

Ryszard Malewski\*, Silvio Ferrari\*\*, Jean-Claude Duart\*\*

## **ARAMIDOWA I MIESZANA IZOLACJA ZWIĘKSZA OBCIĄŻALNOŚĆ TRANSFORMATORÓW**

**Streszczenie:** Zastosowanie materiałów izolacyjnych z syntetycznych włókien aramidowych pozwala na istotne zwiększenie temperatury uzwojeń w porównaniu do izolacji celulozowo-olejowej. Izolacja aramidowa, rozpowszechniana pod nazwą handlową NOMEX®, jest obecnie dostępna zarówno w postaci papieru jak i preszpanu, a także gotowych elementów, takich jak przekładki, pręty i pierścienie kątowe. Wyższy koszt NOMEX'u nie uzasadnia zastąpienia nim celulozy w zwykłych transformatorach sieciowych, jednakże rachunek ekonomiczny wskazuje na opłacalność izolowania NOMEX'em transformatorów trakcyjnych, przewodnych a także przemysłowych, w których występują wysokie przeciążenia. Pośrednim rozwiązaniem jest stosowanie izolacji mieszanej, w której elementy pracujące w podwyższonej temperaturze i poddane wyższym naprężeniom dynamicznym są wykonane z NOMEX'u a celuloza jest wykorzystana do mniej krytycznych części układu izolacyjnego. Podano przykłady realizacji takich transformatorów i ich charakterystyki techniczne.

**Słowa kluczowe:** izolacja transformatorów, włókna aramidowe, obciążalność

### **1. Wstęp**

Papier aramidowy był stosowany do izolowania przewodów nawojowych tworzących uzwojenie transformatora mocy już od lat 1970, jednakże produkcja preszpanu (*Transformerboard*®) aramidowego została opanowana dopiero w połowie lat 80-tych. Następnym krokiem było opanowanie obróbki mechanicznej, tj. wykrawania elementów o określonych kształtach oraz formowanie na mokro kształtek z NOMEX'u. Znakomite własności mechaniczne, odporność na wysoką temperaturę, łatwe nasycanie olejem transformatorowym i wysoka wytrzymałość dielektryczna kwalifikują NOMEX jako zastępstwo izolacji celulozowej. Jednakże wysoka cena nowego materiału nie

---

\* Instytut Elektrotechniki, Warszawa

\*\* Du Pont de Nemours International, Genewa

uzasadnia jego stosowania do zwykłych transformatorów mocy lub transformatorów rozdzielczych. Natomiast coraz częściej NOMEX znajduje zastosowanie jako izolacja transformatorów specjalnych, działających w trudnych warunkach, takich jak znaczne chwilowe przeciążenia, wstrząsy i wibracje spowodowane transportem drogowym lub drganiem na szybko poruszającym się elektrowozie. Stabilność NOMEX'u w wysokiej temperaturze wynika z silnych powiązań chemicznych wewnątrz jego molekuł. Te powiązania stanowią również o kompatybilności NOMEX'u z różnymi rodzajami olejów i żywic stosowanych jako izolacja wysokonapięciowa. W przeciwieństwie do celulozy, NOMEX nie wydziela wody ani gazów i nie podlega rozkładowi w zakresie temperatury do około 750°C. Długotrwałe naprężenia ściskające przy wysokiej temperaturze nie powodują utraty elastyczności NOMEX'u i uzwojenie izolowane papierem oraz preszpanem aramidowym nie traci odporności na siły dynamiczne wywołane przepływem prądów zwarciovych. Wstępne sprężenie uzwojenia nie ulega stopniowemu zmniejszeniu, często obserwowanemu w transformatorach o tradycyjnej izolacji celulozowej.

Wysoka cena izolacji transformatorowej wykonanej z NOMEX'u wynika w pewnym stopniu ze ograniczonej ilości wyprodukowanych dotychczas jednostek, w porównaniu do masowego zastosowania papieru i preszpanu z celulozy. Należy oczekiwać, że proporcja cen ulegnie wyrównaniu w miarę szerszego wprowadzania NOMEX'u do nowych oraz modernizowanych transformatorów. Nie czekając na zasadniczą obniżkę cen, NOMEX jest coraz częściej stosowany jako składnik izolacji mieszanej, w której elementy pracujące w niższej temperaturze i pod mniejszymi naprężeniami mechanicznymi są wykonywane z celulozy. NOMEX stanowi zazwyczaj około 20% całkowitej izolacji i jest stosowany jako taśma oplatająca silnie nagrzewane przewody, oraz w postaci przekładek i prętów z wyciętych z płyty, wytrzymujących wysokie naprężenia mechaniczne w podwyższonej temperaturze.

Papier aramidowy nie ulega rozkładowi ani starzeniu przy najwyższej dopuszczalnej temperaturze pracy oleju. W konsekwencji, temperatura punktu gorącego uzwojenia (*hot-spot*) nie jest krytyczna, a ograniczenie temperatury pracy jest narzucone przez olej izolacyjny. Odpowiedni dobór chłodnic i szybkości przepływu oleju a także zwiększenie przekroju miedzi w uzwojeniach pozwala na zmniejszenie strat obciążeniowych a zarazem podniesienie mocy transformatora. Optymalny dobór temperatury, strat i mocy transformatora jest wyznaczany przez specjalistyczne oprogramowanie.

W transformatorach modernizowanych znakomite własności dielektryczne NOMEX'u pozwalają na zmniejszenie odstępów izolacyjnych, a więc umieszczenie większej ilości miedzi wewnątrz okna rdzenia, co pozwala na zwiększenie mocy transformatora przy zachowaniu istniejącego rdzenia magnetycznego.

## 2. Własności taśm i płyt aramidowych

Ocena mieszanego układu izolacyjnego transformatorów mocy zawierającego elementy wykonane z NOMEX'u i z celulozy była nader starannie przeprowadzona na modelach specjalnie skonstruowanych do przyspieszonego starzenia izolacji mieszanej [1]. Model taki odtwarzał warunki panujące w rzeczywistym transformatorze, gdzie temperatura oplotu izolacyjnego przewodów uzwojenia jest znacznie wyższa od temperatury oleju, a temperatura pozostałej izolacji jest w przybliżeniu równa

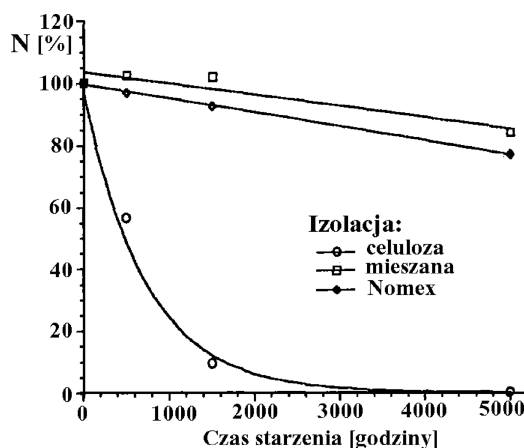
temperaturze oleju. Stosunek objętości i powierzchni NOMEX’u i celulozy był taki sam jak w rzeczywistym transformatorze o mocy 20 MVA. Przewody izolowano sześcioma warstwami taśmy NOMEX T-410 o grubości 0,05 mm i ściskano pomiędzy preszpanem o wysokiej gęstości NOMEX T-994, tak aby zachować gradient temperatury występujący w rzeczywistym transformatorze. Jako punkt odniesienia stosowano analogiczny model z izolacją celulozową w postaci taśmy z papieru Kraft i preszpanu o wysokiej gęstości (NI-CO lub HI-VAL).

Starzenie prowadzono kontrolując temperaturę przewodu miedzianego oraz oleju krążącego wewnątrz modelu. Wartości temperatury ustalone dla modelu z izolacją aramidową, mieszaną i celulozową podano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Temperatura starzenia modelu [1]

Izolacja w oleju mineralnym	Temperatura przewodu	Temperatura oleju
	[°C]	[°C]
Celuloza-olej	160	115
NOMEX-olej	240	130
NOMEX-celuloza-olej	240	130

Modele były poddane starzeniu w czasie 500, 1 500, 5 000 oraz 10 000 godzin. Miarą stopnia starzenia było zmniejszenie wytrzymałości próbki materiału na zrywanie, wyrażone w procentach wytrzymałości początkowej. Wyniki pomiarów przedstawia rys. 1.



**Rys. 1.** Zmniejszenie początkowej wytrzymałości na zrywanie  $N$  w funkcji czasu starzenia; izolacja syntetyczna z NOMEX’u, mieszana NOMEX-Celuloza oraz tradycyjna z celulozy [1]

Wytrzymałość dielektryczna zestarzonych próbek izolacji syntetycznej nie uległa istotnej zmianie, natomiast model izolacji celulozowej wykazał niewielkie zmniejszenie

napięcia przebicia. W modelu izolacji celulozowej badanie oleju wykazało znaczne pogorszenie wytrzymałości dielektrycznej spowodowane rozkładem celulozy w podwyższonej temperaturze. Towarzyszyło temu wydzielanie gazów, a zwłaszcza dwutlenku CO<sub>2</sub> i tlenku węgla CO.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono krzywe życia technicznego izolacji syntetycznej i celulozowej, pokazane na rys. 2 i przedstawiające 50% zmniejszenie wytrzymałości na zrywanie w funkcji czasu i temperatury gorącego punktu (*hot-spot*). Tą temperaturę wyznaczono zgodnie z procedurą podaną w normie IEE C57.92.

Wytrzymałość na zrywanie stanowi o zesterzeniu cieplnym izolacji, jednakże drugim czynnikiem decydującym o czasie służby transformatora jest utrzymanie początkowego naprężenia ściskającego uzwojeń, które zapewnia odporność na działanie sił dynamicznych wywołanych przez wielki prąd płynący w uzwojeniach podczas zwarcia w linii bądź stacji. Siły te działają w kierunku osiowym i mają tendencję podniesienia najwyższych cewek a obniżenia najniższych. Siły promieniowe działają dośrodkowo lub odśrodkowo powodując wybrzuszenie zewnętrznych zwojów. Ponadto w trójfazowym transformatorze może wystąpić asymetria rozkładu sił zwarciovych, co objawia się przesunięciem lub odkształceniem części cewek.

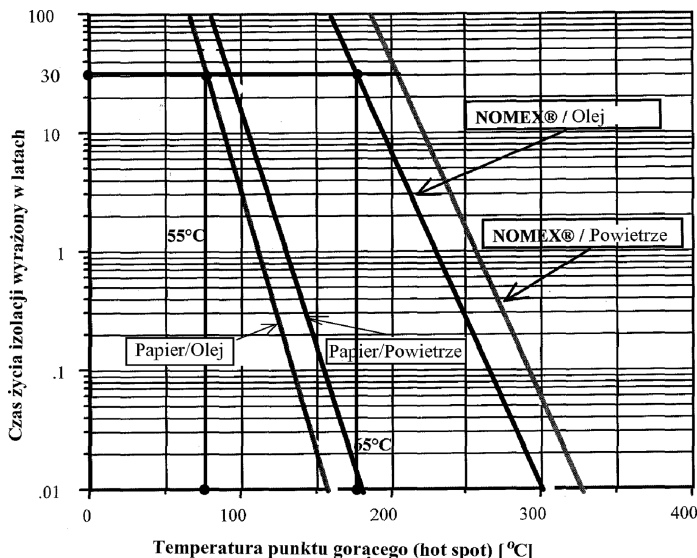
W przypadku zesterzonej izolacji papierowo-olejowej, celuloza traci elastyczność i zanika naprężenie uzyskane za pomocą szcęk ściskających uzwojenie dokręconych śrubami w wytwórni. Powtarzające się zwarcia w linii i wywołany nimi prąd zwarciovych może spowodować odkształcenie lub przesunięcie części uzwojenia. Izolacja zwojów i cewek ulega wtedy skruszeniu odsłaniając miedziane przewody. Obnażone metalowe elektrody zmniejszają wytrzymałość dielektryczną przerwy olejowej i kolejne przepięcie może doprowadzić do przebicia izolacji, zapłonu łuku w oleju i eksplozji transformatora.

Porównanie odkształcenia NOMEX'u i celulozy spowodowanego długotrwałym ściskaniem w podwyższonej temperaturze przedstawiono na rys. 3.

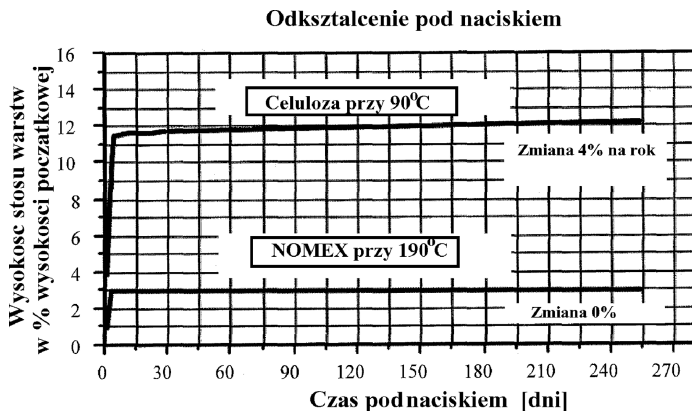
Znakomita sprężystość NOMEX'u utrzymuje wstępne naprężenia ściskające uzwojenia w ciągu wielu lat pracy transformatora nawet w podwyższonej temperaturze i zapewnia odporność uzwojenia na siły dynamiczne od prądów zwarciovych. Aby zapewnić taką odporność, wszystkie elementy układu izolacyjnego podlegające wstępnemu po-osiowemu naprężeniu muszą być wykonane z NOMEX'u. W przypadku izolacji mieszanej, oprócz oplotu przewodów taśmą z NOMEX'u, należy również zastosować aramidowe przekładki pomiędzy cewkami oraz pierścienie na krańcu uzwojenia.

Własności dielektryczne NOMEX'u i celulozy można ocenić porównując napięcie przebicia preszpanu w oleju, przy napięciu udarowym i o częstotliwości sieciowej. Innym kryterium oceny jest porównanie wytrzymałości na naprężenie dielektryczne styczne do powierzchni preszpanu zanurzonego w oleju. Na rys. 4 i rys. 5 pokazano napięcie przebicia oraz napięcie wyładowania po powierzchni preszpanu wykonanego z NOMEX'u i z celulozy.

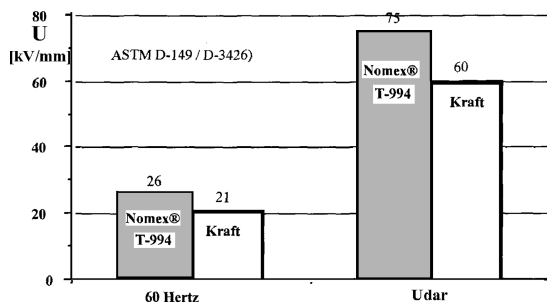
Współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg } \delta$  celulozy w zakresie temperatury do ok. 90°C nie odbiega znacząco od  $\text{tg } \delta$  NOMEX'u, Jednakże przy 130°C stratność NOMEX pozostaje niemal niezmienna, podczas gdy straty dielektryczne celulozy wzrastają kilkukrotnie, jak to można odczytać na rys. 6.



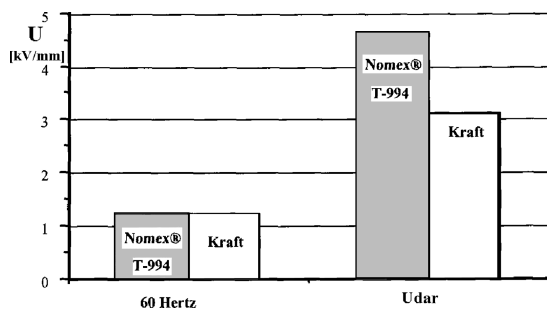
**Rys. 2.** Zmniejszenie początkowej wytrzymałości na zrywanie w funkcji czasu i temperatury punktu gorącego (hot-spot); górne krzywe przedstawiają izolację aramidową w powietrzu i w oleju, a dolne izolację celulozową w oleju przy przyroście temperatury o 65°C i o 55°C ponad najwyższą temperaturę otoczenia równą 40°C; zakładając trzydziestoletnie życie techniczne izolacji można odczytać dopuszczalną temperaturę punktu gorącego 175°C dla układu NOMEX-olej i 90°C dla obecnie stosowanej papierowo-olejowej izolacji transformatorów [2]



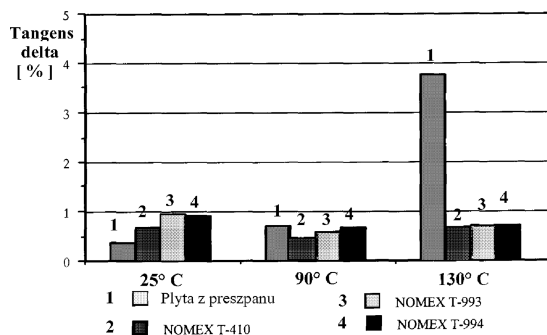
**Rys. 3.** Utrata sprężystości celulozy i NOMEX’u poddanych długotrwałemu ściskaniu przy podwyższonej temperaturze; zmniejszenie grubości początkowej preszpanu wykonanego z celulozy i z NOMEX’u wskazuje na około 3% zmianę początkową i brak dalszego odkształcenia, natomiast taki sam nacisk powoduje początkowe odkształcenie celulozy o około 12%, a następnie stopniowe odkształcenie postępujące o 4% na rok [2]



**Rys. 4.** Napięcie przebicia preszpanu o grubości 3mm w oleju, zmierzone przy napięciu przemiennym i udarowym; NOMEX oferuje większą wytrzymałość na przebicie zarówno podczas próby udarowej, jak i napięciem o częstotliwości sieciowej [3]



**Rys. 5.** Napięcie powodujące wyładowanie wzdłuż powierzchni preszpanu zanurzonego w oleju; naprężenie dielektryczne jest skierowane stycznie do powierzchni granicznej preszpanu i oleju; NOMEX wytrzymuje wyższe naprężenia styczne przy napięciu udarowym, a jego wytrzymałość jest równa wytrzymałości celulozy przy napięciu przemiennym [3]



**Rys. 6.** Współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg } \delta$  celulozy i NOMEX'u przy 25° C, 90° C i 130° C [3]

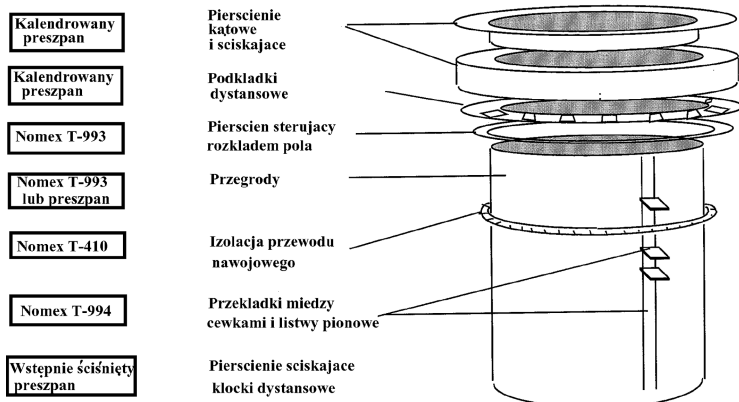
### 3. Zastosowanie NOMEX’u do izolacji transformatorów

Firma Westinghouse zastosowała po raz pierwszy taśmę z NOMEX’u do izolacji przewodów uzwojenia transformatorów rozdzielczych o mocy 25 kVA już w roku 1971 [4]. Inspekcja wewnętrzna przeprowadzona po roku starzenia pod podwyższonym obciążeniem wykazała niezmienny wygląd izolacji aramidowej i czysty olej pomimo, że temperatura punktu gorącego osiągała 250°C. Taki sam transformator izolowany celulozą wykazał zwęgloną izolację i czarny od sadzy olej, a temperatura punktu gorącego nie przekroczyła 145°C.

#### 3.1. Transformatory trakcyjne

Izolacja aramidowa znalazła zastosowanie w transformatorach trakcyjnych zbudowanych na zamówienie kolei niemieckiej. Transformatory o wyłącznie aramidowej izolacji zostały zainstalowane na szybkobieżnych elektrowozach. Transformatory pracowały w warunkach ciągłej wibracji a temperatura punktów gorących często osiągała 190°C. Inspekcja wewnętrzna przeprowadzona po dwuletniej pracy wykazała znakomitą odporność NOMEX’u na podwyższoną temperaturę i naprężenia mechaniczne spowodowane drganiami.

Technologia produkcji preszpanu z włókien aramidowych została opanowana w 1985 roku przez firmę Dupont, wytwórnię NOMEX’u, wspólnie z firmą Weidmann, wiodącym producentem Transformerboard’u. Pozwoliło to na wprowadzenie izolacji mieszanej, w której elementy poddane wysokim naprężeniom mechanicznym i pracujące w wysokiej temperaturze są wykonane z NOMEX’u, a objętościowo większa część układu izolacyjnego składa się z tradycyjnego preszpanu i papieru.



**Rys. 7.** Elementy układu izolacyjnego wykonane z NOMEX’u i z celulozy w transformatorze o izolacji mieszanej [5]

W ten sposób zbudowano transformatory, których temperatura punktu gorącego osiąga 170°C, średni przyrost temperatury uzwojeń wynosi 95°C a temperatura gór-

nych warstw oleju 105°C. Tak wysoka temperatura pracy transformatora w izolacji mieszanej jest osiągnięta przy zastosowaniu stosunkowo niewielkiej ilości kosztownej izolacji aramidowej, jak to pokazano na rys. 7.

### 3.2. Transformatory przewoźne

Firma General Electric otrzymała w 1986 roku zlecenie na badania nad budową transformatorów przewoźnych, stosowanych w przypadku awarii jako jednostki zastępcze. Celem projektu było opracowanie transformatora którego punkty gorące osiągną temperaturę 200°C. Przeprowadzone studia zaowocowały doborem specjalnej emalii izolacyjnej do przewodów nawojowych, złączeni przewodów i wykonaniem systemu izolacyjnego wyłącznie z NOMEX'u. Aby uniknąć problemów napotkanych przez General Electric w czasie badań, obecnie takie transformatory są zazwyczaj budowane w izolacji mieszanej i temperatura punktu gorącego jest ustalana na 170°C.

Koszt transformatora przewoźnego w izolacji mieszanej w porównaniu do transformatora w konwencjonalnej izolacji celulozowej, a także uzyskane zwiększenie mocy można przedstawić w punktach:

- Typowy wzrost kosztu transformatora od 4% do 6%.
- Typowy wzrost obciążalności od 25% do 50%, w niektórych przypadkach do 100%.
- Typowy koszt uzyskania dodatkowej mocy od \$8 do \$12 za 1 kVA, w porównaniu do transformatora w izolacji celulozowej \$15 do \$20 za 1 kVA.

Moc transformatorów przewoźnych jest ograniczona gabarytem drogowym i na ogół nie przekracza 75 MVA [5]. Aby osiągnąć wysoką moc znamionową przy ograniczonych wymiarach i wadze transformatora, konstruktorzy stosują izolację mieszaną a ponadto umieszczają przepusty WN w dolnej części kadzi, budują kadzie z aluminium. Jako przykład takiej jednostki może służyć trójfazowy transformator przewoźny o mocy 45 MVA, napięciu 117,5/12,4/7,2 kV, wyposażony w podobciążeniowy przełącznik zaczepów. Długość jednostki wynosi 22,8 m, szerokość 3 m, i wysokość 4,3 m, a waga nie przekracza 44,1 tony (wraz z traktoem 72,7 tony) [5]. W tabeli 2 podano porównanie różnych rozważanych wariantów realizacji tego transformatora.

**Tabela 2.** Porównanie parametrów transformatora przewoźnego przy różnych wariantach konstrukcyjnych [5]

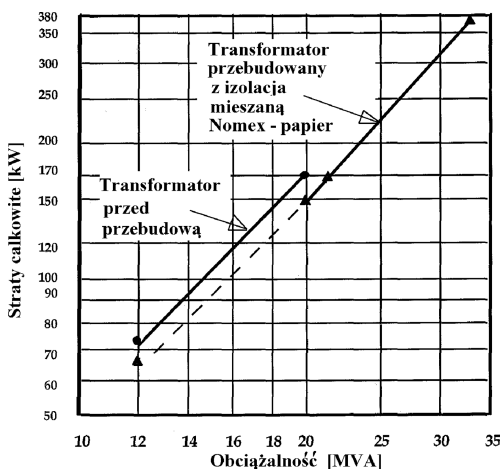
Transformator przewoźny		Izolacja mieszana	Izolacja celulozowa przy takiej samej mocy	Izolacja celulozowa przy takiej samej wadze
Moc	[MVA]	45	45	31,5
Waga	[t]	44,1	57,5	44,1
Napięcie zwarcia	[%]	19,1	10,0	10,0
Straty jałowe	[kW]	11,9	10,0	8,0
Straty obciążeniowe	[kW]	752	225	110
Przyrost temperatury	[°C]	95	65	65



### 3.3. Transformatory modernizowane

Jednakże izolacja mieszana znalazła największe zastosowanie do transformatorów modernizowanych. Typowa modernizacja obejmuje wykonanie nowych uzwojeń o zwiększonym przekroju miedzi, większej wytrzymałości na siły dynamiczne od prądów zwarciovych i podwyższonej temperaturze pracy. Przy zachowaniu oryginalnego rdzenia magnetycznego można uzyskać zwiększenie mocy znamionowej od 20% do 70%, jak to potwierdza doświadczenie przedsiębiorstw energetycznych eksploatujących zmodernizowane jednostki od 1991 roku.

Jako przykład modernizacji transformatora o mocy znamionowej 12 MVA należącego do Virginia Power, pokazano na rys. 8 wykres strat całkowitych w funkcji mocy. W wyniku modernizacji uzyskano powiększenie mocy ciągłej do 20 MVA oraz możliwość krótkotrwałej przeciążalności do 40 MVA.



Rys. 8. Zależność strat całkowitych od obciążalności transformatora zmodernizowanego przy zastosowaniu izolacji mieszanej [6]

Decyzja o modernizacji transformatora jest podejmowana w celu:

- Wykorzystania pozostałej wartości uszkodzonego lub nie użytkowanego transformatora.
- Powiększenia mocy systemu przy możliwie najniższych nakładach.
- Dostarczenia dodatkowej mocy w możliwie najkrótszym czasie.
- Zwiększenia krótkotrwałej przeciążalności.

Korzyści wynikające z zastosowania izolacji mieszanej przy modernizacji transformatorów:

- Typowe powiększenie mocy o 50%.
- Typowe zmniejszenie strat obciążeniowych o 20%.
- Zwiększenie elastyczności operacyjnej systemu przesyłowego.

Dotychczas zmodernizowano ponad 100 transformatorów stosując izolację mieszaną, a ponad 50 przedsiębiorstw zakupiło takie transformatory o powiększonej mocy.

Porównanie kosztów modernizacji transformatora o mocy 18 MVA w izolacji mieszanej i celulozowej, do zakupu dodatkowego transformatora o mocy 8,1 MVA:

*Izolacja mieszana powoduje zwiększenie mocy o 8,1 MVA*

Zwykły koszt przewinięcia	\$110,000.–
Koszt przewinięcia z izolacją mieszaną	\$138,000.–
Dodatkowy koszt powiększenia mocy	\$ 28,000.–
Wartość nowego transformatora o mocy 8,1 MVA (przyjmując \$14.5 za kVA bez kosztu instalacji)	\$117,450.–
Zwiększenie mocy o 45% tj. o 8,1 MVA kosztowało	\$ 28,000.–
Oszczędność netto	\$ 89,450.–

*Łączne straty wynosiły 68 kW przed modernizacją, a izolacja mieszana powoduje zmniejszenie łącznych strat o 19%*

Koszt strat przed przebudową (przyjmując \$3,000/kW)	\$204,000.–
Koszt strat przy zastosowaniu izolacji mieszanej (zmniejszenie strat o 19%, tj. do 55 kW).	\$165,000.–
Wartość obniżonych strat	\$ 39,000.–
Oszczędność netto	\$ 11,000.–

#### 4. Podsumowanie

- Izolacja aramidowa została zastosowana do transformatorów początkowo jako izolacja zwojowa, co pozwoliło na podniesienie temperatury punktu gorącego i istotne zwiększenie mocy jednostki przy zachowaniu nie zmienionej wagi i wymiarów.
- Opracowanie technologii produkcji preszpanu aramidowego pozwoliło na wprowadzenie przekładek pomiędzy cewkami i przegród z NOMEX'u. Dzięki temu zapewniono wysoką odporność uzwojenia na wibracje oraz na działanie sił dynamicznych od prądów zwarciovych.
- Izolacja w pełni aramidowa znalazła zastosowanie do transformatorów trakcyjnych. Natomiast tańsza izolacja mieszana jest stosowana do transformatorów przewoźnych i modernizowanych transformatorów sieciowych i przemysłowych.
- Rachunek ekonomiczny wskazuje na opłacalność stosowania izolacji mieszanej, ponieważ pozwala to na zmniejszenie wagi i wymiarów transformatora przewoźnego, albo na zwiększenie mocy ciągłej i przeciążalności transformatorów modernizowanych przy zachowaniu oryginalnego rdzenia.

#### Literatura

- [1] McNutt W. J., Provost R. L., Whearty R. J.: *Thermal Life Evaluation of High Temperature Insulation Systems and Hybrid Insulation Systems in Mineral Oil*, IEEE-Trans. Vol. 11, 1996, p. 1391–199

- [2] IEEE Std. 1276-1997, *IEEE Trial-Use Guide for the Application of High-Temperature Insulation Materials in Liquid-Immersed Power Transformers*, Publ. March, 1998
- [3] *Background Information on High Temperature Insulation for Liquid Immersed Power Transformers*, IEEE PES Transformer Committee, Insulation Life Subcommittee, Working Group on High Temperature Insulation for Liquid Immersed Power Transformers. IEEE Trans. Vol. PWRD-6, No. 4., 1994, p. 1892–1906
- [4] *Redesigned insulation system increases transformer rating*, Electrical World, March, 1991
- [5] **Declercq J., De la Cruz D., Duart J. C., Snyder H., Whearty R. J.:** *Transformer Technology for Mobile Substations*, CIGRE, London Symposium 1999, paper 600–03
- [6] **Provost R. I., Duart J. C.:** *High Temperature Insulation Systems in Transformer Repair*, 4th Bi-Annual Convention of the Electrical Repairers Association, 1998

#### ARAMID INSULATION INCREASES TRANSFORMER CAPACITY

Synthetic (aramid) and hybrid insulation of transformers allows for a higher hot-spot temperature, and also reinforces the winding against dynamic forces induced by short circuit currents. The hybrid insulation consists of the aramid paper used as the wire wrapping, and spacers cut out of the aramid board. Traction transformers are the first candidates for all aramid insulation, whereas the less expensive hybrid insulation is used for mobile and rebuilt transformers. An economic calculation indicates a net saving obtained when the old or damaged transformer is rewound with the use of hybrid insulation.