

M. BARTOSIK, R. LASOTA, F. WÓJCIK*

SVB 25/15 KV; 60/50/16,7 HZ; 400-1250 A; 40 KA ULTRASZYBKIE PRÓŻNIOWE WYŁĄCZNIKI SYNCHRONIZOWANE DLA TRAKCJI KOLEJOWEJ PRĄDU PRZEMIENNEGO

SVB 25/15 KV; 60/50/16.7 HZ; 400-1250 A; 40 KA ULTRA- -HIGH-SPEED SYNCHRONIZED VACUUM CIRCUIT- -BREAKERS FOR RAILWAY TRACTION SYSTEMS POWERED WITH ALTERNATING CURRENT HIGH VOLTAGES

Streszczenie

Ultraszybkie, synchronizowane wyłączniki próżniowe SVB są nowością w skali światowej. Nie mają dotychczas odpowiedników konstrukcyjnych na rynkach światowych. Ich zasady działania i budowy są odmienne od wykorzystywanych w wyłącznikach tradycyjnych, dotychczas stosowanych w systemach trakcji kolejowej prądu przemiennego. W artykule opisane zostały podstawy teoretyczne i możliwości praktycznej realizacji wyłączników SVB, zwłaszcza problemy związane z synchronizowanym załączeniem i ultraszybkim synchronicznym wyłączeniem prądów zwarciowych. Zaprezentowano podstawowe wymagania dla nowoczesnych komór próżniowych stosowanych w wyłącznikach synchronizowanych dla systemów kolei dużych prędkości o napięciach 25 kV/50 Hz albo 15 kV/16,7 Hz. Opisano podstawowe metody synchronizacji napędu w warunkach zwarciowych. Przeanalizowano korzyści wynikające z synchronizowanego załączenia i wyłączenia prądów przemiennych w porównaniu z klasycznymi wyłącznikami próżniowymi. Podano również najważniejsze parametry znamionowe wyłączników SVB.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, wyłączenie synchronizowane, wyłącznik ultraszybki, wyłącznik próżniowy, kolej dużych prędkości

Abstract

The SVB synchronized ultra-high-speed vacuum circuit-breakers are a world-scale novelty. The SVBs have no constructional equivalents on world markets so far. Their principles of operation and design are different from those of traditional circuit breakers used till now in AC railway traction systems. Theoretical principles and the practical realization of SVBs, particularly essential problems connected with the synchronized switching – on and ultra-high-speed synchronized breaking of short-circuit currents by SVB are described in this paper. Basic requirements stated for modern vacuum chambers applied in synchronized circuit-breakers for the high-speed rail traction systems of 25 kV/50 Hz or 15 kV/16.7 Hz voltages are presented. Basic methods of SVB operating mechanism synchronization under short – circuit conditions are described. Advantages of synchronized switching-on and -off of alternating currents and the operational performance of SVB are compared with those of classical vacuum circuit-breakers. Ratings of SVB are given. Profits yielded by introducing the circuit breakers into service in traction vehicles and supply systems will be accumulated mainly at users.

Keywords: electric traction, synchronized switching-off, ultra-high-speed circuit-breaker, vacuum circuit-breaker, high-speed railway

* Dr hab. inż. Marek Bartosik, prof. PŁ, dr inż. Ryszard Lasota, dr inż. Franciszek Wójcik, Katedra Aparatów Elektrycznych, Politechnika Łódzka.

1. Wstęp

Wzrost liczby przewozów pociągami rozwijającymi duże prędkości jest znacznie większy niż innymi środkami transportu. Dlatego obecnie kształtują się szeroko zakrojone koncepcje uruchomienia w Polsce kolei dużych prędkości. Prowadzone są zaawansowane prace studialne nad budową nowych, wydzielonych linii kolei dużych prędkości (do 350 km/h), początkowo na trasie: Warszawa – Łódź – węzeł Kalisz – Poznań, z odgałęzieniem: węzeł Kalisz – Wrocław (tzw. polski Y).

Polskie koleje dużych prędkości, chcąc skutecznie konkurować na rynku europejskim, będą musiały pokonać przede wszystkim przeszkody techniczne wynikające z sąsiedowania dwóch odmiennych systemów zasilania sieci trakcji kolejowej: planowanego w Polsce 25kV/50Hz i niemiecko-szwajcarskiego 15 kV/16,7 Hz. Pociągi operujące na liniach zagranicznych w ruchu pasażerskim i towarowym powinny być przystosowane do napięć używanych w obydwu systemach, tj. pewna liczba lokomotyw powinna być dwusystemowa. W przypadku użycia takich lokomotyw racjonalne wydaje się zastosowanie jednego wyłącznika SVB, zdolnego do pracy w obydwu sąsiadujących systemach AC.

Zapotrzebowanie na takie wyłączniki można oszacować na podstawie dostępnych źródeł [9] i studiów projektowych [10]. Przyjmując typową długość odcinka trakcyjnego jako ok. 50 km i zakładając zasilanie odcinka z dowolnego kierunku, z kabiną sekcyjną w środku trasy, przy ewentualnym połączeniu równoległym ciągów sieciowych, zarówno torów szlakowych, jak i stacyjnych, oraz uwzględniając potrzeby stacji, stacji technicznych itd. – liczbę podstacji trakcyjnych można oszacować na ok. 12 oraz co najmniej drugie tyle kabin sekcyjnych. Prognozowana intensywność ruchu na poszczególnych odcinkach linii jest zróżnicowana i oceniana na od 50 (Warszawa – Łódź) do 10 (Poznań – granica zachodnia) par pociągów na dobę. Do tego należy dodać linie przez granicę zachodnią do połączenia polskiego Y z europejskim systemem kolei dużych prędkości. Łączną długość tych linii można oszacować na ponad 800 km (rys. 1).

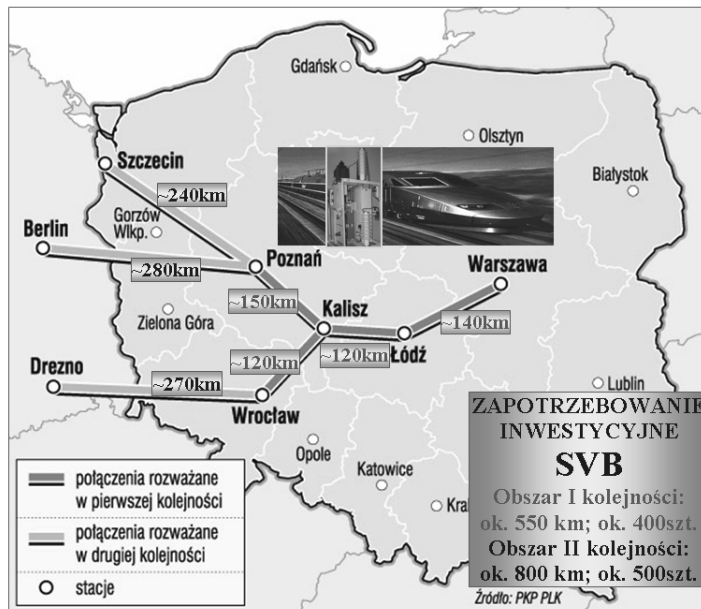
Inwestycyjne zapotrzebowanie krajowe na wyłączniki podstacyjne i pojazdowe dla polskiego Y można oszacować na ok. 400 sztuk, co przy założeniu 10-letniego cyklu eksploatacji oznacza w przyszłości przeciętne roczne zapotrzebowanie krajowe na ok. 40 wyłączników, a dla pozostałych linii można je oszacować na ok. 500 sztuk, czyli zachowując powyższe założenia na ok. 50 wyłączników rocznie. Docelowo więc łączne zapotrzebowanie inwestycyjne można oszacować na ok. 900 wyłączników SVB, a ustabilizowane zapotrzebowanie roczne na ok. 90 sztuk.

Rozmiary potencjalnych eksportowych rynków zbytu dla wyłączników SVB są determinowane przez szeroki zakres stosowalności elektrotrakcji prądu przemiennego. Napięcie 25 kV/50 Hz jest stosowane na obszarze 30 krajów, napięcie 25 kV/60 Hz – 4 krajów, napięcie 15 kV/16,7 Hz – 5 krajów, inne zaś przemienne napięcia trakcyjne (20 kV/50 Hz lub 60 Hz; 11 kV/16,7 Hz lub 25 Hz; 12,5 kV/60 Hz) są stosowane na obszarze 3 krajów.

Potencjalne rynki zbytu wyłączników są wręcz ogromne. Warunkiem koniecznym jest uzyskanie poziomu technicznego i technologicznego wyłączników pozwalającego na skuteczne konkurowanie ekonomiczne na rynkach światowych z istniejącymi konstrukcjami.

Podjęto więc, z niezbędnym wyprzedzeniem w stosunku do planowanych w Polsce procesów inwestycyjnych, prace rozwojowe zmierzające do opracowania nowych wyłączników trakcyjnych prądu przemiennego SVB, spełniających wszystkie współczesne wyma-

gania i zdolnych do pracy w dowolnym z użytkowanych na świecie wysokonapięciowych systemów trakcyjnych prądu przemiennego.



Rys. 1. Planowane polskie koleje dużych prędkości i oszacowane zapotrzebowanie inwestycyjne na wyłączniki SVB

Fig. 1. Map of the high-speed railway system in Poland and the forecast for the domestic capital investment demand for substation and vehicle circuit-breakers

2. Ogólne zasady działania i budowy wyłączników SVB

2.1. Uwagi ogólne i zasada działania

W obwodach trakcyjnych prądu przemiennego stosowane są zazwyczaj jednofazowe wyłączniki próżniowe o tradycyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i relatywnie małej szybkości działania, o parametrach przystosowanych do danego systemu i relatywnie dużych czasach własnych i czasach wyłączenia. Przy zwarciach wydziela się w nich bardzo duża energia łuku, powodująca silne niszczenie zestyków i komór gaszeniowych, dlatego mają one małą trwałość łączeniową i mogą zazwyczaj wyłączyć tylko do kilkudziesięciu zwarć. Ponadto wyłączniki takie zazwyczaj nie są zdolne do selektywnego działania, czyli zwarcie w pojeździe trakcyjnym jest wyłączane jednocześnie przez wyłącznik pojazdowy i podstacyjny pracujące szeregowo, co powoduje niepotrzebne wyłączenie całego odcinka trakcyjnego. Zestyki komór próżniowych również są narażone na tzw. trwałe szczypanie styków, czyli nie usuwane przez napęd ich złączenie spoiną szczypaniową utworzoną przez metal styków, stopiony podczas przepływu dużych wartości półfali prądu zwarciego

przez zestyk zamknięty lub załączający obwód zwarty, po czym metal ten krzepnie, gdy prąd dąży do zera. Dlatego konieczne jest stosowanie docisków zestykowych rzędu setek kilogramów. Wyłączniki takie w coraz mniejszym stopniu mogą spełniać stawiane im współcześnie wymagania zwłaszcza w zakresie trwałości łączeniowej w warunkach roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych oraz przepięć łączeniowych, a nadto pożądana jest zdecydowana poprawa selektywności ich działania. Na to nakładają się przede wszystkim wymagania europejskie z zakresu interoperacyjności transportu kolejowego¹, co stwarza nowe wymagania dla wyposażenia wyłączników, zwłaszcza wyzwalaczy lub przekaźników nadprądowych oraz układów sterowania.

Współczesne uwarunkowania technologiczne, a przede wszystkim szybki postęp w zakresie technologii próżniowych, materiałowych i elektronicznych, stwarzają nowe możliwości rozwiązania takich problemów.

W wyłącznikach SVB wykorzystano zasadę **ultraszybkiego** łączenia synchronizowanego prądów w próżni. Zarówno **załączanie** (pkt 3.1), jak i **wyłączanie** (pkt 3.2) obwodu są synchronizowane. Przy wyłączaniu zwarć jest zapewniona **pełna selektywność**² współpracy wyłączników taborowych oraz podstacyjnych (pkt 2.1; pkt 4). Czas palenia się łuku w komorze próżniowej nie przekracza 2–3 ms, dzięki czemu energia łuku wyłączeniowego jest mała, a więc trwałość łączeniowa wyłącznika będzie relatywnie duża zarówno w warunkach roboczych, jak i zwarciovych (pkt 3.2; pkt 5.3).

- **Ultraszybkie otwieranie** wyłącznika SVB z możliwie dużym przyspieszeniem organu ruchomego i dużej średniej prędkości rozchodzenia się styków oraz możliwie małym czasem własnym otwierania uzyskano za pomocą ultraszybkiego napędu indukcyjno-dynamicznego komory próżniowej, w którym metalowy dysk pracujący jako zwój zwarty jest odrzucany od cewki napędowej, przez którą przepływa impuls wieloprądowy wytwarzany przez rozładowanie kondensatora. Styk ruchomy połączony jest z dyskiem bezprzechyłowo za pomocą sztywnego prostowodu i utrzymywany w stanie otwarcia przez zamek. Organ ruchomy wyłącznika uzyskuje przyspieszenia początkowe rzędu 10^4 – 10^6 m/s², czas własny otwierania poniżej 500 μs oraz średnią prędkości otwierania do 2 m/s. Zamykanie zestyku odbywa się pod wpływem sprężyn napędowych, bez udziału wyżej wymienionego napędu, tzn. załączanie obwodu trakcyjnego nie jest ultraszybkie.
- **Załączanie synchronizowane** prądu przemiennego polega na szybkim zamknięciu zestyku komory próżniowej w chwili umożliwiającej uzyskanie pożądanego przebiegu lub eliminację składowej nieokresowej prądu zwarciovego w przypadku załączenia obwodu zwartego. Chwila załączenia obwodu jest określana względem napięcia sieci trakcyjnej.
- **Wyłączanie synchronizowane** prądu przemiennego polega na otwarciu zestyku komory próżniowej bezpośrednio przed tym zerem prądu, w którym nastąpi zgaszenie łuku. Czas wyprzedzenia synchronicznego, liczony od chwili rozdzielenia się styków do chwili zera prądu, powinien być możliwie krótki w celu uzyskania minimalnej energii łuku i dużej

¹ Za podstawę wymagań dla wyłączników przyjęto notyfikowane przez Polskę odpowiednie normy z zakresu trakcji kolejowej, elektrotechniki, kompatybilności elektromagnetycznej, ochrony środowiska, a także decyzje Komisji Europejskiej dotyczące specyfikacji technicznej dla interoperacyjności tzw. podsystemu energia i podsystemu tabor transeuropejskiego systemu kolei [6–8].

² Selektywność pełna: zwarcie w pojeździe jest wyłączane zawsze przez wyłącznik pojazdowy, bez uruchomienia wyłącznika podstacyjnego.

trwałości łączeniowej, a zarazem wystarczająco długi, aby uzyskać w chwili zera prądu dostatecznie dużą odległość styków, mającą wymaganą wytrzymałość powrotną dla danego napięcia sieci, co narzuca konieczność ultraszybkiego otwierania wyłącznika.

- Pełna selektywność działania wyłączników podstawyjnego i pojazdowego przy zwarciach została uzyskana za pomocą wprowadzenia opóźnienia zadziałania napędu wyłącznika podstawyjnego o czas jednej półfali prądu, czyli uruchomienie napędu nie następuje przed pierwszym, lecz przed drugim spodziewanym zerem prądu, natomiast wyłącznik pojazdowy reaguje bez tej zwłoki.

2.2. Warianty techniczne wyłączników SVB

- **Wersja podstawowa SVB-P:** napięcie znamionowe 25 kV o częstotliwości 50/60 Hz.
 - **Zakres zastosowania na świecie:** Australia³, Botswana, Bułgaria, Chiny, Chorwacja, Czechy, Dania, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania³, Indie, Iran, Japonia³, Kanada, Korea Południowa³, Malezja, Namibia, Niemcy³, Nowa Zelandia, Portugalia, Republika Południowej Afryki, Rumunia, Sardynia, Serbia i Czarnogóra, Słowacja, Słowenia, Turcja, USA, Węgry, Wielka Brytania, Włochy³, kraje dawnego Związku Radzieckiego³.
- **Wersja opcjonalna SVB-O:** napięcie znamionowe 15 kV o częstotliwości 16,7 Hz.
 - **Zakres zastosowania na świecie:** Austria, Niemcy³, Norwegia, Szwecja, Szwajcaria.
- **Wersja uniwersalna SVB-U:** napięcie znamionowe 15–25 kV o częstotliwości 16,7–60 Hz (możliwość instalowania w dowolnym istniejącym obecnie na świecie systemie AC).

Uniwersalność ta nie dotyczy:

- **zespołu ograniczników przepięć**, stanowiącego element instalowany opcjonalnie i działający autonomicznie (pkt 2.4; pkt 4);
- **zespołu pomiarów napięcia** o górnym stopniu dostosowywanym do napięcia sieci i zunifikowanym stopniu dolnym (zasilanie napięciem mierzonym, praca na wysokim potencjale, wyjście światłowodowe) (pkt 4).

Rozwiązania uniwersalne tych zespołów (dwustopniowe lub nawet trzystopniowe, o przełączanych samoczynnie poziomach napięć lub ograniczania przepięć) są możliwe do realizacji, lecz mają sens jedynie w wyłącznikach pojazdowych przeznaczonych do ruchu między systemami AC o różnych wartościach napięć zasilających.

2.3. Właściwości użytkowe komory próżniowej przy wyłączaniu synchronizowanym

Dla wszystkich użytkowanych na świecie wysokonapięciowych systemów trakcyjnych prądu przemiennego opracowano jeden zunifikowany próżniowy człon łączeniowy. Daje to oczywiste korzyści związane z unifikacją produkcji. Wymagania napięciowe i prądowe dla wyłączników SVB [14–17] determinują łącznie parametry elektryczne i mechaniczne uniwersalnej komory próżniowej przeznaczonej do pracy w wyłącznikach SVB-U, zatem przyjęto najostrzejsze warunki napięciowe i prądowe ze wszystkich systemów trakcyjnych AC wg norm [18, 19] i dokumentów stowarzyszonych.

³ Napięcie występujące na części terytorium krajowego ze względu na współistnienie różnych systemów AC 50; 60; 16,7 Hz lub DC.

Po analizie parametrów technicznych komór próżniowych uznanych na świecie wytwórców (ABB, Cutler – Hammer, HANGUANG, HOLEC, JAEPS, Siemens, TOSHIBA itd.), do wykorzystania w wyłączniku SVB przyjęto komorę próżniową z zestykiem generującym osiowe pole magnetyczne [11–14] (nakładka stykowa typu CuCr na korpusie zestyku typu zwojowego wykonanego z Cu z dodatkami utwardzającymi), co pozwala na utrzymanie dyfuzyjnej formy łuku próżniowego w całym zakresie prądów zwarciovych wyłączanych synchronicznie. Główne parametry znamionowe komory: 25 kV; 50/60 Hz; 630/1250 A; 40 kA. Inne znamionowe parametry elektryczne i mechaniczne: składowa nieokresowa początkowa $\leq 40\%$; prąd załączalny 100 kA; prąd krótkotrwały (3 s) wytrzymywany 40 kA; napięcie probiercze (1 min) przemienne 50 kV; napięcie udarowe 125 kV; trwałość mechaniczna 10 000 c. p.; maksymalna przerwa zestykowa 16 mm; masa styku ruchomego 1,5 kg; gabaryty $\Phi 110 \times 250$ mm; przyłącza na 1250 A; pozostałe dane pominięto. Parametry te są w pełni zadowalające z punktu widzenia warunków pracy komory w wyłączniku SVB-U.

2.4. Ogólne zasady budowy wyłączników SVB

Wyłączniki SVB mają budowę modułową, umożliwiającą w typowych granicach dostosowywanie ich przestrzennego układu do wymiarów cel w rozdzielnicach podstacji i pojazdów trakcyjnych.

SVB jest jednofazowym próżniowym wyłącznikiem synchronizowanym z ultraszybkim napędem impulsowym (pkt 2.1; pkt 4.) i bezprzechyłowym zamkowym **organem ruchomym** o trwałym stanie zamknięcia (pkt 4), wyposażonym w **układ antyszczepieniowy** zasilany prądem zwarciovym (pkt 4) oraz w autonomiczny **system ograniczania przepięć** zewnętrznych i wewnętrznych (pkt 4), sterowanym synchronicznie za pomocą specjalnego **sterownika mikroprocesorowego** z synchronizatorem elektronicznym (pkt 4), wykorzystującego detekcję progową i stromościową prądów zwarciovych, przystosowanego do pracy przy częstotliwościach 50, 60 lub 16,7 Hz.

- **Organ ruchomy** próżniowego zespołu łączeniowego tworzą połączone osiowo: styk ruchomy komory próżniowej złączony bez zachowania izolacji elektrycznej z elementem dociskającym układu antyszczepieniowego, a z zachowaniem izolacji elektrycznej z dyskiem napędowym głównym. Styk ruchomy jest połączony z dyskami za pomocą dwuczęściowego sztywnego pręta regulacyjnego z izolatorem napędowym separującym elektrycznie obie części pręta, na którym są osadzone sztywno zaczepy dwóch zamków: głównego i przechwytyjącego, współpracujące z przesuniętymi względem siebie ryglami tych zamków. Organ ruchomy członu łączeniowego jest utrzymywany w stanie maksymalnego otwarcia zestyku przez zamek główny. Przy zamykaniu wyłącznika następuje otwarcie zamka głównego, zatrzymanie organu ruchomego przez zamek przechwytyjący na czas potrzebny do powrotu przez zamek główny do stanu gotowości, a następnie synchronizowane otwarcie zamka przechwytyjącego i zamknięcie się zestyku komory próżniowej. Taka sekwencja działania zamków jest niezbędna ze względu na możliwość załączenia obwodu zwartego, gdyż cykl pracy ultraszybkiego wyłącznika może być krótszy niż zamka głównego.
- **Układ antyszczepieniowy** jest indukcyjno-dynamicznym lub elektrodynamicznym siłownikiem wytwarzającym w zakresie dużych wartości półfali prądu zwarciovego dodatkowy docisk zestykowy, szybko malejący, gdy prąd zwarciovych dąży do zera. Eliminuje

to zjawisko szepiania styków, bez konieczności stosowania wielkich docisków zestykowych niekorzystnych przy wyłączeniu ultraszybkim. Wybór rodzaju układu antyszepieniowego, spośród kilku możliwych (pkt 4), zależy od zakresu spodziewanych prądów zwarciovych i potrzebnych docisków zestykowych.

- **System ograniczania przepięć**, zarówno zewnętrznych (sieciowych), jak i wewnętrznych (odbiornikowych), generowanych w różnych stanach łączeniowych odbiorników, złożony jest z warystorów tlenkowych współpracujących z mikroprocesorowymi zespołami monitorowania degradacji warystorów [14, 16, 17].
- **Sterownik mikroprocesorowy** zarządzający pracą wyłącznika SVB jest w zasadzie specjalizowanym mikrokomputerem, współpracującym z podstawowym lub pokładowym systemem sterowania, wykorzystującym detekcję progową i stromościową prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych oraz pomiary wartości napięcia i jego częstotliwości. W wersji podstawowej sterownik jest przystosowany do pracy przy napięciu 25 kV/50(60) Hz lub napięciu 15 kV/16,7 Hz. Wszystkie sygnały informacyjne i robocze między sterownikiem i współpracującymi z nim zespołami wyłącznika są przesyłane siecią światłowodową [14, 16, 17].

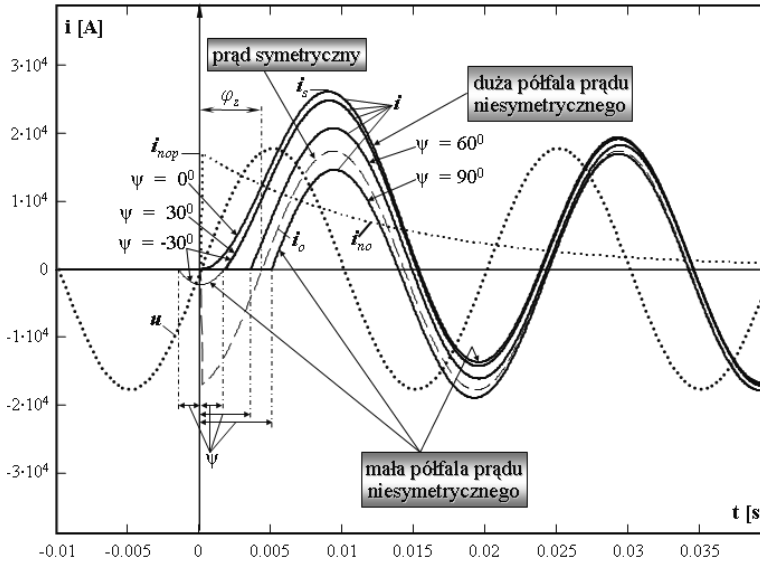
3. Zasady łączenia synchronizowanego prądów przez SVB

3.1. Zasada synchronizowanego załączania

Z definicji podanej w pkt. 2.1 wynika, że załączanie synchronizowane prądu przemienego polega na zamknięciu zestyku komory próżniowej w określonej chwili w stosunku do spodziewanego zera składowej okresowej prądu zwarciovego. Czas wyprzedzenia synchronicznego przy załączaniu (pkt 2.1; 3.2; 4; rys. 3) jest to znany dla danego wyłącznika i praktycznie stały (rozrzut poniżej 300 μ s) czas własny zamykania, liczony w wyłączniku SVB od chwili podania impulsu otwierającego zamek przechwytyjący (pkt 4; rys. 6) do chwili zetknięcia się styków. Załączanie synchronizowane umożliwia wyeliminowanie niekorzystnych zjawisk występujących w przypadku załączania obwodu zwartego wskutek występowania asymetrii prądu zwarciovego. Zasada synchronizowanego załączania została przedstawiona na rys. 2.

Na podstawie symulacji komputerowej w typowych warunkach zwarciovych pokazano wpływ kąta fazowego załączenia na przebiegi spodziewanego prądu zwarciovego w charakterystycznych miejscach odcinka trakcyjnego. Kąt ten jest określany w stosunku do zera napięcia sieci trakcyjnej, które jest jedyną możliwą do wykorzystania wielkością determinującą przebiegi spodziewanego prądu zwarciovego przy znanych parametrach obwodu zwarciovego. Dla systemu polskiego Y przyjęto warunki symulacji: 25 kV, 50 Hz, 15 kA; $\cos\varphi_z = 0,15-0,3$; $R_1 = 0,12 \Omega/\text{km}$; $L_1 = 1,2 \text{ mH}/\text{km}$; 40 km; $S_z = 375 \text{ MVA}$.

Najgorsze warunki zwarciove występują przy zwarciu w pobliżu punktu zasilania odcinka trakcyjnego. Prąd szczytowy przy zwarciu w tym punkcie dla $\psi = 0$ jest udarowym prądem zwarciovym. Teoretycznie (wg górnej granicy norm) może on osiągać wartości do 38 kA przy 50 Hz lub do 101 kA przy 16,7 Hz, natomiast czas trwania pierwszej półfali prądu niesymetrycznego może wówczas przekraczać odpowiednio 15 lub 50 ms.



Rys. 2. Przebiegi napięć i prądów przy synchronizowanym załączeniu obwodu zwartego w punkcie zasilania odcinka trakcyjnego dla różnych przypadków asymetrii prądu: u – napięcie sieci trakcyjnej; ψ – kąt fazowy załączenia względem zera napięcia u ; i – zwarciovne prądy przejściowe przy różnych chwilach załączenia prądu zwarciovnego spodziewanego; i_o – składowa okresowa oraz i_{no} – składowa nieokresowa prądu i dla $\psi = 0$; i_{nop} – wartość początkowa i_{no} ; i_s – prąd szczytowy; φ_z, φ_{z1} – kąt fazowy obwodu zwarciovnego

Fig. 2. Current and voltage transients at synchronized short-circuit switching-on: u – network voltage, ψ – contact closing phase angle (in relation to zero of network voltage u), i – fault currents for various moments of short-circuit occurrence, i_o – AC component of i and i_{no} – DC component of i , for $\psi = 0$, i_{nop} – initial value of i_{no} , i_s – peak current, φ_z, φ_{z1} – short circuit phase angle

W stosunku do sieci rzeczywistych są to dane raczej zawyżone [4, 6–9 10, 16], ale wskazują na poważne zagrożenia wskutek silnych oddziaływań elektrodynamicznych i termicznych tak wielkich prądów zwarciovnych na zestyk komory próżniowej, mogących powodować jego odskok elektrodynamiczny lub szepienie się w stanie zamknięcia.

Z pokazanych na rys. 2 przebiegów prądów wynika, że w przypadku załączenia obwodu zwartego właściwy i dostatecznie precyzyjny dobór chwili zamknięcia się zestyku komory próżniowej w stosunku do zera napięcia sieci pozwala na praktyczne wyeliminowanie składowej nieokresowej spodziewanego prądu zwarciovnego, a nawet na znaczące ograniczenie amplitudy i czasu przepływu pierwszej półfali prądu w stosunku do półokresu prądu symetrycznego.

Generowana jest wówczas tylko tzw. mała półfala prądu zwarciovnego, wyłączana synchronicznie przez wyłącznik SVB (pkt 3.2; rys. 3). Ograniczeniem możliwości zmniejszenia pierwszej półfali prądu zwarciovnego jest minimalny czas jej trwania, niezbędny do przeprowadzenia procedury synchronizowanego wyłączenia prądu (pkt 3.3; rys. 4).

Synchronizowane załączenie eliminuje więc ryzyko występowania odskoków elektrodynamicznych i szepienia styków komory próżniowej. W miarę oddalania się miejsca zwarcia od punktu zasilania parametry R i L linii silnie ograniczają prąd zwarciovny, a po-

nadto występuje zjawisko zmniejszania się kąta φ_z ze względu na wzrost udziału rezystancji linii w zastępczej impedancji zwarciowej. Poprawia to zarówno warunki załączania, jak i wyłączenia zwarcia.

Symulacja dla przypadku systemu 15 kV/16,7 Hz, przy 40 kA, $\cos\varphi_z = 0,2-0,4$; R_1 i L_1 jak wcześniej, $S_z = 600$ MVA, daje w wartościach względnych wyniki jakościowo podobne, prowadzące do analogicznych wniosków.

Wszystkie operacje potrzebne do załączania synchronizowanego realizują układy elektroniczne niezbędne zarazem do wyłączenia synchronizowanego.

3.2. Zasada synchronizowanego wyłączenia

Podstawowe zjawiska fizyczne w komorze próżniowej podczas synchronizowanego wyłączenia silnych prądów opisano w [1, 14]. Zdefiniowana w pkt. 2.1 ogólna zasada synchronizowanego wyłączenia prądu przemiennego sprowadza problem do określenia czasu wyprzedzenia synchronicznego przy wyłączeniu, liczonego od chwili rozdzielenia się styków do chwili zera prądu.

Czas wyprzedzenia synchronicznego przy wyłączeniu jest sumą czasu własnego otwierania wyłącznika, liczonego od chwili podania impulsu uruchamiającego napęd komory próżniowej do chwili rozdzielenia się jej styków oraz czasu łukowego liczonego od chwili rozdzielenia się styków do chwili zera prądu.

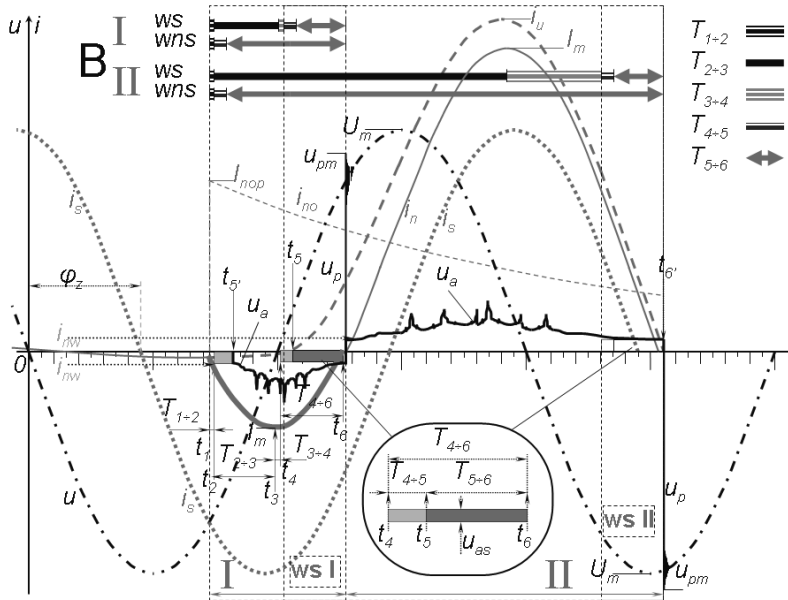
Czas własny otwierania wyłącznika jest praktycznie stały i jest determinowany przez parametry mechaniczne organu ruchomego wyłącznika oraz parametry elektrodynamiczne napędu ultraszybkiego.

Czas łukowy powinien być dla uzyskania minimalnej energii łuku i dużej trwałości łączeniowej możliwie krótki, a zarazem wystarczająco długi dla uzyskania w chwili zera prądu dostatecznie dużej odległości styków, mającej wymaganą wytrzymałość powrotną dla danego napięcia sieci. Wymaga to ultraszybkiego otwierania wyłącznika. Są to dwa przeciwstawne kryteria optymalizacji działania wyłącznika próżniowego o określonych właściwościach elektrycznych i kinetycznych [1, 5, 11–13].

Synchronizowane otwarcie zestyku komory próżniowej względem przebiegu prądu uzyskano za pomocą synchronizowania chwili podania impulsu sterującego, powodującego załączenie impulsu silnopiędowego zasilającego cewkę ultraszybkiego napędu i otwarcie zestyku tej komory.

Dla synchronizowanego wyzwania ultraszybkiego napędu z zadaniem czasem 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 zwarciowych, a także do minimalizacji rozrzutów czasu T_{ws} , powstających wskutek błędów systematycznych wykorzystywanych metod ekstrapolacji. Ogólne przypadki synchronizowanego wyłączenia prądu zwarciowego symetrycznego i maksymalnie niesymetrycznego w najcięższych warunkach zwarciowych opisano w [1, 14, 16, 17].



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączeniu zwarcia: I, II – pierwsza i druga półfala prądu zwarciego; ws – wyłączenie synchronizowane; wns – wyłączenie niesynchronizowane; napięcia: u – n. sieci, U_m – amplituda u , u_p – n. powrotne, u_{pm} – wartość szczytowa u_p , u_a – n. łuku przy wns, u_{as} – n. łuku przy ws; φ_z – kąt fazowy obwodu zwarciego; prądy zwarcieowe i : I_m – amplituda półfali i , i_s – p.z. symetryczny, i_n – p.z. niesymetryczny, i_{n0} – składowa nieokresowa i_n , I_{nop} – wartość początkowa i_{n0} , i_u – p.z. udarowy, i_{nw} – p.z. zadziałania wyzwalacza wyłącznika; WS \rightarrow chwile: t_1 – ch. zarcia obwodu, t_2 – ch. zadziałania wyzwalacza nadprądowego oraz startu procedury ws, t_3 – ch. amplitudy prądu ($di/dt = 0$), t_4 – ch. synchronizowanego uruchomienia napędu ultraszybkiego, t_5 – ch. rozejścia się styków i zapłonu łuku, t_6 – ch. dojścia prądu do zera i zgaszenia łuku w I półfali prądu, t_6' – ch. dojścia prądu do zera i zgaszenia łuku w II półfali prądu; czasy: T_{1-2} – cz. zadziałania wyłącznika, T_{2-3} – cz. pomiarów i obliczeń, T_{3-4} – cz. opóźnienia, T_{4-5} – cz. własny otwierania, T_{5-6} – cz. łukowy, T_{4-6} – cz. wyprzedzenia synchronicznego, T_{1-6} – cz. zarcia przy ws; WNS \rightarrow chwile: t_1 – ch. zarcia obwodu, t_2 – ch. zadziałania wyzwalacza, t_5' – ch. rozejścia się styków i zapłonu łuku, t_6' – ch. przejścia prądu przez zero i ponownego zapłonu łuku, t_6' – ch. dojścia prądu do zera i zgaszenia łuku; czasy: T_{1-2} – cz. zadziałania wyzwalacza, $T_{2-5'}$ – cz. własny otwierania, $T_{5'-6'}$ – cz. łukowy, $T_{1-6'}$ – cz. zarcia przy wns; B – bilans czasów przy ws oraz wns podczas I lub II półfali prądu

Fig. 3. Current and voltage transients at synchronized and non-synchronized short-circuit current breaking: I, II – first and second half-wave of short-circuit current, ws – synchronized switching off, wns – non-synchronized switching off; voltages: u – operating v., U_m – amplitude of u , u_p – recovery v., u_{pm} – peak value of u_p ; u_a – arc v. at wns, u_{as} – arc v. at ws; φ_z – phase angle of short circuit; short-circuit current i : i_n – total asymmetrical c., i_s – AC component of i_n , i_{n0} – DC component of i_n , I_{nop} – initial value of i_{n0} , I_m – half-wave amplitude of i_n , i_u – peak c., i_{nw} – trip c. WS \rightarrow moments: t_1 – short circuit m., t_2 – triggering m. of detector 27 (initiating start of ws procedure), t_3 – current amplitude m. ($di/dt = 0$), t_4 – synchronized m. of drive 15 actuation, t_5 – contact separation and arc ignition m., t_6 – current zero and arc extinction m. in I half-wave of the current, t_6' – current zero and arc extinction m. in II half-wave of the current; times: T_{1-2} – operating t., T_{2-3} – measurement and calculations t., T_{3-4} – delay t., T_{4-5} – opening t., T_{5-6} – arcing t., T_{4-6} – synchronous advance time; T_{1-6} – total clearing t. at ws. WNS \rightarrow moments: t_1 – short circuit m., t_2 – trip m. of c. b., t_5' – contact separation and arc ignition m., t_6' – current zero and arc reignition m., t_6' – current zero and arc extinction m.; times: T_{1-2} – operating t. of overcurrent trip, $T_{2-5'}$ – opening time of c. b., $T_{5'-6'}$ – arcing t., $T_{1-6'}$ – total clearing t. at wns; B – comparative balance of times at ws and wns during I or II current half-wave

Na rys. 3 pokazane zostało porównanie przebiegów prądów i napięć przy synchronizowanym i niesynchronizowanym wyłączeniu prądu zwarciego oraz bilans czasów przy wyłączeniu synchronizowanym oraz niesynchronizowanym podczas I lub II półfali prądu.

W danych warunkach układowych rzeczywisty przebieg prądu zwarciego zależy w znany sposób od chwili wystąpienia zwarcia względem przebiegu spodziewanego prądu zwarciego. Tylko w przypadku powstania zwarcia w chwili zera prądu spodziewanego wyłączana jest sinusoidalna półfala prądu symetrycznego i . W pozostałych przypadkach występuje składowa nieokresowa i_{no} zniekształcająca sinusoidę prądu zwarciego, powodująca wzrost jego amplitudy i wydłużenie, w granicznym przypadku, czasu trwania zdeformowanej półfali tego prądu do wartości według rys. 3 (prądy niesymetryczne i_n , graniczny przypadek z udarowym prądem zwarcigowym przy powstaniu zwarcia w chwili maksimum prądu spodziewanego).

Bilans czasów B pokazuje porównanie całkowitych czasów wyłączenia zwarcia T_{1-6} i $T_{1-6'}$ oraz ich składników przez wyłącznik synchronizowany oraz niesynchronizowany, przy takim samym prądzie zadziałania obu wyłączników. Wyłącznik niesynchronizowany zadziała bezzwłocznie, ale nie jest dostatecznie szybki, więc przy krótkich czasach I półfali prądu zazwyczaj styki komory próżniowej osiągają w chwili t_6 zbyt małą odległość i następuje ponowny zapłon łuku, a czas łukowy przy wns jest znacznie dłuższy niż przy ws.

W systemie 25 kV/50 Hz, przy wyłączeniu niesynchronizowanym prądu w granicznych warunkach zwarcigowych, czas trwania półfali prądu niesymetrycznego może przekraczać $T_{6-6'} > 15$ ms; prąd udarowy może sięgać $i_u \approx 38$ kA; wartości czasów łukowych są zawarte w przedziale $T_{5-6} = 7-15$ ms; średni czas łukowy wynosi $T_{sr5-6} \approx 11$ ms; maksymalna wartość energii łuku przy wyłączeniu i_s wynosi $E_{lms} \approx 11$ kJ, przy wyłączeniu i_n wynosi $E_{lms} \approx 30$ kJ. W systemie 15 kV/16,7 Hz wartości te wynoszą odpowiednio: $T_{6-6'} > 50$ ms; $i_u \approx 100$ kA; $T_{5-6} = 27-52$ ms; $T_{sr5-6} \approx 38$ ms; $E_{lms} \approx 60$ kJ; $E_{lms} \approx 130$ kJ. Warunki prądowe i energetyczne pracy komory próżniowej przy wyłączeniu niesynchronizowanym są więc znacznie trudniejsze przy częstotliwości 16,7 Hz niż przy 50 Hz.

Istnieje duże zagrożenie trwałym szczepieniem styków. Erozja materiału styków emitowanego do otoczenia zestyku jest proporcjonalna do energii wydzielonej z łuku do styków. Zużycie styków pracujących w tak trudnych warunkach energetycznych jest powodem bardzo poważnego ograniczenia trwałości łączeniowej wyłącznika w warunkach zwarcigowych, a także roboczych.

Dlatego, w zależności od warunków, próżniowe wyłączniki niesynchronizowane są zdolne wyłączyć jedynie kilkadziesiąt zwarć⁴. Ponadto znamionowa zdolność wyłączalna typowych przemysłowych komór próżniowych określona dla częstotliwości 50/60 Hz nie jest zazwyczaj możliwa do osiągnięcia przy częstotliwości 16,7 Hz.

Przy ultraszybkim wyłączeniu synchronizowanym problemy te zostają w znacznej części wyeliminowane. Czas łukowy jest krótki i praktycznie stały. Wyłączenie odbywa się zawsze na opadającym zboczku krzywej prądu. Wartości szczytowe prądu łuku zmieniają się w niewielkich granicach i są zazwyczaj mniejsze od wartości granicznej [1, 11] dla łuku dyfuzyjnego, przy czym są one zawarte w granicach 30-58% (przy 50 Hz) lub 10-20% (przy

⁴ Dane na ten temat nie są znane z dostępnej literatury dla 16,7 Hz; dla 50 Hz w zakresie napięć średnich niektórzy znani producenci wyłączników próżniowych podają (niekatalogowo) trwałości do 50 zwarć ciężkich (w warunkach granicznych w cyklu łączeniowym) lub od 75 do 100 w pozostałych warunkach (Konferencja „Łączniki'06”, Pieczyńska, 16-18 maja 2006).

16,7 Hz) amplitudy prądu zwarcioowego. Przy $T_{4,6} = 2$ ms jest to ok. 12 kA przy 50 Hz lub 15 kA przy 16,7 Hz. W praktyce występuje tylko łuk dyfuzyjny o prawie stałym i najniższym z możliwych napięciu, a skokowo wzrastająca wytrzymałość powrotna jest największa z możliwych i praktycznie zależy jedynie od odległości styków w chwili zera prądu [1, 11, 14, 16, 17].

Wyłączanie synchronizowane niezwykle skutecznie stabilizuje warunki energetyczne w komorze próżniowej, niezależnie od systemu zasilania sieci trakcyjnej. Średnia energia łuku jest wówczas ponad dwudziestokrotnie (przy 50 Hz) lub studwudziestokrotnie (przy 16,7 Hz) mniejsza niż przy wyłączaniu niesynchronizowanym. W granicznych warunkach zwarcioowych przy $T_{ws} \approx 2-3$ ms jest ona rzędu 200–400 J przy 50 Hz lub 300–500 J przy 16,7 Hz, zarówno przy wyłączaniu prądu symetrycznego, jak i niesymetrycznego.

Podobnie jest w warunkach przeciążeniowych i roboczych, dlatego trwałość łączeniowa wyłączników SVB jest wielokrotnie większa niż wyłączników tradycyjnych dotychczas stosowanych w układach trakcyjnych. Wyłączanie synchronizowane nie eliminuje natomiast zagrożenia trwałym szepieniem styków.

3.3. Praca wyłącznika SVB przy synchronizowanym załączaniu i wyłączaniu zwarcia

Prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia w dowolnej chwili względem sinusoidy napięcia sieci trakcyjnej jest jednakowe, a napięcie łuku w próżni jest małe w stosunku do tego napięcia i nie wpływa na przebieg prądu. Zawsze istnieje więc ryzyko pojawienia się w odpowiednich okolicznościach udarowego prądu zwarcioowego podczas zwarcia obwodu następującego w stanie roboczym, tj. przy całkowicie zamkniętej komorze próżniowej. Nie ma nawet teoretycznych możliwości całkowitego wyeliminowania takiego przypadku.

Zestyk komory jest wówczas poddany dociskowi robocznemu gwarantującemu komorze próżniowej wytrzymanie znamionowego prądu szczytowego, a w wyłącznikach SVB docisk ten jest dodatkowo wspomagany układem antyszepieniowym (pkt 2.4; pkt 4), przede wszystkim ze względu na wielkie prądy udarowe w systemie 15 kV/16,7 Hz.

Jednak z punktu widzenia szepiania się styków, najgroźniejszym przypadkiem jest załączenie obwodu zwartego, wówczas bowiem duże wartości chwilowe prądu zwarcioowego 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 wtedy znacznie większa niż zestyków całkowicie zamkniętych.

Ten groźny przypadek może zostać całkowicie wyeliminowany dzięki zastosowaniu załączania synchronizowanego obwodu, pozwalającego przy załączeniu obwodu zwartego na znaczące ograniczenie amplitudy i czasu przepływu pierwszej półfali prądu zwarcioowego w stosunku do półokresu prądu symetrycznego, dzięki generowaniu tzw. małej pierwszej półfali prądu zwarcioowego, o ograniczonej amplitudzie i czasie trwania wystarczająco długim dla synchronizowanego wyłączenia prądu. Korzyści stąd wynikające pokazane zostały w tabeli 1.

Opisane wyżej w pkt. 3.1 i pokazane w tabeli 1 korzystne warunki działania wyłącznika SVB w zakresie tzw. małej półfali mają wyjątkowe znaczenie nie tylko w przypadku załączania obwodu zwartego, ale zwłaszcza przy pracy wyłączników SVB w systemie SPZ, gdy nieprzemijające zwarcie może być łączone kilkakrotnie.

Zarówno skutki termiczne, jak i elektrodynamiczne są w znany sposób zależne od kwadratu prądu, przy czym na skutki termiczne ma jeszcze wpływ czas zwarcia. Dlatego syn-

Tabela 1

Wpływ załączania synchronizowanego na ograniczanie skutków cieplnych i elektrodynamicznych prądu zwarciovego

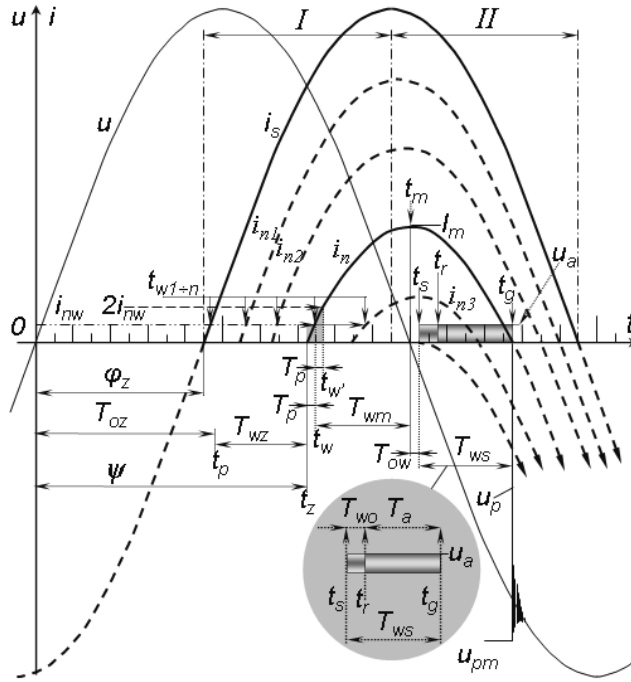
<p>Załączanie niesynchronizowane obwodu zwartego: Maksymalne czasy zwarcia t_z i udarowe prądy zwarciovie i_u przy: 25kV/50Hz: $t_z \approx 17^*$; 20^{**}ms $i_u = 38$ kA; 15kV/16,7Hz: $t_z \approx 51^*$; 60^{**}ms $i_u = 102$ kA; <i>(przy wyłączeniu: * dużej półfali prądu; ** jednookresowym)</i></p>
<p>Załączanie synchronizowane obwodu zwartego: Maksymalne czasy zwarcia t_z, prądy szczytowe i_{sz} oraz współczynniki ograniczenia prądu k_{oi} przy: 25kV/50Hz: $t_z \approx 6$ms; $i_{sz} \approx 9$kA; $k_o = i_u / i_{sz} \approx 4$; 15kV/16,7Hz: $t_z \approx 6$ms; $i_{sz} \approx 3$kA; $k_o = i_u / i_{sz} \approx 29$; <i>(* zawsze dla przypadku wyłączenia małej półfali prądu, względem **)</i></p>
<p>Korzyści przy synchronizowanym załączeniu obwodu zwartego: Maksymalne współczynniki ograniczenia sił elektrodynamicznych k_{oF} oraz skutków cieplnych k_{oJ} wytwarzanych przez prąd zwarciovym przy: 25kV/50Hz: $k_{oF} \approx 16$; $k_{oJ} > 40$; 15kV/16,7Hz: $k_{oF} \approx 800$; $k_{oJ} > 1700$; <i>(* zawsze dla przypadku wyłączenia małej półfali prądu, względem **)</i></p>

chronizowane załączanie, pozwalające realnie wyłączyć zwarcie w czasie przepływu małej półfali prądu, ograniczonym do ok. 6 ms, daje tak duże ograniczenia oddziaływania prądu zwarciovego w stosunku do wyłączenia niesynchronizowanego, zwłaszcza przy częstotliwości 16,7 Hz.

Przypadek synchronizowanego załączania i wyłączenia małej półfali prądu zwarciovego przeanalizowano szczegółowo na rys. 4.

Ciężkie warunki zwarciovie w postaci tzw. dużej półfali prądu (rys. 2; 3) występują w przypadku pojawienia się zwarcia w dowolnej chwili podczas II ćwiartki półfali składowej okresowej i_o , tj. spodziewanego prądu symetrycznego. Przebieg prądu jest wówczas losowo zmienny w zależności od przypadkowej wartości kąta. Mała półfala prądu pojawia się tylko przy wystąpieniu zwarcia podczas I ćwiartki półfali spodziewanego prądu symetrycznego, ale przy załączaniu zwarcia w drugiej połowie tej ćwiartki czasy małej półfali prądu są zbyt krótkie nawet dla ultraszybkiego wyłącznika SVB. Przy możliwych do uzyskania parametrach kinetycznych wyłącznika SVB czas tej półfali nie może być mniejszy niż ok. 5–6 ms, bowiem czas T_{ws} ma ściśle określoną wartość, a czas T_{ow} musi mieć wartość dodatnią.

Rodzinę przebiegów prądu zwarciovego dla różnych chwil t_z wystąpienia zwarcia, pokazaną na rys. 2, możliwą do wyłączenia synchronizowanego, stanowią więc przypadki z zakresu kąta $\psi = \varphi_z \div (\varphi_z + \pi/2)$. Zakres zmienności kątów φ_z jest możliwy do określenia na podstawie znajomości warunków zwarciovych występujących w danej sieci trakcyjnej. W systemie o częstotliwości 50 Hz zakres ten można oszacować na $\cos \varphi_z = 0,15-0,3$, a w systemie o częstotliwości 16,7 Hz na $\cos \varphi_z = 0,2-0,4$, tj. odpowiednio $\varphi_z = 81^\circ-72^\circ$ albo $\varphi_z = 78^\circ-66^\circ$. Po przeliczeniu na skalę czasu oznacza to opóźnienia w stosunku do zera napięcia odpowiednio 0–4,5 ms przy 50 Hz lub 11–13 ms przy 16,7 Hz.



Rys. 4. Synchronizowane załączanie i wyłączenie obwodu zwartego dla uzyskania wyłączenia podczas tzw. *małej półfali* prądu zwarciovego: napięcia: u – n. sieci, u_a – n. łuku, u_p – n. powrotne, u_{pm} – wartość szczytowa u_p ; prądy zwarciovie: i_s – p.z. symetryczny, i_n – p.z. niesymetryczny, I_m – amplituda i_n , i_{nw} – prąd nastawczy wyłącznika (zadziałania wyzwalacza); chwile: t_p – ch. uruchomienia zamka przechwytyjącego (pkt 3.1), t_z – ch. zamknięcia zestyku i zwarcia, t_w – ch. zadziałania wyzwalacza, t_w' – ch. osiągnięcia przez prąd i wartości $2i_{nw}$, t_m – ch. maksimum prądu, t_s – ch. synchronicznego załączenia napędu, t_r – ch. rozdzielenia się styków komory próżniowej, t_g – ch. dojścia prądu do zera i zgaszenia łuku; czasy: T_{oz} – cz. opóźnienia załączenia, T_{wz} – cz. własny zamykania wyłącznika, T_{wm} – cz. mierzony od t_w do t_m , T_p – poprawka pomiaru czasu T_{wm} , T_{ws} – cz. wyprzedzenia synchronicznego, T_{wo} – cz. własny otwierania wyłącznika, T_a – cz. opóźnienia wyłączenia; ψ – kąt fazowy załączenia względem zera napięcia u ; φ_z – kąt fazowy obwodu zwarciovego; I, II – pierwsza i druga ćwiartka półfali prądu symetrycznego

Fig. 4. Synchronized switching-on and switching-off of a short-circuit. A family of fault currents for various moments of short-circuit occurrence. Voltages: u – network voltage, u_a – arc voltage, u_p – recovery voltage, u_{pm} – peak value of u_p ; currents: i_s – symmetric fault current, i_n – asymmetric fault current, I_m – amplitude of i_n , i_{nw} – circuit-breaker setting current (for trip activation); moments: t_z – contact closing and short circuit moment, t_w – trip action moment, t_w' – $i = 2i_{nw}$ moment; t_m – current maximum moment; t_s – synchronous drive closure moment; t_r – vacuum chamber separation moment; t_g – moment of current zero and arc extinction; t_p – intercepting lock activation moment (sec. 3.1); times: T_{wm} – time measured from t_w to t_m , T_{oz} – lag time of switching-on, T_{ow} – lag time of switching-off, T_{wz} – circuit-breaker closing time, T_{wo} – circuit-breaker opening time, T_a – arcing time, T_{ws} – synchronized advance time, T_p – time T_{wm} measurement correction; ψ – contact closing phase angle (in relation to zero of network voltage u); φ_z – short circuit phase angle; I, II – first and second quarter of the half-wave of symmetric current

Przy znanym czasie T_{wz} , który jest charakterystyczny i praktycznie stały dla danego wyłącznika SVB, oraz przy przyjęciu najmniejszej wartości kąta φ_{zmin} , problem sprowadza się do wyznaczenia czasu T_{oz} jako różnicy kąta ψ przeliczonego dla danej częstotliwości systemu trakcyjnego oraz czasu T_{wz} .

Po załączeniu, jeżeli wystąpi zwarcie, wyłącznik wykrywa je po osiągnięciu przez prąd i_n w chwili t_w wartości i_{nw} prądu nastawczego wyłącznika (zadziałania wyzwalacza nadprądowego). Przy założonej wartości czasu T_{ws} dla danego przebiegu rzeczywistego prądu zwarciego $i_n(t)$ problem sprowadza się do określenia czasu opóźnienia wyłączenia T_{wo} względem chwili t_m , po którym zostanie uruchomiony napęd komory próżniowej. Chwila t_m jest jedyną bazą odniesienia możliwą do określenia na podstawie pomiaru prądu i analizy jego pochodnej, bowiem tylko przy ekstremum prądu I_m jest $(di/dt)_{Im} = 0$.

Przy danej częstotliwości napięcia systemu trakcyjnego i czasu trwania półokresu napięcia T_{pf} do określenia czasu T_o przyjęto następującą procedurę:

- a) od chwili t_w na podstawie pomiaru prądu i jego pochodnej mierzony jest czas T_{wm} ;
- b) w zakresie prądów $i_{nw} \div 2i_{nw}$ jest określana średnia stromość wzrostu prądu:

- c)
$$s_{sn} = di/dt = i_{nw} / t_w - t_w \quad (1)$$

- d) do skorygowania skrócenia czasu T_{wm} wskutek pominięcia pomiaru prądu w zakresie prądów $0 \div i_{nw}$ jest wprowadzana poprawka:

- e)
$$T_p = i_{nw} / s_{sn} \quad (2)$$

- f) dla $T_{wm} + T_p \geq 0,5T_{pf}$ czas T_o jest określany z zależności:

- g)
$$T_o = 0,5T_{wm} + 1,5T_p - 0,25T_{pf} - T_{ws} \quad (3)$$

- h) dla $T_{ws} \leq T_{wm} + T_p < 0,5T_{pf}$ czas T_o jest określany z zależności:

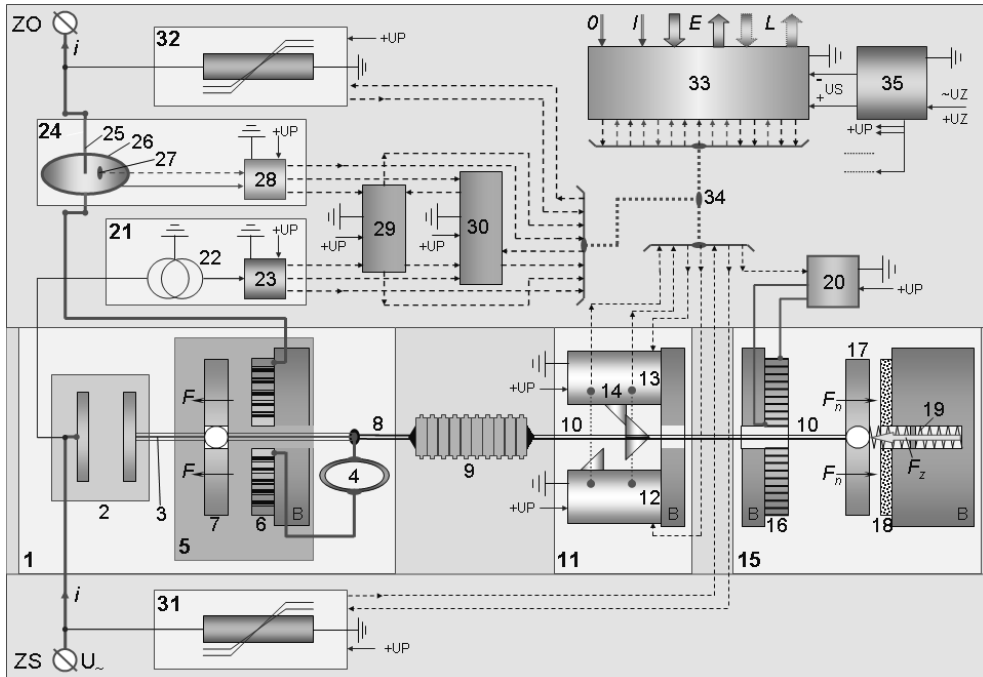
- i)
$$T_o = T_{wm} + T_p - T_{ws} \quad (4)$$

Przy prawidłowym określeniu czasu T_{oz} przypadek $T_{wm} + T_p < T_{ws}$ nie występuje, gdyż wyłączenie nie jest wówczas możliwe i dokonywane może być dopiero podczas następnej półfali prądu [13]. Inne przypadki synchronizowanego wyłączania obwodów trakcyjnych w warunkach roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych oraz metody synchronicznego sterowania zostały szczegółowo opisane we wcześniejszych pracach autorów [1, 14–17], dlatego też ze względu na ograniczone rozmiary niniejszej pracy zostały pominięte.

4. Budowa i działanie wyłączników SVB

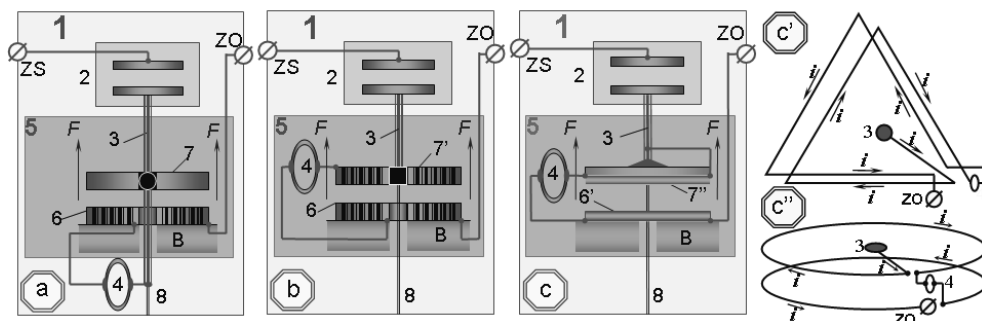
Schemat główny ideowo-blokowy wyłącznika SVB pokazany został na rys. 5, a możliwe warianty budowy układu antyszczeniowego na rys. 6.

Układ antyszczeniowy może być pomocniczym napędem indukcyjno-dynamicznym (rys. 6a), elektrodynamicznym napędem dwucewkowym (rys. 6b) lub dwuszynowym (rys. 6c, c', c''), o kierunku działania przeciwnym do kierunku działania napędu głównego.



Rys. 5. Schemat ideowo-blokowy wyłącznika SVB: 1 – zespół wyłączający, 2 – komora próżniowa, 3 – przyłącze styku ruchomego, 4 – połączenie podatne, 5 – układ antyszczeniowy, 6 – cewka, 7 – dysk dociskający o sile F , 8 – pręt napędowy (cz. I), 9 – izolator napędowy, 10 – pręt napędowy (cz. II), 11 – zespół zamków, 12 – zamek przechwytyjący, 13 – zamek główny, 14 – czujniki położenia, 15 – ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny, 16 – cewka, 17 – dysk o sile F_n , 18 – amortyzator, 19 – sprężyna zamykająca o sile F_z , 20 – generator silnoprądowego impulsu napędowego, 21 – zespół pomiaru napięcia, 22 – przekładnik napięciowy, 23 – analizator napięcia z przetwornikiem a/c, 24 – zespół pomiaru prądu, 25 – szyna pomiarowa, 26 – cewka Rogowskiego, 27 – progowy detektor prądu, 28 – analizator prądu z przetwornikiem a/c, 29 – analizator czasów, 30 – synchronizator mikroprocesorowy, 31, 32 – ograniczniki przepięć zewnętrznych i wewnętrznych, 33 – sterownik mikroprocesorowy, 34 – główna magistrala światłowodowa, 35 – zasilacz; UP – napięcia pomocnicze, US – napięcie sterownika, UZ – napięcia pomocnicze zasilające, i – prąd główny; zewnętrzne sygnały sterujące: E – elektryczne, L – optyczne, O/I – ręczne (otwierający i zamykający); B – sztywne bazy konstrukcyjne; główne zaciski przyłączowe: ZS – sieciowy, ZO – odbornikowy

Fig. 5. Block diagram of the SVB circuit-breaker: 1 – switching assembly, 2 – vacuum chamber, 3 – moving contact connector, 4 – flexible connection, 5 – anti-welding system, 6 – coil, 7 – holding disc of the force F , 8 – operating rod (part I), 9 – operating insulator, 10 – operating rod (part II), 11 – locking assembly, 12 – intercepting lock, 13 – main lock, 14 – position sensors, 15 – ultra-high-speed inductive-dynamics drive, 16 – coil, 17 – disc of the force F_n , 18 – shock absorber, 19 – closing spring of the force F_z , 20 – voltage pulse generator, 21 – voltage measuring unit, 22 – voltage transformer, 23 – voltage analyser with a/d converter, 24 – current measuring unit, 25 – measuring bus, 26 – Rogowski coil, 27 – current threshold detector, 28 – current analyser with a/d converter, 29 – time analyser, 30 – microprocessor synchronizer, 31, 32 – external and internal surge arresters, 33 – main microprocessor controller, 34 – main fibre optic bus-bar, 35 – power supply; UP – auxiliary voltage, UZ – powering auxiliary voltage, US – auxiliary voltage of controller; i – main current; external command signals: E – electrical, L – light, O/I – manual (opening and closing); B – fixed constructional basis; main terminals: ZS – network t., ZO – load t



Rys. 6. Warianty budowy układu antyzwarceniowego: a) indukcyjno-dynamiczny, b) elektrodynamiczny dwucewkowy, c) elektrodynamiczny dwuszynowy; c' , c'' – przestrzenne układy szyn wg rys. c; $6'$ – szyna, $7'$ – cewka lub $7''$ – szyna; pozostałe oznaczenia jak na rys. 5

Fig. 6. Anti-welding system types: a) inductive-dynamic, b) electrodynamic (two-coil), c) electrodynamic (two-bus); c' , c'' – bus configurations acc. to Fig. c; $6'$ – bus, $7'$ – coil or $7''$ – bus; other markings as in Fig. 5

Wybór rodzaju układu antyzwarceniowego zależy od zakresu spodziewanych prądów zwarciovych i potrzebnych docisków zestykowych.

Jest on zasilany prądem głównym, a w zakresie dużych wartości półfali tego prądu wytwarza dodatkowy docisk zestykowy, sumujący się z dociskiem zestykowym wytwarzanym przez sprężynę zamykającą wyłącznik. Docisk wytwarzany przez układ szybko maleje, gdy prąd dąży do zera. Nie utrudnia to więc ultraszybkiego działania napędu głównego, działającego w krótkim czasie przed naturalnym zerem prądu zwarciovego, w zakresie szybko malejących jego wartości.

Spośród innych nowych rozwiązań charakterystycznych dla wyłączników SVB należy wyróżnić:

- **Napędy indukcyjno-dynamiczne** 15 (rys. 6) są sprawdzonymi w eksploatacji napędami ultraszybkimi wykorzystywanymi w wyłącznikach serii DC [2, 12, 13]. Są one niezawodne, charakteryzują się prostotą budowy i relatywnie dużą trwałością mechaniczną. Ograniczeniem w zakresie ultraszybkiego działania wyłącznika jest wytrzymałość mechaniczna komór próżniowych. Ogólną budowę napędu opisano w pkt. 2.1 i 4 (rys. 5), a szczegółowe zasady budowy i działania napędów były przedmiotem wcześniejszych prac autorów [1, 2, 12–14] i zostały pominięte.
- **Ograniczniki przepięć** 31 i 32 (rys. 6) wyłączników SVB zbudowane są z typowych warystorów tlenkowych MOV [3]. W przypadku dwusystemowych wyłączników pojazdowych (przeznaczonych dla lokomotyw dwusystemowych) każdy z układów ograniczników przepięć jest złożony z zestawu dwóch szeregowo połączonych ograniczników przepięć o napięciach znamionowych odpowiednio 15 kV oraz 10 kV. Przy zmianie napięcia systemu trakcyjnego z 25 kV/50 Hz na 15 kV/16,7 Hz lub odwrotnie, przełączenie zestawu ograniczników odbywa się samoczynnie wraz z cyklem operacji dostosowawczych lokomotywy.
- **Monitoring MOV** wprowadzono w ogranicznikach przepięć ze względu na zjawisko degradacji występujące w MOV podczas normalnej eksploatacji, pomimo dobrze opatrzonych technologii ich produkcji. Prowadzi ono do pogarszania się parametrów

MOV, co w konsekwencji powoduje zmniejszanie się napięcia charakterystycznego, a w dłuższej perspektywie do uszkodzenia całego ogranicznika. W wyłącznikach SVB wprowadzono zespoły monitorujące w sposób ciągły MOV, mające za zadanie z odpowiednim wyprzedzeniem sygnalizować potrzebę wymiany ogranicznika o obniżonych parametrach. Są to mikroprocesorowe układy kontrolujące przebieg mierzonego upływu prądu przez układ oraz napięcie charakterystyczne ograniczników, określane na podstawie mierzonego przebiegu napięcia. Wartości te są na bieżąco porównywane z wartościami odniesienia wprowadzonymi dla danego ogranicznika do sterownika mikroprocesorowego 33 (rys. 6).

Działanie wyłączników SVB opisano dla przypadków załączania obwodu przez pojazdowy wyłącznik SVB-U, wyłączania zwarcia przez wyłącznik pojazdowy i podstacyjny oraz łączenia prądów roboczych.

- **Synchronizowane załączanie zwarcia przez pojazdowy SVB** (rys. 5) → Początkowo komora 2 jest utrzymywana przez zamek 13 w stanie maksymalnego otwarcia. Po pojawieniu się napięć U_{\sim} i U_Z oraz naładowaniu kondensatorów generatora 20, zespół 21 i analizator 29 mierzą wartość i częstotliwość napięcia, a sterownik 33 na tej podstawie łączy właściwe sekcje ograniczników przepięć 31 oraz 32 i wyłącznik jest gotowy do pracy. Po podaniu zewnętrznego sygnału torem I , E lub L , sterownik 33 wysyła serię sygnałów powodujących: otwarcie zamka 13, zatrzymanie organu ruchomego przez zamek 12 na czas powrotu zamka 13 do stanu gotowości, a następnie synchronizowane otwarcie zamka 12 (pkt. 2.1 i 2.2) oraz zamknięcie zestyku komory 2 (jest to niezbędne przy załączeniu obwodu zwartego, bo wówczas wyłącznik może okazać się szybszy niż zamek 13). Kiedy płynie prąd, zespół 24 dostarcza danych analizatorowi 29 i synchronizatorowi 30 do identyfikacji stanu obwodu (roboczy, przeciążeniowy lub zwarcia).
- Synchronizowane załączanie obwodu przez wyłącznik podstacyjny przebiega analogicznie, z pominięciem procedury identyfikacji systemu i dostosowywania do niego ograniczników przepięć, ponieważ zawsze jest to stacjonarny wyłącznik dostosowany do systemu zasilania.
- **Synchronizowane wyłączanie zwarcia przez pojazdowy SVB** (rys. 3 i 5) → Po wystąpieniu w chwili t_1 zwarcia, wzrasta prąd i , powodując w chwili t_2 zadziałanie czujnika 27 i uruchomienie procedury wyłączania synchronizowanego. Na podstawie danych pomiarowych napięcia, prądu i czasów z zespołów 21, 24 i 29, uzyskiwanych w czasie $T_{2,3}$, przy zadanym czasie palenia się łuku $T_{5,6}$, synchronizator 30 i sterownik 33 obliczają chwilę t_6 dojścia prądu do zera oraz czas opóźnienia $T_{3,4}$, po którym sterownik 33 wysyła w chwili t_4 sygnał załączający generator 20, zasilający impulsem silnopiędowym napęd 15, powodujący ultraszybkie zadziałanie wyłącznika oraz wyłączenie zwarcia w chwili t_6 . Gdy czas I półfali prądu jest za krótki (tj. przy $T_{1-3} < T_{4,6}$), wyłącznik pozostaje zamknięty, a procedura ws jest ponawiana po zerze prądu. Czas łukowy jest zawsze taki sam, niezależnie od amplitudy oraz czasu półfali prądu.
- **Synchronizowane wyłączanie zwarcia przez podstacyjny SVB** (rys. 3 i 5) → Taka sama procedura ws jest realizowana z półfalowym opóźnieniem w stosunku do chwili t_2 , a przy zbyt krótkim czasie I półfali prądu pierwsze zero prądu jest pomijane, natomiast uruchomienie procedury ws następuje po identyfikacji drugiego zera prądu, jeżeli nadal płynie prąd zwarcia. W każdych warunkach zwarcia jest wówczas

selektywność działania wyłączników, tzn. zwarcie w pojeździe jest zawsze wyłączane przez wyłącznik pojazdowy, a nie podstacyjny.

- **Synchronizowane łączenie prądów roboczych lub przeciążeniowych** → Załączenie obwodu zawsze przebiega podobnie, ale synchronizacja nie ma w tym przypadku praktycznego znaczenia. Przy synchronizowanym wyłączaniu prądu roboczego lub przeciążeniowego obliczane są dwa różne i stałe czasy opóźnienia względem zera oraz maksimum prądu. Jeżeli sygnał startu procedury pojawi się po maksimum, a przed zerem prądu, to od zera prądu jest odmierzany dłuższy z czasów, a jeżeli pojawi się po zerze, a przed maksimum prądu, to od maksimum prądu jest odmierzany krótszy z czasów. Sygnałem startu procedury w warunkach roboczych jest odpowiedni sygnał zewnętrzny (O , E lub L). W warunkach przeciążeniowych sterownik 33 działa jak znane wyzwalacze elektroniczne o danej charakterystyce czasowo-prądowej.

5. Cechy użytkowe wyłączników SVB

5.1. Parametry znamionowe

Tabela 2

Parametry znamionowe rodziny wyłączników SVB

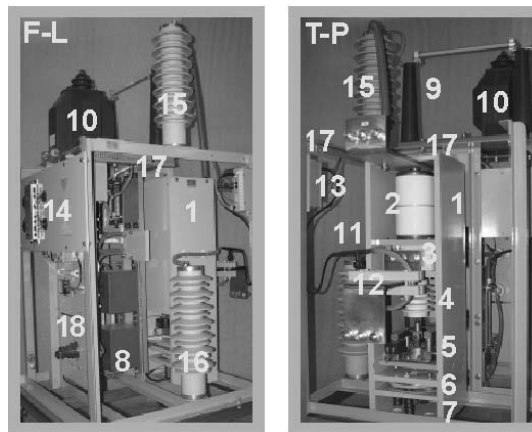
1	Napięcie izolacji U_i [kV]	30	
2	Napięcie łączeniowe U_n [kV]	25	15
3	Częstotliwość f [Hz]	50/60	16,7
4	Poziom ograniczania przepięć u_m [kV]	~90	~50
5	Graniczna zdolność wyłączalna I_b [kA]	15	40
6	Zwarciowa trwałość łączeniowa n_b [c.ł.z. Z-W] ⁵	5000	
7	Prąd ciągły I_{th} [A]	400; 630; 800; 1250	
8	Napięcie pomocnicze U_a [V]	220	
9	Czas własny otwierania t_o [μ s]	< 500	
10	Czas łukowy t_a [ms]	2-3	
11	Trwałość mechaniczna n_m [c.p.] ⁶	20 000	
12	Zakres temperatur $\pm\Theta$ [°C]	-30 / +40	
13	Wysokość n.p.m. a [m]	÷ 1500	
14	Wymiary gabarytowe* ___/ s/h/g [mm]	1200 / 1450 / 935	
15	Ciężar* G [kG]	~ 200	
*dotyczy prototypu (rys. 7) rozbudowanego ze względów badawczych			

⁵ [c.ł.z. Z-W] = cykli łączeniowych zwarciowych załącz-wyłącz.

⁶ [c.p.] = cykli przestawieniowych.

5.2. Prototyp przemysłowy wyłącznika SVB-P 25 kV/50(60) Hz i jego badania

Pokazany na rys. 7 prototyp przemysłowy wyłącznika SVB-P 25 kV/50(60) Hz został wykonany przez ZAE WOLTAN w Łodzi, współpracujący przy realizacji projektu z KAE PŁ. Wyłączniki SVB mają budowę modułową. Podstawowym modulem jest ultraszybki, próżniowy zespół łączeniowy 1 o schemacie według rys. 5, złożony z zespołów 2–7 według rys. 7, dokonujący synchronizowanych operacji łączeniowych w obwodzie głównym. Poszczególne moduły (zespoły), przy określonych ograniczeniach konstrukcyjnych, mogą być montowane w różnych konfiguracjach przestrzennych. Stwarza to możliwość elastycznego dostosowywania gabarytów wyłącznika do potrzeb w miejscu jego zainstalowania. Obecna wersja prototypu SVB, pokazana na rys.7, jest rozbudowana przestrzennie, co pozwala na uzyskanie dostępu do poszczególnych zespołów w celach badawczych. Gabaryty wersji użytkowej wyłącznika będą mniejsze.



Rys. 7. Widok wyłącznika SVB: F-L: front-lewa; T-P: tył-prawa; 1 – zespół łączeniowy, 2 – komora próżniowa, 3 – przyłącze styku ruchomego, 4 – izolator napędowy, 5 – zespół zamków, 6 – ultraszybki napęd indukcyjno-dynamiczny, 7 – sprężyny zamykające, 8 – generator wielkopiętrowego impulsu napędowego, 9 – zespół pomiaru napięcia, 10 – przekładnik napięciowy, 11 – zespół pomiaru prądu, 12 – szyna pomiarowa z cewką Rogowskiego, 13 – analizator prądu z przetwornikiem a/c, 14 – główny sterownik mikroprocesorowy, 15, 16 – ograniczniki przepięć, 17 – główna magistrala światłowodowa, 18 zasilacz

Fig. 7. SVB circuit breaker: F-L – front – left side, B-R – back – right side: 1 – switching assembly, 2 – vacuum chamber, 3 – moving contact connector, 4 – operating insulator, 5 – locking assembly, 6 – ultra-high-speed inductive-dynamics drive, 7 – closing spring, 8 – high current pulse generator, 9 – voltage measuring unit, 10 – voltage transformer, 11 – current measuring unit, 12 – measuring bus with Rogowski coil, 13 – current analyser with a/d converter, 14 – main microprocessor controller, 15, 16 – surge arresters, 17 – main fibre optic bus, 18 – power supply

W laboratoriach Katedry zostało zbudowane nowe, pierwsze w Polsce silnoprądowe laboratorium specjalistyczne, przeznaczone do badań wysokonapięciowej aparatury trakcyjnej prądu przemiennego dla kolei wielkich prędkości. Źródłem zasilania laboratorium jest suchy transformator specjalny o mocy 2 MVA i napięciach 6,3/15/25 kV. Wartości napięć wtórnych odpowiadają napięciom stosowanym w systemie kolejowym 15 kV o częstotliwości 16,7 Hz oraz w planowanym systemie 25kV/50Hz dla polskich kolei dużych prędkości. Przy obydwu napięciach roboczych będą wykorzystywane te same elementy obwodu głównego (kable, szynoprzewody, oporniki, dławiki, odłączniki itd.), posiadają więc one izolację dla napięcia 25 kV. Zabezpieczenie główne stanowi wyłącznik próżniowy VD4 o napięciu znamionowym 36 kV, 50/60 Hz i prądzie znamionowym ciągłym 1250 A. Na tej bazie planowane jest utworzenie pierwszego w Polsce stanowiska do badań przy częstotliwości 16,7 Hz, a stosowne wnioski już zostały złożone.

W laboratoriach Katedry wyłącznik SVB został poddany serii badań specjalistycznych, obejmujących najpierw badania poszczególnych podzespołów, a następnie wyłącznika kompletnego, obejmujące m.in.: badania izolacji obwodu głównego, obwodów pomocniczych i elektronicznych; badania działania wyłącznika (w tym gotowości do pracy), obejmujące wstępne sprawdzenie działania wyłącznika oraz pomiary czasu przygotowawczego i pomiary czasów charakterystycznych; badania cyklu załączeniowego i wyłączeniowego w warunkach znamionowych i granicznych; badania działania blokad i uzależnień, obejmujące sprawdzenie progów napięciowych samoczynnego otwierania wyłącznika oraz progów blokad załączania; badania nagrzewania obwodu głównego; pomiary spadków napięć itd. Obecnie wyłącznik jest w trakcie badań trwałościowych.

Przeprowadzone badania miały charakter typowo konstruktorski, w miarę potrzeb wprowadzano niezbędne zmiany pozwalające na uzyskanie jednoznacznie pozytywnych wyników każdego z badań. Zakończeniem cyklu badań będzie specjalna próba łączeniowa w granicach możliwości zwarciovych nowego laboratorium.

5.3. Korzyści techniczne i eksploatacyjne z zastosowania wyłączników SVB

Parametry techniczne synchronizowanych wyłączników ultraszybkich są nieosiągalne dla klasycznych wyłączników próżniowych ze względu na relatywnie małą szybkość ich działania.

W porównaniu do tych wyłączników⁷ ultraszybkie wyłączniki synchronizowane w przybliżeniu mają w znamionowych warunkach zwarciovych⁸:

	przy 16,7 Hz / przy 50 Hz
zwarciovą prąd szczytowy – mniejszy ponad:	29-krotnie / 4-krotnie
maksymalną siłę elektrodynamiczną – mniejszą ponad:	800-krotnie / 16-krotnie
skutek cieplny prądu zwarciovego – mniejszy ponad:	1700-krotnie / 40-krotnie
prąd szczytowy łuku – mniejszy ponad:	8-krotnie / 3-krotnie
maksymalny czas łukowy – mniejszy ponad:	26-krotnie / 8-krotnie
średni czas łukowy – mniejszy ponad:	19-krotnie / 5-krotnie
maksymalną energię łuku – mniejszą ponad:	430-krotnie / 150-krotnie
jednostkową erozję ⁹ styków – mniejszą ponad:	220-krotnie / 40-krotnie

⁷ Przy założeniu wyłączenia jednookresowego i maksymalnej asymetrii prądu (rys. 3).

⁸ Przy założeniu synchronizowanego cyklu *Z-W* malej półfali o czasie zwarcia $T_{1-6} \approx 6$ ms (rys. 3).

Technika synchronizowanego załączania i wyłączania prądów jest najlepszym i najtańszym sposobem zwiększania trwałości łączeniowej wyłączników próżniowych, zwłaszcza w warunkach zwarciovych.

Synchronizacja wyłączania, w połączeniu z zastosowaniem ultraszybkiego napędu komory próżniowej, pozwala na tak znaczne ograniczenie czasu łukowego oraz energii wydzielonej z łuku, że erozja łukowa materiału styków przestaje w praktyce być czynnikiem ograniczającym trwałość łączeniową¹⁰ wyłącznika SVB nawet w warunkach zwarciovych, a więc trwałość ta jest zbliżona do trwałości mechanicznej. Jeden wyłącznik SVB staje się więc równoważnikiem eksploatacyjnym wielu próżniowych wyłączników niesynchronizowanych, eliminując konieczność ich zakupu.

Do innych walorów użytkowych wyłączników SVB należy także zaliczyć:

- spełnianie wymagań norm europejskich z zakresu trakcji, elektrotechniki, ochrony środowiska, kompatybilności elektromagnetycznej itd., a ponadto stosownych dyrektyw KE,
- pełną neutralność środowiskową,
- możliwość przystosowania do pracy w dowolnym systemie trakcyjnym prądu przemiennego,
- selektywne działanie przy przeciążeniach i zwarciach wyłączników taborowych w stosunku do podstacyjnych,
- wyposażenie w autonomiczny system przeciwprzebieciowy, ograniczający narażenia elementów obwodów głównych taboru oraz systemów zasilania sieci jezdnej, skutecznie zmniejszający liczbę ich awarii i pozwalający zarazem na redukcję innych środków systemowych ochrony od przepięć zewnętrznych,
- małe straty mocy przy przepływie prądów roboczych,
- brak strefy ochronnej,
- światłowodową transmisję sygnałów sterujących i informacyjnych,
- dużą odporność na przepięcia i zakłócenia,
- brak potrzeby przeglądów i konserwacji w całym okresie eksploatacji, tj. w zakresie trwałości łączeniowej,
- niskie koszty eksploatacyjne wyłącznika.

Korzyści ekonomiczne powstające wskutek wprowadzania wyłączników SVB do eksploatacji w pojazdach trakcyjnych i systemach ich zasilania będą się kumulowały u ich użytkowników.

Opisane walory eksploatacyjne wyłączników SVB, w tym przede wszystkim możliwości selektywnego działania oraz ich nowoczesność sprawiają, że wyłączniki te już obecnie wywołały duże zainteresowanie i uznanie specjalistów, czego wyrazem są pokazane na rys. 8 liczne wyróżnienia uzyskane przez wyłączniki.

Wystawienie prototypu wyłącznika SVB na 7. Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO w październiku 2007 r. w Gdańsku, a następnie na 56. Światowych Targach Wynalazczości, Badań Naukowych i Nowych Technik BRUSSELS EUREKA w listopadzie

⁹ Jednostkowa erozja materiału styków – podczas jednego wyłączenia zwarcia przez komorę próżniową w granicznych warunkach zwarciovych, dla erozyjności $e_{AK} = 200 \mu\text{g/C}$ dla Cu (brak danych literaturowych dla używanego materiału typu CuCr).

¹⁰ Trwałość łączeniowa komory próżniowej jest odwrotnie proporcjonalna do erozji jednostkowej materiału styków.

2007 r. w Brukseli, zaowocowało czterema znaczącymi wyróżnieniami międzynarodowymi: na TRAKO 2007 prototyp wyłącznika SVB uzyskał specjalne wyróżnienie w konkursie im. inż. Ernesta Malinowskiego, a na Brussels Eureka – Innova Energy ‘2007: Złoty Medal z Wyróżnieniem, Nagrodę Ministra Gospodarki RP oraz Nagrodę Ministra Nauki, Nowych Technologii i Współpracy z Zagranicą Rządu Walonii. W przyszłości będzie to miało ważne znaczenie marketingowe. Ponadto na XV Giełdzie Polskich Wynalazków w Warszawie w marcu 2008 r. twórcy wyłącznika SVB zostali uhonorowani Nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za Międzynarodowe Osiągnięcia Wynalazcze. Na 80. Międzynarodowych Targach Poznańskich: Innowacje – Technologie – Maszyny Polska 2008 wyłącznik SVB uzyskał Złoty Medal w kategorii *Transfer Wyników Badań Naukowych Do Praktyki Gospodarczej*.

Projekt p.n. *Wysokonapięciowe synchronizowane próżniowe wyłączniki ultraszybkie SVB dla kolei dużych prędkości* realizowany jest przez Katedrę Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej, we współpracy z Zakładem Aparatury Elektrycznej WOLTAN Sp. z o.o. w Łodzi jako przyszłym producentem wyłączników.

Projekt jest finansowany przez Ministra Gospodarki oraz Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Projekt Badawczy Zamawiany PBZ nr PW-004/ITE/07/2006) w zakresie Programu Wieloletniego nr PW 004, koordynowanego przez ITE-PIB w Radomiu.



Rys. 8. Międzynarodowe i krajowe nagrody uzyskane przez wyłączniki SVB

Fig. 8. National and international prizes and honours for SVB ultra-high-speed, synchronized, vacuum circuit-breaker for railway traction systems powered with alternating current high voltages

Literatura

- [1] Bartosik M., *Wylączenie synchroniczne obwodów NN*, praca habilitacyjna, ZNPŁ nr 37, Rozprawy Naukowe, 1981¹¹.
- [2] Bartosik M., Wójcik F., *Napędy impulsowe próżniowych wyłączników trakcyjnych*, Materiały Konferencji Naukowej „Rozwój systemów i środków w transporcie” TRANSSYSTEM-89, Warszawa 1989.
- [3] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Warystory tlenkowe jako wysokoenergetyczne ograniczniki przepięć łączeniowych w trakcji kolejowej*, Materiały Konferencji Naukowej TRANSSYSTEM-89, Warszawa 1989.
- [4] Frontczak F., *Podstacje trakcyjne i ich zasilanie*, KOW, Warszawa 1994.
- [5] Shioiri T., Homma M., Kaneko E., Miyagawa M. and Ohshima I., *Insulation characteristics of vacuum interrupter for a new 72/84 kV C-GIS*, XVIIIth ISDEIV, Eindhoven 1998.
- [6] Decyzja Komisji Europejskiej z dn. 30.05.2002 dot. specyfikacji techn. dla interoperacyjności *podsystemu tabor* transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości określ. w art. 6 ust. 1 dyrektywy 96/48/WE.
- [7] Decyzja Komisji Europejskiej z dn. 30.05.2002 dot. specyfikacji techn. dla interoperacyjności *podsystemu energia* transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości określ. w art. 6 ust. 1 dyrektywy 96/48/WE.
- [8] TSI (2002/733/EG) z 30 maja 2002.
- [9] Rostkowski W., *Sieci trakcyjne prądu przemiennego i przejścia między systemami*, Materiały na kurs „Nowoczesna trakcja elektryczna”, Politechnika Warszawska, Centrum Doskonałości EESEMC, 2005.
- [10] *Wstępne studium wykonalności budowy linii dużych prędkości*, praca zbiorowa pod kier. A. Massel, CNTK, Warszawa 2005.
- [11] Janiszewski J., Purczyński A., *High current vacuum arc in axial magnetic field*, Proceedings of the Xth International Conference on Switching Arc Phenomena SAP'2005, Łódź 2005.
- [12] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Modern DC circuit breakers*, *tts* nr 9/2006.
- [13] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Nowoczesne wyłączniki prądu stałego*, Konferencja Naukowo-Techniczna ŁĄCZNIKI '06, Pieczyska 2006.
- [14] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Synchronizowany wyłącznik próżniowy SWT dla kolei dużych szybkości*, XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK '2006, Zakopane 2006.
- [15] Bartosik M., Borsiak J., Lasota R., Polak P., Szubko A., Wójcik F., *Synchronizowany wyłącznik próżniowy prądu przemiennego*, projekt wynalazczy nr P-383462 z dnia 1.10.2007.

¹¹ Tam zamieszczony jest również obszerny spis literatury własnej i obcej (176 poz. lit.) dotyczącej wylączenia synchronicznego prądu przemiennego w powietrzu i w próżni.

- [16] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Nowa rodzina synchronizowanych wyłączników próżniowych SWT do systemów trakcji kolejowej zasilanych wysokimi napięciami przemiennymi*, *tts*, nr 10/2007.
- [17] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F., *Ultraszybki próżniowy wyłącznik synchronizowany SVB dla wysokonapięciowych systemów trakcji kolejowej prądu przemiennego*, Konferencja Naukowo-Techniczna ŁĄCZNIKI '06, Pieczyska 2008.
- [18] PN-EN 62271-100 – *Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza*, Część 100: Wyłączniki wysokiego napięcia prądu przemiennego, 2006.
- [19] PN-EN 50152-1 – *Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Wymagania szczególne dla aparatury łączeniowej prądu przemiennego*, Część 1: Wyłączniki jednofazowe na napięcia U_m powyżej 1 kV, 2002.