

Artur HEJDUK  
Andrzej DZIERŻYŃSKI  
Henryk SIBILSKI  
Sławomir KOZAK  
Stanisław KWIATKOWSKI

## WYŁĄCZNIKI PRÓŻNIOWE NA NAPIĘCIU 24 kV OPRACOWANE W INSTYTUCIE ELEKTROTECHNIKI

**STRESZCZENIE** *W artykule omówiono opracowane w Zakładzie Wielkich Mocy Instytutu Elektrotechniki dwa typy wyłączników na napięcie znamionowe 24 kV. Jeden z napędem bocznym i drugi z napędem ustawionym równoległe do komór próżniowych. Przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu pola elektrycznego w komorze próżniowej wyłącznika z uwzględnieniem rozmieszczenia ekranów wewnątrz komór oraz wyniki symulacji działania napędu elektromagnetycznego. W opracowaniu udział wzięły: Zakład ZPUE S.A., Włoszczowa oraz ZE LAMINA S.A. – dostawca komór próżniowych. Oba modele wyłączników poddano badaniom łączenia prądów zwarciovych.*

**Słowa kluczowe:** *wyłączniki próżniowe, komory próżniowe, napędy elektromagnetyczne*

### 1. WSTĘP

---

Wyłączniki próżniowe na niskie i średnie napięcia znamionowe są powszechnie stosowane w sieciach energetycznych. Stosuje się je również na wyższe napięcia znamionowe nawet do 145 kV. Przewaga tych wyłączników nad wyłącznikami, np. małoolejowymi, których w sieciach średniego napięcia jest nadal bardzo dużo, wynika ze znacznej

---

**mgr inż. Artur HEJDUK, dr inż. Andrzej DZIERŻYŃSKI,  
prof. dr hab. inż. Henryk SIBILSKI, prof. dr hab. Sławomir KOZAK,  
mgr inż. Stanisław KWIATKOWSKI**

e-mail: [hejduk; dzierzynski; sibilski; kozak; kwiatkowski]@iel.waw.pl

Zakład Wielkich Mocy, Instytut Elektrotechniki,  
ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 269, 2015

wytrzymałości elektrycznej próżni, dużej trwałości łączeniowej oraz ze względu na to, że łuk elektryczny towarzyszący wyłączanemu prądowi znajduje się w przestrzeni zamkniętej – w komorze próżniowej. Wyłączniki próżniowe można stosować w warunkach napowietrznych w niskich temperaturach, ponieważ ich właściwości łączeniowe i parametry techniczne nie ulegają zmianie w zmiennych warunkach pogodowych – zimą i latem. Inną zaletą tych wyłączników jest to, że przy otwartych stykach wyłącznika, w przypadku przebicia przerwy międzystykowej, w wyniku np. przepięcia pochodzenia atmosferycznego, płynący prąd generuje osiowe lub radialne pole magnetyczne, które ułatwia samoczynne zgaszenie łuku i wyłączenie prądu. W innych wyłącznikach – np. z izolacją gazową SF<sub>6</sub> w podobnej sytuacji może dojść do eksplozji, gdyż palący się pomiędzy stykami łuk powoduje wzrost ciśnienia w biegunie wyłącznika powyżej poziomu wytrzymałości osłony komory bieguna (wyłącznik gasi łuk jedynie pod działaniem napędu podczas otwierania styków wyłącznika, kiedy następuje sprężanie gazu powyżej ciśnienia w biegunie).

Dzięki charakterystycznej dla próżni dużej wytrzymałości powrotnej, wyłączniki próżniowe mogą być stosowane w sieciach, w których występują duże stromości zmian prądu zwarciovego i duże stromości napięcia powrotnego. Ważny jest jednak zawsze należyty dobór wyłącznika do miejsca zainstalowania, gdyż występujące w niektórych miejscach w sieci energetycznej duże stromości początkowe zmian prądu zwarciovego i duże stromości napięcia powrotnego mogą stanowić zagrożenie. Z tego też powodu, konieczne jest stosowanie wysokiej jakości komór próżniowych o powtarzalnej technologii produkcji.

W Instytucie Elektrotechniki opracowano wyłączniki próżniowe: tornistrowy oraz wyłącznik z napędem bocznym na napięcie 24 kV spełniające wymagania norm PN EN 62271-100:2009 w zakresie działania w cyklu SPZ i wyłączania prądu zwarciovego 25 kA.

Oryginalność wspomnianych wyżej konstrukcji wyłączników polega na zastosowaniu napędów elektromagnesowo-sprężynowych [1].

W artykule podano wyniki prac wykonywanych przy współdziałaniu Zakładu ZPUE S.A., Włoszczowa oraz ZE LAMINA S.A.

## 2. OGÓLNY OPIS KONSTRUKCJI WYŁĄCZNIKÓW

Komory próżniowe, przy powtarzalnej technologii produkcji, mogą wyłączać prąd znamionowy 10 000 razy a prąd zwarciovowy nawet 50-krotnie, co jest nieosiągalne w innych konstrukcjach wyłączników. Jest to najtańszy sposób wyłączania prądu roboczego znamionowego i zwarciovego i to bez potrzeby dokonywania przeglądu i bez wymiany styków. Za efektywność gaszenia łuku łączeniowego i zwarciovego w stosowanych komorach próżniowych odpowiedzialna jest ich konstrukcja i rodzaj styków. W Instytucie Elektrotechniki od kilku lat prowadzone są badania układów stykowych w rozbiornym komorze próżniowej. W wyniku tych działań opracowano styki zapewniające korzystny rozkład pola magnetycznego na powierzchni styków z osiowym polem magnetycznym i tym samym równomierne zużywanie się powierzchni stykowych podczas wielokrotnego wyłączania prądów zwarciovych. Komory próżniowe

w wyłącznikach średniego napięcia zwykle umieszczane są w osłonach izolacyjnych, np. wykonanych z rur izolacyjnych lub w osłonach z żywicy zapewniających możliwość recyklingu.

Rozwiązanie konstrukcyjne wyłącznika tornistrowego na 24 kV pokazano na rysunku 1, natomiast wyłącznika z napędem bocznym na rysunku 2. Oba wyłączniki różnią się tylko ustawieniem napędu w stosunku płaszczyzny biegunów wyłącznika.



Rys. 1. Wyłącznik tornistrowy



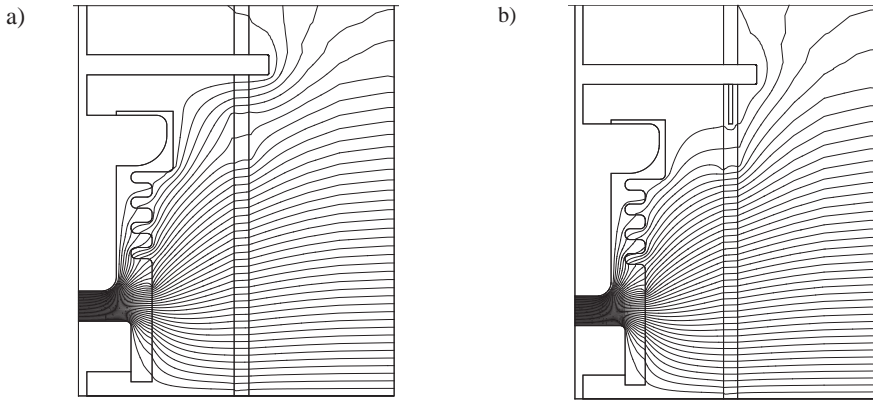
Rys. 2. Wyłącznik z napędem bocznym

W wyłączniku tornistrowym napęd jest ustawiony równoległe do biegunów, natomiast w wyłączniku z napędem bocznym – jest prostopadły do biegunów wyłącznika. Takie ustawienie biegunów wyłączników skutkuje odmiennym przekazywaniem energii napędu na poszczególne bieguny. W wyłączniku tornistrowym wał główny napędu połączony jest bezpośrednio z każdym biegunem, natomiast w wyłączniku z napędem bocznym energia napędu przekazywana jest na bieguny wyłącznika w wyniku szeregowego połączenia kinematyki napędu do biegunów.

W obu typach wyłączników pod każdym biegunem umieszczono w odpowiedniej osłonie sprężyny dociskające styki. Siłę docisku styków wyznaczano tak, aby nie dopuszczać do odskoków styków, jak również aby skompensować działania sił dynamicznych powstałych podczas załączania na zwarcie.

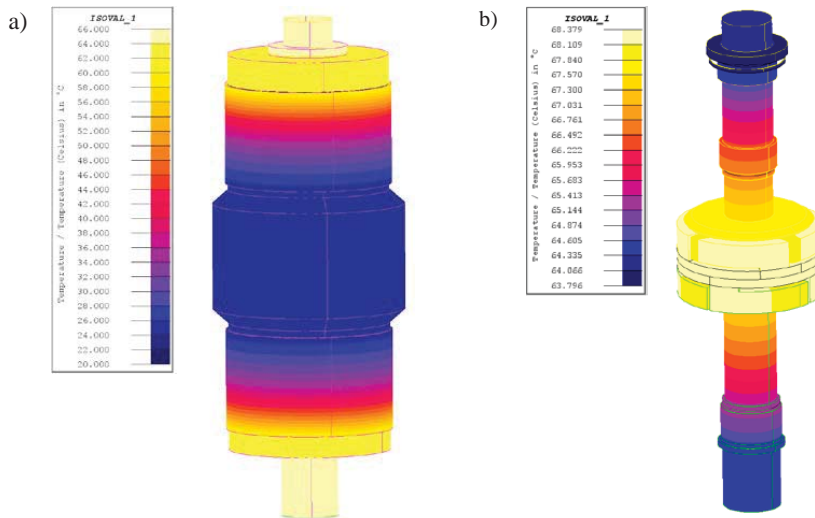
Komory próżniowe umieszczono w osłonach izolacyjnych (rys. 3). W celu zapewnienia wymaganej wytrzymałości elektrycznej względem części uziemionych zastosowano ekranowanie poprawiające rozkład pola elektrycznego wzdłuż izolacji wewnętrznej bieguna (rys. 3b). Wprowadzenie ekranu zwiększyło wytrzymałość napięciową o około 25% w stosunku do rozwiązania bez ekranu.

Umieszczenie komór próżniowych we wnętrzu osłony izolacyjnej utrudnia wyprowadzenie ciepła wydzielanego pomiędzy stykami komory i otoczeniem. Dla zapewnienia prawidłowego odprowadzania ciepła i nieprzegrzewania się elementów komory próżniowej w warunkach eksploatacji, przy długotrwałym przepływie prądu znamionowego dobrano odpowiednie przekroje wyprowadzeń jak i średnicę styków w oparciu o obliczenia wykonane z zastosowaniem programu FLUX 3D oraz uwzględniając zależność Renza podaną w [2].



**Rys. 3. Wynik obliczeń rozkładu pola elektrycznego w biegunie wyłącznika przy otwartych stykach:** a) rozkład pola bez zastosowanego ekranu, b) rozkład pola po wprowadzeniu ekranu

Szczegółowe badania rozkładu temperatury w biegunie wyłącznika, podczas przepływu prądu znamionowego, pozwalające ocenić prawidłowość wykonania obliczeń, wykonano w laboratorium. Badania rozkładu temperatury wykonywane są na zgodność z normą PN-EN 62271-1:2009.



**Rys. 4. Obliczony rozkład temperatury:**  
a) na powierzchni osłony, b) na elementach zespołu stykowego

### 3. NAPĘD ELEKTROMAGNESOWO-SPRĘŻYNOWY NOWEJ GENERACJI W WYŁĄCZNIKACH IEL

---

Powszechnie stosowany napęd zasobnikowo-sprężynowy stanowi znaczny procent kosztu całego wyłącznika. Składa się zwykle z bardzo dużej liczby detali, których wykonanie wymaga odpowiedniego oprzyrządowania. Dlatego, aby produkcja wyłączników była opłacalna, musi być prowadzona w dużych seriach. Dopiero wtedy cena wyłącznika mieści się w granicach cen rynkowych wyznaczanych przez innych producentów. Przy krótkich seriach produkcyjnych konieczne staje się zastosowanie nowego, znacznie tańszego i mniej pracochłonnego napędu. Takim napędem jest napęd elektromagnesowo-sprężynowy. Jego zaletą są mniejsze wymiary i mniejsza wymagana liczba elementów konstrukcyjnych. Stąd wynikają mniejsze koszty tych napędów.

Napęd w wyłączniku próżniowym musi spełniać inne wymagania niż to ma miejsce w wyłącznikach małoolejowych czy z izolacją gazową. Podczas załączania na zwarcie styki ruchome zderzają się ze stykami spoczynkowymi, w wyniku czego może dojść do niepożądanych odbić i spiekania się styków. Aby temu zapobiec, stosuje się sprężyny stykowe, które zapewniają docisk styków ruchomych do spoczynkowych i zapobiegają odskokom. Te same sprężyny zapobiegają odrywaniu się styków, w wyniku działania sił dynamicznych spowodowanych przez prąd płynący podczas zwarcia oraz podczas załączania na zwarcie.

Działanie napędu elektromagnesowo-sprężynowego wymaga stosowania zasilacza, w którym źródłem energii jest kondensator. Kondensator jest ładowany z sieci prądu przemiennego lub z baterii akumulatorów znajdujących się na każdej stacji średniego napięcia. Przy braku zasilania ze źródła prądu przemiennego korzysta się ze źródła prądu stałego, co zapewnia w każdym przypadku poprawne działanie wyłącznika.

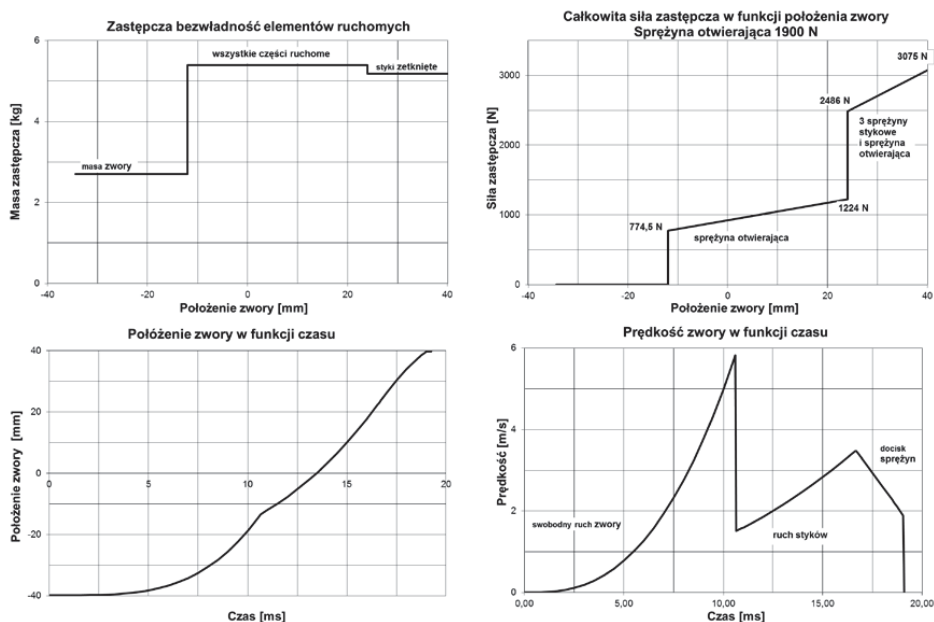
W napędzie elektromagnesowo-sprężynowym załączanie wyłącznika odbywa się przez rozładowanie kondensatora przez cewkę elektromagnesu, a wyłączenie odbywa się pod działaniem sprężyny napinanej podczas załączania. Utrzymywanie wyłącznika w stanie zamkniętym zapewnia blokada mechaniczna. Energia elektromagnesu przekazywana jest na wał wyłącznika, który jest sprzężony z biegunami. Taka konstrukcja zapewnia jednoczesne załączanie i jednoczesne wyłączenie wszystkich trzech biegunów.

Elektromagnes napędu wyłącznika zaprojektowano przyjmując, że musi zapewnić wymaganą prędkość ruchu styków przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganego docisku styków jak i przy równoczesnym napięciu sprężyny otwierającej wyłącznik. Zagadnienie to jest skomplikowane ponieważ sprężyna otwierająca podczas otwierania musi pokonać wszystkie opory zapewniając wymaganą prędkość ruchu styków podczas wyłączenia prądu zwarcowego. Wyniki obliczeń napędu przedstawiono na rysunku 5.

Na tym rysunku przedstawiono wyniki obliczeń ruchu napędu elektromagnetycznego zastosowanego w w/w wyłącznikach.

Na rysunku 5a przedstawiono zmiany masy sprowadzonej w funkcji położenia zwory. Początkowo elektromagnes powoduje ruch jedynie zwory elektromagnesu.

Następnie włączane są w ruch wszystkie części ruchome układu kinematycznego napędu i w końcowej fazie ruchu, z chwilą zetknięcia się styków całkowita masa zmniejsza się o masę styków ruchomych.



Rys. 5. Wyniki obliczeń ruchu zwory napędu wyłącznika próżniowego

Zależność siły sprężyn w funkcji drogi zwory przedstawiono na rysunku 5b. Początkowo na zworę nie działają siły od sprężyn, ale po zakończeniu swobodnego ruchu zwory dalszy ruch powoduje napinanie sprężyny otwierającej. Na początku obciążenie wynosi 774 N, w końcowym położeniu wzrasta do 1224 N. Dalszy wzrost wywołany jest zejściem się styków i rozpoczyna się napinanie sprężyn stykowych, dlatego siła skokowo wzrasta do 2486 N. Ostatecznie po zgnieceniu sprężyn stykowych siła osiąga wartość 3075 N.

Rysunek 5c pokazuje położenie zwory w funkcji czasu. Początkowo zwora jest rozpędzana i po 20 ms, wskutek wzrostu obciążenia wszystkimi częściami ruchomymi, przyspieszenie zwory maleje i w końcowym etapie, po 30 ms następuje dalsze widoczne spowolnienie ruchu zwory aż do zatrzymania.

Prędkość ruchu zwory w funkcji czasu przedstawia rysunku 5d. Początkowo sama zwora rozpędza się i osiąga znaczną prędkość, a po zderzeniu z nieruchomymi elementami kinematyki napędu prędkość zwory i innych elementów wyłącznika zrównuje się. Rozpoczyna się ruch styków. Po zejściu się styków następuje zwolnienie ruchu zwory, która napina sprężyny stykowe. Rosnący docisk sprężyn stykowych i zmniejszanie się prądu w cewce elektromagnesu powoduje zakończenie ruchu napędu.

## 4. WYNIKI BADAŃ

Głównymi elementami wyłącznika są komory próżniowe i napęd. Komory poddano kondycjonowaniu przy napięciu 50 Hz, a następnie badaniom wytrzymałości elek-

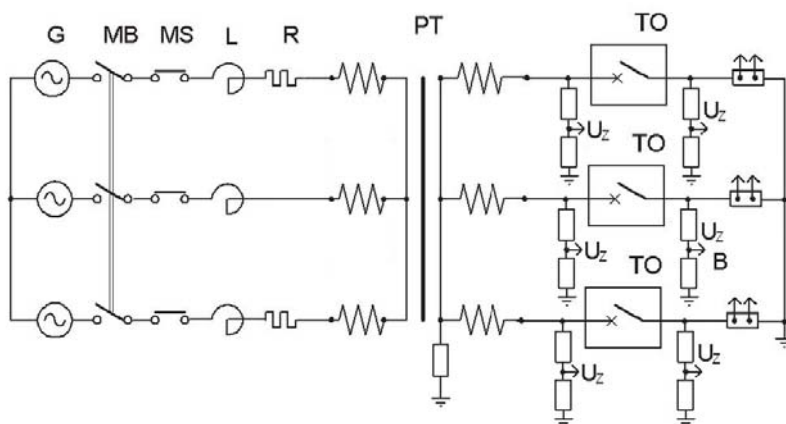
trycznej napięciem udarowym 1.2/50 zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 62271-1:2009. Napęd wyłącznika zasobnikowo sprężynowy poddano badaniom trwałości mechanicznej 2000 przestawień. Ponadto wykonano badania mechaniczne w celu sprawdzenia czasów załączania i wyłączania (patrz tab. 1). Wyniki prób mechanicznych wyłącznika podano w tabeli 1.

**TABELA 1**

Wyniki prób mechanicznych wyłączników

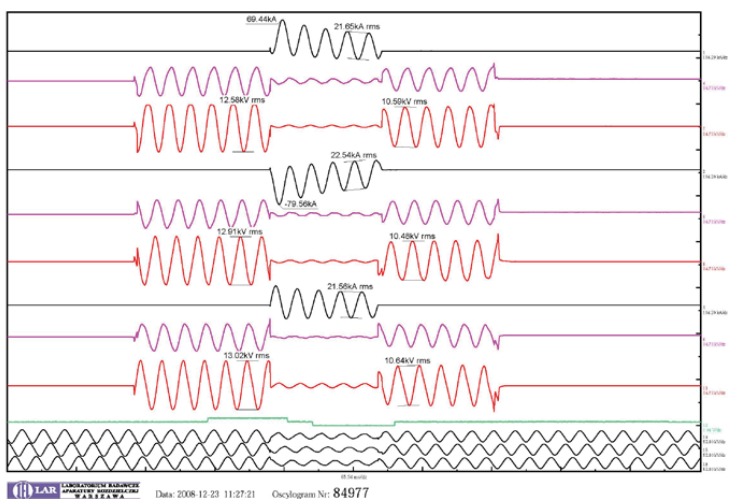
	Wyłącznik z napędem bocznym		Wyłącznik z napędem równoległym do biegunów	
Rodzaj operacji	Czas zamykania/otwierania	Prędkość ruchu styków	Czas zamykania/otwierania	Prędkość ruchu styków
-	ms	m/s	ms	m/s
Z	32,6	0,94	34,1	1,42
W	69,2	1,12	59,6	1,35
Z	32,1	0,95	34,5	1,05
W	67,3	1,15	59,7	1,36

Badania wielokrotnego wyłączenia i załączania prądów zwarciovych w cyklu SPZ wykonano w Laboratorium Zwarciovym Instytutu Elektrotechniki. Schemat układu probierczego do badań łączenia prądu zwarciovego pokazano na rysunku 6.

**Rys. 6. Schemat układu probierczego podczas badań łączenia prądów zwarciovych**

Oznaczenia: G – generator, MB – wyłącznik bezpieczeństwa, MS – załącznik zwarciovym, L – dławiki, R – rezystory, PT – transformator, TO – obiekt badany, Uz – pomiar napięcia, B – pomiar prądu

Przykładowy oscylogram wyłączenia prądów zwarcia pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Łączenie prądu zwarciego

Wartość prądu szczytowego wynosiła 79 kA. Badania wyłączników przy większych prądach zwarciovych będą kontynuowane po wykonaniu serii prototypowej wyłączników.

## 5. WNIOSKI

Wykonane wyłączniki, ze względu na konstrukcję napędu, stanowią oryginalne rozwiązanie [1]. Wykonane badania wyłączników na zgodność z wymaganiami norm PN-EN 62271-100:2009 oraz PN-EN 62271-1:2009 potwierdzają słuszność zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Przewiduje się, że bieguny wyłączników będą produkowane w osłonach z żywicy epoksydowej, inaczej niż to pokazano na rysunku 1 i 2. Przyjęte rozwiązanie pozwoli na znaczną obniżkę ceny wyłącznika w stosunku do cen wyłączników obecnie produkowanych.

## LITERATURA

1. Sibilski H., Dzierżyński A., Augustyniak M.: Wyłącznik próżniowy z elektromagnesowym załączaniem, Patent Nr 207138, od 2006.06.30.
2. Renz R.: Axialkontakte fuer Hochspannung – Vakuumschaltrohren, ITG – Fachbericht, 1989.

*Rękopis dostarczono dnia 14.04.2015 r.*



24 KV VACUUM CIRCUIT BREAKERS  
DEVELOPED IN THE ELECTROTECHNICAL INSTITUTE

Artur HEJDUK, Andrzej DZIERŻYŃSKI,  
Henryk SIBILSKI, Sławomir KOZAK, Stanisław KWIATKOWSKI

**ABSTRACT** *Two types of the 24 kV vacuum circuit breakers were developed at the Electrotechnical Institute. One with a lateral electromagnetic-spring actuator and the second one with the actuator arranged in parallel to the vacuum chambers. The calculation of the electric field distribution shows that the screen in the circuit-breaker pole can reduce the electric field and significantly increase the electric strength of the pole insulation. The actuator electromagnetic force, contact movement and velocity were calculated. Both of the circuit-breaker models were constructed in cooperation with the factories: ZPUE S.A. Włoszczowa and ZE LAMINA S.A. The short-circuit tests were made in accordance with PN-EN62271-100:2009.*

