

Piotr PRZYBYŁEK, Hubert MORAŃDA, Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI  
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

## Bubble effect w izolatorach przepustowych o izolacji wykonanej z różnych materiałów

Dr inż. Piotr PRZYBYŁEK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor i współautor ponad 40 publikacji, głównie z zakresu badań właściwości izolacji papier-olej oraz metod związanych z diagnostyką izolacji transformatora. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 6 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

Profesor zwyczajny na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Wieloletni kierownik Zakładu Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autorka ponad 200 publikacji z zakresu inżynierii materiałowej oraz diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Promotor 19 prac doktorskich. Członek IEEE oraz Komitetu Elektrotechniki PAN. Koordynator 2 projektów międzynarodowych i kierownik 13 krajowych projektów badawczych.



e-mail: hanna.moscicka@put.poznan.pl

Dr inż. Hubert MORAŃDA

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 90 publikacji z zakresu badań materiałowych oraz diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 6 badawczych krajowych, w tym kierownik projektu rozwojowego.



e-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań modeli izolatorów przepustowych w aspekcie możliwości wystąpienia w nich *bubble effect*. Badaniu poddano trzy rodzaje układów izolacyjnych: papier - olej mineralny, papier żywiczny - olej mineralny oraz papier - olej syntetyczny. Głównym efektem pracy jest wykazanie możliwości wystąpienia *bubble effect* w izolatorach przepustowych. Stwierdzono, że zamiana syciwa z oleju mineralnego na syntetyczny może spowodować zmianę warunków wystąpienia *bubble effect*.

**Słowa kluczowe:** izolator przepustowy, efekt bąbelkowania.

### Bubble effect in bushing insulators of insulation consisting of different materials

#### Abstract

The purpose of the research was to answer the question: is there any possibility of appearing the bubble effect in a bushing insulator? The bubble effect can appear under particular operating conditions, i.e. substantial moisture and high insulation temperature. In the second section of the paper, the reason for temperature increase in the bushing insulator insulation model is explained. In new bushing insulators of good dielectric properties of insulation, the source of heat are power losses resulting from a flowing current. In old moistened bushing insulators, another source of heat are dielectric losses. There were investigated three kinds of insulation models: paper-mineral oil, paper-synthetic oil and resin bounded paper-mineral oil. Construction of the bushing insulation models investigated is described in the third section. In the fourth section the investigation results and conclusions are presented. The main conclusion of the work is that the bubble effect can appear in a bushing insulator (Figs. 2-4). It can also be stated that the change of mineral oil into synthetic ester causes the increase in the bubble effect initiation temperature.

**Keywords:** bushing insulator, bubble effect.

### 1. Wprowadzenie

Do badań, rekonesansowych w pierwszym etapie, skłoniła nas niemożność odpowiedzenia na poniższe pytania.

- Czy w izolatorze przepustowym o izolacji papier-olej występuje zjawisko *bubble effect*?
- Czy w izolatorze o izolacji papier żywiczny-olej można się spodziewać tego zjawiska?
- Czy zamiana oleju mineralnego na ester syntetyczny zmienia relacje ilościowe opisujące zjawisko *bubble effect*?

Izolacja papier-olej mineralny w izolatorze przepustowym jest jakościowo identyczna jak izolacja główna transformatora, a więc należałoby się spodziewać wystąpienia zjawiska. Natomiast inny stosunek ilościowy masy wyrobów celulozowych do masy oleju może rzutować na pewne zmiany. Szczególnie jednak interesowała nas rola wkładek metalowych pełniących rolę ekranów sterujących rozkładem natężenia pola elektrycznego. Intuicyjnie oceniając sytuację, wydawało się, że wkładki metalowe mogą mocno utrudniać i ograniczać migrację pary wodnej i w jakiś wymierny sposób wpływać na rozwój zjawiska *bubble effect*.

Najpopularniejsze izolatory przepustowe, o najstarszej koncepcji, mają izolację wykonaną z papieru impregnowanego olejem mineralnym. Izolator taki, w międzynarodowej nomenklaturze ma symbol OIP (*Oil Impregnated Paper*) [1].

Jedna ze starszych i popularnych konstrukcji izolatora przepustowego bazuje na wykorzystaniu izolacji papier żywiczny-olej. W starszych konstrukcjach papier był jednostronnie powlekany żywicą termoutwardzalną. Tak przygotowany papier nawijało na metalowy sworzeń, umieszczając co pewną liczbę warstw, wkładki sterujące rozkładem natężenia pola. Następnie rdzeń izolatora wygrzewano powodując termiczne utwardzenie żywicy. Dla utrudnienia penetracji wilgoci, przestrzeń między ceramicznym izolatorem osłonowym, a zaizolowanym rdzeniem, wypełniano masą zalewową o bardzo dużej lepkości. W obecnych konstrukcjach masę zalewową zastąpiono olejem mineralnym. Ze względu na użyty materiał celulozowy izolator taki ma symbol RBP (*Resin Bounded Paper*) [1].

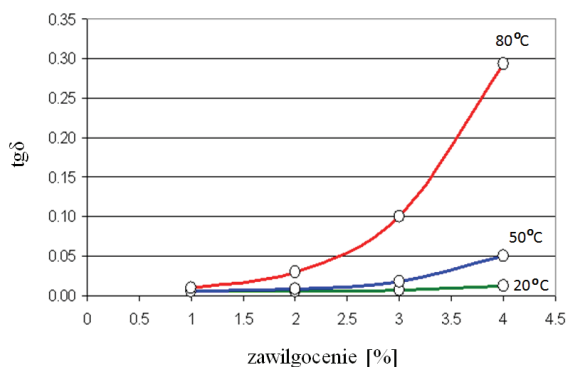
W najnowszych rozwiązaniach tego typu izolatorów przepustowych wprowadzono zmiany technologiczne. Zamiast powlekania papieru żywicą stosuje się proces impregnacji żywicą. Papier nawija się na sworzeń metalowy, rozmieszczając odpowiednio wkładki aluminiowe sterujące rozkładem natężenia pola elektrycznego. Tak wykonany rdzeń suszy się próżniowo, a następnie impregnuje ciśnieniowo żywicą, która musi mieć odpowiednio małą lepkość. Izolator osłonowy może być ceramiczny lub z elastomeru silikonowego. Przestrzeń między rdzeniem izolatora a izolatorem osłonowym wypełnia się olejem. Izolator tego typu, ze względu na zastosowaną technologię, ma symbol RIP (*Resin Impregnated Paper*) [1].

Nasze pytania dotyczyły źródeł zawilgocenia papieru żywicznego. Czy absorpcja wody przez włókna celulozowe jest wystarczająco intensywna? Czy dyfuzja wilgoci poprzez żywicę istotnie wpływa na zawilgocenie izolacji? Czy obecność żywicy łącznie z obecnością wkładek metalowych nie wyhamowują rozwoju zjawiska *bubble effect*.

Kolejne pytanie dotyczyło współpracy papieru z olejem syntetycznym. Olbrzymia rozpuszczalność wody w estrach syntetycznych sugeruje możliwość ilościowych zmian w procesie rozwoju *bubble effect*, co postanowiono eksperymentalnie sprawdzić.

## 2. Przyczyny wzrostu temperatury w izolacji przepustów

Bardzo istotne jest zrozumienie przyczyn wzrostu temperatury przepustu aż do jego zniszczenia. W nowym przepuscie, o dobrych właściwościach dielektrycznych izolacji, źródłem ciepła są straty omowe wynikające z przepływającego prądu. W przepuscie starym, zawilgoconym, pojawia się drugie źródło ciepła – straty dielektryczne. Na rysunku 1 pokazano zależność współczynnika strat  $tg\delta$  od zawilgocenia papieru przy kilku wartościach temperatury.



Rys. 1. Współczynnik strat dielektrycznych w zależności od zawilgocenia papieru przy temperaturze 20, 50, 80 °C, dla 50 Hz [2]

Fig. 1. Dielectric loss factor vs. water content in paper for temperature 20, 50, 80 °C and 50 Hz [2]

Z rysunku 1 wynika duży wpływ zawilgocenia na  $tg\delta$ , szczególnie przy wyższej temperaturze. Przewodiliśmy badania modelowe, z których wynika, że przy wybranym przeciętnym zawilgoceniu papieru, przy roboczym natężeniu pola elektrycznego (kilka kV/mm), powyżej pewnej temperatury wyjściowej występuje samonapędzający się mechanizm wzrostu temperatury. Wzrost temperatury izolacji powoduje wzrost  $tg\delta$ , a wzrost  $tg\delta$  powoduje wzrost temperatury. W rezultacie, w wyniku takiego sprzężenia, bardzo szybko, w sposób nieograniczony, rośnie temperatura, prowadząc albo do przebicia cieplnego, albo do *bubble effect* [3]. To doświadczenie na modelach wyjaśnia, dlaczego w przypadku mało obciążonego transformatora może dojść do eksplozji i rozrwania przepustu. Należy dodać, że w przypadku mocno zawilgoczonego przepustu, temperatura krytyczna, powyżej której następuje nieograniczony przyrost temperatury, jest relatywnie niska i wynosi zaledwie 70-80 °C.

Według służb eksploatacji PSE (Polskie Sieci Energetyczne), awarie, jakie ostatnio się zdarzały, rozpoczynały się od przepustów, jeśli przepusty były w tym samym wieku co transformator. Sugerujemy, że przyczyną eksplozji i awarii przepustów jest *bubble effect*. Dotychczas zjawisko to wiązano tylko z izolacją główną transformatora.

## 3. Obiekty badań

Obiektami badań były modele laboratoryjne w skali 1:10. Imitowały one dosyć dobrze układ izolacyjny przepustu. W celu zademonstrowania różnic w rozwoju mechanizmu *bubble effect* zamodelowano trzy sytuacje:

- układ papier-olej mineralny,
- układ papier-ester syntetyczny MIDEL 7131,
- układ papier żywicowany-olej mineralny.

Wszystkie trzy modele różniły się tylko użytymi materiałami izolacyjnymi, natomiast wymiary i geometria modeli nie zmieniały się.

Na rurkę miedzianą o średnicy 10 mm i długości 150 mm nawiano 12 warstw papieru. Co trzy warstwy papieru umieszczano wkładkę metalową imitującą ekran sterujący rozkładem natężenia pola elektrycznego. Wkładki miały stopniowaną szerokość, tak jak to jest w izolatorze przepustowym. We wnętrzu rurki umieszczono grzałkę o precyzyjnie regulowanej temperaturze. Między powierzchnią rurki miedzianej a pierwszą warstwą papieru umieszczono termoparę. W ten sposób mierzono najwyższą temperaturę w modelu. Jest to poprawne założenie, gdyż *bubble effect* występuje w realnym transformatorze zawsze w rejonie *hot-spot*.

W modelu papier-olej mineralny użyto takiego samego papieru, jaki jest używany w zakładach produkcyjno remontowych Power Engineering SA w Czerwonaku. Zakupiono go u tego samego dostawcy. Wykorzystywano nowy olej mineralny firmy NYNAS.

W modelu papier żywicowany-olej mineralny użyliśmy materiały izolacyjne uzyskane dzięki uprzejmości Zakładów IZO-ERG w Gliwicach, które są producentem tego typu izolatorów przepustowych. Z zakładów otrzymaliśmy półprodukt w formie papieru powleczonego żywicą. Stosuje się żywicę fenolowo-formaldehydową lub jej kompozycję z żywicą epoksydową. W tym przypadku była to żywica fenolowo-formaldehydowa. Żywica jest nanoszona na papier w formie roztworu. Schnięcie żywicy polega na odparowaniu rozpuszczalnika. Model po wykonaniu był suszony próżniowo w temperaturze otoczenia, a następnie utwardzono żywicę w temperaturze 150 °C przez 15 min. Parametry utwardzania zostały zasugerowane przez głównego technologa zakładu. Żywica w pierwszej fazie podgrzewania topi się, przesycza papier i skleja warstwy, a dopiero później następuje proces termicznego jej utwardzenia.

Rdzenie z nawiniętym papierem lub utwardzonym papierem żywicowanym suszono w próżni dla wyrównania warunków. Następnie umieszczano wszystkie modele w komorze i zawilgocano je w sposób kontrolowany przez kontakt z wilgotnym powietrzem przez czas do 6 dób.

Spreparowane modele, odpowiednio zawilgocone, umieszczano w prostopadłościennym naczyniu szklanym i zalewano olejem mineralnym lub syntetycznym. Podgrzewano model z szybkością około 6 °C/min cały czas prowadząc rejestrację obrazu. Temperatura wyświetlająca się na ekranie miernika była też rejestrowana za pomocą kamery.

## 4. Wyniki badań i wnioski

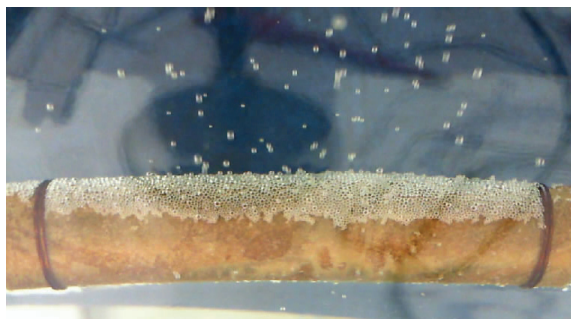
Spośród kilkunastu sfilmowanych obiektów, wybrano kilka kadrów, które stanowią dobrą ilustrację badanego zjawiska oraz pozwalają na wyciągnięcie pierwszych wniosków. Na rysunkach 2-5 pokazano wybrane obrazy zarejestrowane kamerą przy tej samej temperaturze obiektów badań.



Rys. 2. Olej mineralny – papier 5% wody; 115,6 °C; start 92,2 °C

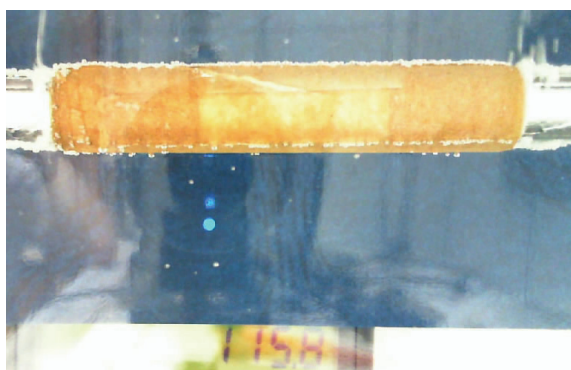
Fig. 2. Mineral oil – paper, water content 5%; 115,6 °C; start 92,2 °C

Przyjmując rysunek 2 za punkt odniesienia, widzimy że zwiększenie zawartości wody (rys. 3) zwiększa intensywność zjawiska i powoduje obniżenie temperatury inicjacji zjawiska.



Rys. 3. Olej mineralny – papier 7% wody; 115,6 °C; start 85 °C  
Fig. 3. Mineral oil – paper, water content 7%; 115,6 °C; start 85 °C

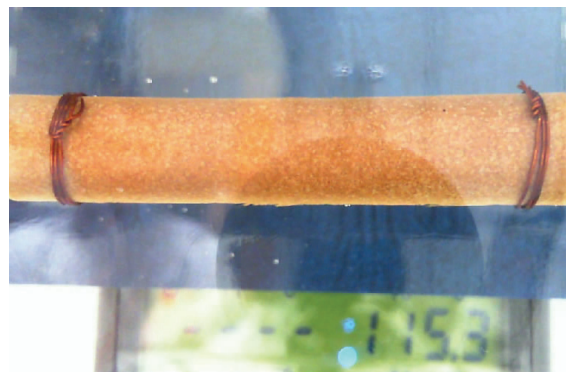
W przypadku papieru żywcowanego (rys. 4) zjawisko wystąpiło, czego nie byliśmy pewni; jego intensywność przy tej samej temperaturze jest niestety większa niż w przypadku izolacji papier-olej mineralny.



Rys. 4. Olej mineralny – papier żywcowany 5% wody; 115,8 °C; start 88,4 °C  
Fig. 4. Mineral oil – resin bounded paper, water content 5%; 115,8 °C; start 88,4 °C

W układzie ester syntetyczny – papier (rys. 5), w tym zakresie temperatury, zjawisko nie wystąpiło, co świadczy na korzyść układu. Wiąże się to prawdopodobnie z ogromną rozpuszczalnością wody w MIDELE oraz korzystnymi warunkami równowagi wody w papierze i w cieczy. Przy zawartości wody w oleju mineralnym równej 20 ppm, przy 60 °C, zawartość wody w celulozie wynosi 2,6%. Natomiast przy tej samej temperaturze, przy zawar-

tości wody w MIDELE równej aż 200 ppm, zawartość wody w celulozie wynosi tylko 1,4%.



Rys. 5. Ester syntetyczny MIDELE 7131 – papier 5% wody; 115,3 °C; zjawisko nie wystartowało  
Fig. 5. Synthetic ester MIDELE 7131 – paper, water content 5%; 115,3 °C; phenomenon not started

Najważniejszym efektem tej pracy jest pokazanie, że w izolatorach przepustowych należy się spodziewać zjawiska *bubble effect*. Najprawdopodobniej to zjawisko doprowadza do tak częstych awarii przepustów będących już 20-25 lat w eksploatacji, a więc zawilgoconych w stopniu przekraczającym wartość krytyczną.

Po rozwinięciu tych badań będzie można spróbować zmodyfikować konstrukcję przepustów, głównie w zakresie zmiany dielektryku ciekłego, ale to będzie wymagało sprawdzenia rozkładu natężenia pola elektrycznego w całym przepuszcisku.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki. Numer projektu N N511 312140.

## 5. Literatura

- [1] PN-EN 60137:2008, Izolatory przepustowe na napięcia przemienne powyżej 1 000 V.
- [2] Grackowski A.: Współczynnik strat dielektrycznych w funkcji zawilgocenia izolacji celulozowej, dane niepublikowane 2010.
- [3] Przybyłek P., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H.: Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, Issue 3, June 2010, pp. 919-925.

otrzymano / received: 23.01.2011  
przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK  
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl