ ) – przypadki pośrednie i inne pominięto. Zawsze osiągnięcie przez wzrastający prąd zwarciovych wartości prądu  $i_z$  powoduje zadziałanie wyłącznika i wyłączenie zwarcia, niesynchronizowane w przypadku zwykłego wyłącznika próżniowego, lub synchronizowane w przypadku wyłącznika UWT.

Przy niesynchronizowanym wyłączaniu zwarcia WNS, po krótkim czasie własnym następuje otwarcie zestyku komory próżniowej 1 i zapłon łuku, który pali się aż do najbliższego dojścia prądu do zera (tzw. wyłączenie półfalowe). Otwarcie zestyku następuje przy relatywnie małej wartości prądu, zależnej od prądu nastawczego wyłącznika  $i_z$  oraz czasu własnego otwierania i stromości wzrostu prądu. Duży prąd zwarciovych przez pozostałą część półfalki płynie przez łuk. Istnieje wówczas zagrożenie powstania przewężonego łuku stacjonarnego (nieruchomego), najbardziej niszczącego styki. Przy synchronizowanym wyłączaniu zwarcia WS układ sterowania wyłącznika identyfikuje wybrane parametry prądu zwarciovego i oblicza czas do przewidywanego zera prądu, uruchamiając ultraszybki napęd wyłącznika z możliwie krótkim czasem wyprzedzenia synchronicznego  $T_{ws} = T_{wo} + T_f$ , gdzie:  $T_{wo}$  – czas własny otwierania,  $T_f$  – czas łukowy (wartości stałe).

Synchronizowane otwarcie zestyku komory próżniowej względem przebiegu prądu jest uzyskiwane za pomocą synchronizowania chwili podania impulsu sterującego, powodującego załączenie impulsu silnopiętowego zasilającego cewkę ultraszybkiego napędu i otwarcie zestyku tej komory. Dla synchronizowanego wyzwalania ultraszybkiego napędu z zadaniem wyprzedzenia synchronicznego  $T_{ws} = \text{const.}$  wykorzystywany jest cyfrowy pomiar przebiegu prądu i analiza jego pochodnej oraz pierwszej harmonicznej, a także pomiary charakterystycznych przedziałów czasowych w przebiegach prądu oraz napięcia. Są to narzędzia wystarczające do identyfikacji stanu roboczego i stanu zwarcia za pomocą detekcji progowej i stromościowej prądów zwarciovych, a także dla minimalizacji rozrzutów czasu  $T_{ws}$ , powstających wskutek błędów systematycznych wykorzystywanych metod ek-

strapolacji. Szczegółowy opis metod synchronicznego sterowania wykracza poza zakres niniejszej publikacji i jest zawarty w innych publikacjach [4, 11–13].

Założony czas łukowy  $T_f$ , w którym występuje napięcie  $u_{fs}$ , liczony od chwili rozdzielenia się styków do chwili zera prądu, powinien być możliwie krótki (minimalizacja energii łuku i erozji łukowej styków komory próżniowej), a zarazem (przy założonej prędkości rozchodzenia się styków) dostatecznie długi dla uzyskania odległości styków dostatecznie dużej, o wymaganej wytrzymałości powrotnej, przy stromościach zmian napięcia powrotnego relatywnie dużych w stosunku do stromości zmian napięcia sieci. Warunkiem koniecznym do spełnienia tych wymagań i niezawodnego wyłączania synchronizowanego prądu zwarciovego jest stworzenie warunków do utrzymania w komorze wyłączającej 1 tylko dyfuzyjnej formy łuku (p. 4 [4]). Z przeciwstawnych kryteriów minimalizacji czasu łukowego oraz maksymalizacji odległości styków wynika konieczność maksymalizacji prędkości otwierania komory próżniowej 1 (rys. 2), tj. wyłącznik synchronizowany musi być ultraszybki. Są to podstawowe uwarunko-



Rys. 4. Stylizowane przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączaniu zwarcia: a) w systemie AC 25 kV 50 Hz; b) w systemie AC 15 kV 16,7 Hz; c) usytuowanie wyłącznika UWT (lub SVB) w obwodzie zwarciovym o parametrach zwarciovych  $R, L, C$

W każdym systemie po dwa przypadki wyłączania przez wyłącznik próżniowy obwodu zwartego łączonego w chwilach zera (indeksy 1) oraz maksimum (indeksy 2) zwarciovego prądu spodziewanego; przebiegi napięcia sieci tak przesunięto, by chwila załączenia w obu przypadkach odpowiadała początkowi układu współrzędnych 0;  $t$  – czas; napięcia:  $u_s$  – sieci trakcyjnej,  $u_1$  – łuku przy wyłączaniu niesynchronizowanym,  $u_{fs}$  – łuku przy wyłączaniu synchronizowanym; prądy:  $I_m$  – szczytowe,  $i_1$  – zwarciovych symetryczny,  $i_2$  – zwarciovych niesymetryczny,  $i_z$  – prąd zadziałania wyłącznika;  $\varphi_2$  – kąt fazowy obwodu zwarciovego; skale:  $k_i = 10 \text{ kA/dz}$ ,  $k_{us} = 5 \text{ kV/dz}$ ,  $k_{u1} = 10 \text{ V/dz}$ ,  $k_t = 5 \text{ ms/dz}$ ; warunki symulacji zwarc: a)  $U_s = 25 \text{ kV}$  50 Hz;  $I_1 = 15 \text{ kA}$ ;  $\cos \varphi_2 \approx 0,2$ ; b)  $U_s = 15 \text{ kV}$  16,7 Hz;  $I_1 = 40 \text{ kA}$ ;  $\cos \varphi_2 \approx 0,2$ ; 1, 4 – jak na rysunku 2

wania determinujące wymagania elektryczne i kinetyczne dla ultraszybkiego napędu wyłącznika.

Zasadę wyłączania przeciwprądem prądu stałego WPP przedstawiono na rysunku 5.

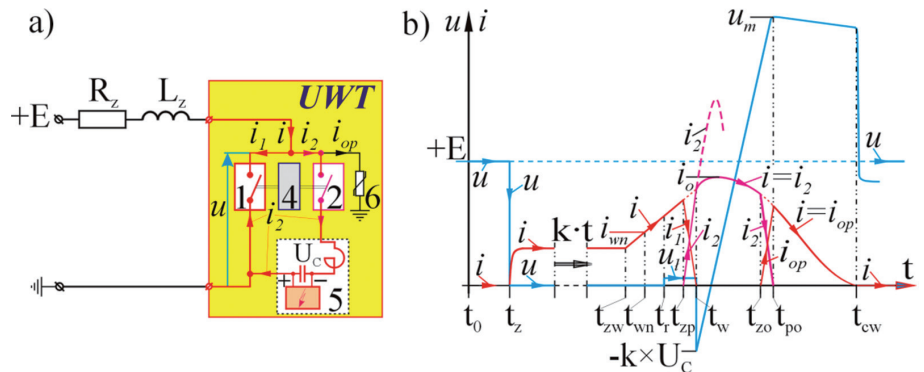
Na rysunku 5a pokazano usytuowanie wyłącznika UWT (lub DCN-L) w obwodzie zwarciovym o parametrach zwarciovych  $R_z, L_z$ , natomiast na rysunku 5b pokazano przebiegi łączeniowe prądów i napięć przy wyłączaniu zwarcia w systemie DC 3 kV.

**Prądy stałe** są wyłączane w próżni za pomocą przeciwprądu przez współpracujące zespoły A oraz C według rysunku 2d, f (przy zespole B próżniowych rozłączników konfiguracyjnych 3 według rysunku 2d w stanie zamknięcia), tj. zestyk komory 1 jest otwierany po możliwie krótkim czasie własnym otwierania wyłącznika, liczonym od chwili osiągnięcia przez prąd zwarciovym wartości prądu nastawczego (zadziałania) wyłącznika.

Wyłączanie silnych prądów stałych za pomocą przeciwprądu polega na wymuszonym sprowadzeniu do zera prądu stałego  $i$  w komorze próżniowej 1 za pomocą impulsu prądu  $i_2$  o kierunku przeciwnym (zwanego przeciwprądem), uzyskanego z obcego źródła (baterii kondensatorów generatora 5).

Działanie wyłącznika o schemacie blokowym według rysunku 5b podczas WPP oraz przebiegi łączeniowe prądów i napięć opisano dla przypadku zwarcia ze stanu obciążenia. Obwód jest załączany wskutek zamknięcia komory 1 przy otwartej komorze 2. Kondensator komutacyjny w generatorze przeciwprądu 5 jest wstępnie naładowany i ma polaryzację przeciwną do napięcia zasilającego. W chwili  $t_{zw}$  pojawia się zwarcie. Płynący przez komorę główną 1 prąd zwarciovym  $i = i_1$  wzrasta i osiąga wartość prądu zadziałania  $i_{wn}$ , powodując uruchomienie wyłącznika. Po krótkim czasie własnym w chwili  $t_r$  zestyk komory 1 otwiera się powodując zapłon łuku, a następnie w chwili  $t_{zp}$  zestyk komory 2 zamyka się impulsowo, załączając przeciwprąd  $i_2$  płynący w obwodzie 5-1-2. W komorze 1 przeciwprąd  $i_2$  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 przetadowywanym kondensatorze ulega odwróceniu i wzrasta, powodując intensywne zmniejszanie się prądu zwarciovego. Gdy przepięcie łączeniowe osiągnie w chwili  $t_{zo}$  próg zadziałania ogranicznika przepięć 6, zaczyna płynąć prąd  $i_{op}$ . W czasie  $t_{zo} \div t_{po}$  cały prąd główny zostaje przejęty przez ogranicznik 6, rozładowujący energię magnetyczną obwodu i ograniczający przepięcie do wymaganej wartości  $u_m$ , wskutek czego prąd główny dąży do zera.

Czas własny otwierania wyłącznika ( $t_{wn} \div t_r$ ) oraz czas łukowy ( $t_r \div t_w$ ) powinny być możliwie krótkie dla uzyskania możliwie małego prądu ograniczonego i zachowania dyfuzyjnej formy łuku (p. 4) oraz minimalnej energii łuku, minimalnej erozji styków i dużej trwałości łączeniowej, a zarazem czas łukowy musi być wystarczająco długi dla uzyskania w chwili zera prądu dostatecznie dużej odległości styków o wymaganej wytrzymałości powrotnej dla danego napięcia sieci. Podobnie jak przy wyłączaniu synchronizowanym, przy wyłączaniu przeciwprądem występują takie



Rys. 5. Zasada działania wyłącznika UWT podczas WPP

a) usytuowanie wyłącznika UWT (lub DCN-L) w obwodzie zwarciovym;  $R_z, L_z$  – rezystancja i indukcyjność obwodu zwarciovego; komory próżniowe: 1 – główna, 2 – pomocnicza; 4 – system napędów i sterowania; 5 – generator przeciwprądu, 6 – ogranicznik przepięć; napięcia:  $+E$  – sieci,  $u$  – na wyłączniku,  $u_l$  – łuku,  $u_m$  – ograniczone,  $U_c$  – kondensatora komutacyjnego,  $-k \times U_c$  – wsteczne ( $k < 1$ ); prądy:  $i$  – zwarciovym,  $i_{wn}$  – zadziałania wyzwalacza,  $i_1$  – komory 1,  $i_2$  – przeciwprąd,  $i_o$  – 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,  $t_w$  – wyłączenia zwarcia w komorze 1,  $t_{zo}$  – zadziałania ogranicznika przepięć,  $t_{po}$  – przejęcia prądu przez ogranicznik,  $t_{cw}$  – całkowitego wyłączenia zwarcia

same kryteria narzucające maksymalizację prędkości otwierania komory próżniowej 1 (rys. 2), czyli konieczność ultraszybkiego działania napędu tej komory.

### Próżniowy zespół łączeniowy

Podane wymagania dotyczą obu wersji wyłącznika UWT, tj. próżniowych zespołów łączeniowych w wersjach A (uniwersalnej dla systemów AC/DC – rys. 2), lub A1 (dla systemów AC) oraz A2 (dla systemów DC) według rysunku 3.

Główna komora próżniowa jest zdolna do wyłączenia zwarcia w warunkach WS lub WPP, gdy bezpośrednio po chwili pierwszego dojścia prądu głównego do zera wytrzymałość powrotna przerwy zestykowej w tej komorze jest większa od wartości maksymalnej napięcia powrotnego (rys. 4) lub wartości napięcia ograniczonego  $u_m$  (rys. 5). Liczne badania wytrzymałości powrotnej próżni charakteryzują się bardzo dużym zróżnicowaniem metod i warunków badań oraz uzyskiwanych przez różnych badaczy wyników [4, 15].

Przykładowo, w zakresie odległości styków  $d \leq 4$  mm, przy średniej prędkości rozchodzenia się styków  $v_{sr}$  i czasie łukowym  $T_p$ , udarowa wytrzymałość powrotna zależy od odległości styków  $d = v_{sr} \times T_p$  i jest definiowana jako napięcie przeskoku  $u_p \approx K_p \times d$ , gdzie średnie udarowe natężenie przeskoku  $K_p \approx 25$  kV/mm [15]. Statyczne natężenie przeskoku w przerwie próżniowej, zależne od kilku parametrów, jest duże (np. dla zestyku płaskiego z Cu wynosi ok. 140 kV/cm) [4]. Dla częstotliwości 50, 60 lub 16,7 Hz można operować statycznym napięciem przeskoku  $K_{ps}$  obliczanym dla styków płaskich ze wzoru empirycznego  $u_{ps} = f(d) = 99,4 \times d^{0,88}$  [kV] (według pomiarów napięciem przemiennym 50 Hz w zakresie  $d \leq 2$  cm). Stąd można przyjąć średnie  $K_{ps} \approx 10$  kV/mm [12]. Z zasady przezorności wynika, że do oszacowania warunków niezawodnego wyłączania zwarc metodą WS lub WPP najbezpieczniejsze jest przyjmowanie  $K_{ps}$  jako wartości najmniejszej. Czas łukowy oraz charakterystyka statyczna próżni są wówczas podstawowymi czynnikami determinującymi parametry

kinetyczne organów ruchomych zespołów A, A1, A2, zwłaszcza ich średnią prędkość i czas własny otwierania.

Przy czasie łukowym rzędu  $T_l = 2 \div 3$  ms oraz prędkości styku ruchomego rzędu  $v_{sr} = 2$  m/s, wystarcza to w zupełności do uzyskania wytrzymałości powrotnej rzędu 40 ÷ 60 kV, wystarczającej podczas ultraszybkiego wyłączenia zwarć za pomocą metod WS oraz WPP. Skracanie czasu łukowego jest limitowane wartością dopuszczalnej prędkości otwierania komory próżniowej, określanej przez producenta, determinującej minimalny czas łukowy.

Ultraszybkie otwieranie zestyku głównej komory próżniowej zespołów A, A1 i A2 wyłączników UWT (podobnie jak w SVB lub DCN-L) wymaga stosowania napędów impulsowych wielkiej mocy. W tych zespołach stosowane są napędy indukcyjno-dynamiczne. Są one niezawodne, charakteryzują się prostotą budowy i relatywnie dużą trwałością mechaniczną. Napędy te potrafią krótkotrwale wytwarzać wielkie siły napędowe, umożliwiające organowi ruchomemu wyłącznika, w zależności od masy, uzyskanie wielkiego przyspieszenia początkowego, nawet rzędu  $10^4 \div 10^6$  m/s<sup>2</sup>, czasu własnego otwierania poniżej 500 μs oraz średniej prędkości otwierania zestyku ponad  $v_{sr} = 2$  m/s. Ograniczeniem w tym zakresie jest wytrzymałość mechaniczna organu ruchomego, zwłaszcza komór próżniowych. W praktyce pod działaniem napędu powstają w organie ruchomym wielkie udarowe naprężenia mechaniczne o falowym charakterze. Przekroczenie wartości naprężeń dopuszczalnych dla stosowanych materiałów konstrukcyjnych powoduje bardzo szybkie zmniejszanie się trwałości mechanicznej wyłącznika lub jego zniszczenie. Jest to nieprzekraczalna bariera praktyczna wykluczająca obecnie zmniejszanie czasu własnego wyłącznika poniżej 100 ÷ 200 μs.

Jak wspomniano, warunkiem koniecznym do niezawodnego wyłączenia metodami WS lub WPP jest stworzenie warunków do utrzymania w głównej komorze próżniowej dyfuzyjnej formy łuku wyłączeniowego, ponieważ tylko wówczas zależności te są słuszne w całym okresie połukowym (liczonym od chwili dojścia prądu do zera). Łuk dyfuzyjny występuje przy określonych warunkach geometrycznych zestyku, determinowanych stosunkiem średnicy styków do ich odległości oraz przy wartościach prądu mniejszych od pewnej wartości granicznej  $i_g$ , silnie zależnej od natężenia składowej osiowej pola magnetycznego w przerwie zestykowej. Materiał styków nie może zawierać składników niskotopliwych. Struktura łukowego wyładowania dyfuzyjnego jest wielokanałowa, przy stanie elektrod: katoda – aktywna, anoda – pasywna i braku lokalnych ognisk termicznych na anodzie. Przepływ plazmy w każdym kanale jest dyfuzyjny (bezzderzeniowy). Ruch kanałów jest szybki, bezładny, po całej powierzchni styków. Erozja styków jest równomierna. Średnie napięcie łuku dyfuzyjnego jest zawarte w granicach:  $u_l = (10 \div 27) V \approx \text{const}$ . Po dojściu prądu do zera początkowa gęstość plazmy połukowej jest mniejsza od wartości krytycznej, poniżej której średnia droga swobodna atomów staje się większa od odległości styków. W takich warunkach po chwili dojścia prądu do zera wytrzymałość powrotna wzrasta skokowo do wytrzymałości statycznej zimnej przerwy próżniowej  $K_{ps}$ . Przy prądach większych od wartości granicznej  $i_g$ , szacowanej przy AC na ok. 9 kA ( $\sim 13$  kA<sub>max</sub>), łuk dyfuzyjny przekształca się w łuk przewężony z czynną anodą, co zupełnie zmienia jego właściwości i zachowanie się na stykach oraz może początkowo zmniejszać wytrzymałość powrotną. Przy typowych dla obwodów trakcyjnych stromościach dojścia prądu zwarcioowego do zera,

większych w systemach AC niż w DC, osiągnięcie wartości szczytowych prądu łuku mniejszych od  $i_g$  wymaga czasu łukowego do ok. 2 ms, ale przy zbyt małych czasach łukowych nie uzyska się dostatecznej wytrzymałości powrotnej, więc nastąpi desynchronizacja wyłączania, tj. ponowny ząpton łuku i wyłączenie po następnym półokresie prądu zwarcioowego. Wartość prądu granicznego  $i_g$  silnie wzrasta ze wzrostem natężenia osiowego pola magnetycznego przerwie zestykowej głównej komory próżniowej. Znane typy komór próżniowych generujące takie pole są zdolne do zachowywania dyfuzyjnej formy łuku nawet przy prądach rzędu 60 kA [9, 10], w przeciwieństwie do komór z polem radialnym.

Bardziej szczegółowy opis zjawisk w próżni przy WS i WPP wykracza poza zakres tej publikacji, jest dostępny we wcześniejszych pracach autorów, a w [4] jest podane bardzo obszerne zestawienie literatury obcej na ten temat.

Z przedstawionych informacji wynikają dla celów aplikacyjnych dwie konstatacje:

- ze względu na prawdopodobieństwo występowania (zwłaszcza przy WS) prądów szczytowych łuku próżniowego o wartościach zbliżonych lub większych od prądu granicznego  $i_g$ , do stosowania w zespołach A1 oraz A2 wyłączników UWT są przydatne tylko komory próżniowe z osiowym polem magnetycznym;
- w przypadku zespołów łączeniowych w wersji A2 (dla systemów DC) warunki pracy głównej komory próżniowej będą łatwiejsze niż w A1, dobór parametrów elektrycznych zespołów będzie dokonywany na podstawie odrębnych kryteriów szczegółowych, mniejsza będzie dynamika pracy organów ruchomych.

Próżniowy zespół łączeniowy w wersji A1 jest zamkowym łącznikiem jednobiegunowym o sile zwrotnej i trwałym położeniu zamknięcia, z komorą próżniową o opisanych właściwościach współpracującą bezprzechyłowo z ultraszybkim napędem indukcyjno-dynamicznym otwierającym tę komorę, utrzymywanym w stanie otwarcia przez podwójny zespół zamków złożony z zamka głównego i przechwytyjącego, wyposażonym w styki pomocnicze i czujniki położenia, nadto opcjonalnie wyposażanym w układ adynamiczny. Budowę takiego zespołu pokazano na rysunku 6.

Zespół łączeniowy ma zwartą budowę dzięki usytuowaniu jego podzespołów wewnątrz korpusu nośnego złożonego z elementów B, stanowiących sztywne bazy odniesienia, umożliwiające precyzyjną regulację wzajemnego położenia podzespołów. Styk ruchomy komory próżniowej 2 napędzany jest bezprzechyłowo za pomocą prostowodu złożonego z dwuczęściowego pręta napędowego 5 połączonego izolatorem 6, przez ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny 11, w którym metalowy dysk 13 pracujący jako zwój zwarty jest odrzucany od cewki napędowej 12 siłą elektrodynamiczną generowaną wskutek interakcji prądu indukowanego w dysku z prądem w cewce, przez którą przepływa impuls wieloprądowy wytwarzany przez rozładowanie kondensatora. Dysk 13 połączony jest samostawnie z prętem napędowym 5, na którym są osadzone zaczepy zamków 8 i 9. Każdy z nich utrzymuje styki komory 2 w stanie otwarcia przy innej odległości międzystykowej. Umożliwia to etapowe zamykanie komory 2 przy załączaniu, co jest konieczne ze względu na masy i duże szybkości ruchomych elementów oraz minimalne czasy gotowości zamków, dla zapewnienia właściwej pracy wyłącznika w przypadku załączenia obwodu zwartego. Po zadziałaniu napędu wyłącznik

jest zatrzymywany w położeniu otwarcia przez zamek 9. Przy złączaniu zamek 9 otwiera się, ale komora KG jest krótkotrwałe utrzymywana w stanie otwarcia przez zamek 8, podczas gdy zamek 9 powraca do stanu gotowości. Dopiero wtedy otwarcie zamka 8 powoduje zamknięcie wyłącznika pod działaniem sprężyny 15. Generatory impulsów zasilania napędów zamków 8z i 9z są niezależne. Bezprzechylowy napęd prostowodowy styku ruchomego i samoustawne zawieszenie dysku są najkorzystniejsze dla komory próżniowej ze względu na minimalizację uderowych narażeń mechanicznych i naprężeń bocznych podczas pracy wyłączniowej. Napęd 11 jest zasilany impulsem wieloprądowym z zasilacza 16, w którym źródłem energii jest zespół kondensatorów ładowany z przetwornicy zasilanej napięciem pomocniczym.

Ze względu na duże wartości uderowych prądów zwarciovych (p. 3, rys. 4) i wymagane wówczas duże wartości docisków zestykowych, możliwe jest wykorzystanie elektrodynamicznego oddziaływania prądu zwarciovego za pomocą układu antyszczepieniowego UA, zwiększającego docisk zestykowy w zakresie wielkich prądów (proporcjonalnie do kwadratu wartości chwilowej prądu). UA jest dodatkowym napędem indukcyjno-dynamicznym, działającym odwrotnie do napędu 11. Między cewką a dyskiem układu UA jest relatywnie duża szczelina robocza. Cewka tego układu jest połączona szeregowo z zestykiem komory 2 i płynie przez nią prąd główny, dzięki czemu dysk skutecznie dociska zestyk komory 2 w zakresie szczytu sinusoidy prądu zwarciovego. Oddziaływanie to szybko się zmniejsza gdy prąd dąży po sinusoidzie do zera i w chwili zadziałania napędu 11 jest znacznie mniejsze od siły napędowej. Dzięki temu można ograniczyć siłę zwrotną  $F_z$ , co poprawia warunki pracy komory 2 (mniejsze prędkości zamykania) i zamków 8 i 9 (mniejsze siły statyczne i dynamiczne, mniejsze siły napędów NZ tych zamków). Możliwe są również inne rozwiązania konstrukcyjne układu antyszczepieniowego (np. → rys. 7, napęd 51 załącznika przeciwprądu 45).

Szczegółowy opis zespołu łączeniowego i układu adynamicznego UA wykracza poza rozmiary niniejszej publikacji, więcej informacji na ten temat, szczególnie różnych wariantów UA, podano w [12].

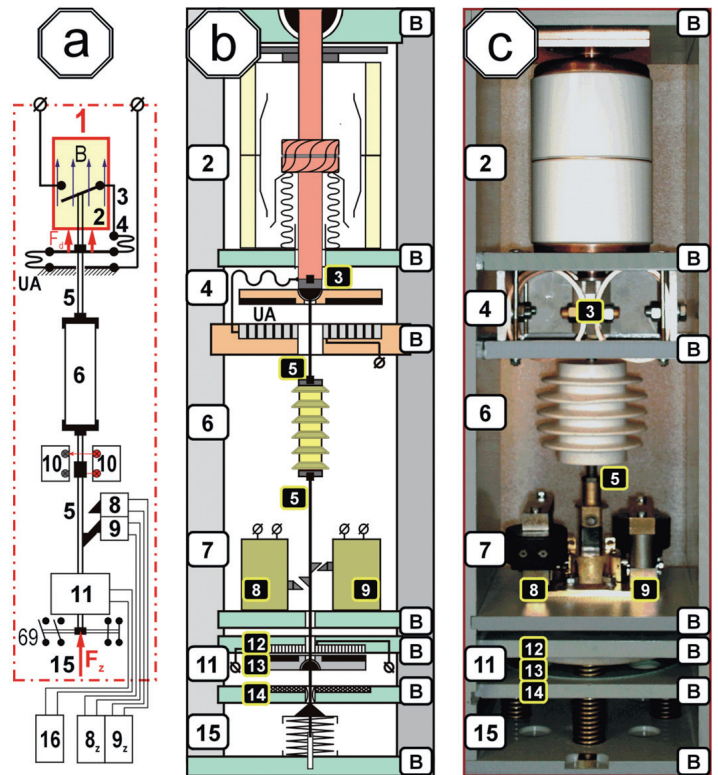
## Działanie wyłącznika UWT przy zmianach systemu zasilania sieci trakcyjnej oraz przy wyłączeniu zwarciovych prądów przemiennych i stałych

### 1. Schemat ideowo-blokowy wyłącznika UWT

Uproszczony główny schemat ideowo-blokowy wyłącznika w wersji UWT-P (w pełni zintegrowanej) pokazano na rysunku 7. Konfiguracja główna zespołów A, B, C odpowiada konfiguracji wyłącznika według rysunku 2d.

### 2. Zmiany systemu zasilania sieci trakcyjnej

Różne systemy zasilania (a w przypadku AC także odcinki trakcyjne zasilane z różnych faz, lub przy 16,7 Hz z różnych sieci zasilających) są łączone za pomocą tzw. sekcji separacji, ponieważ podczas przejazdu pociągi nie mogą powodować zwierania dwóch układów trakcyjnych o innych rodzajach zasilania. Sekcje separacji są stosowane między innymi w kilku typowych przypad-



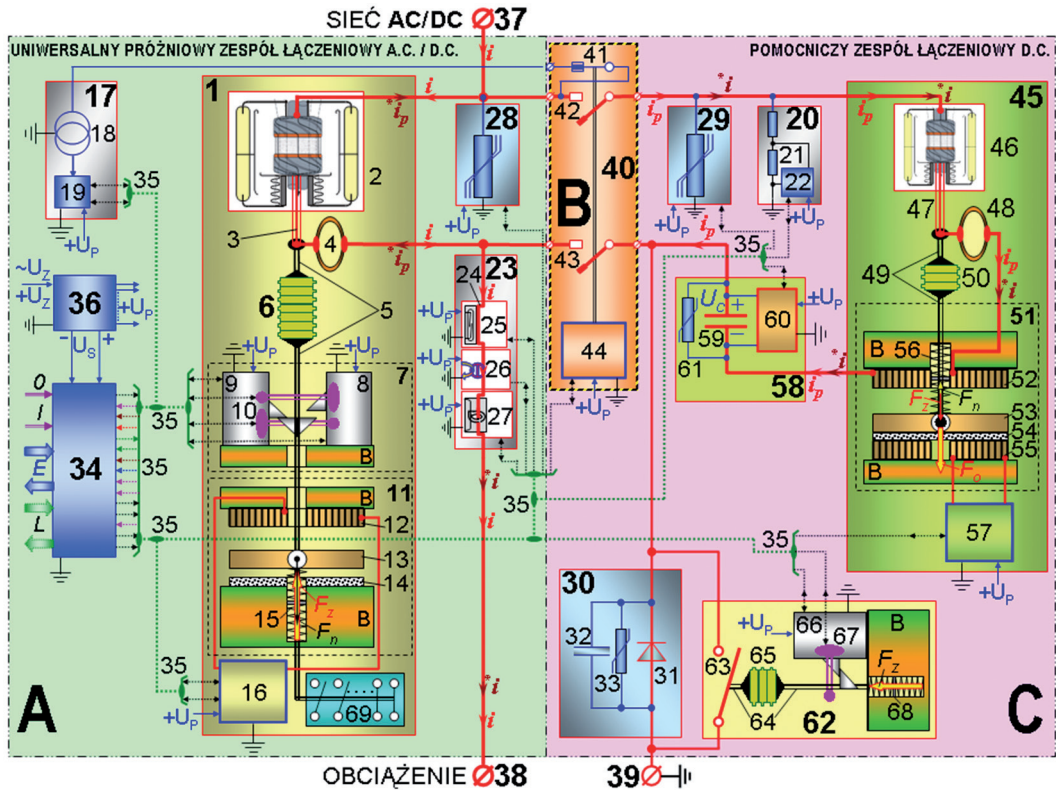
Rys. 6. Uniwersalny próżniowy zespół łączeniowy AC/DC

a) schemat ideowo-blokowy, b) schemat kinematyczny, c) widok zespołu (numeracja elementów zgodna ze schematem szczegółowym wyłącznika pokazanym na rysunku 7) 1 – ultraszybki zespół wyłączający, 2 – komora próżniowa, 3 – przyłącze styku ruchomego, 4 – połączenie podatne, 5 – dwuczęściowy pręt napędowy, 6 – izolator napędowy, 7 – zespół zamków, 8 – zamek przechwytyjący, 9 – zamek główny, 10 – czujniki położenia; 11 – ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny, 12 – cewka, 13 – dysk, 14 – amortyzator, 15 – sprężyna zamykająca o sile  $F_z$ , 69 – styki pomocnicze, B – sztywne bazy konstrukcyjne, UA – układ adynamiczny o sile  $F_d$  (montowany opcjonalnie), poza zespołem: 8z, 9z – generatory impulsów zasilania napędów zamków, 16 – generator silnoprądowego impulsu napędowego

kach, jak np.: → między systemami DC i AC, a także DC i DC lub AC i AC o różnych napięciach; → w systemach AC między odcinkami zasilanymi z różnych faz; → w systemie AC 15 kV 16,7 Hz między odcinkami o napięciach niesynchronizowanych (przy zasilaniu scentralizowanym lub zdecentralizowanym)<sup>1</sup>. We wszystkich przypadkach przejazdów przez sekcje separacji, sekwencje działania wyłączników UWT są podobne. Szczegóły zależą od typu zasilania odcinków rozdzielonych sekcją separacji i od kierunku przejazdu.

Możliwe są dwa rodzaje przejazdu pociągu przez sekcje separacji: z podniesionymi pantografami, albo z opuszczonymi pantografami. Ze względów eksploatacyjnych pierwszy sposób jest podstawowy dla wyłączników UWT. Podsystem sterowania ruchem powinien wysyłać do pojazdu trakcyjnego niezbędne sygnały sterujące, by w trakcie przejazdu przez sekcję separacji różnych systemów wyłącznik UWT dokonywał odpowiednich

<sup>1</sup> System AC 15 kV 16,7 Hz. Zasilanie scentralizowane – dwa źródła energii: 1 – kolejowa sieć dwufazowa  $2 \times 110$  kV / 16,7 Hz → transformacja na 15 kV 16,7 Hz; 2 – krajowa sieć trójfazowa  $3 \times 110$  kV 50 Hz → transformacja na 15 kV / 50 Hz → przetwarzanie na 16,7 Hz. Zasilanie zdecentralizowane – źródło energii 2 jw. → przekształcanie elektromaszynowe (transformacja z napięcia  $3 \times 110$  kV 50 Hz na napięcie pośrednie trójfazowe silnika synchronicznego, napędzającego jednofazową prądnicę o częstotliwości 16,7 Hz → transformacja napięcia prądnicy na 15 kV 16,7 Hz).



Rys. 7. Uproszczony ideowo-blokowy schemat główny wyłącznika UWT

A – uniwersalny próżniowy zespół łączeniowy AC/DC; B – zespół próżniowych rozłączników konfiguracyjnych DC; C – pomocniczy zespół łączeniowy DC  
 Ultraszybki zespół wyłączający; 1, 2 – komora próżniowa, 3 – przyłącze styku ruchomego, 4 – połączenie podatne, 5 – dwuczęściowy pręt napędowy, 6 – izolator napędowy; 7 – zespół zamków, 8 – zamek przechwytyjący, 9 – zamek główny, 10 – czujniki położenia; 11 – ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny, 12 – cewka, 13 – dysk o sile  $F_n$ , 14 – amortyzator, 15 – sprężyna zamykająca o sile  $F_z$ , 16 – generator silnopiędowego impulsu napędowego; układy pomiarowe: 17 – zespół pomiaru napięcia przemiennego, 18 – przekładnik napięciowy, 19 – analizator napięcia, 20 – zespół pomiaru napięcia stałego, 21 – dzielnik napięcia, 22 – analizator napięcia, 23 – zespół pomiaru prądów, 24 – szyna pomiarowa, 25 – progowy detektor prądów AC/DC, 26 – cewka Rogowskiego z analizatorem prądu przemiennego, 27 – analizator prądu stałego; ochrona przeciwprzebiegowa: 28 – ogranicznik przepięć zewnętrznych systemu AC, 29 – ogranicznik przepięć zewnętrznych systemu DC, 30 – ogranicznik przepięć wewnętrznych systemu DC, 31 – dioda zwrotna, 32 – kondensator, 33 – warystor tlenkowy; system sterowania: 34 – główny sterownik mikroprocesorowy, 35 – magistrale światłowodowe, 36 – zasilacz; główne zaciski przyłączeniowe: 37 – sieciowy, 38 – odbiornikowy, 39 – uziomowy; zespół rozłączników konfiguracyjnych: 40, 41 – odcinacz napięcia, 42 i 43 – rozłączniki konfiguracyjne, 44 – napęd; załącznik przeciwprądu 45, 46 – komora próżniowa, 47 – przyłącze styku ruchomego, 48 – połączenie podatne, 49 – dwuczęściowy pręt napędowy, 50 – izolator napędowy; 51 – ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny; 52 – cewka otwierająca, 53 – dysk o sile  $F_n$  lub  $F_o$ , 54 – amortyzator, 55 – cewka zamykająca, 56 – sprężyna otwierająca o sile  $F_z$ , 57 – generator silnopiędowego impulsu napędowego; generator przeciwprądu 58, 59 – kondensator komutacyjny, 60 – przetwornica, 61 – warystor tlenkowy; uziemnik 62, 63 – zestyk główny, 64 – dwuczęściowy pręt napędowy, 65 – izolator napędowy, 66 – zamek, 67 – czujnik położenia, 68 – sprężyna zamykająca o sile  $F_z$ ; 69 – łączniki pomocnicze; B – sztywne bazy konstrukcyjne; napięcia: UP – napięcie pomocnicze, US – napięcie pomocnicze sterownika, UZ – napięcie pomocnicze zasilające, UC – napięcie na kondensatorze komutacyjnym 59; prądy:  $i$  – prąd główny,  $i_p$  – przeciwprąd; przy zamkniętych załącznikach 42 i 43:  $*i_p$  – tor przeciwprądu,  $*i$  – tor prądu głównego po wyłączeniu prądu w komorze 2; zewnętrzne sygnały sterujące: E – elektryczne, L – optyczne, O/I – manualne (tylko serwisowe)

przełączeń bez udziału maszynisty, otwierając we właściwym czasie zespół łączeniowy opuszczanego systemu tak, by urządzenia elektryczne pojazdu odcinające system zasilania zostały całkowicie wyłączone przed osiągnięciem nowego systemu zasilania. W systemie lokomotywy mogą pozostać dołączone do sieci poza wyłącznikiem jedynie te układy elektryczne pojazdu, które są zdolne do natychmiastowego dostosowania się do zmiany napięcia zasilania na pantografie. Przed ponownym załączeniem sekwencja czynności ma zawsze podobny przebieg (p. 3).

W przypadku braku automatycznego sterowania zewnętrznego, własny układ sterowania wyłącznika UWT umożliwia, w zależności od potrzeb, wykrywanie wyjazdu z jednego systemu, wjazdu na odcinek separacji i wyłączenie właściwych układów elektrycznych w pojeździe, a następnie automatyczne rozpoznawanie napięcia na pantografie w nowym systemie zasilania w ce-

lu skonfigurowania wyłącznika oraz załączenia innych odpowiednich urządzeń pokładowych.

### 3. Syntetyczny opis sekwencji działania wyłącznika UWT

1. W stanie wyjściowym wyłącznik UWT zawsze przyjmuje konfigurację do pracy wyłącznika w obwodzie 25 kV. Rozłączniki 42 i 43 są otwarte, odcinacz 41 zamknięty, a ogranicznik 28 na poziomie 25 kV (system zmiany układu połączeń ograniczników dla różnych poziomów ochrony oraz system ich monitoringu tutaj pominięto). Pojawienie się napięcia na pantografie uruchamia sterownik 34 i jego procedury testujące. Rozpoczyna się proces dostosowania konfiguracji wyłącznika do napięcia zasilającego.

2. Analizator 19 dokonuje pomiaru napięcia na zacisku 37 wyłącznika poprzez przekładnik napięciowy 18 i przetworzony sygnał przesyła do sterownika 34. Jeśli sterownik stwierdzi obecność

napięcia przemiennego, wtedy zespół 40 nie zmienia położenia. Wynik pomiaru wartości tego napięcia decyduje o konfiguracji ogranicznika przepięć 28. Jeśli napięcie będzie miało wartość około 25 kV, pozostaje ona bez zmian. Jeżeli zidentyfikowane będzie napięcie 15 kV, nastąpi przetłoczenie ogranicznika dla odpowiedniego obniżenia poziomu ochrony przeciwprzepięciowej.

3. Jeżeli analizator 19 nie stwierdzi obecności napięcia przemiennego, a zostanie zidentyfikowany stały prąd płynący przez pierwotne uzwojenie przekładnika 18, nastąpi zadziałanie napędu 44 i przestawienie zespołu odcinaczy konfiguracyjnych 40. W efekcie zamykają się odcinacze 42 i 43 oraz otwiera się 41, odtaczając pierwotne uzwojenie przekładnika PNH od napięcia zasilającego. Proces identyfikacji napięć trwa stosunkowo krótko i czas jego trwania nie zagraża przegrzaniem uzwojenia pierwotnego przekładnika w przypadku obciążenia prądem stałym. Przesłanie zespołu 40 powoduje dołączenie zespołu pomocniczego DC, w tym układu generującego przeciwprąd, do głównego zespołu łączeniowego wyłącznika.

4. W wyniku opisanych działań, do obwodu głównego dołączony zostaje również zespół 20 mierzący napięcie stałe. Jeśli w wyniku pomiaru zostanie stwierdzona obecność napięcia 3 kV, wtedy sterownik 34 kończy działania konfiguracyjne wyłącznika i przechodzi do procedur umożliwiających uzyskanie gotowości do załączenia.

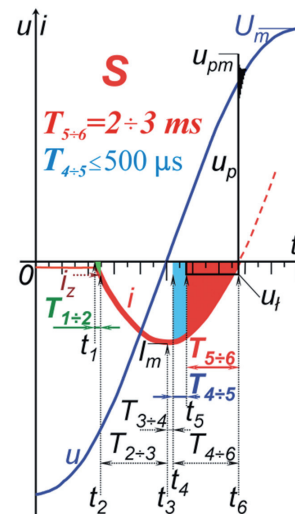
5. Zanik głównego napięcia zasilającego przez czas dłuższy od zadanego w sterowniku, zawsze powoduje powrót układu do punktu wyjścia i ponowną weryfikację napięcia zasilającego.

6. Po wstępnej konfiguracji wyłącznika, w zależności od rodzaju i wartości napięcia głównego, pracuje on dalej tak jak próżniowy wyłącznik ultraszybki DC lub synchronizowany AC (syntetyczne opisy w p. 3, 5.4 i 5.5, więcej informacji w cytowanej literaturze [5÷14]).

#### 4. Działanie wyłącznika UWT przy synchronizowanym wyłączeniu prądu przemiennego

Przy synchronizowanym wyłączeniu WS zwarcia prądu przemiennego przez wyłącznik UWT, jak podano w p. 3j, wyłącznik najpierw przyjmuje konfigurację właściwą do pracy w zidentyfikowanym systemie AC, tj. rozłączniki 42 i 43 są otwarte, komora 2 jest utrzymywana przez zamek 9 w stanie maksymalnego otwarcia. Jeżeli napięcia  $\sim U_z$ ,  $+U_z$  i  $+U_p$  mają właściwe wartości oraz naładowane są kondensatory generatora 16, zespół 17 i analizator 19 mierzą wartość i częstotliwość napięcia, a sterownik 34 na tej podstawie załącza właściwe sekcje ogranicznika przepięć 28 i wyłącznik jest gotów do pracy. Po podaniu zewnętrznego sygnału torem E lub L, sterownik 34 wysyła serię sygnałów powodujących: otwarcie zamka 9, zatrzymanie organu ruchomego przez zamek 8 na czas powrotu zamka 9 do położenia początkowego, otwarcie zamka 8 i zamknięcie zestyku komory 2 (jest to niezbędne przy załączeniu obwodu zwartego, bo wówczas wyłącznik może okazać się szybszy niż zamek 9). Gdy płynie prąd, zespół 23 dostarcza danych sterownikowi 34 do identyfikacji stanu obwodu (roboczy, przeciążeniowy lub zwarcia). Przykład WS pokazano na rysunku 8.

Po wystąpieniu w chwili  $t_1$  zwarcia wzrasta prąd  $i$ , powodując w chwili  $t_2$  zadziałanie zespołu 23 i uruchomienie procedury wyłączenia synchronizowanego. Na podstawie danych pomiarowych napięcia, prądu i czasów z układów 25, 26 i 19, uzyskiwanych w czasie  $T_{2+3}$ , przy zadanym czasie palenia się łuku  $T_{5+6}$ , sterow-



Rys. 8. Wyłączenie synchronizowane zwarcia w systemie AC

Napięcia:  $u$  – łączeniowe,  $u_p$  – powrotne,  $u_1$  – łuku; prądy:  $i$  – główny,  $i_2$  – zadziałania; chwile:  $t_1$  – zwarcia,  $t_2$  – zadziałania wyzwalacza (start procedury synchronizacji),  $t_3$  – maksimum prądu ( $di/dt = 0$ ),  $t_4$  – synchronizowana chwila zadziałania napędu 11,  $t_5$  – otwarcia zestyku komory 2 i zapłonu łuku,  $t_6$  – zera prądu  $i$  i zgaszenia łuku; czasy:  $T_{1+2}$  – zadziałania,  $T_{2+3}$  – pomiarów i obliczeń,  $T_{3+4}$  – opóźnienia,  $T_{4+5}$  – własny otwierania,  $T_{5+6}$  – łukowy,  $T_{4+6}$  – wyprzedzenia synchronicznego

nik 34 oblicza chwilę  $t_6$  dojścia prądu do zera oraz czas opóźnienia  $T_{3+4}$ , po którym sterownik 34 wysyła w chwili  $t_4$  sygnał załączający generator 16, zasilający impulsem silnopięciowym napęd 11 powodujący ultraszybkie zadziałanie wyłącznika oraz wyłączenie zwarcia w chwili  $t_6$ . Gdy czas pierwszej półfali prądu jest za krótki (tj. przy  $T_{1+3} < T_{4+6}$ ), wyłącznik pozostaje zamknięty, a procedura wyłączenia synchronizowanego jest ponawiana po zerze prądu, tj. po chwili  $t_6$ . Czas łukowy jest zawsze prawie taki sam, niezależnie od amplitudy oraz czasu półfali prądu. Na rysunku 2a i b) pokazano porównanie czasów łukowych podczas wyłączenia zwarcia przez wyłącznik synchronizowany oraz niesynchronizowany, przy takim samym prądzie zadziałania obu wyłączników. Czas łukowy przy wyłączeniu niesynchronizowanym jest znacznie dłuższy.

Wyłączenie prądów roboczych i przeciążeniowych przebiega podobnie. W warunkach przeciążeniowych sterownik 34 działa jak znane wyzwalacze elektroniczne o danej charakterystyce czasowo-prądowej.

#### 5. Działanie wyłącznika UWT przy wyłączeniu przeciwprądem zwarcia prądu stałego

Przy wyłączeniu zwarcia prądu stałego przez wyłącznik UWT, jak podano w p. 3, wyłącznik najpierw przyjmuje konfigurację właściwą do pracy w zidentyfikowanym systemie DC., tj. rozłączniki 42 i 43 są zamknięte, komora 2 jest utrzymywana przez zamek 9 w stanie maksymalnego otwarcia. Jeżeli napięcia  $\sim U_z$ ,  $+U_z$  i  $+U_p$  mają właściwe wartości oraz naładowane są kondensatory generatora 16, kondensator komutacyjny 59 generatora przeciwprądu 58 ładuje się do napięcia  $U_c$ . Jeżeli napięcia  $U_+$  i  $U_c$  mają prawidłowe wartości, wyłącznik można załączyć. Po podaniu sygnału załączającego torem E lub L, mikroprocesorowy sterownik 34 otwiera zamki 9 i 8 jak w p. 2, a komora próżniowa



2 łączy obwód główny. Wówczas płynie prąd roboczy zależny od parametrów obciążenia (rys. 5b).

Przy zwarciu w chwili  $t_{zw}$ , wzrastający prąd zwarciový i płynie między zaciskami 37 i 38 przez komorę 2. Powoduje to w chwili  $t_{wn}$  zadziałanie wyzwalacza 25. Wówczas sterownik 34 uruchamia napędy 11 i 51 w taki sposób, że bezzwłocznie w chwili  $t_r$  otwiera się komora 2, następnie z zadaniem opóźnienia w chwili  $t_{zp}$  zamyka się komora 46 łączyjąc przeciwprąd  $i_p$ , po czym wraca ona do położenia początkowego. Zamek 9 utrzymuje komorę próżniową 2 w położeniu otwarcia. Przeciwprąd  $i_p$  w komorze 2 odejmuje się od prądu  $i$  (pierwsza komutacja prądu). W efekcie prąd zwarciový w chwili  $t_w$  zmienia drogę i płynie przez komorę próżniową 46, cewkę 52 oraz kondensator komutacyjny 59, ładując ten kondensator z odwrotną biegunowością. Na kondensatorze komutacyjnym wzrasta przepięcie łączeniowe do wartości  $u_m$ . W chwili  $t_{z0}$  powoduje to zadziałanie ograniczników przepięć 29 i 30. Przepływ prądu między zaciskami 37 i 38 ustaje w chwili  $t_{p0}$ , a cały prąd płynie między zaciskami 37 i 39. Wówczas energia magnetyczna zawarta w indukcyjnościach podstacji i sieci jest tracona w ograniczniku 29, energia magnetyczna odbiorników jest tracona w ograniczniku 30, a prąd  $i$  dochodzi do zera w chwili  $t_{cw}$ . Po ponownym naładowaniu się kondensatora komutacyjnego wyłącznik UWT jest znów gotów do pracy. Wyłączenie prądów roboczych i przeciążeniowych przebiega podobnie.

## Budowa i cechy eksploatacyjne wyłącznika UWT

Wyłącznik UWT może być obecnie wykorzystywany w trójfazowych lokomotywach zasilanych napięciem stałym albo przemiennym o wartościach: AC 25 kV 50(60) Hz; 15 kV 16,7 Hz; DC 3 kV. Praca wyłącznika w systemie DC 1,5 kV wymaga jeszcze badań uzupełniających.

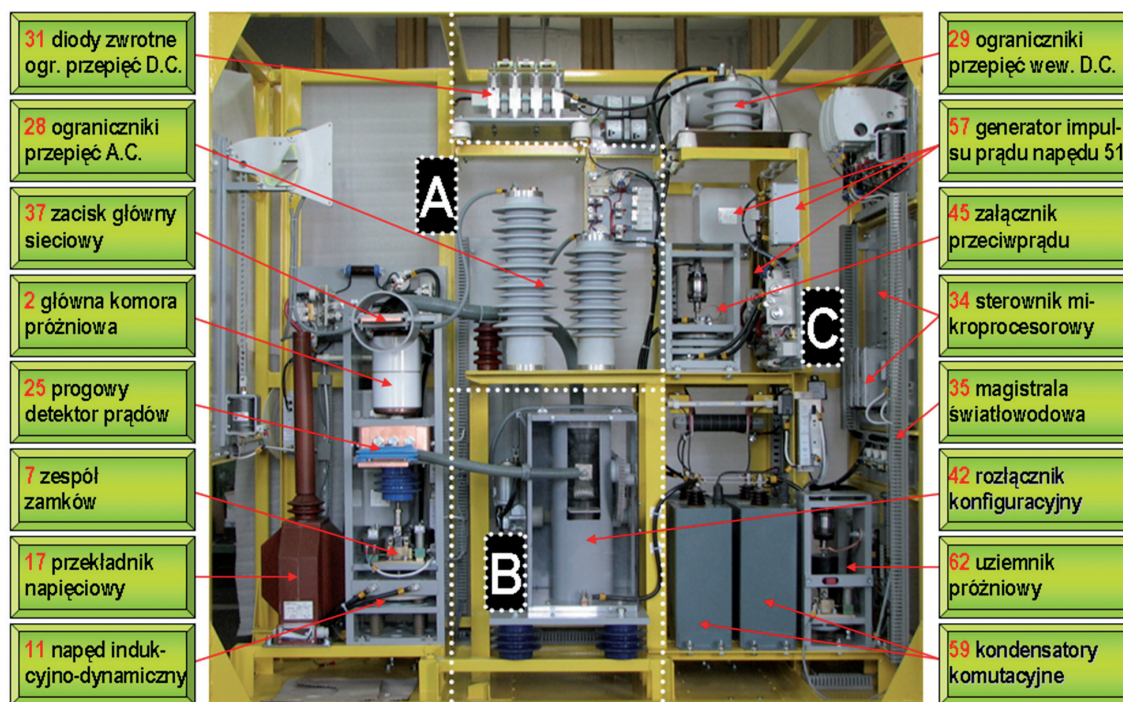
Wyłączniki mają budowę modułową, umożliwiającą w typowych granicach dostosowywanie przestrzennego układu wyłączników do wymiarów przeznaczonych dla nich komór (cel) w rozdzielnicach podstacji i pojazdów trakcyjnych.

Budowę wyłącznika UWT oraz jego główne podzespoły pokazano na rysunku 9 (modułowa wersja przyścienna, bez potrzeby tylnego korytarza rewizyjnego).

Pracą wyłącznika UWT zarządza sterownik mikroprocesorowy 34. Jest to specjalizowany mikrokomputer, wykorzystujący detekcję progową i stromościową prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciových oraz pomiary wartości napięcia i jego częstotliwości. W wersji podstawowej sterownik jest przystosowany do pracy przy napięciu 25 kV 50 (60) Hz i napięciu 15 kV 16,7 Hz lub 3 kV DC (docelowo także 1,5 kV DC). Jego główne funkcje, to:

- odbieranie sygnałów z czujników i układów pomiarowych wyłącznika,
- przetwarzanie danych pomiarowych i obliczanie czasów,
- wysyłanie sygnałów sterujących poszczególnymi podzespołami,
- prowadzenie diagnostyki wybranych podzespołów,
- dwustronna komunikacja z pokładowym systemem sterowania lokomotywy,
- archiwizacja wybranych zdarzeń z pracy wyłącznika,
- dokumentowanie ewentualnych niesprawności lub niewłaściwej eksploatacji,
- współpraca z komputerem serwisowym, zapewnienie selektywnej<sup>2</sup> współpracy z wyłącznikami podstacijnymi AC lub DC.

Wyłącznik jest dodatkowo wyposażony w interfejs sterowania wyłącznikiem za pomocą sygnałów elektrycznych. Ma także tężca rezerwowę. Sygnały informacyjne i robocze między sterownikiem



Rys. 9. Wyłącznik UWT i jego główne zespoły oraz podzespoły

A – uniwersalny próżniowy zespół łączeniowy AC/DC; B – zespół próżniowych rozłączników konfiguracyjnych DC; C – pomocniczy zespół łączeniowy DC; numeracja pozostałych podzespołów jak na rysunku 8

<sup>2</sup> Selektywność pełna – zwarzenie w pojeździe jest wyłączane zawsze przez wyłącznik UWT, bez uruchomienia wyłącznika podstacijnego. Selektywność niepełna – pobudzone są oba wyłączniki, wyłącza szybszy UWT, podstacyjny otwiera się bezprądowo i może natychmiast wykonać SPZ.

PARAMETRY ZNAMIONOWE WYŁĄCZNIKÓW UWT					
PARAMETRY ZNAMIONOWE			SYSTEM TRAKCYJNY		
			1 A.C.	2 A.C.	D.C.
1	Napięcie izolacji:	$U_i$ [kV]	30		4
2	Napięcie łączeniowe:	$U_n$ [kV]	25	15	3
3	Częstotliwość:	$f$ [Hz]	50/60	16.7	0
4	Przebiecie maksymalne:	$u_m$ [kV]	90	50	9
5	Zdolność wyłączalna:	$I_{ps}$ [kA]	15	40	100
6	Prąd ciągły:	$I_{oh}$ [kA]	0.4 ÷ 3.15		
7	Napięcie pomocnicze:	$U_p$ [V]	220		
8	Trwałość mechaniczna <sup>1)</sup> :	$n_m$ [c.]	20 000		
9	Trwałość łączeniowa <sup>2)</sup> :	$n_e$ [o.]	5 000		
10	Czas otwierania:	$t_o$ [μs]	≤ 500		
11	Czas lukowy:	$t_l$ [ms]	2		
12	Zakres temperatur:	$\Delta\theta$ [°C]	-30 ÷ +40		
13	Wysokość n.p.m.:	$h$ [m]	≤ 1500		
14	Gabaryty (prototypu):	— / [mm]	ok. 1700 × 1800 × 800		
15	Ciężar:	$G$ [kG]	ok. 450		
16	Prąd ograniczony:	$I_c$ [kA]			≤ 9+ $I_l$
17	Współcz. ograniczania prądu: $C=I_c/I_{ps}$ [-]				≤ 0.12
18	Całka Joule'a:	$I^2t$ [A <sup>2</sup> s]			≤ 10 <sup>5</sup>

<sup>1)</sup> Po 10 000 c. wymiana komory próżniowej. <sup>2)</sup> W warunkach zwarciovych  
 $I_l$  – prąd zadziałania wyzwalacza

GŁÓWNE ZALETY EKSPLOATACYJNE WYŁĄCZNIKÓW UWT	
>	Wyłączanie prądów roboczych i zwarciovych w próżni.
>	Ultraszybkie, synchronizowane otwieranie zestyku.
>	Sterowanie mikroprocesorowe.
>	Światłowodowa transmisja sygnałów.
>	Dwustronne ograniczanie przepięć.
>	Budowa modułowa, zmienna konfiguracja przestrzenna.
>	Zdolność do pracy wielosystemowej.
>	Selektywność <sup>1)</sup> wyłączania zwarc.
>	Duża zwarciova trwałość łączeniowa.
>	Wysoka odporność na przepięcia i zakłócenia.
>	Małe straty mocy przy przepływie prądów roboczych.
>	Brak zakresu prądów krytycznych przy D.C.
>	Brak strefy ochronnej.
>	Okresowa obsługa zbędna.
>	Pełna neutralność środowiskowa.

<sup>1)</sup> Zwarcie w pojeździe jest zawsze wyłączane przez wyłącznik pojazdowy działający szybciej niż podstacyjny.

Rys. 10. Parametry znamionowe oraz główne zalety eksploatacyjne wyłączników UWT

i współpracującymi z nim zespołami wyłącznika są przesyłane siecią światłowodową.

Układy ograniczania przepięć w systemach AC są montowane opcjonalnie, w zależności od warunków układowych i innych elementów ochrony przeciwprzebieciowej, a układy ograniczania przepięć w systemach DC obligatoryjnie.

Układy ograniczania przepięć są wyposażone w zespoły monitorujące stan warystorów tlenkowych MOV, mające za zadanie sygnalizować z odpowiednim wyprzedzeniem potrzebę wymiany MOV o obniżonych parametrach.

Dla szepiania się styków komory próżniowej najgroźniejszym przypadkiem jest załączanie obwodu zwartego. Duże wartości chwilowe prądu zwarciovego mogą wystąpić krótko po zetknięciu się styków, przy niepełnym docisku zestykowym lub podczas jego zmian wywołanych tendencją do odskoków sprężystych. Podatność zestyków na szepianie jest wówczas znacznie większa, niż zestyków całkowicie zamkniętych. Szczególnie trudne warunki zwarciove występują w systemie 16,7 Hz. Teoretycznie prąd udarowy może osiągać wartości do 101 kA przy 16,7 Hz (rys. 4). Czas trwania pierwszej półfali prądu niesymetrycznego może wówczas przekraczać 50 ms. Silne oddziaływania elektrodynamiczne i termiczne tak wielkich prądów zwarciovych na zestyk komory próżniowej mogą powodować jego odskok elektrodynamiczny i szepianie się zestyku. Ten groźny przypadek jest w wyłączniku UWT całkowicie wyeliminowany wskutek zastosowania załączania synchronizowanego obwodu trakcyjnego, pozwalającego przy załączeniu obwodu zwartego na znaczące ograniczenie amplitudy i czasu przepływu pierwszej półfali prądu zwarciovego w stosunku do półokresu prądu symetrycznego, dzięki generowaniu tzw. małej pierwszej półfali prądu zwarciovego, o ograniczonej amplitudzie i czasie trwania wystarczająco

długim dla synchronizowanego wyłączenia prądu [13.]. Zawsze istnieje możliwość pojawienia się udarowego prądu zwarciovego podczas zwarcia obwodu następującego w stanie roboczym, tj. przy całkowicie zamkniętej komorze próżniowej. Nie ma możliwości, nawet teoretycznych, całkowitego wyeliminowania takiego przypadku. Zestyk komory jest jednak wówczas poddany dociskowi robocznemu gwarantującemu komorze próżniowej wytrzymanie znamionowego prądu szczytowego, a w wyłączniku UWT docisk ten może być dodatkowo wspomagany układem antyszepieniowym (p. 4, rys. 6).

Szczegółowy opis tych zagadnień wykracza poza rozmiary artykułu. Więcej informacji podano w [13, 14]. Podstawowe parametry znamionowe wyłącznika oraz główne zalety eksploatacyjne wyłączników UWT przedstawiono na rysunku 10.

W porównaniu do wyłączników klasycznych, ultraszybkie wyłączniki UWT w przybliżeniu mają w znamionowych warunkach zwarciovych istotne zalety przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Parametr	W systemie AC		W systemie DC
	16,7 Hz	50 Hz	
Prąd szczytowy tuku – mniejszy ponad	8-krotnie	3-krotnie	6-krotnie
Maksymalny czas lukowy – mniejszy ponad	26-krotnie	8-krotnie	10-krotnie
Średni czas lukowy – mniejszy ponad	19-krotnie	5-krotnie	nie dotyczy
Maks. energia magnetyczna – mniejsza ponad	nie dotyczy	nie dotyczy	45-krotnie
Całka Joule'a – mniejsza ponad	nie dotyczy	nie dotyczy	300-krotnie
Maksymalna energia tuku – mniejsza ponad	430-krotnie	150-krotnie	3000-krotnie
Jednostkowa erozja* styków – mniejsza ponad	220-krotnie	40-krotnie	3000-krotnie

\* Jednostkowa erozja materiału styków – podczas jednego wyłączenia zwarcia przez komorę próżniową w granicznych warunkach zwarciovych, dla erozyjności  $e_{AK} = 200 \mu\text{g}/\text{C}$  dla Cu (brak danych dla używanego CuCr).

Jest to nieosiągalne dla klasycznych wyłączników próżniowych (AC) lub magnetywduchowych (DC), ze względu na relatywnie małą szybkość ich działania. Wobec tego erozja łukowa styków przestała być czynnikiem ograniczającym trwałość łączeniową wyłącznika UWT, szczególnie przy zwarciach, wskutek czego trwałość łączeniowa wyłącznika UWT jest dziesiątki razy większa w porównaniu z innymi wyłącznikami próżniowymi. Jeden wyłącznik UWT jest zatem eksploatacyjnym równoważnikiem kilkudziesięciu wyłączników klasycznych. Korzyści ekonomiczne z wprowadzania wyłączników DWT do eksploatacji będą się kumulowały u ich użytkowników.

Wyłączniki UWT już obecnie wywołały duże zainteresowanie i uznanie specjalistów, uzyskując: specjalne wyróżnienie w konkursie im. Prof. C. Jaworskiego na 8. Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO, 2009; Złoty Medal z Wyróżnieniem na 58. Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik Brussels Innova – Brussels Eureka, 2009; Nagrodę Wicepremiera Belgii – Ministra Zatrudnienia i Równych Szans na 58. Światowej Wystawie Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik Brussels Innova – Brussels Eureka, 2009; Nagrodę Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Międzynarodowe Osiągnięcia Wynalazcze, Warszawa, 2010.



Projekt Badawczy Rozwojowy nr R01 033 02, finansowany przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Producentem wyłączników UWT będzie ZAE WOLTAN Sp. z o.o. w Łodzi.

#### Literatura:

- [1] Gawłowski K.: *Lokomotywa wielosystemowa typu E 186 serii EU43*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2008.
- [2] Krzyżanowski M., Pawlak J., Vitins J.: *TRAXX – platforma lokomotyw dla Europy*. Technika Transportu Szynowego 9/2006.
- [3] Skibicki J.: *Pojazdy elektryczne, cz. 1*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk, 2010.

- [4] Bartosik M.: *Wyłączanie synchroniczne obwodów nn*. Rozprawa habilitacyjna. ZNPŁ nr 37, 1981<sup>3</sup>.
- [5] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *New generation of DC circuit breakers*. Proceedings of the IV International Conference on Electrical Contacts Arcs, Apparatus and Their Applications ECAAA/97, XI'an, China, 1997.
- [6] 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.
- [7] Bartosik M., Wójcik F.: *High speed DC vacuum circuit breaker*. Proceedings of the XI<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berlin, BRD, 1984.
- [8] Bartosik M., Wójcik F.: *Napędy impulsowe próżniowych wyłączników trakcyjnych*. Materiały Konferencji Naukowej „Rozwój systemów i środków w transporcie” TRANSSYSTEM 89, Warszawa, 1989.
- [9] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Nowoczesne wyłączniki prądu stałego*. Konferencja Naukowo-Techniczna ŁĄCZNIKI'06, Pieczęyska, 2006.
- [10] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Modern DC circuit breakers*. Technika Transportu Szynowego 9/2006.
- [11] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Nowa rodzina synchronizowanych wyłączników próżniowych SWT<sup>4</sup> do systemów trakcji kolejowej zasilanych wysokimi napięciami przemiennymi*. Technika Transportu Szynowego 10/2007.
- [12] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *A New Family of SVB Synchronized Vacuum Circuit-breakers for Railway Traction Systems Powered with Alternating Current High Voltages*. Technika Transportu Szynowego 9/2008.
- [13] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *AC double-system vacuum circuit-breakers for high-speed railways*. 9<sup>th</sup> International Conference „Modern Electric Traction” MET'2009, Warszawa, 2009.
- [14] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Uniwersalny wyłącznik próżniowy prądu przemiennego i stałego*. Konferencja Naukowo-Techniczna ŁĄCZNIKI'10, Pieczęyska, 2010.
- [15] Shioiri T., Homma M., Kaneko E., Miyagawa M. and Ohshima I.: *Insulation characteristics of vacuum interrupter for a new 72/84 kV C-GIS*. XVIII<sup>th</sup> ISDEIV, Eindhoven, Netherlands, 1998.

<sup>3</sup> Tamże zamieszczony jest spis literatury własnej i obcej (176 poz. lit.), dotyczącej wyłączania synchronicznego prądu przemiennego w powietrzu i w próżni.

<sup>4</sup> Pierwotny symbol SWT został zmieniony na SVB dla umożliwienia rejestracji znaku towarowego.