

Ben LANDIS<sup>2</sup>, Sébastien MULLER<sup>1</sup>, Guillaume PERIGAUD<sup>1,2</sup>,  
Margareta PETROVAN-BOIARCIUC<sup>1</sup>, Omar K. AHMED<sup>2</sup>, Sangpil YOON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SERGI HOLDING, Achères, Francja

<sup>2</sup> TRANSFORMER PROTECTOR CORPORATION (TPC), Houston, Teksas, USA

## Zabezpieczenie transformatorów olejowych przed wybuchem: eksperymenty i symulacje

Mgr inż. Ben LANDIS

Jest pracownikiem Transformer Protector Corporation (TPC), mieszczącej się w Houston, w stanie Teksas w USA, która jest spółką zależną SERGI Holding. Zajmuje się badaniem łagodzenia wybuchu transformatora poprzez rozwój symulacji interakcji Płyn-Struktura. Ben Landis ukończył Stanowy Uniwersytet Emporia z tytułem Licencjata Fizyki oraz Stanowy Uniwersytet Oklahoma z tytułem Magistra Fizyki (2005 rok).



e-mail: [research@sergi-holding.com](mailto:research@sergi-holding.com)

Dr inż. Sébastien MULLER

Był pracownikiem działu badań SERGI Holding, zajmował się rozwojem modelu matematycznego symulującego eksplozje transformatorów. Sébastien Muller posiada Dyplom Inżynierii Mechanicznej i Magistra Mechaniki Płynów (ENSMA, Poitiers, Francja, 2002) oraz tytuł Doktora Mechaniki Płynów (Université d'Orléans, Francja, 2007).

Dr inż. Guillaume PERIGAUD

Jego głównym obszarem zainteresowań badawczych jest zapobieganie eksplozjom transformatorów wynikających z wewnętrznego łuku elektrycznego. Dr. Perigaud jest członkiem Grupy Roboczej CIGRE A2.33 zajmującej się praktykami bezpieczeństwa przeciwpożarowego transformatorów. Posiada Dyplom Inżynierii Mechanicznej i Magistra Mechaniki Płynów (Ecole Centrale Nantes, Nantes, Francja, 2000) oraz tytuł Doktora Mechaniki Płynów (Université de Marseille I, Francja, 2003).

### Streszczenie

Eksplozje transformatorów olejowych są powodowane przez łuk elektryczny. W przeciągu milisekund łuk doprowadza do odparowania otaczającego go oleju a wygenerowany gaz znajduje się pod ciśnieniem ponieważ inercja oleju zapobiega jego ekspansji. To doprowadza do niebezpiecznych eksplozji, kosztownych awarii i ewentualnego zanieczyszczenia środowiska. Podczas gdy mury ochronne otaczające transformator mogą zahamować eksplozję a tryskacze zagasić wywołany pożar niniejszy dokument przedstawia strategię, która zapobiega eksplozji kadzi transformatora.

**Słowa kluczowe:** transformatory energetyczne, eksplozja, łuk elektryczny, eksperymenty, symulacje.

### Protection of oil-filled transformers against explosion: experiments and simulations

#### Abstract

Oil-filled transformer explosions are caused by electrical arc occurring in transformer tanks. Within milliseconds, arc vaporizes the surrounding oil and the generated gas is pressurized as the liquid inertia prevents its expansion. The pressure difference between the gas bubble and the surrounding oil generates pressure waves, which propagate and interact with the tank. The reflections of the pressure waves build up the static pressure, which rises and leads to the tank rupture since tanks are not designed to withstand such levels of static pressure. This results in dangerous explosions, expensive damages and possible environmental pollution. The current paper presents a strategy to prevent the transformer tank rupture. Once an electrical fault occurs, the fast depressurization of the tank is induced by quick oil evacuation to a reservoir in order to prevent the tank explosion. To evaluate the efficiency of this strategy, experiments and computer simulations are used. The experiments were performed on large scale transformers equipped with the protection. They confirmed that the protection prevents the explosion. Besides, simulations of the consequences of an electrical arc occurring in a 200 MVA transformer geometry were run and again, they confirmed that the static pressure increase can be prevented by a quick oil evacuation triggered by the first dynamic pressure peak generated by the electrical arc.

Dr inż. Margareta PETROVAN-BOIARCIUC

Była pracownikiem działu badań SERGI Holding. Zajmowała się rozwojem modelu matematycznego mającego do czynienia z ruchomymi siatkami dla strategii interakcji struktura-płyn oraz adaptacją modelu szybkiego odparowywania dla łuków elektrycznych w transformatorach. Ukończyła Inżynierię Lotniczą na Uniwersytecie Brasov w Rumunii i posiada tytuł Magistra Mechaniki Płynów (University of Orleans, Francja, 2004) oraz Doktora Mechaniki Płynów (University of Orleans, Francja, 2008).

Mgr inż. Omar K. AHMED

Jest pracownikiem Transformer Protector Corporation (TPC), mieszczącej się w Houston, w stanie Teksas w USA, która jest spółką zależną SERGI Holding. Omar K. Ahmed ukończył Uniwersytet Teksaski w Austin z tytułem Licencjata Matematyki i Fizyki oraz Uniwersytet Rice z tytułem Magistra Geofizycznej Dynamiki Płynów. Jego praca dyplomowa dotyczyła tworzenia wzorca w nieliniowych układach fizycznych przy pomocy techniki analitycznej i numerycznej.

Mgr inż. Sangpil YOON

Jest pracownikiem Transformer Protector Corporation (TPC), mieszczącej się w Houston, w stanie Teksas w USA, która jest spółką zależną SERGI Holding. Obecnie pracuje nad poprawą szybkości i dokładności interakcji Płyn-Struktura stosowanej do symulacji eksplozji i ochrony transformatora. Ukończył studia w zakresie Inżynierii Mechanicznej na Uniwersytecie Iowa (2000 rok). Brał wcześniej czynny udział w obliczeniowej analizie urządzeń elektronicznych.

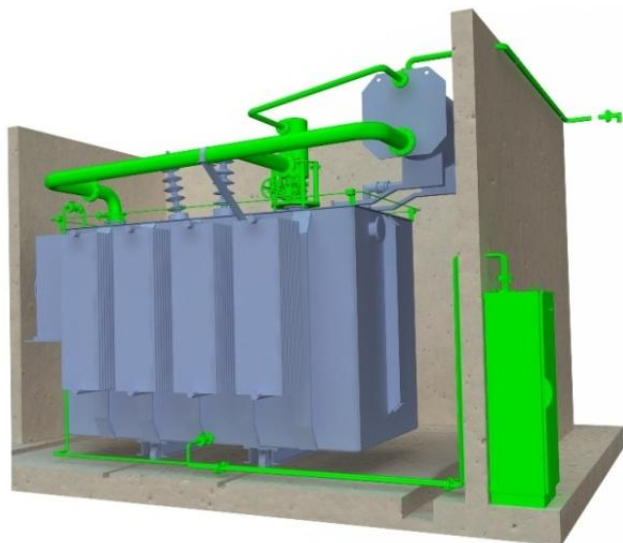
**Keywords:** power transformers, explosion, electrical arc, experiments, simulations.

## 1. Wstęp

Prywatyzacja spółek energetycznych sprawia, iż rynek energii elektrycznej staje się coraz bardziej konkurencyjny. W celu ograniczenia kosztów, firmy redukują inwestycje poprzez korzystanie ze starzejącego się oprzyrządowania i przez przeciążanie transformatorów. Z tego powodu eksplozje transformatorów olejowych występują coraz częściej, doprowadzając do niebezpiecznych pożarów, kosztownych awarii i ewentualnego zanieczyszczenia środowiska. Aby ograniczyć te negatywne konsekwencje, ściany ochronne otaczające transformator powinny zahamować rozpręszanie się wybuchu a tryskacze zgasić wywołany pożar. Ażeby uzupełnić ten łańcuch zabezpieczeń, niniejszy artykuł prezentuje strategię, która pozwala zapobiec pęknięciu kadzi transformatora. Strategia ta, zilustrowana na zielono na rysunku 1, bazuje na bezpośredniej reakcji mechanicznej Zestawu Rozprężającego względem wewnętrznego ciśnienia dynamicznego kadzi wywołanego przez zwarcie. Po wystąpieniu zwarcia, eksplozji udaje się zapobiec dzięki szybkiemu rozprężeniu transformatora poprzez natychmiastowe odprowadzenie oleju do zbiornika

Niniejszy artykuł zaczyna się od krótkiego przeglądu doświadczeń wyjaśniających zjawiska fizyczne prowadzące do eksplozji kadzi i analizujących działanie powyższego zabezpieczenia i jego efektywności.

W celu opisanie zmiennego i nierównomiernego zjawiska ciśnienia następującego po łuku elektrycznym opracowano model matematyczny. Ma on do czynienia z dwufazowymi przepływami, ze zmiennym, ściślimy oraz lepkiem medium, z efektami termicznymi i grawitacyjnymi i z modelowaniem 3D. Symulacje są przeprowadzone na geometrii transformatora o skali przemysłowej i o mocy 200 MVA w celu oceny zestawu bazującego na szybkiej ewakuacji oleju pozwalającej na uniknięcie eksplozji.



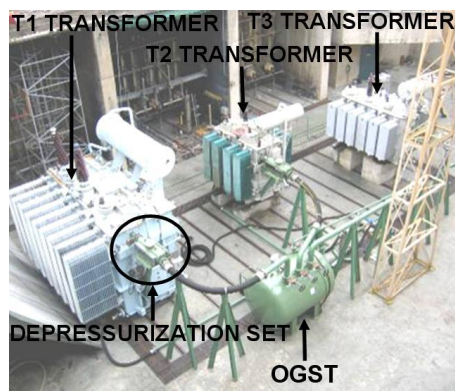
Rys. 1. Transformator chroniony przez strategię szybkiego rozprężenia  
Fig. 1. Transformer protected by a fast depressurisation strategy

## 2. Testy doświadczalne

Pełne badania doświadczalne zostały przeprowadzone przez CEPTEL, brazylijskie, niezależne Laboratorium Wysokiego Napięcia i SERGI Holding, w celu zrozumienia chronologii wydarzeń prowadzących do eksplozji transformatora i opracowania strategii zapobiegającej eksplozji.

### 2.1. Konfiguracja testów

Doświadczenia składały się z testów z łukami elektrycznymi generowanymi w 3 transformatorach olejowych o skali przemysłowej (do 5,3 m długości) posiadających ich wewnętrzne komponenty (zwoje, kable, itp.) i wyposażonych w różne czujniki (ciśnienia, temperatury, przyspieszenia, itp.). Duże rozmiary transformatorów umożliwiły szczegółowe zbadanie rozkładu nierównomiernego ciśnienia wewnątrz kadzi. Ponadto, w związku z faktem, iż eksplozje transformatorów są bardzo niebezpieczne i niekontrolowane, musiano zainstalować system ochrony transformatora na czas testów. System ten, pokazany na rysunku 2 na zielono, bazuje na bezpośredniej reakcji mechanicznej Zestawu Rozprężającego (Depressurization Set = DS) względem wewnętrznego ciśnienia dynamicznego kadzi wywołanego przez zwarcie. Wszystkie szczegóły na temat wniosków z badań można znaleźć w [1] i są one przedstawione w następujących paragrafach.

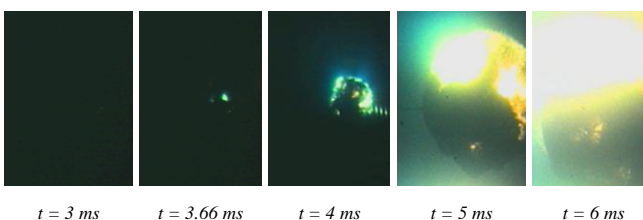


\*Zbiornik Rozdzielania Oleju i Gazu=Oil Gas Separation Tank (OGST)

Rys. 2. Konfiguracja testów CEPTEL  
Fig. 2. CEPTEL tests configuration

### 2.2. Proces nasycenia parowania

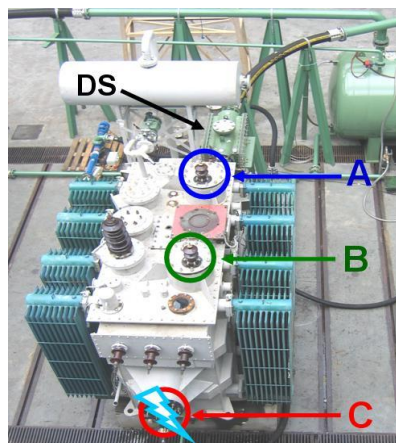
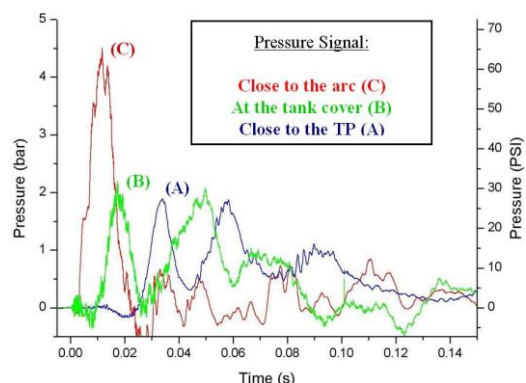
Po powstaniu łuku elektrycznego w oleju transformatora, niemal natychmiastowo następuje odparowanie znacznej ilości gazu (patrz rysunek 3). Wygenerowana objętość gazu okazała się być funkcją logarytmiczną energii łuku, która wydaje się być w zgodzie z procesem odparowywania i w szczególności z nasyceniem procesu odparowywania dla łuków o dużej energii. Po tym jak łuk doprowadzi do odparowania otaczającego go oleju i do stworzenia pęcherza gazu, pozostaje on w tej samej objętości i korzystając ze swojej energii powoduje rozpad cząsteczek oparów oleju raczej niż bezpośrednie odparowywanie oleju: to prowadzi do szybszego procesu odparowania. Pierwszy etap procesu odparowania jest prawie natychmiastowy a inercja oleju powoduje, że gaz w bardzo szybkim czasie znajduje się pod ciśnieniem i generuje w ten sposób jeden wysoki pik ciśnienia.



Rys. 3. Pęcherz gazu (3 do 6 ms po zwarceniu)  
Fig. 3. Gas bubble (3 to 6 ms after the arc ignition)

### 2.3. Rozprzestrzenianie się fali ciśnienia

Na rysunku nr 4 przedstawiono doświadczalne profile ciśnienia.



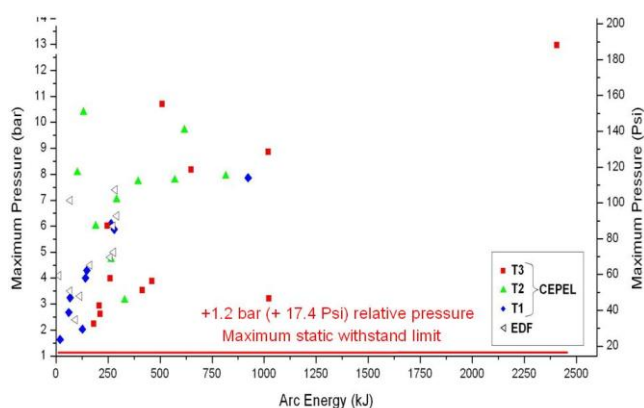
Rys. 4. Profile ciśnienia w różnych pozycjach  
Fig. 4. Pressure profiles at different locations

Krzywe pokazują zmiany ciśnienia odnotowane w pobliżu czujników usytuowanych odpowiednio w pozycji A (po przeciwnej stronie łuku, blisko systemu ochrony), B (relatywnie blisko łuku) i C (w miejscu powstania łuku).

Przesunięcie fali uderzeniowej w zbiorniku można zatem łatwo śledzić na rysunku 4. Powstanie łuku w pozycji C powoduje pik wysokiego ciśnienia (jak wspomniano w punkcie 2.2.), który następnie rozprzestrzenia się i prowadzi do drugiego opóźnionego, niższego piku w pozycji B, kończąc w pozycji A. Inne piki ciśnienia (mniejsze niż główny pik), mierzone przez każdy z czujników wynikają z fali ciśnienia odbijającej się od ścian kadzi. Udowodniono zatem doświadczalnie, że wzrost ciśnienia nie jest jednorodny w przestrzeni kadzi i, że fale ciśnienia rozprzestrzeniają się z określoną prędkością.

## 2.4. Wytrzymałość kadzi na wysokie nadciśnienie dynamiczne

Statyczna wytrzymałość kadzi transformatora zwyczajowo wynosi  $2,2 \text{ bar abs. (220 kPa)}$ . Innymi słowy, jeśli kadź transformatora zostanie poddana działaniu jednolitego i ustabilizowanego ciśnienia (dalej zwanego ciśnieniem statycznym) powyżej  $2,2 \text{ bar (220 kPa)}$  to kadź pęknie (patrz np. [1] lub [2]).



Rys. 5. Maksymalne ciśnienie względne mierzone dla każdego testu względem energii łuku

Fig. 5. Max. relative pressure measured for each test vs. arc energy

Podczas testów z łukami elektrycznymi przeprowadzonych przez CEPEL i SERGI, czujniki mierzyły piki ciśnienia dochodzącego do  $14 \text{ bar abs (1400 kPa)}$ , i nie odnotowano pęknięcia kadzi (rysunek 5). Dzięki działaniu systemu ochrony i jak pokazano na rysunku 4, kadź została poddana działaniu miejscowym pikom ciśnienia przez bardzo krótki okres czasu (dalej zwanego ciśnieniem dynamicznym) i kadź mogła wytrzymać te wysokie piki ciśnienia dynamicznego. Badania wykazały w ten sposób, że jeśli ewakuacja oleju z kadzi jest aktywowana w przeciągu milisekund przez pierwszy pik ciśnienia dynamicznego zanim nastąpi wzrost ciśnienia statycznego, eksplozji można zapobiec.

## 3. Symulacje eksplozji transformatora 200 MVA i jej zapobiegania

### 3.1. Opis narzędzia symulacji

Doświadczenia pokazały, że kluczowe zjawiska przy eksplozji transformatora i jej zapobieganiu są po pierwsze, wzrost miejscowego ciśnienia spowodowany odparowaniem oleju otaczającego łuk i po drugie, rozprzestrzenianie się fali ciśnienia. W związku z tym, rdzeń modelu symulacyjnego składa się z szeregu cząstkowych równań różniczkowych, które opisują dynamikę cieczy podczas gdy inne zjawiska fizyczne (lepkość, efekt termiczny, itp.) są modelowane za pomocą terminów źródłowych, które są dodane. Ten szereg równań bazuje na pięciorównaniowym modelu

dwufazowych przepływów opracowanym w [4]. Obie fazy (ciecz/gaz) są traktowane jako ściśliwe. Termodynamika obu faz jest ostrożnie modelowana aby uniknąć wszelkich problemów teoretycznych lub liczbowych. Modelowanie jest poświęcone przepływowi z interfejsami, tak żeby obie fazy dzieliły jedno ciśnienie i prędkość w danym miejscu domeny. Celem tego modelu jest oszacowanie rozłożenia ciśnienia wewnątrz kadzi transformatora podczas pierwszych frakcji sekundy po wystąpieniu łuku elektrycznego.

### 3.2. Cel badania

Niniejszy rozdział wykorzystuje narzędzie symulacji w celu szczegółowego zbadania skutków łuku elektrycznego występującego w typowym transformatorze o mocy 200 MVA. Ponadto, analizuje konsekwencje użycia strategii ze reprezentowanej w pierwszym rozdziale aby zapobiec eksplozji kadzi transformatora.

### 3.3. Konfiguracja

Transformator ma moc 200 MVA i następujące wmiary:  $5,75 \text{ m}$  długości,  $3,25 \text{ m}$  wysokości i  $2,5 \text{ m}$  szerokości. Wszystkie urządzenia transformatora takie jak, wieżyczki przepustów (Olejowa Skrzynka Kablowa Przepustu = Oil Bushing Cable Box = OBCB) czy uzwojenia są brane pod uwagę. Łuk elektryczny ( $115 \text{ MJ}$  łuku generuje około  $3,4 \text{ m}^3$  gazu) powstaje w rogu kadzi i generuje pęcherz gazu pod ciśnieniem  $11 \text{ bar abs (1100 kPa)}$ .

### 3.4. Wyniki symulacji

Rysunek 6 obrazuje symulowaną zmianę ciśnienia wewnątrz kadzi po utworzeniu się pęcherza gazu spowodowanego przez łuk. Transformator po prawej stronie (rysunek 6b), jest wyposażony w system ochrony zaprezentowany wcześniej, podczas gdy z lewej strony (rysunek 6a), nie jest chroniony.

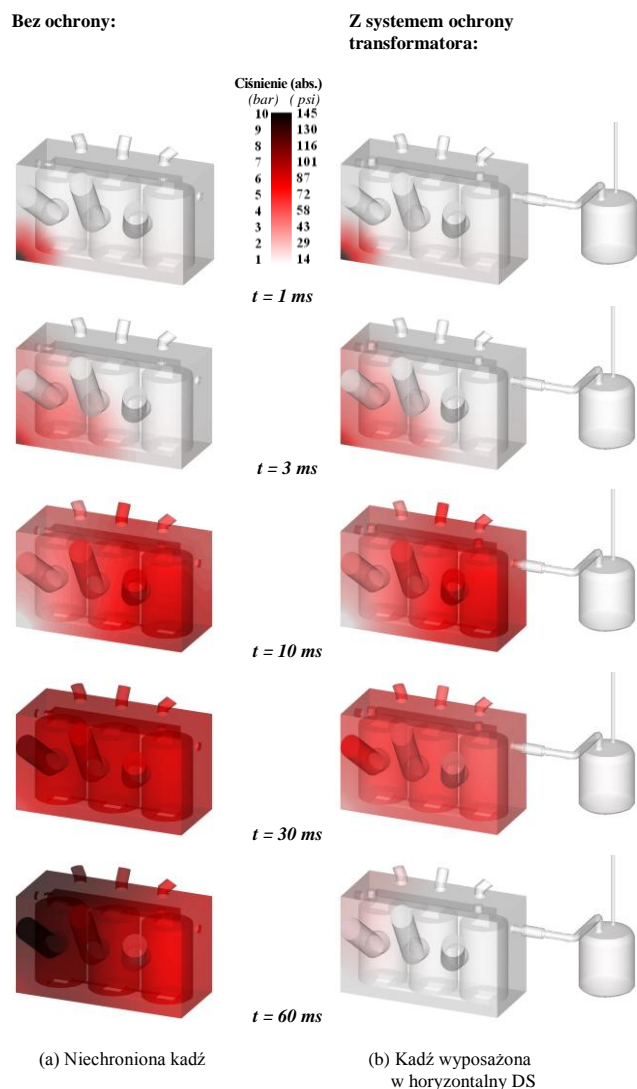
Kiedy transformator jest wyposażony w system ochrony, pęcherz gazu znajdujący się pod ciśnieniem wytwarza fale ciśnienia, które rozpraszają się w transformatorze, odbijają się i skądinąd oddziałują na strukturę kadzi (rysunek 6b). W ciągu  $3 \text{ ms}$  duży pik ciśnienia dociera do otworu pierwszego przepustu, jak pokazano na rysunku 6b. Następnie fala ciśnienia aktywuje Zestaw Rozprężający w przeciągu około  $10 \text{ ms}$  po powstaniu pęcherza gazu. To powoduje szybką ewakuację cieczy (patrz rysunek 7) z kadzi transformatora, która prowadzi do rozrzedzenia fal rozpraszających się w transformatorze. Po zaledwie  $60 \text{ ms}$ , ciśnienie w transformatorze stabilizuje się znacznie poniżej niebezpiecznego poziomu, jak pokazano na rysunku 6b.

W przeciwnym wypadku, gdy kadź nie jest wyposażona w żaden system ochrony, i jeśli jest poddana porównywalnemu zwarciu, kadź jest narażona na bardzo niebezpieczne poziomy ciśnienia. Na przykład,  $60 \text{ ms}$  po powstaniu łuku, ciśnienie w przepustach dochodzi do ponad  $10 \text{ bar abs (1000 kPa)}$  jak pokazano na rysunku 6a. Ponadto, bez ochrony kadzi, ciśnienie statyczne ustabilizowałoby się na wysokości około  $7,4 \text{ bar abs (740 kPa)}$  i transformator gwałtownie by eksplodował (jako że kadź transformatora jest zaprojektowana by wytrzymać ciśnienie statyczne do poziomu około  $2,2 \text{ bar abs / 220 kPa}$ ).

## 4. Symulacje eksplozji typowego transformatora i jej zapobiegania (główna kadź i olejowa skrzynka kablowa przepustu)

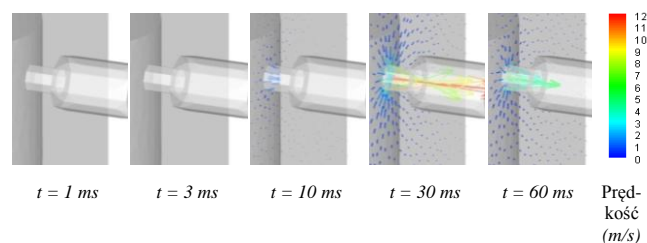
W celu zbadania szybkiego i bezpośredniego systemu ochrony rozprężającego kadź ważne jest, aby dokładnie modelować geometrię transformatora, zrozumieć inicjalizację zjawiska i uzasadnić technologię zapobiegania eksplozji kadzi.





Rys. 6. Ewolucja ciśnienia w symulowanych kadziach transformatora (200 MVA)

Fig. 6. Pressure evolution in simulated transformer tanks (200 MVA)



Rys. 7. Prędkość przy wejściu do Zestawu Rozprężającego

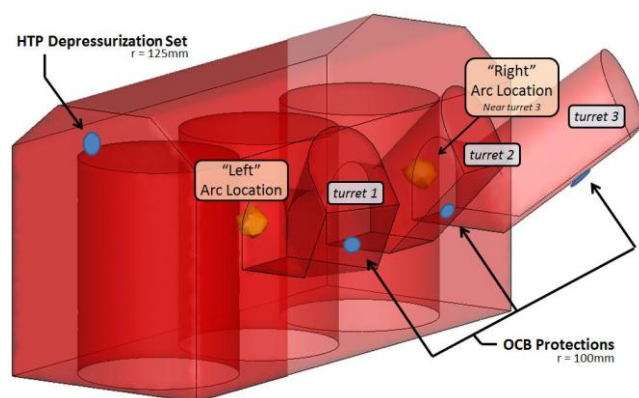
Fig. 7. Speed at the entrance of the Depressurisation Set

## 4.1. Geometria transformatora

Ponieważ nie istnieją żadne konkretne normy dotyczące projektowania kadzi transformatora, zdecydowaliśmy się skupić na komponentach i wymiarach, które są charakterystyczne dla rzeczywistej kadzi transformatora. Dla celów symulacji stworzono wysoko sparametryzowaną geometrię kadzi typowego transformatora, tak jak pokazano na rysunku 8. Ta geometria modeluje transformator z trzema wewnętrznymi rdzeniami ale bez innych wewnętrznych komponentów (takich jak np. kable).

Wyżej wymieniona geometria została użyta w 3 podstawowych konfiguracjach:

- 1) Bez ochrony
- 2) Poziomy Zestaw Rozprężający (Horizontal Depressurization Set = HDS)
- 3) HDS + ochrona 3 Olejowych Skrzynek Kablowych Przepustu (OBCB) (po jednej na każdej wieżyczce 1, 2 i 3)  
Z dwoma pozycjami łuku:
  - 1) "Po lewej" – Wejście do wieżyczki 1
  - 2) "Po prawej" – Wejście do wieżyczki 3



Rys. 8. Geometria testu

Fig. 8. Test geometry

Ostateczna siatka składała się z około 150.000 czworościennych elementów.

Zamiast podłączyć elementy rurociągu z Zestawu Rozprężającego, w jego miejscu stworzono brzegowe warunki atmosferyczne.

## 4.2. Opis łuku elektrycznego

Testy na transformatorach o skali przemysłowej [1] zawierają szczególne informacje na temat zjawiska łuku elektrycznego.

a) **Przegląd:** Po wystąpieniu łuku elektrycznego w transformatorze, następuje szybkie odparowanie oleju otaczającego łuk i powstaje pęcherz gazu. Jako iż olej nie pozwala na jego ekspansję, pęcherz gazu znajduje się pod wysokim ciśnieniem w miejscu odparowywania. Różnica ciśnień pomiędzy pęcherzem gazu a otaczającym go olejem generuje pierwszy pik ciśnienia dynamicznego, który w skutek oddziaływania na strukturę kadzi generuje fale ciśnienia dynamicznego. Te fale ciśnienia dynamicznego rozprzestrzeniają się w transformatorze, z prędkością dźwięku, powodując narastanie ciśnienia statycznego w kadzi.

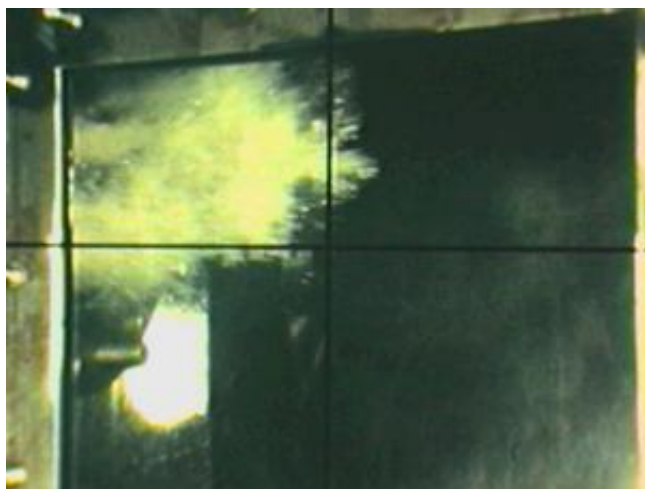
Po wstępnym odparowaniu oleju i powstaniu pęcherza gazu, łuk elektryczny nie jest już w bezpośrednim kontakcie z olejem transformatora, dlatego też jego dalsze odparowywanie jest ograniczone. Zamiast tego, energia łuku jest przeniesiona do gazu i powoduje jego podgrzanie, to z kolei prowadzi do powstania plazmy. Jednakże rozpadanie cząsteczek odparowanego oleju nie ma wyraźnego wpływu na generowanie fali ciśnienia tak jak w przypadku procesu wstępnego odparowania.

b) **Badanie warunków zwarcia:** Przy pozycji łuku "Po Lewej", łuk powstaje w kadzi transformatora przy połączeniu z wieżyczką 3. Łuk jest symulowany poprzez usytuowanie wielkiej ilości gazu pod ciśnieniem lub „pęcherza” w transformatorze. Następnie, w czasie trwania łuku, dodaje się energię w tym obszarze co powoduje dalszy wzrost ciśnienia. Ta metoda modelowania łuku została wykorzystana we wcześniejszych badaniach takich jak badanie parametryczne na konfiguracjach DS [5].

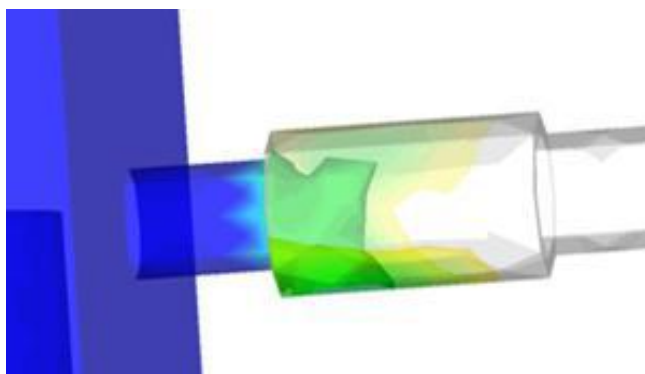
Pęcherz ma kształt przybliżony do walca, o długości i promieniu odpowiednio około 0,4 m i 0,2 m, i jest pod ciśnieniem na poziomie 11 bar (1100 kPa). Jednakże ze względu na wariacje siatki, wynik nie jest identyczny.

### 4.3. Modelowanie systemu ochrony

Symulacja działania zestawu rozprężającego jest bardzo trudnym zadaniem. Udało się je osiągnąć w narzędziu obliczeniowym poprzez usunięcie separacji między olejem a Zestawem Rozprężającym jako funkcje różnicy ciśnienia po obu stronach bariery. Ponadto, funkcja otwierania jest ograniczona do stopniowego otwierania się najpierw od środka, a potem na zewnątrz. Porównanie ewakuacji oleju z badań na żywo (po lewej) i symulacji (po prawej) jest pokazane na rysunku 9.



Rys. 9a. System ochrony z doświadczeń  
Fig. 9a. Experimental protection



Rys. 9b. Symulowany system ochrony  
Fig. 9b. Simulated protection

### 4.4. Modelowanie parametrów symulacji systemu ochrony

Parametry symulacji użyte do testów są opisane w Tabeli 1, 2 i 3, poniżej. Olej i gaz są modelowane z równaniem naprężonego stanu gazu.

Tab. 1. Właściwości cieczy  
Tab. 1. Fluid properties

	Gęstość (kg/m <sup>3</sup> )	Gamma* (bez jednostki)	Naprężenie (Pa)
Olej	843,0	1,7	7,0*10 <sup>8</sup>
Gaz	1,0	1,43	0,0

\* stosunek ciepła właściwego w przemianie izobarycznej i ciepła właściwego w przemianie izochorycznej

Tab. 2. Warunki początkowe  
Tab. 2. Initial conditions

	Alfa*	Ciśnienie (Pa)
Kadź transformatora	1,0*10 <sup>-5</sup>	1,0*10 <sup>5</sup>
„Pęcherz” łuku	0,99999	1,1*10 <sup>6</sup>
Odplyw (przy otwarciu)	0,99999	1,0*10 <sup>5</sup>

\*frakcja objętości gazu

Tab. 3. Parametry łuku  
Tab. 3. Arc parameters

Prąd (Pik)	Napięcie (Pik)	Częstotliwość	Czas trwania	Całkowita energia
2,0*10 <sup>3</sup> A	80,0*10 <sup>3</sup> V	50,0 Hz	0,110 s	7,1986 MJ

### 4.5. Wyniki symulacji

Tabela 4 obrazuje piki ciśnienia dla sześciu testów. Tabela 5 obrazuje czas aktywacji pojedynczego DS i Czas Rozprężenia kadzi transformatora. Czas Aktywacji jest zdefiniowany jako czas od początku łuku do otwarcia DS. Czas Rozprężenia jest zdefiniowany jako czas od początku łuku do czasu końcowego, w którym ciśnienie dynamiczne spada poniżej limitu statycznej wytrzymałości kadzi transformatora, moment po którym pęknięcie zbiornika nie jest już możliwe.

Tab. 4. Piki ciśnienia w transformatorze  
Tab. 4. Peak pressures in transformer

	Kadź *	Wieżyczka 1	Wieżyczka 2	Wieżyczka 3
“Po lewej” – Bez ochrony	19,3 bar	15,0 bar	10,7 bar	18,2 bar
“Po lewej” – HDS	16,8 bar	12,4 bar	9,4 bar	15,5 bar
“Po lewej” – HDS + 3 OBCB	15,0 bar	12,1 bar	7,0 bar	9,3 bar
“Po prawej” – Bez ochrony	18,6 bar	17,7 bar	11,9 bar	15,5 bar
“Po prawej” – HDS	17,0 bar	15,8 bar	10,1 bar	12,4 bar
“Po prawej” – HDS + 3 OBCB	15,0 bar	11,5 bar	6,6 bar	11,5 bar

\* Pik ciśnienia “Kadzi” może wystąpić w dowolnym miejscu w transformatorze, włączając wieżyczki

Tab. 5. Czas rozprężenia i aktywacji  
Tab. 5. Depressurization and activation Times

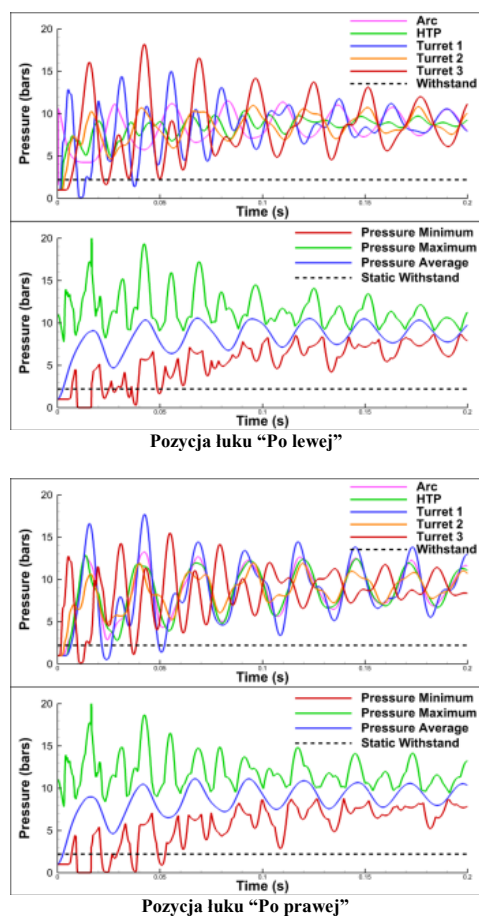
	Czas Rozprężenia	Aktywacja HDS	Aktywacja OBCB Wieżyczka 1	Aktywacja OBCB Wieżyczka 2	Aktywacja OBCB Wieżyczka 3
“Po lewej” – Bez ochrony	∞	n/a	n/a	n/a	n/a
“Po lewej” – HDS	400 ms	2,07 ms	n/a	n/a	n/a
“Po lewej” – HDS + 3 OBCB	146 ms	1,95 ms	1,56 ms	2,84 ms	5,33 ms
“Po prawej” – Bez ochrony	∞	n/a	n/a	n/a	n/a
“Po prawej” – HDS	350 ms	5,33 ms	n/a	n/a	n/a
“Po prawej” – HDS + 3 OBCB	139 ms	5,32 ms	5,97 ms	3,08 ms	1,65 ms

Czas aktywacji dla łuku powstającego po lewej stronie wskazuje, że system ochrony OBCB jest o 20% szybszy niż Czas Aktywacji samego HDS. Zmieniając pozycję powstania łuku na stronę prawą, aktywacja OBCB jest o 70% szybsza niż Czas Aktywacji samego HDS.

Czasy Rozprężenia są znacznie szybsze. W przypadku powstania łuku po lewej stronie, Czas Rozprężenia OBCB jest o 36,5% szybszy od czasu rozprężenia w przypadku samego HDS. W przypadku łuku po prawej stronie, Czas Rozprężenia wynosi 39,7% czasu samego HDS. Te niższe Czasy Rozprężenia są około 2,6 razy szybsze niż w przypadkach samego HDS.

#### 4.5.1. Skutki lokalizacji łuku

Wyniki pokazują duży stopień symetrii ze względu na położenie łuku. Rysunek 10 przedstawia profile ciśnienia w niechronionym transformatorze. Możemy zaobserwować, że profile ciśnienia w dwóch testach są bardzo podobne, podczas gdy profile wieżyczki 2 są niemal takie same a profile wieżyczek 1 i 2 to lustrzane odbicia jeśli zmienić położenie łuku.



Rys. 10. Brak ochrony  
Fig. 10. No protection

Odnotowano istotne różnice pomiędzy pozycjami łuku „Po lewej” i „Po prawej”. Tabela 6 przedstawia porównanie pików ciśnienia w ważnych miejscach transformatora. Mimo iż, profile ciśnienia są podobne, piki ciśnienia różnią się aż o 10%.

Ostatecznie, odnotowano, że wraz z systemem ochrony OBCB, bez względu na miejsce powstania zwarcia, DS będzie prawdopodobnie blisko łuku. W przypadku powstania łuku po lewej stronie, pierwszy DS aktywuje się 1,25 razy szybciej. Gdy łuk powstaje z prawej strony, aktywacja jest jeszcze szybsza, 3 razy szybsza od samego HDS, a to z powodu bliskości łuku.

Tab. 6. Porównanie pików ciśnienia ze względu na pozycję łuku – niechronione transformatory

Tab. 6. Comparison of peak pressure based on arc location – unprotected transformers

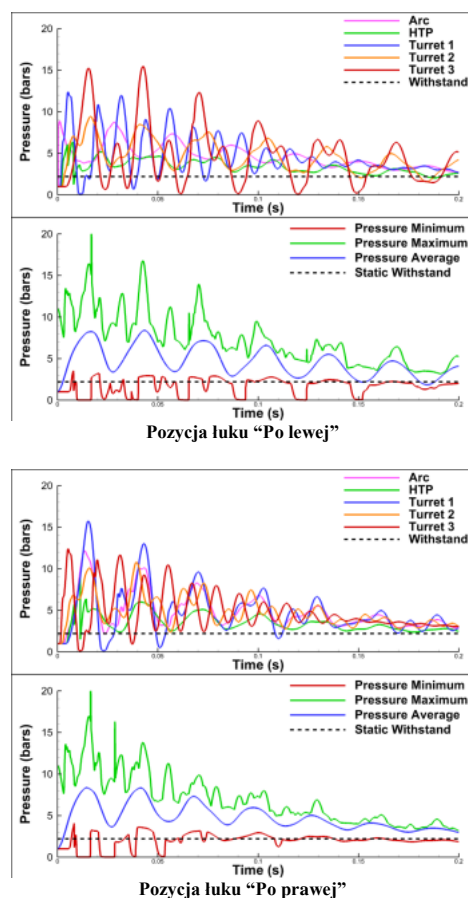
	Ciśnienie (bar/kPa)		
	„Po lewej”	„Po prawej”	Różnica
Główna kadź	19,3 / 1930	18,6 / 1860	- 0,7 / - 70
Dalsza wieżyczka	18,2 / 1820	17,7 / 1770	- 0,5 / - 50
Bliska wieżyczka	15,0 / 1500	15,5 / 1550	+ 0,5 / + 50
Środkowa wieżyczka	10,7 / 1070	11,9 / 1190	+ 1,2 / + 120

#### 4.5.2. Skutki ochrony OBCB

Możemy zaobserwować tendencję, że dodatkowa ochrona OBCB pozwala na znacznie szybszą aktywację DS, jeśli łuk jest wystarczająco blisko wieżyczki.

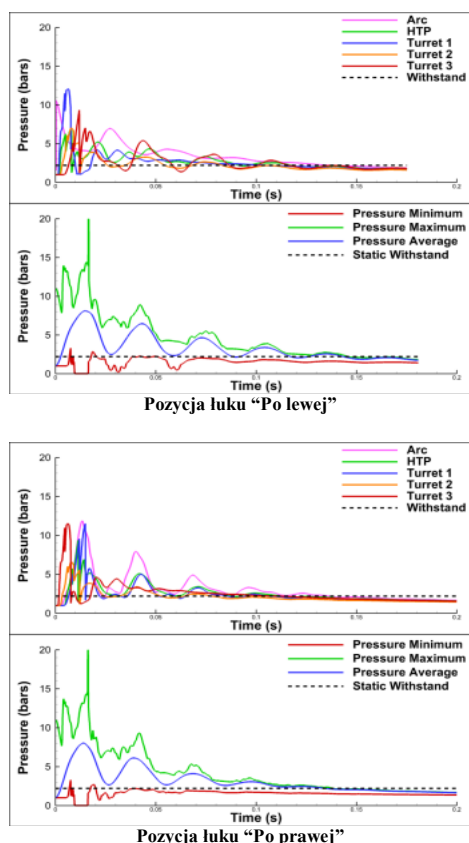
Co więcej, wyniki wskazują, że dodanie 3 zabezpieczeń OBCB skraca Czas Rozprężania w porównaniu z pojedynczym zabezpieczeniem HDS. Jak przedstawiono w tabeli 5, Czas Rozprężania dla konfiguracji 3+1 był średnio 2,6 razy szybszy od Czasu Rozprężania samego HDS w przeprowadzonych symulacjach.

Dodatkowo, symulacja wskazują, że dodatkowe zabezpieczenia OBCB pozwalają na ograniczenie pików ciśnienia doświadczanych przy czujnikach ciśnienia zlokalizowanych we wszystkich trzech przepustach wieżyczek, jak pokazano w tabeli 4. Zmiany ciśnienia dla obu przypadków są zaprezentowane na rysunkach 11 i 12.



Rys. 11. Poziomy Zestaw Rozprężający (HDS)  
Fig. 11. Single Horizontal Depression Set





Rys. 12. Poziomy Zestaw Rozprężający (HDS)+ 3 zabezpieczenia OBCB  
Fig. 12. Horizontal Depressurization Set + 3 OBCB Protections

## 5. Wnioski

### 5.1. Testy doświadczalne

Przeprowadzono kampanię badań doświadczalnych poświęconą zrozumieniu eksplozji transformatorów wywołanych łukami elektrycznymi. Ponieważ eksplozje transformatorów są niekontrolowane i prowadzą do wielkich szkód, testy zostały przeprowadzone na transformatorach wyposażonych w technologię zapobiegającą eksplozji, która działa na poziomie wykalibrowanego ciśnienia spowodowanego pikami ciśnienia dynamicznego.

Testy wykazały, że w momencie powstania łuku elektrycznego w kadzi, olej otaczający łuk jest szybko odparowany i wygenerowany gaz znajduje się pod ciśnieniem ponieważ inercja oleju zapobiega jego ekspansji. Różnica ciśnień pomiędzy pęcherzem gazu a otaczającym go olejem generuje fale ciśnieniowe, które rozprzestrzeniają się w oleju. Kiedy pierwszy pik ciśnienia dynamicznego dotrze do systemu ochrony wtedy aktywuje on ewakuację oleju, która szybko rozpręża kadź żeby nie nastąpiło jej pęknięcie.

Podczas testów, kadź transformatora mogła wytrzymać takie wysokie piki ciśnienia (do 14 bar abs. / 1400 kPa) podczas kilkadziesiąt milisekund nawet jeśli statyczna wytrzymałość kadzi transformatora wynosi około 2,2 bar abs (220 kPa).

### 5.2. Symulacje eksplozji transformatora 200 MVA i jej zapobiegania

Komplementarnie, skutki zwarcia wewnątrz niechronionego transformatora mogą być badane w sposób bezpieczny przy użyciu symulacji obliczeniowych. W tym celu stworzono numeryczne narzędzie symulacyjne. Aby narzędzie było skuteczne, musi ono brać pod uwagę ciecz i gaz oraz być w stanie obliczyć rozprzestrzenianie się fali ciśnienia. Dlatego też dostosowano pełen model dla zmiennych, ściśliwych dwufazowych przepływów i powołano metodę skończonych objętości w celu rozwiązywania równań na niestructuralnych siatkach 3D.

Następnie przeprowadzono symulacje na transformatorze 200 MVA, które zwróciły uwagę na zalety korzystania z zaawansowanych narzędzi symulacyjnych:

- Po pierwsze, dają one pełne zrozumienie tego co dzieje się podczas eksplozji transformatora. Narzędzie symulacyjne potwierdziło, że jeśli łuk elektryczny powstanie w transformatorze, który nie jest chroniony, fale ciśnienia dynamicznego generowane przez łuk rozprzestrzeniając się w kadzi, odbijają się od ścian i stopniowo podnoszą ciśnienie statyczne wewnątrz kadzi doprowadzając do jej pęknięcia.
- Po drugie, narzędzie obliczeniowe jest skuteczne do badania działania systemów zabezpieczających przed eksplozją, takich jak te, które bazują się na szybkim rozprężeniu spowodowanym przez ewakuację oleju. Wyniki wskazały, że ta szybka ewakuacja cieczy generuje duże rozrzedzone fale, które rozprzestrzeniając się rozprężają całą kadź w przeciągu milisekund i zapobiegają wzrostowi ciśnienia statycznego, które nie może być utrzymane przez kadź.

Takie strategie, które opierają się na szybkim rozprężeniu kadzi powodowanym natychmiastową ewakuacją oleju mogą być zatem uważane za skuteczne zabezpieczenie transformatora przed eksplozją.

### 5.3. Symulacje eksplozji typowego transformatora i jej zapobiegania (główna kadź i olejowe przepusty skrzynki kablowej)

Użyto trójwymiarowego narzędzia symulacyjnego opartego na 5-równaniowym, hydrodynamicznym modelu w celu zbadania systemu ochrony przed pęknięciem kadzi transformatora. Korzystanie z tego systemu ochrony służy jako alternatywa dla projektowania kadzi transformatora jako zbiorników ciśnieniowych, które przy zastosowaniu standardu ASME wymagałyby niepraktycznego dziesięciokrotnego zwiększenia grubości kadzi. Skuteczność szybkiej metody rozprężenia kadzi została zbadana poprzez użycie tego narzędzia symulacyjnego

Symulacje zostały przeprowadzone na geometrii transformatora żeby uzyskać wgląd w skutki dodania 3 zabezpieczeń Olejowych Skrzynek Kablowych Przepustu (OBCB) oprócz samego poziomego zestawu rozprężającego (HDS). Zgodnie z modelem, wieżyczki, na których zainstalowano dodatkowe zabezpieczenia OBCB są podłączone do głównej kadzi, bez wewnętrznych przeszkód między kadzią główną i przepustami wieżeczek.

Niniejsze symulacje wskazują, że dodatkowe zabezpieczenia redukują całkowity czas rozprężenia transformatora o współczynnik 2,6 poprzez do 3 razy szybszą aktywację. Co więcej, zabezpieczenia OBCB redukują pik ciśnienia w przepustach, które są narażone na pęknięcie.

## 6. Literatura

- [1] Muller S., Brady R., De Bressy G., Magnier P., Perigaud G.: Prevention of transformer tank explosion, Part 1: Experimental Tests on Large Transformers, ASME PVP08 Conference, 2008.
- [2] Culver B., Froehlich K., Widenhorn L.: Prevention of tank rupture of faulted power transformers by generator circuit breakers, European Transactions on Electrical Power, Vol. 6, No. 1, 1996.
- [3] Allaire G., Clerc S. & Kokh S.: A Five Equation Model for the Simulation of Interfaces between Compressible Fluids, Journal of Computational Physics, vol. 181, 2, pp. 577-616, 2002.
- [4] Brady R., Muller S., De Bressy G., Magnier P., Perigaud G.: Prevention of transformer tank explosion, Part 2: Development and Application of a Numerical Simulation Tool, ASME PVP08 Conference, 2008.
- [5] Brady R., Muller S., Petrovan-Boiarciuc M., Perigaud G., Landis B.: Prevention of transformer tank explosion, Part 3: Design of Efficient Protections using Numerical Simulations, ASME PVP09 Conference, 2009.