

STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

ZESPOŁOWY OGRANICZNIK PRZEPIĘĆ PRZEZNACZONY DO UKŁADÓW TRAKCYJNYCH WYŁĄCZANYCH PRZECIWPRADEM

Autor: mgr inż. Grzegorz Drygała.

Promotor: dr hab. inż. Piotr Borkowski prof. nadzw. PŁ.

1. GENEZA PRACY

W świetle kolejnych dyrektyw unijnych dotyczących między innymi aparatury łączeniowej stosowanej w elektrycznej trakcji kolejowej, a w szczególności selektywnego działania wyłączników pojazdowych i podstacyjnych pojawia się problem stosowania właściwych typów wyłączników spełniających te wymagania.

W najbardziej rozpowszechnionym spośród czterech systemów zasilania elektrycznej trakcji kolejowej - systemie zasilania prądem stałym o napięciu 3000 V, stosuje się klasyczne wyłączniki prądu stałego wyposażone w magnetowdmuchowe komory gaszeniowe i działające na znanej zasadzie wydmuchu elektromagnetycznego. Ze względu na ich stosunkowo wolne działanie bardzo słabo ograniczają one prąd zwarciovowy, a w ich układach stykowo-gaszeniowych wydzielają się energie rzędu megadżuli. Wyłączniki te w praktyce nie są w stanie zapewnić żadnej selektywności działania pomiędzy wyłącznikiem pojazdowym i podstacyjnym. Częściową, a nawet pełną selektywność mogą zapewnić ultraszybkie wyłączniki próżniowe działające na zasadzie wyłączania przeciwprądem (IPP). Od kilku lat wchodzi one sukcesywnie do eksploatacji głównie jako wyłączniki taborowe, stosowane w jednostkach trakcyjnych, a ostatnio również jako wyłączniki lokomotywowe. Pomimo znacznie silniejszego ograniczania prądu zwarciovowego do wartości około 30 % prądu zwarciovowego spodziewanego, nadal w indukcyjnościach obwodu występuje znaczna energia magnetyczna, która musi być przejęta przez kondensator lub zamieniona na ciepło w warystorze tlenkowo-cynkowym biorącym udział w ostatnim etapie wyłączania. W granicznych przypadkach energia ta może osiągać wartości do 100 kJ i jej znaczna część jest wytracana w warystorze powodując jego przyspieszoną degradację. Skuteczna i bezpieczna ochrona przeciwprzebieciowa obwodów trakcyjnych zawierających próżniowe wyłączniki szybkie wymaga stosowania specjalnych ograniczników przepięć o wyjątkowo dużej energochłonności i trwałości. W takich systemach okazuje się, że trwałość nawet największych produkowanych obecnie warystorów jest zbyt niska. Wartości dopuszczalnych prądów udarowych warystorów przy udarach łączeniowych (2 ms), podawane przez producentów, są na poziomie od 1000 A do 2700 A. Zbliżone do tych wartości warunki pracy warystorów występują w obwodach trakcji elektrycznej wyposażonych w wyłączniki IPP i należy zauważyć, że praca warystorów w warunkach dla nich granicznych może powodować ich szybką degradację i uszkodzenie.

Warystor pełni w procesie wyłączania przeciwprądem nie tylko funkcję ochrony przeciwprzebieciowej. Jego działanie należy rozpatrywać przede wszystkim jako ostatni etap w sekwencji wyłączania impulsem przeciwprądu. Łączenie kilku warystorów równolegle do tej funkcji skutkuje obniżeniem wartości przepięcia (poziom ochrony może zmaleć nawet do 6 kV przy kilku równolegle połączonych warystorach, w porównaniu z 9 kV w rozwiązaniu z jednym warystorem). Okazuje się wówczas, że zdecydowanie maleje stromość opadania prądu w ostatniej fazie cyklu i całkowity czas wyłączania może przekroczyć 4 ms, a taka jego wartość dyskwalifikuje wyłącznik z klasy V (wyłączniki bardzo szybkie, ograniczające prąd), przypisując go do klasy H (wyłączniki szybkie ograniczające prąd). Stąd wypływa bardzo

ważny wniosek: chcąc zachować parametry wyłącznika, które mieszczą się w przedziałach zdefiniowanych dla klasy V, należy unikać niskich poziomów ograniczania przepięć łączeniowych, a więc także stosowania dużych warystorów lub kilku połączonych równolegle. Idealny ogranicznik przepięć dedykowany dla wyłączników IPP powinien mieć działanie dwustanowe, tzn. powinien mieć dużą impedancję przy niskich napięciach i małą dla założonego poziomu ochrony (rzeczywisty warystor charakteryzuje się stosunkowo dużą zmiennością napięcia obniżonego w funkcji prądu wyładowczego – por. rys. 14). Całkowite wyeliminowanie warystorów jako ochrony przeciwprzepięciowej na rzecz innych, złożonych układów ograniczających przepięcia jest niepożądane, gdyż mają one nieosiągalną przez inne rozwiązania szybkość działania. Właściwym postępowaniem jest raczej stosowanie warystorów wspomaganych energetycznie dodatkowymi układami, włączanymi tylko przy zadanym poziomie napięcia.

Warystory w wyłącznikach IPP są newralgicznym elementem, ich uszkodzenie może być przyczyną bardzo rozległych uszkodzeń w systemie zasilania. Energia przepięcia, która w klasycznych wyłącznikach magnetowymuchowych jest wytracana w łuku elektrycznym, w przypadku uszkodzenia warystora w wyłączniku IPP zostaje oddana do obwodu w postaci przepięcia wielokrotnie przekraczającego wartości dopuszczalne. W przypadku kilku połączonych równolegle warystorów, uszkodzenie jednego z nich może spowodować przeciążenie energetyczne pozostałych i w konsekwencji także ich uszkodzenie.

Oprócz powyższych spostrzeżeń, należy dodać, że budowanie zestawów warystorów łączonych równolegle celem zwiększenia energochłonności ogranicznika wymaga precyzyjnego dobierania poszczególnych egzemplarzy o jednakowych parametrach elektrycznych. Jednak nawet ten zabieg nie gwarantuje długotrwałe poprawnej współpracy równoległej warystorów, gdyż szybkości degradacji różnych egzemplarzy warystorów są niejednakowe i trudne do przewidzenia.

W tej sytuacji celowe staje się poszukiwanie alternatywnych, złożonych rozwiązań zabezpieczeń przeciwprzepięciowych, których trwałość oraz energochłonność będą zadowalające. Ich opracowanie pozwoli uzyskać trwałość łączeniową w warunkach zwarciovych zbliżoną do trwałości mechanicznej obecnie produkowanych wyłączników IPP. Jest to szczególnie pożądane, ponieważ wyłączniki próżniowe, które są obecnie w eksploatacji są dużo częściej wykorzystywane do wyłączania prądów, niż wyłączniki magnetowymuchowe (ich parametry pozwalają ograniczać prądy wyłączane na dużo niższym poziomie niż wyłączniki klasyczne i ta cecha sprawia, że wiele układów zabezpieczających jest z nimi sprzęganych). W dotychczasowych rozwiązaniach (bez wspomagania energetycznego warystora) trwałość łączeniowa warystora ogranicza trwałość wyłącznika nawet do kilkunastu wyłączeń w przypadku szczególnie trudnych warunków obwodowych (dużych prądów zwarciovych).

2. CEL I TEZA PRACY

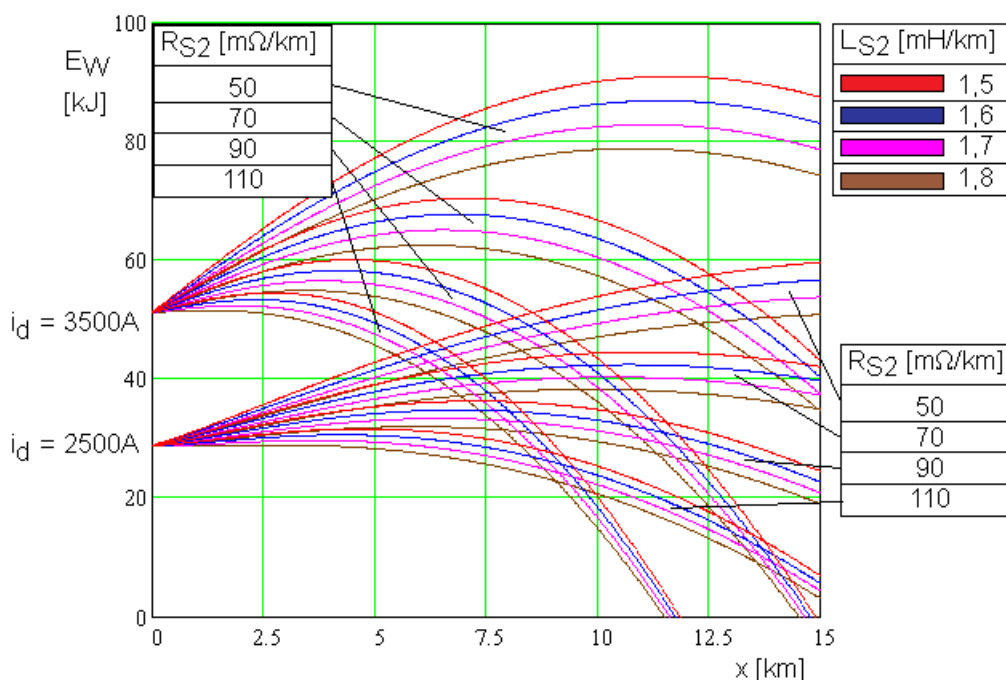
Celem pracy jest opracowanie układu służącego do ochrony przeciwprzepięciowej obwodów trakcyjnych prądu stałego o napięciu znamionowym 3 kV. Układ ten powinien współpracować z wyłącznikami próżniowymi działającymi na zasadzie wyłączania przeciwprądem, których właściwością wynikającą z zasady ich działania jest generowanie przepięć łączeniowych o dużych energiach. Opracowanie takiego układu (nazywanego w pracy skrótem ZOP - zespołowy ogranicznik przepięć) pozwoli na zwiększenie niezawodności układów zasilania w każdych warunkach eksploatacyjnych.

Teza pracy brzmi: „Poprawa trwałości ograniczników przepięć w obwodach trakcji elektrycznej prądu stałego wyłączanych przeciwprądem jest możliwa do zrealizowania za pomocą układów odciążających energetycznie warystor”.

3. GŁÓWNE UKŁADY TRAKCYJNE PRĄDU STAŁEGO

W pracy zebrano wiadomości dotyczące obecnie stosowanych rozwiązań w głównych systemach zasilania krajowej trakcji kolejowej prądu stałego, oraz dopuszczalnych wartości przepięć w nich występujących. Szczególną uwagę zwrócono na wprowadzane do eksploatacji ultraszybkie, próżniowe wyłączniki działające na zasadzie wyłączania impulsem przeciwprądu (IPP). Wyłączanie w nich odbywa się na zasadzie wymuszonego sprowadzenia do zera prądu stałego w próżniowej komorze łączeniowej za pomocą impulsu prądu o kierunku przeciwnym, generowanego przez dodatkowe źródło w postaci uprzednio naładowanego kondensatora. Zarówno wyłączanie prądu głównego jak i załączanie przeciwprądu odbywa się w próżni, a źródłem energii wytwarzającej przeciwprąd jest kondensator ładowany napięciem obwodu głównego, ale o odwróconej polaryzacji.

Źródłem przepięć generowanych podczas wyłączania obwodów trakcyjnych jest pole magnetyczne, które magazynuje energię powstałą w wyniku przepływu prądu przez indukcyjności obwodu oraz energia źródła zasilania. W rozprawie zaprezentowano wyniki wieloparametrycznych symulacji, które umożliwiają oszacowanie energii wydzielanej w postaci ciepła w strukturze warystora współpracującego z wyłącznikiem działającym na zasadzie IPP (rys. 1).



Rys. 1. Wartość energii E_W absorbowanej przez warystor w funkcji odległości miejsca zwarcia od podstacji: L_{S2} – indukcyjność jednostkowa linii zasilającej, R_{S2} – rezystancja jednostkowa linii zasilającej, i_d – nastawiony prąd zadziałania wyzwalacza nadprądowego wyłącznika (oprac. wł).

Porównanie danych katalogowych największych (pod względem energochłonności) warystorów i oszacowanej energii E_W przepięć występujących w sieci trakcyjnej wskazuje, że tak naprawdę tylko jeden obecnie produkowany warystor jest zdolny do samodzielnej pracy w systemach zasilania trakcji 3 kV wyposażonych w wyłączniki próżniowe IPP. Biorąc pod uwagę dużą zmienność i rozrzut parametrów systemów zasilania trakcji należy zauważyć, że jest to jednak tak naprawdę praca w skrajnych, dopuszczalnych przez producenta, warunkach, która powoduje przyspieszoną degradację warystora i w konsekwencji prowadzi do jego uszkodzenia.

4. WARYSTORY ZnO ORAZ ICH DEGRADACJA WYSOKOENERGETYCZNYMI UDARAMI PRĄDOWYMI

Warystory tlenkowo cynkowe są półprzewodnikami, których charakterystyka prądowo-napięciowa jest silnie nieliniowa. Ich podstawowym składnikiem są ziarna tlenku cynku ZnO o przeciętnej średnicy 20 μm , oddzielone od siebie cienkimi ($< 2 \text{ nm}$) warstwami domieszek, głównie tlenków bizmutu. Pomiędzy ziarnami ZnO występują także obszary międzyziarnowe spinelu antymonowo cynkowego i nadmiarowego tlenku bizmutu. Istota działania warystora polega na występowaniu na granicach ziaren tlenku cynku barier potencjałowych o wartości około 3.5 V, kontrolujących przepływ prądu przez warystor. Wynika z tego, że o napięciu charakterystycznym całego warystora decyduje głównie grubość pastylki. Napięcie charakterystyczne jest to wartość napięcia na warystorze, przy którym przechodzi on ze stanu zaporowego w stan przewodzenia. Duża wartość ciepła właściwego struktury warystora pozwala na pochłanianie znacznych ilości energii przepięć. Powoduje ona nagrzewanie warystora podczas przepływu prądu udarowego i następnie jest oddawana do otoczenia w postaci ciepła.

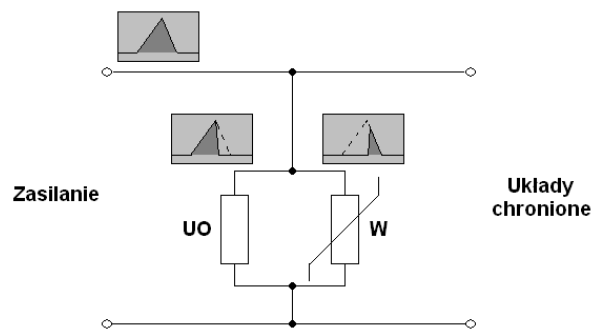
Degradacją nazywa się zmianę parametrów elektrycznych warystora (przede wszystkim w zakresie prądów upływu) wywołaną jego ekspozycją na przepięcia lub inne, niekorzystne warunki pracy. Pomimo stale rozwijanej technologii produkcji warystorów zjawisko to jest poważnym problemem, szczególnie w systemach, których działanie związane jest z generowaniem udarów przepięciowych o szczególnie dużych energiach. Systemem takim jest z pewnością system zasilania trakcji prądu stałego. Postępująca degradacja prowadzi do zwiększenia prądu upływu warystora, który powoduje niebezpieczne nagrzewanie jego struktury, już przy napięciu pracy ciągłej. Warystor, którego temperatura jest zbyt wysoka, nie jest w stanie zadziałać prawidłowo podczas ograniczania przepięcia. Prąd wyładowczy powoduje dalszy wzrost temperatury jego struktury i w efekcie warystor może wyjść ze stanu stabilności termodynamicznej. Zjawisko to ma charakter lawinowy, a jego przyczyną jest zmniejszanie impedancji warystora wraz ze wzrostem temperatury warystora.

Przedstawione w pracy wyniki badań (zaczepnięte z literatury) potwierdzają, że prądy wyładowcze o parametrach zbliżonych do granicznych, podawanych przez producentów warystorów, powodują zmiany w strukturze ZnO, które skutkują dużym wzrostem prądu upływu. Przekroczenie tych parametrów powoduje powstawanie uszkodzeń – lokalnych przegrzań, które trwale niszczą warystor.

Zwiększenie energochłonności ogranicznika przepięć jest możliwe przez równoległe łączenie kilku egzemplarzy, jednak wymaga to precyzyjnego dobierania poszczególnych egzemplarzy z jednakowymi charakterystykami prądowo napięciowymi, aby uzyskać zadowalający rozptyw prądu. W takim rozwiązaniu nie ma jednak pewności, że zmiany charakterystyk U-I współpracujących warystorów będą zachodziły w jednakowy sposób i z jednakową szybkością. Dlatego raz właściwie dobrane warystory mogą nieprawidłowo współpracować po pewnym okresie eksploatacji. Niektórzy producenci warystorów dopuszczają łączenie warystorów równoległe, ale jednocześnie wprowadzają ograniczenie energochłonności takiego układu zaledwie do 140 % energochłonności pojedynczego warystora, oraz dopuszczają łączenie równoległe egzemplarzy warystorów, których charakterystyki prądowo – napięciowe nie różnią się więcej niż 20 %. Świadczy to o tym, że rozrzut parametrów warystorów jest znaczny i trudny do kontroli podczas procesu produkcji.

5. ODCIĄŻANIE ENERGETYCZNE WARYSTORÓW

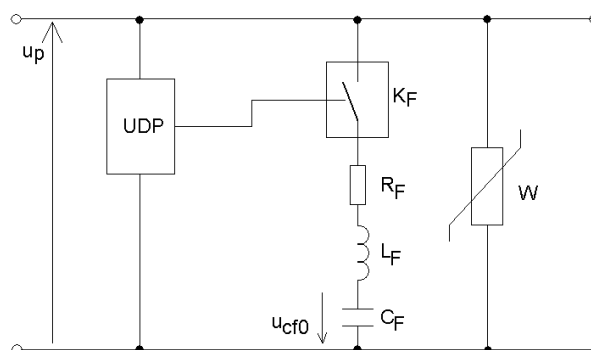
Ograniczenie amplitudy lub czasu trwania udaru wielkopiękowego w warystorze podczas tłumienia przepięcia znakomicie zwiększa jego trwałość. Wychodząc z założenia, że jest możliwe zbudowanie układu pochłaniającego energię w krótkich, odcinkach czasu i oddającego następnie ją w postaci nieszkodliwej dla otoczenia i układu elektrycznego należy rozważyć współpracę takiego układu z warystorem. Schemat współpracy takiego układu z warystorem przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Autorska koncepcja układu odciążającego warystor.

UO – Układ odciążający energetycznie warystor (W) (opr. wł.).

W proponowanym rozwiązaniu układu odciążającego jako główny element pochłaniający energię przepięcia zastosowano gałąź szeregową RLC (rys. 3). Jest ona włączana równoległe do warystora za pomocą komory próżniowej z szybkim napędem indukcyjno – dynamicznym, w chwili wystąpienia przepięcia. Z podstawowych zależności wynika, że energia potrzebna na przeładowanie kondensatora w tej gałęzi jest proporcjonalna do kwadratu zmian napięcia na nim, zatem zaproponowano, aby kondensator włączany równoległe do warystora był wstępnie naładowany do napięcia znamionowego w systemie, ale o przeciwnej polaryzacji. Wówczas, aby przeładować do 9 kV typowy, trakcyjny kondensator o pojemności 200 μF konieczna jest energia rzędu 15 kJ. Zastosowanie gałęzi szeregową RLC ma tę zaletę, że prąd w gałęzi odciążającej samoczynnie jest sprowadzany do zera i przy odpowiednim zsynchronizowaniu czasów otwarcia styków próżniowej komory łączeniowej można operację tę wykonywać bezprądowo. Ma to duży wpływ na trwałość styków komory próżniowej.

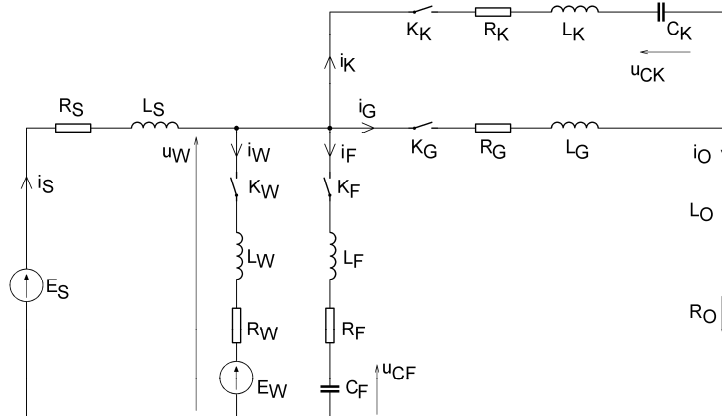


Rys. 3. Zespołowy ogranicznik przepięć z układem odciążającym z gałęzią szeregową RLC.

UDP – Układ detekcji przepięć, W – warystor, K_F – komora próżniowa z napędem indukcyjno – dynamicznym, R_F L_F C_F –układ RLC, u_{cf0} – napięcie początkowe na kondensatorze C_F (opr. wł.).

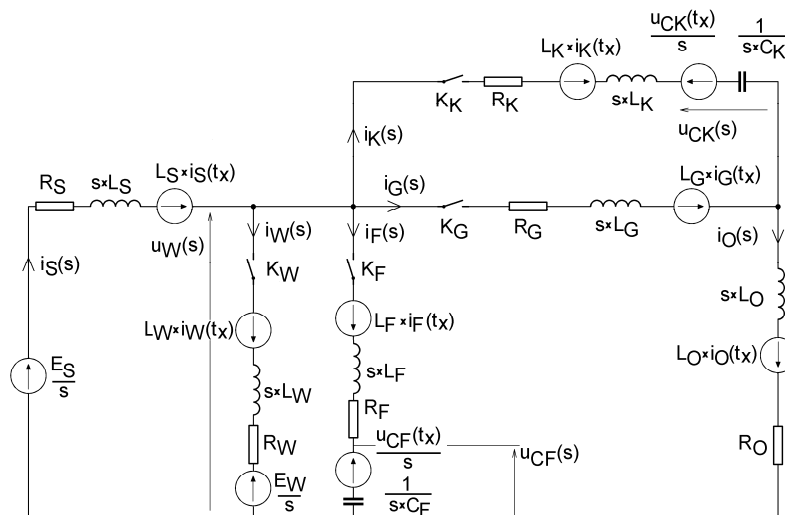
W pracy szczegółowej analizie poddane zostały zjawiska zachodzące w obwodzie z próżniowym wyłącznikiem szybkim działającym na zasadzie wyłączania przeciwprądem, wyposażonym w warystorowy ogranicznik przepięć wspomagany układem odciażającym. Jako najbardziej niekorzystny dla warystora przypadek zasymulowano zjawiska zachodzące w układzie podczas wyłączania prądu zwarciovego (po załączeniu obwodu zwartego).

Rozpatrywany schemat zastępczy wyłącznika w takim obwodzie przedstawiono na rys. 4. Założono, że impedancja obciążenia roboczego $R_0 L_0$ jest mała w porównaniu z zastępczą impedancją sieci $R_S L_S$.



Rys. 4. Schemat zastępczy wyłącznika działającego na zasadzie wyłączania przeciwprądem z zespołowym ogranicznikiem przepięć (opr. wł.).

Do obliczeń układu wybrano metodę operatorową. Wymaga ona przekształcenia schematu na właściwą dla tej metody postać (rys. 5). Na tym rysunku symbolem t_x oznaczono ogólnie czasy, którym przypisane są warunki początkowe dla obliczeń wszystkich podukładów wynikających z różnych kombinacji położeń łączników K_W , K_F , K_G i K_K .

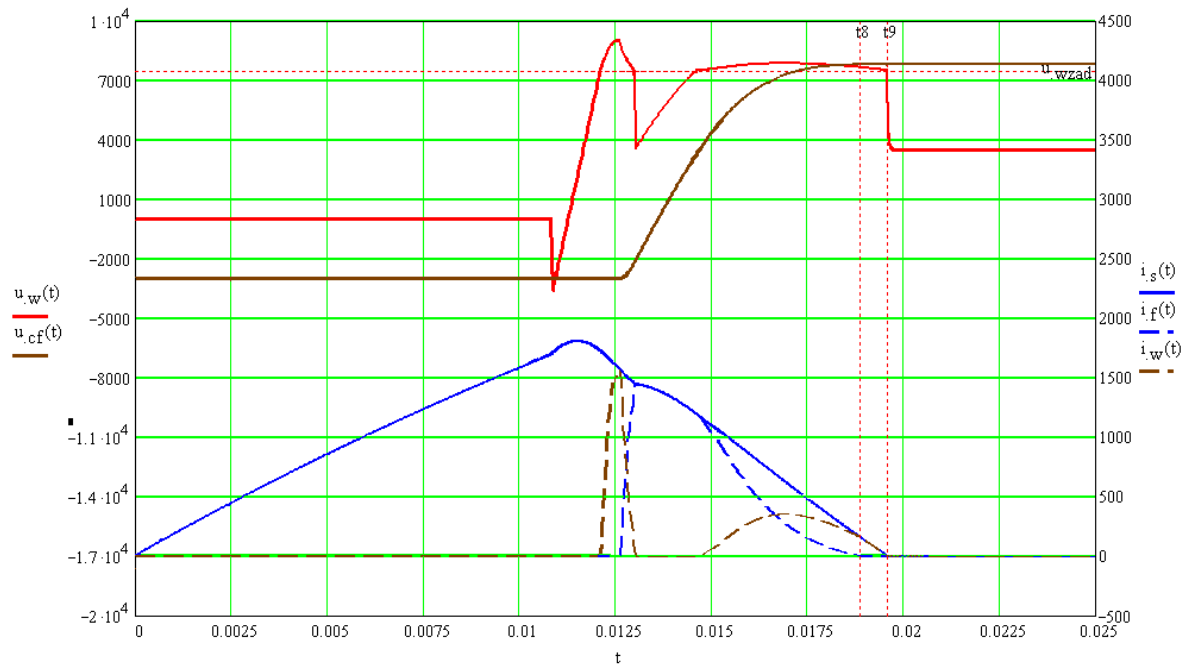


Rys. 5. Schemat zastępczy wyłącznika z układem energochłonnym przekształcony na postać operatorową (opr. wł.).

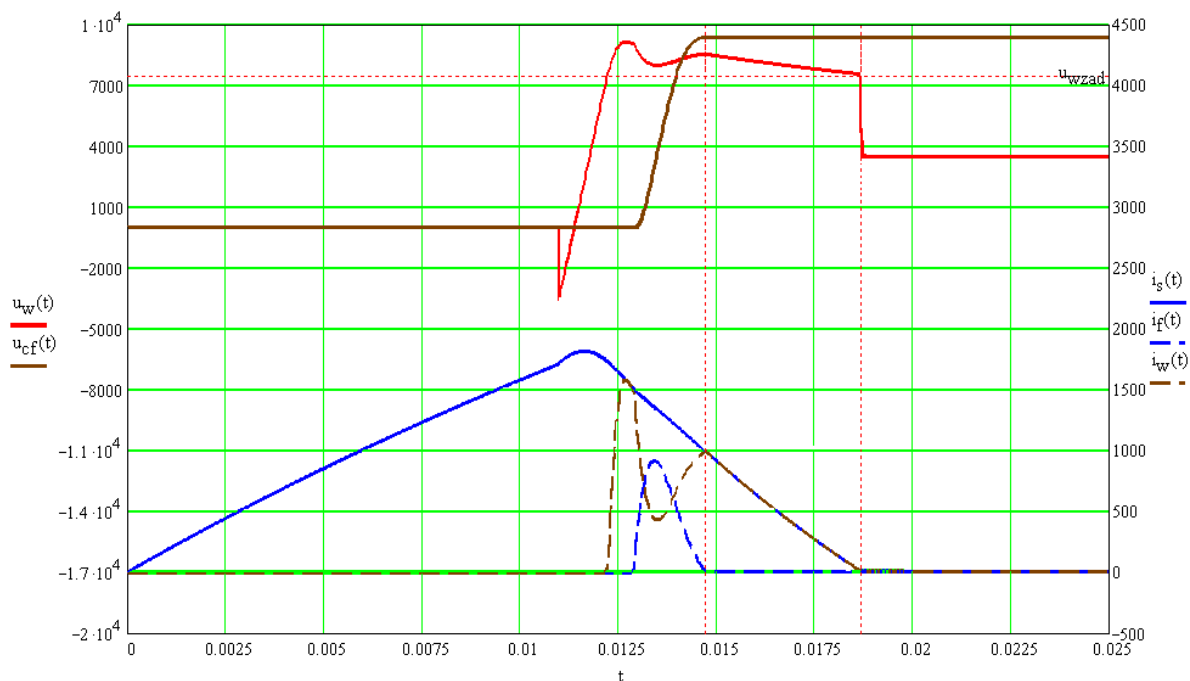
Aby przeanalizować cały cykl łączeniowy i proces ograniczania przepięcia wyodrębniono kolejne etapy pracy układu i przypisano właściwe im schematy zastępcze obwodu. Warunki końcowe każdego z etapów są jednocześnie warunkami początkowymi dla etapów kolejnych.

W zależności od warunków w układzie proces wyłączania i ograniczania przepięcia może zachodzić na trzy różne sposoby. Ta różnica wynika z bilansu energii zgromadzonej w

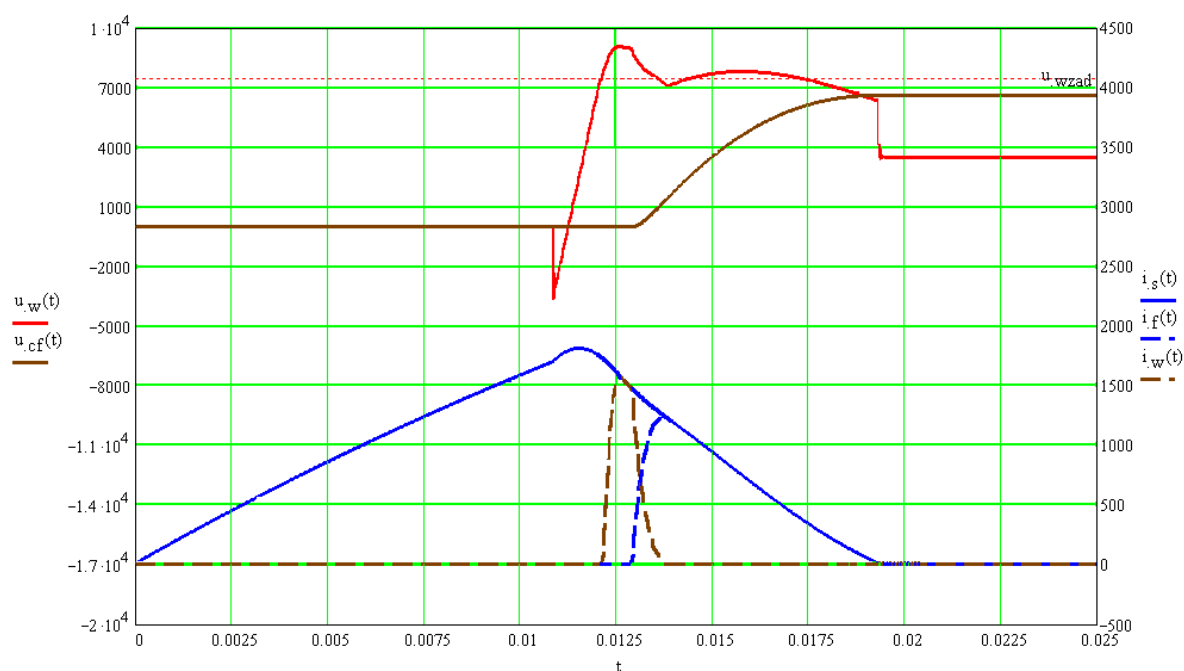
indukcyjnościach obwodu i energii, którą może przejść warystor i układ wspomagający. Wynika stąd konieczność skonstruowania trzech osobnych modeli wyłącznika. W pracy modele te oznaczono kolejnymi cyframi: 1, 2 i 3. Obliczone wartości prądów i napięć w analizowanym obwodzie przedstawiono w postaci przebiegów czasowych na rys 6, 7 i 8.



Rys. 6. Obliczone przebiegi prądów i napięć w układzie pracującym według modelu nr 1: $u_w(t)$ – napięcie na warystorze, $u_{cf}(t)$ – napięcie na kondensatorze układu wspomagającego C_f , $i_w(t)$ – prąd w warystorze, $i_f(t)$ – prąd w układzie wspomagającym, $i_s(t)$ – prąd w obwodzie zasilającym.



Rys. 7. Obliczone przebiegi prądów i napięć w układzie pracującym według modelu nr 2: $u_w(t)$ – napięcie na warystorze, $u_{cf}(t)$ – napięcie na kondensatorze układu wspomagającego C_f , $i_w(t)$ – prąd w warystorze, $i_f(t)$ – prąd w układzie wspomagającym, $i_s(t)$ – prąd w obwodzie zasilającym.



Rys. 8. Obliczone przebiegi prądów i napięć w układzie pracującym według modelu nr 3: $u_w(t)$ – napięcie na warystorze, $u_{cf}(t)$ – napięcie na kondensatorze układu wspomagającego C_f , $i_w(t)$ – prąd w warystorze, $i_f(t)$ – prąd w układzie wspomagającym, $i_s(t)$ – prąd w obwodzie zasilającym.

Przedstawione wyżej symulacje autorskich modeli wyłącznika z warystorowym ogranicznikiem przepięć wspomagany układem odciążającym posłużyły do wykonania weryfikacji eksperymentalnej jego pracy w różnych warunkach układowych.

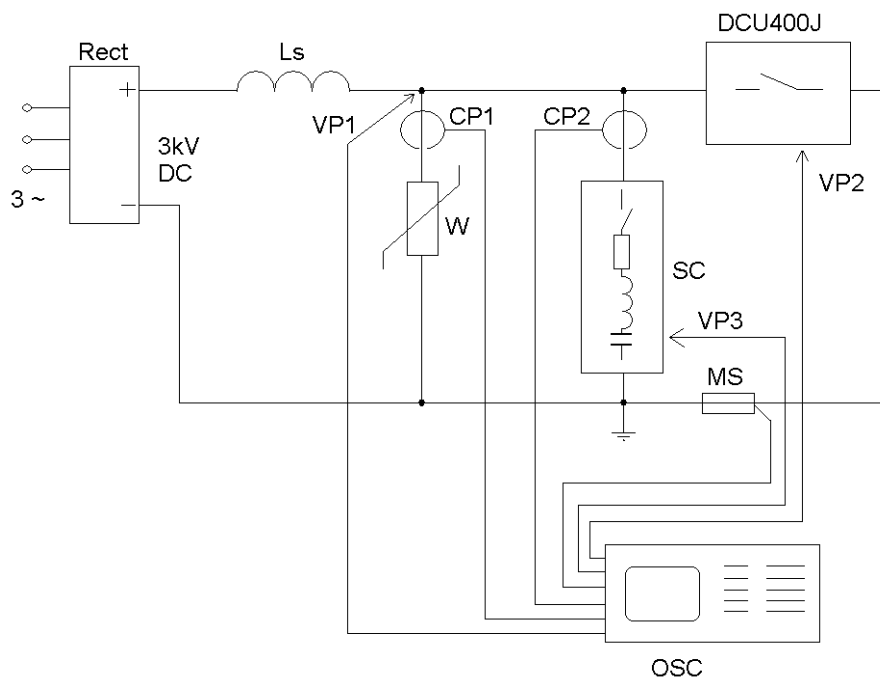
6. MODEL LABORATORYJNY ZESPOŁOWEGO OGRANICZNIKA PRZEPIĘĆ

Pomiary układu modelowego ogranicznika przepięć przeprowadzono w zwarciowni 3 kV prądu stałego w Katedrze Aparatów Elektrycznych Politechniki Łódzkiej.

Wszystkie pomiary przeprowadzono przy załączeniu niskoimpedancyjnego obwodu na napięcie 3 kV wyłącznikiem typu DCU 400J. W trakcie pomiarów zweryfikowano działanie zamodelowanego matematycznie układu odciążającego warystor. Pomiary przeprowadzono w dwóch etapach:

- w pierwszym zarejestrowano przebiegi w układzie bez odciążania energetycznego warystora. Na podstawie tego pomiaru określono parametry obwodu zasilania zwarciowni. Ten etap pozwolił też na dobranie elementów układu odciążającego oraz określenie parametrów warystora.
- w drugim etapie zarejestrowano przebiegi w układzie z aktywacją układu odciążającego warystor. Przeprowadzono pomiary dla różnych parametrów układu, odpowiadającym trzem możliwym modelom pracy układu odciążającego.

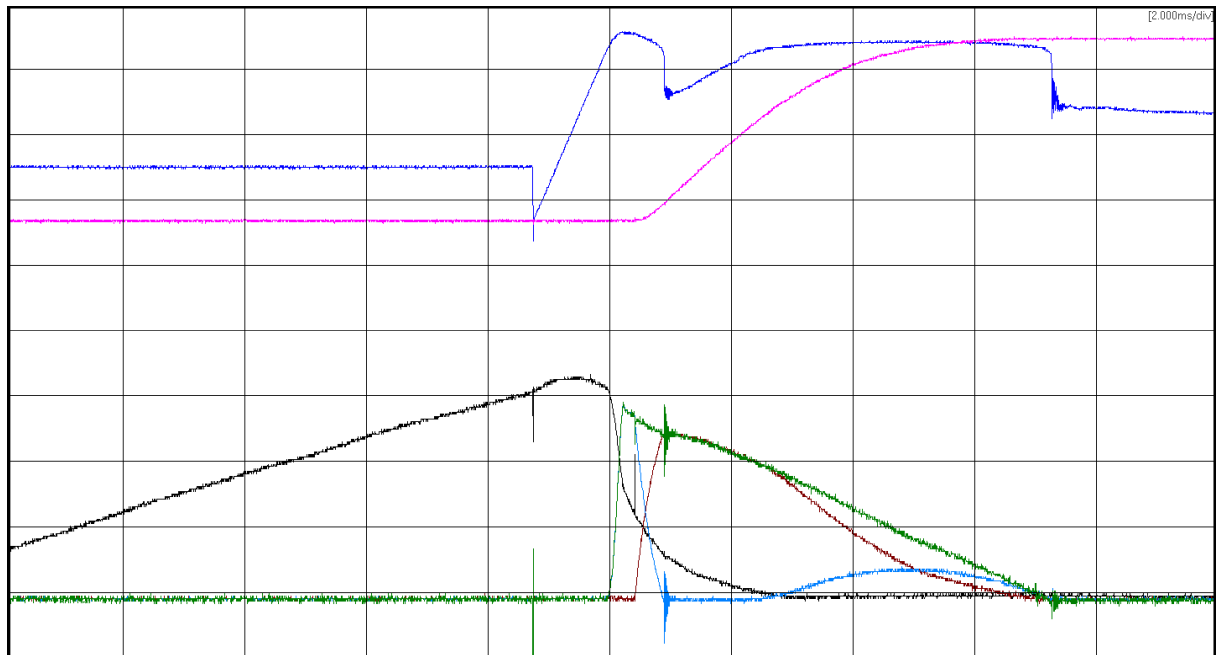
Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 9.



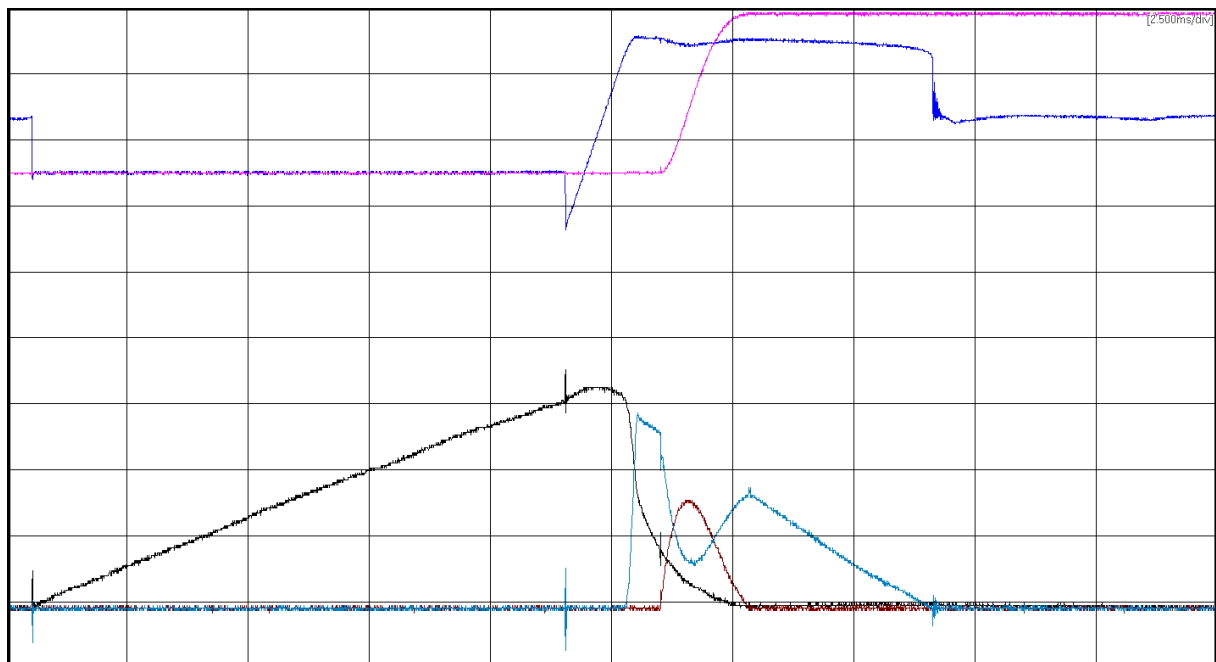
Rys. 9. Schemat układu pomiarowego: Rect – zespół prostownikowy zwarciozni 3 kV prądu stałego, Ls – dławik powietrzny, DCU400J – wyłącznik próżniowy działający na zasadzie wyłączania przeciwpłędem, W – warystor, S.C. – gałąź odciążająca energetycznie warystor, OSC – oscyloskop, VP1 – VP3 – sondy napięciowe, CP1 – CP2 – sondy prądowe, MS – bocznik pomiarowy.

Podczas pomiarów wykonanych na fizycznym modelu zespołowego ogranicznika przepięć zweryfikowano jego działanie we wszystkich możliwych i zasymulowanych wcześniej trybach pracy. W rzeczywistych warunkach w układach zasilania elektrycznej trakcji kolejowej występuje bardzo duża zmienność parametrów elektrycznych będąca następstwem między innymi ruchu pociągów oraz zmian ich ilości w rozważanym odcinku sieci trakcyjnej. Parametry proponowanego układu przeciwpzepięciowego pozostają natomiast niezienne – jest to urządzenie o ustalonych parametrach, dobranych tak, aby zapewnić jak najskuteczniejsze jego działanie w całym, szerokim zakresie zmian parametrów obwodowych. Przygotowanie laboratorium zwarcioowego do pomiarów polegało na jego skonfigurowaniu w taki sposób, aby uzyskać jak największą energię uzyskiwanych udarów przepięciowych podczas wyłączania prądów zwarcioowych. Ponieważ zmiany w konfiguracji obwodu zwarcioowego laboratorium są pracochłonne i długotrwałe zdecydowano o wykonaniu prób zespołowego ogranicznika przepięć z zachowaniem stałych parametrów udaru napięciowego. Takie postawienie problemu wymusiło odwrócenie zagadnienia – za niezienne przyjęto parametry obwodu zwarcioowego. Natomiast w celu wymuszenia pracy ZOP w trzech trybach pracy konieczne było dokonywanie zmian wartości jego elementów składowych tak, aby uzyskać różne wartości energochłonności układu odciążającego.

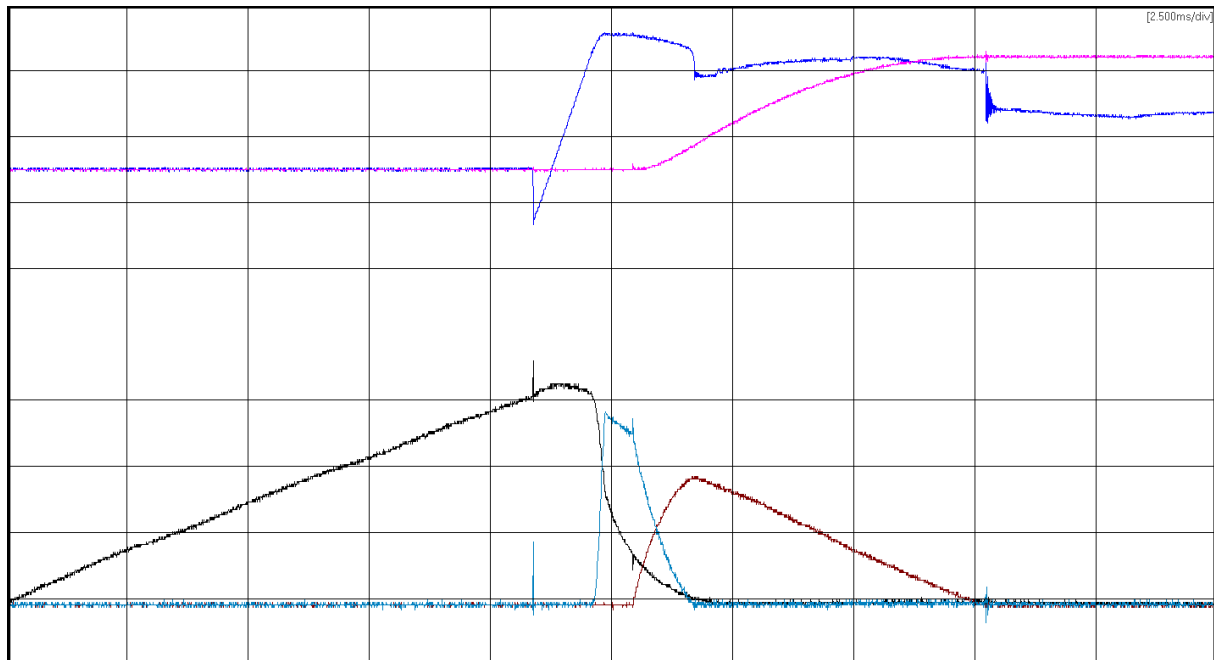
Na rys. 10, 11 i 12 przedstawiono przebiegi zarejestrowane podczas prób w układzie pomiarowym dla pracy ZOP odpowiednio według modeli 1, 2 i 3. Należy zauważyć, że podczas pomiarów wykonano po kilka rejestracji dla każdego z prezentowanych trybu pracy układu wspomagającego. Wyniki w każdej z serii były identyczne, więc praca układu była w wysokim stopniu stabilna i powtarzalna.



Rys. 10. Pomierzone przebiegi prądów i napięć w układzie pomiarowym, pracującym według modelu nr 1: Przebiegi odpowiadają przebiegom z rys. 6. Podziałka czasowa: 2 ms/dz, podziałka prądowa: 0.5 kA/dz, podziałka napięciowa: 5 kV/dz.



Rys. 11. Pomierzone przebiegi prądów i napięć w układzie pomiarowym, pracującym według modelu nr 2: Przebiegi odpowiadają przebiegom z rys. 7. Podziałka czasowa: 2.5 ms/dz, podziałka prądowa: 0.5 kA/dz, podziałka napięciowa: 5 kV/dz.



Rys. 12. Pomierzone przebiegi prądów i napięć w układzie pomiarowym, pracującym według modelu nr 3. Przebiegi odpowiadają przebiegom z rysunku 8. Podziałka czasowa: 2.5 ms/dz, podziałka prądowa: 0.5 kA/dz, podziałka napięciowa: 5 kV/dz.

Przeprowadzone pomiary potwierdziły skuteczność działania układu wspomagającego. Dla wszystkich możliwych modeli pracy nastąpiło wydatne ograniczenie energii absorbowanej przez ochraniający warystor. Dla takich samych warunków obwodowych jak w układzie pomiarowym przeprowadzono symulację pracy bez aktywowania układu wspomagającego. Pozwoliło to na wyznaczenie energii przepięcia, która zostaje zaabsorbowana przez warystor niechroniony układem wspomagającym. Wynosiła ona 40,4 kJ.

W tabeli 1 zebrano wartości energii przepięć dostarczanej do warystora dla pracy każdego z modeli układów wspomagających, oraz dla porównania dla pracy bez takiego układu.

Tabela 1. Ograniczenie energii wydzielanej w warystorze wyznaczone dla warunków takich jak w trakcie prób układu wspomagającego.

Praca z układem wspomagającym :	Model 1	Model 2	Model 3	Bez wspomaganiania
Energia wydzielana w warystorze [kJ]	14,6	33,4	11,6	40,4
Energia wydzielana w warystorze (wartość względna)	0,36	0,83	0,28	1

Wartości względne energii pokazane w tabeli 1 zostały wyznaczone jako stosunek energii wydzielanej w warystorze dla każdego z modeli do ilości energii wydzielanej w warystorze bez jego wspomaganiania.

7. WYBRANE ZAGADNIENIA EKONOMICZNE

Zaprojektowany układ zespołowego ogranicznika przepięć działa poprawnie i wydatnie ogranicza energię wydzielaną w warystorze, przez co spowalnia proces jego degradacji. W pracy wykazano, że szacunkowy koszt zespołowego ogranicznika przepięć jest

niewiele wyższy od ceny pojedynczego warystora, a zatem jego zastosowanie zamiast dodatkowego, drugiego warystora jest w pełni uzasadnione, zwłaszcza mając na uwadze zachowanie odpowiedniego poziomu ochrony przeciwprzepięciowej i krótkiego czasu wyłączenia. Stwierdzono, że wykonanie i zastosowanie zespołowego ogranicznika przepięć do współpracy z wyłącznikami działającymi na zasadzie wyłączenia przeciwprądem jest uzasadnione zarówno technicznie, jak i ekonomicznie. Rozwój technologii produkcji elementów półprzewodnikowych w niedalekiej przyszłości umożliwi znaczne uproszczenie układu i obniżenie jego ceny.

8. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Rozprawa stanowi opracowanie podstaw teoretycznych działania i budowy zespołowego ogranicznika przepięć ZOP przeznaczonego do współpracy z ultraszybkimi wyłącznikami próżniowymi prądu stałego. Teoretyczne i praktyczne aspekty jego działania i budowy zostały skonfrontowane z teoretycznymi i realnymi możliwościami warystorów tlenkowo cynkowych stosowanych w systemach trakcji elektrycznej prądu stałego. Analizie poddano warunki pracy wyłączników ultraszybkich oraz elementów sieci trakcyjnej przy wyłączaniu prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych metodą komutacji wymuszonej oraz przeprowadzono analizę wymagań dla warystorów.

Rozprawa jest naukowym wynikiem opracowania wydajnych i trwałych urządzeń do ochrony przeciwprzepięciowej systemów zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego, wyposażonych w ultraszybkie wyłączniki próżniowe klasy V. Stworzone w rozprawie podstawy teoretyczne działania zespołowego ogranicznika przepięć zaowocowały powstaniem jego działającego modelu, charakteryzującego się nieporównywalnie większą trwałością, niż wykorzystywane do tego celu warystory tlenkowo-cynkowe. Ma to duże znaczenie techniczne dla rozwoju nowoczesnych wyłączników próżniowych prądu stałego stosowanych w trakcji elektrycznej.

Najważniejsze wnioski wynikające z niniejszej pracy są następujące:

1. Wśród metod ultraszybkiego wyłączenia obwodów zasilania trakcji kolejowej największą przydatność ma metoda wyłączenia impulsem przeciwprądu. Ma ona charakter złożony i ostatnim jej etapem jest samoistna komutacja prądu do warystora współpracującego z wyłącznikiem. Warystor jest dlatego newralgicznym elementem wyłącznika i jego trwałość musi być zbliżona do trwałości mechanicznej wyłącznika. Uszkodzenie warystora powoduje generowanie dużych przepięć łączeniowych w układach zasilania, nawet wielokrotnie przekraczających wartości dopuszczalne.
2. W warunkach pracy zbliżonych do parametrów granicznych warystory tlenkowo-cynkowe ulegają przyspieszonej degradacji i w konsekwencji mogą ulec uszkodzeniu. Zwiększanie energochłonności ogranicznika przepięć poprzez łączenie równoległe wielu egzemplarzy warystorów nie jest wskazane ze względu na niejednakowe parametry poszczególnych egzemplarzy, które ponadto ulegają niejednakowym zmianom podczas eksploatacji.
3. Do współpracy z ultraszybkimi wyłącznikami działającymi na zasadzie wyłączenia przeciwprądem klasy V nie jest wskazane stosowanie równoległe połączonych warystorów, ponieważ ich wypadkowa charakterystyka prądowo napięciowa powoduje obniżenie poziomu ochrony przeciwprzepięciowej. Następuje wówczas znaczące wydłużenie czasu działania warystora i w konsekwencji zwiększenie czasu wyłączenia. (W przypadku przekroczenia czasu 4 ms wyłącznik nie może być zakwalifikowany do klasy V).
4. Energia skojarzona z indukcyjnościami w obwodzie zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego przy wyłączaniu prądów zwarciovych osiąga wartości ponad 200 kJ. Duża jej

część musi być przejęta przez warystor współpracujący z wyłącznikiem próżniowym IPP i oddana do otoczenia w postaci ciepła. W granicznych przypadkach w warystorze wydzielana jest energia o wartościach do 100 kJ. Taka wartość przekracza nominalne energochłonności największych produkowanych obecnie warystorów przeznaczonych do ochrony przeciwprzepięciowej obwodów prądu stałego. Na podstawie literatury wykazano, że prądu wyładowczy o długich czasach i dużych wartościach powoduje postępującą degradację struktury warystora ZnO i w konsekwencji jego uszkodzenie. W warunkach, które występują w układach trakcji kolejowej 3 kV DC z wyłącznikami próżniowymi działającymi na zasadzie wyłączania przeciwprądem taka degradacja może zachodzić w szybkim tempie.

5. Do wspomagania energetycznego warystora współpracującego z wyłącznikiem IPP należy używać dodatkowych układów, włączanych równolegle do warystora po wystąpieniu w nim dużych wartości prądów wyładowczych.
6. W zależności od bilansu energii w obwodzie, zaprojektowany zespołowy ogranicznik przepięć może pracować w różny sposób, przy czym zawsze występuje wydatne odciążenie energetyczne warystora.
7. Do opisu działania ZOP został opracowany autorski model matematyczny, uwzględniający wszystkie przypadki pracy ogranicznika. Model ten może posłużyć do wyznaczania parametrów elementów układu odciążającego warystor w zależności od przewidywanych parametrów obwodów trakcyjnych.
8. Badania eksperymentalne całkowicie potwierdziły wyniki przeprowadzonej wielowariantowej symulacji działania ZOP.
9. Budowanie i stosowanie zespołowego ogranicznika przepięć ma techniczne i ekonomiczne uzasadnienie. Koszt wykonania ZOP jest porównywalny z ceną pojedynczego egzemplarza warystora stosowanego w eksploatowanych wyłącznikach próżniowych IPP.

W świetle powyżej opisanych najważniejszych efektów rozprawy sformułowana teza została udowodniona.