

Ryszard Malewski<sup>1</sup> Artur Rojek<sup>2</sup> Jean-Claude Duart<sup>3</sup>

## ZASTOSOWANIE IZOLACJI NOMEX-CELULOZA DO TRANSFORMATORÓW PROSTOWNIKOWYCH ZASILAJĄCYCH SIĘ TRAKCYJNĄ

**Streszczenie:** Transformatory do zasilania sieci trakcyjnej w klasycznej izolacji papierowo-olejowej są wymiarowane na maksymalną moc chwilową pobieraną w czasie przejazdu lokomotywy przez odcinek linii zasilanej z jednego transformatora. Chwilowe obciążenie transformatora przekracza kilkakrotnie skuteczną moc pobieraną w ciągu doby, a nawet w ciągu jednej godziny. Stosując izolację mieszaną NOMEX-celuloza powiększa się przeciążalność transformatora, zmniejsza straty biegu jałowego, wymiary, objętość oleju i całkowitą wagę. Nieznaczne zwiększenie strat obciążeniowych jest zawiązką skompensowane przez oszczędność na stratach biegu jałowego, zmniejszenie gabarytów transformatora, a także obniżenie zagrożenia ekologicznego skutkiem zmniejszenia zawartości oleju. Obliczenia wykonano na przykładzie transformatora zasilającego sieć trakcyjną Polskich Kolei Państwowych.

**Słowa kluczowe:** Izolacja aramidowa, Nomex, transformatory prostownikowe, przeciążalność transformatora, straty biegu jałowego, straty obciążeniowe, charakterystyka obciążenia, siły dynamiczne od prądu zwarcia, moc skuteczna, wyższe harmoniczne.

### 1. Wstęp

Polskie Koleje Państwowe wprowadzają zasilanie trakcji elektrycznej z sieci 110 kV na nowych liniach przeznaczonych do szybkich pociągów. W tym celu opracowano konstrukcję, wykonano prototypową serię i wdrożono do eksploatacji transformatory o napięciu 110/2\*1.3/15 kV i mocy odpowiednio 7,3/2x3,15/1 MVA. Ponadto istniejące transformatory o mocy 4.4 MVA na napięciu 15/2\*2.6 kV i 15/2,6 kV, które przekraczają 20 lat służby, są przewidziane do sukcesywnej modernizacji. Część z nich wcześniej zasilala prostowniki rtecioowe.

Zważywszy na znaczną ilość nowych, a także modernizowanych transformatorów przeprowadzono analizę opłacalności zastąpienia konwencjonalnej izolacji papierowo-olejowej przez izolację mieszaną Nomex-celuloza. W artykule przedstawiono specyfikę obciążenia transformatorów zasilających trakcję elektryczną, a także porównano straty biegu jałowego,

<sup>1</sup> Instytut Elektrotechniki, Warszawa

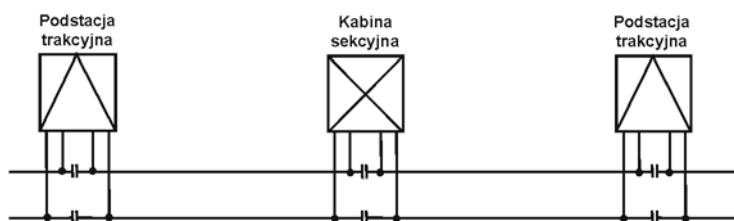
<sup>2</sup> Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, Warszawa

<sup>3</sup> Dupont International, Genewa, Szwajcaria

straty obciążeniowe oraz możliwość zmniejszenia wymiarów przy zachowaniu takiej samej mocy znamionowej. Porównanie takie zostało oparte o obliczenie cieplne transformatora przyjmując dopuszczalną temperaturę punktów gorących izolacji według norm obowiązujących dla izolacji celulozowej i syntetycznej. Izolacja aramidowa jest kilkukrotnie droższa od celulozowej, jednakże dopuszczalny długotrwały przyrost temperatury Nomex'u jest o około 30K wyższy od wartości przyjmowanej dla celulozy. Z tego powodu elementy izolacyjne wykonane z Nomex'u stosuje się tylko w tej części układu izolacyjnego transformatora, która pracuje w najwyższej temperaturze.

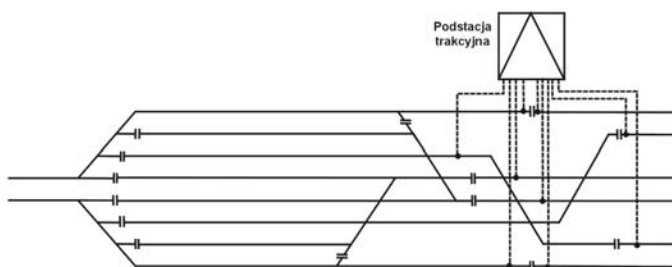
## 2. Szczególne wymagania stawiane transformatorom zasilającym trakcję kolejową

Kolejowa trakcja elektryczna w Polsce jest zasilana napięciem stałym o wartości znamionowej 3 kV. Zespoły prostownikowe są instalowane wzdłuż linii kolejowej i zasilają jej kolejne odcinki, jak to pokazano schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Przykład zasilania odcinka linii kolejowej (podstacje szlakowe)

Pociągi przejeżdżające przez odcinek linii kolejowej obciążają bezpośrednio zespół transformator-prostownik, który pracuje na biegu jałowym jeśli w danej chwili żaden pociąg nie przejeżdża przez ten odcinek. Stąd krzywa obciążenia transformatora wykazuje chwilowe maksima odpowiadające przejazdowi, bądź ruszaniu pociągu.



Rys. 2. Sposób zasilania stacji węzłowej stacji kolejowej (podstacja węzłowa)

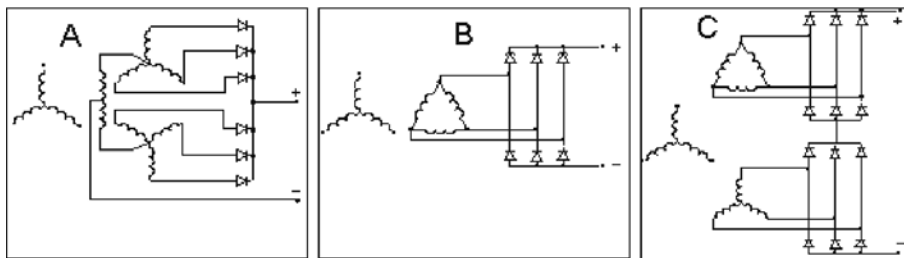
Zasilanie stacji kolejowych, z których wybiega wiele linii pokazano na rysunku 2. Zapewnia to bardziej wyrównany rozkład obciążenia, z uwagi na większą częstość ruszających i przejeżdżających pociągów.

Oprócz nierównomiernego obciążenia, specyfika transformatora prostownikowego polega na takim doborze napięcia zwarcia, aby ograniczać w wartość prądów zwarciovych, a jednocześnie zmniejszać spadki napięcia na transformatorze. Spadki napięcia w całym układzie elektro-trakcyjnym, w skład którego wchodzi transformator prostownikowy, determinują wartość mocy przekazanej do pojazdu trakcyjnego przy zachowaniu określonego poziomu napięcia w punkcie odbioru.

Konstrukcja transformatora prostownikowego ma znaczący wpływ na jakość napięcia wyprostowanego. Bez względu na typ zespołu prostownikowego napięcie wyjściowe oprócz składowej stałej zawiera również składową zmienną. Wartość składowej zmiennej zależy między innymi od układu zespołu prostownikowego. Na rysunku 3 przedstawiono podstawowe układy połączeń zespołów prostownikowych eksploatowanych obecnie w Polsce.

Składowa zmienna napięcia wyjściowego zespołu prostownikowego zawiera wyższe harmoniczne rzędu:  $n = c \cdot p$ , o częstotliwościach:  $f = n \cdot f_1$ . Częstotliwość znamionową napięcia zasilającego oznaczono przez  $f_1$ , a wskaźnik tętnień  $p$  oznacza ilość pulsów przypadającą na jeden okres tego napięcia. Wskaźnik ten wynosi  $p=6$  dla układów na rysunku 3A i 3B, ale  $p=12$  dla układu na rysunku 3C.

Oprócz charakterystycznych wyższych harmonicznych rzędu  $n$ , w napięciu wyprostowanym mogą pojawiać się harmoniczne niecharakterystyczne rzędu:  $n_n = k \cdot \text{const.}$ , o częstotliwościach:  $f_n = n_n \cdot f_1$ . Współczynnik  $k=1$  dla przekształtników jednokierunkowych (Rys. 3A), natomiast  $k=2$  dla przekształtników dwukierunkowych (Rys. 3B i 3C).



**Rys. 3.** Układy połączeń zespołów prostownikowych eksploatowanych na sieci PKP: A) sześciopulsowy jednokierunkowy, B) sześciopulsowy dwukierunkowy, C) dwunastopulsowy dwukierunkowy

Harmoniczne niecharakterystyczne generowane są przez zespół prostownikowy wówczas, gdy występuje asymetria napięcia zasilającego prostownik. Asymetria ta może być spowodowana nierównością przekładni rzeczywistej (uwzględniającej straty obciążeniowe) poszczególnych faz transformatora lub różnych napięć wyjściowych uzwojeń zasilających prostownik w transformatorach trój- i n-uzwojeniowych.

### 3. Obciążalność transformatora zasilającego trakcję kolejową

Przebieg obciążenia zespołu prostownikowego jest wynikiem zasilania przez ten zespół odcinka linii kolejowej, na której odbywa się ruch obecnie eksploatowanych lokomotyw

o mocy 2 i 3 MW. W niedalekiej przyszłości do ruchu zostaną wprowadzone lokomotywy o mocy 6 MW oraz planowany jest wzrost prędkości jazdy na części linii do 160 km/h, a na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK) do 200 km/h.

Wzrost wartości prądu pobieranego przez lokomotywy oraz zwiększenie prędkości jazdy spowoduje wzrost amplitudy wartości obciążeń chwilowych transformatora prostownikowego. Ponadto, nowe lokomotywy o rozruchu energo-elektronicznym pobierają maksymalną moc z układu zasilania w czasie jazdy z określoną prędkością, w przeciwieństwie do obecnie eksploatowanych lokomotyw z rozruchem rezystorowym, które prąd maksymalny pobierają w czasie rozruchu. Zmiana sposobu rozruchu lokomotyw również spowoduje wzrost chwilowych obciążeń transformatorów prostownikowych, szczególnie pracujących w podstacjach szlakowych.

Zespoły prostownikowe zasilające sieć trakcyjną PKP znamionowane są w dwóch klasach przeciążalności prądowej:

1.Klasa III (wg PN-IEC 146-1-1+AC), w której przeciążalność prądowa w czasie wynosi:

- 100 %  $I_{dN}$  trwale;
- 150 %  $I_{dN}$  przez 2 min;
- 200 %  $I_{dN}$  przez 10 s.

2.Klasa VIb (wg IEC 84/57), w której przeciążalność prądowa w czasie wynosi:

- 100 %  $I_{dN}$  trwale;
- 150 %  $I_{dN}$  przez 2 h;
- 300 %  $I_{dN}$  przez 5 min.

Klasę przeciążalności prądowej zespołu prostownikowego złożonego z transformatora, prostownika i dławika katodowego, określa się głównie ze względu na prostownik – element najbardziej podatny na uszkodzenia wskutek przeciążenia. Elementy zespołu prostownikowego wyskalowanego w klasie VIb są to te same urządzenia, które pracują w klasie III, lecz ich prąd znamionowy ( $I_{dN}$ ) określony jest na niższym poziomie. Przykładowo prąd znamionowy prostownika typu D-20/1,6 wchodzącego w skład zespołu typu PD-16/3,3 o III klasie przeciążalności określono na poziomie  $I_{dN}=1600$  A, a te same prostowniki pracujące w zespole typu PD-10/3,3 w VIb klasie przeciążalności mają  $I_{dN}=1000$ A. Powyższe dotyczy również transformatorów. Transformator typu TO3Z-6000/15 o mocy znamionowej 5,850 MVA stanowi element zarówno zespołu prostownikowego PD-16, jak również PD-10.

Zespoły prostownikowe znamionowane w klasie III przeznaczone są do podstacji szlakowych, natomiast zespoły pracujące w klasie VIb do podstacji węzłowych. Ze względu na możliwość przeciążania zespołu prostownikowego znamionowa moc transformatora prostownikowego jest wyższa od znamionowej mocy prostownika (mocy, która została określona przy uwzględnieniu przeciążeń odpowiadających określonej klasie). Stosunek mocy transformatora do mocy prostownika w III klasie przeciążalności wynosi około 1,12 w klasie VIb około 1,75. Wartość tą będzie można obniżyć przez zastosowanie do budowy transformatorów prostownikowych izolacji mieszanej Nomex-celuloza. Izolacja taka dopuszcza wyższą temperaturę uzwojeń i pozwala na przeciążanie transformatora.

Obecnie, w sieci PKP pracują cztery podstawowe typy zespołów prostownikowych: PK-17, PD-12, PD-16 i zasilany napięciem 110 kV PD-17. Znamionowe moce uzwojeń zasilających prostowniki w tych zespołach są następujące:

- 4,40 MVA w zespołach typu PK-17 i PD-12;
- 5,85 MVA w zespołach typu PD-16;
- 6,30 MVA w zespołach typu PD-17.

Kolejową sieć trakcyjną w Polsce zasila ponad 400 podstacji trakcyjnych. Każda z nich jest obciążana w inny sposób. Na przebieg ich obciążenia wpływają między innymi takie czynniki jak:

- usytuowanie podstacji – szlakowa, węzłowa;
- długość zasilanego odcinka sieci trakcyjnej;
- liczba torów;
- częstotliwość kursowania pociągów;
- prędkość pociągów;
- zwolnienia i zatrzymania na odcinku zasilania;
- rodzaj i moc pojazdów trakcyjnych.

Przy tak wielu czynnikach wpływających na charakter obciążenia podstacji trakcyjnej i jej zespołu prostownikowego, bardzo trudno jest dobrać optymalnie moc transformatora prostownikowego mając do dyspozycji trzy wartości mocy. Zasadniczo, dla każdej podstacji powinno się dobierać indywidualnie moc zainstalowanych tam transformatorów, biorąc pod uwagę obecny i planowany charakter obciążenia oraz nietypowe sytuacje ruchowe, występujące w czasie awarii sąsiedniej podstacji lub spiętrzeń ruchowych.

Jednak takie rozwiązanie prowadziłoby do eksploatacji bardzo wielu typów drogich transformatorów (jednostkowe wyroby). Ponadto, rozwiązanie to nie spełniałoby kryterium wymienności urządzeń i wydłużyłoby czas wyłączenia w przypadku uszkodzenia transformatora.

Innym rozwiązaniem jest określenie 10 lub 20 typowych charakterystyk obciążenia zespołów prostownikowych, jakie występują lub mogą wystąpić w układzie elektro-trakcyjnym PKP, a następnie dobranie do nich transformatorów o optymalnej mocy i przeciążalności.

#### 4. Straty biegu jałowego i straty obciążeniowe transformatora

Dobowy przebieg mocy pobieranej przez transformator i prostownik zasilający sieć trakcyjną był rejestrowany przez dłuższy czas na transformatorze pracującym w podstacji szlakowej, aby wyznaczyć wpływ nierównomiernego obciążenia na straty w transformatorze. Zarejestrowany przebieg pobieranej mocy, prądu oraz napięcia przedstawiono na rysunku 4.

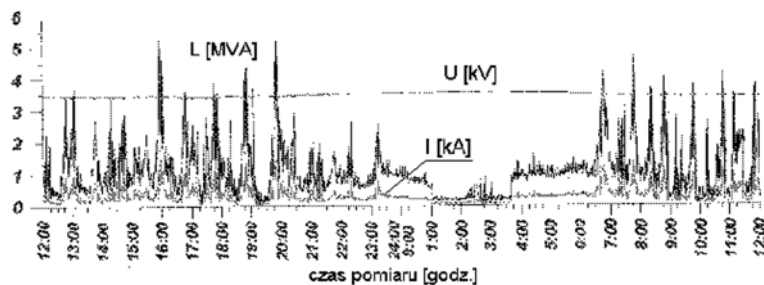
Znając dobową charakterystykę obciążenia przeprowadzono komputerową symulację transformatora o mocy znamionowej 6.06 MVA. Do celów analizy podzielono 24 godzinną charakterystykę na krótsze segmenty. Po powiększeniu, zastąpiono zarejestrowaną krzywą przez prostokątne odcinki o czasie trwania równym 0.02 godziny, tj. około 72 s, pokazane na rysunku 5.

Kolejne wartości mocy pobieranej w każdym okresie 72 s wprowadzono do arkusza obliczeniowego. Dla porównania z zarejestrowaną charakterystyką pokazaną na rysunku 4 wykreślono przebieg obciążenia według danych z arkusza obliczeniowego, przedstawiony na rysunku 6.

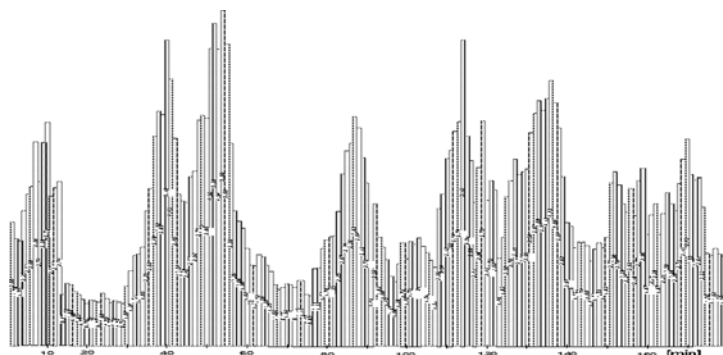
Wartość skuteczną pobieranej mocy wyznaczono według znanej zależności:

$$L_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i^2 \times 0,02)}{n \times 0,02}}$$

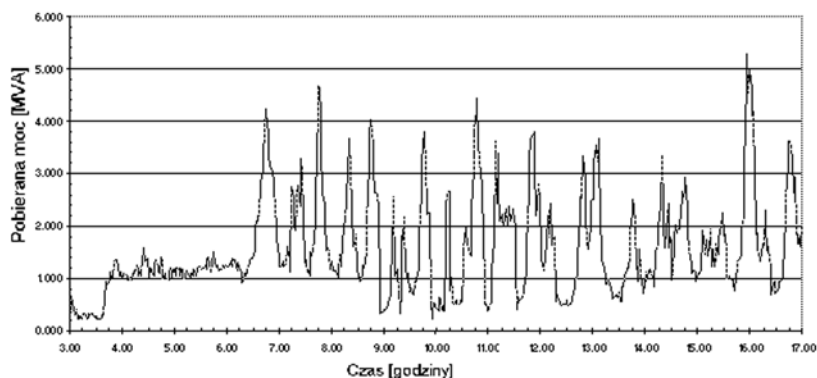
gdzie:  $L_i$  oznacza moc pobieraną w kolejnym segmencie o czasie trwania 0.02 godziny, a  $n$  stanowi całkowitą ilość segmentów w ciągu doby. Stwierdzono podobieństwo pomiędzy niektórymi segmentami charakterystyki obciążenia. Na przykład obciążenie pomiędzy godziną 17:00 i 22:00 przebiegało tak jak pomiędzy 12:00 a 17:00. Dla uproszczenia analizy przyjęto takie same wartości mocy skutecznej w segmentach o analogicznym przebiegu obciążenia.



Rys. 4. Przebieg dobowego obciążenia zespołu prostownikowego z transformatorem 110/2\*1.3/15 kV, 7,3 MVA na szlakowej podstacji trakcyjnej



Rys. 5. Trzygodzinny segment charakterystyki obciążenia, w którym zmierzone wartości aproksymowano prostokątami o czasie trwania około 72 s



Rys. 6. Segment charakterystyki obciążenia wykreślony z danych zawartych w arkuszu obliczeniowym, dla porównania z oryginalnym, zarejestrowanym przebiegiem

Wartość skuteczna mocy pobieranej w ciągu doby wynosi 1,74 MVA, a więc stanowi **jedynie 25%** znamionowej mocy transformatora. Ta moc skuteczna jest szczególnie ważna przy dużej zmienności obciążenia, ponieważ ona decyduje o nagrzewaniu transformatora. Moc ta jest dostarczana przez transformator i ona określa jego wymiary i wagę, a w konsekwencji koszt.

Obciążenie szczytowe występujące podczas przejazdu lokomotywy przez sekcję torów zasilaną z transformatora powoduje dodatkowe nagrzewanie uzwojeń. Aby ograniczyć przyrost temperatury uzwojeń i nie przegrzewać konwencjonalnej izolacji z celulozy, konstruktor ustalał moc znamionową na poziomie najwyższego chwilowego obciążenia i w konsekwencji transformator był przewymiarowany.

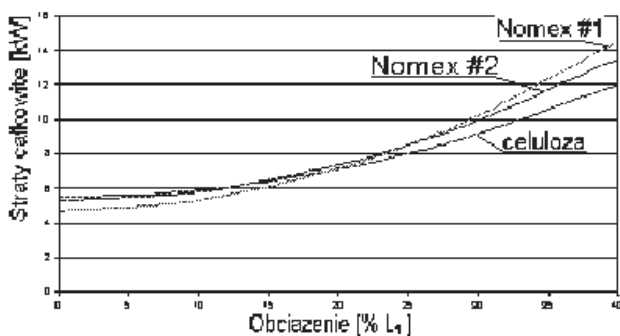
Jednakże w miejscach gdzie izolacja jest narażona na wysoką temperaturę, celulozę można zastąpić materiałem syntetycznym. Preszpan i papier aramidowy pracuje w znacznie wyższej temperaturze i nie ulega rozkładowi bądź przyspieszonemu starzeniu. Izolacja mieszana aramidowo-celulozowa pozwala na istotne zmniejszenie mocy znamionowej, do poziomu zbliżonego do mocy skutecznej pobieranej w cyklu dobowym. W efekcie można uzyskać mniejsze wymiary i wagę transformatora.

Jako przykład takiej oszczędności zaprojektowano transformator prostownikowy zasilający sieć trakcyjną przy zastosowaniu izolacji mieszanej, tak aby można było nim zastąpić konwencjonalny transformator 6,6 MVA. Przedstawiono dwa warianty o różnych stratach (Nomex #1 i Nomex #2), co pozwoli na wybór najkorzystniejszego rozwiązania w zależności od aktualnego kosztu mocy strat.

Izolacja:		celuloza	Nomex #1	Nomex #2
Przyrost temperatury uzwojenia	[K]	55	95	95
Straty biegu jałowego	[kW]	5,466	4,686	5,278
Straty obciążeniowe	[kW]	40,993	61,495	51,660
Straty całkowite	[kW]	46,459	66,181	56,938
Straty całkowite przy 26% obciążenia	[kW]	8,315	8,960	8,869

Tablica wykazuje znacznie wyższe straty dla transformatora o izolacji mieszanej, jeśli przyjąć ciągle obciążenie pełną mocą znamionową wszystkich trzech porównywanych wariantów. Jednakże rzeczywiste obciążenie mocą skuteczną 1,74 MVA stanowi jedynie 26% mocy znamionowej i w takim przypadku straty porównywanych transformatorów są zbliżone. Pełny obraz zależności strat od obciążenia przedstawiono na rysunku 7.

Z tego wykresu wynika, że przy niskim współczynniku obciążenia (<20%), transformator w izolacji mieszanej ma mniejsze straty niż jednostka konwencjonalna. Wynika to z faktu, że straty biegu jałowego są niższe bo transformator w izolacji mieszanej ma mniejszą moc znamionową, a zatem mniejszy rdzeń magnetyczny. Całkowite wymiary i waga transformatora są istotnie zmniejszone dzięki temu, że może on pracować przy znacznych przeciążeniach bez obawy o skrócenie czasu życia technicznego izolacji syntetycznej [1].

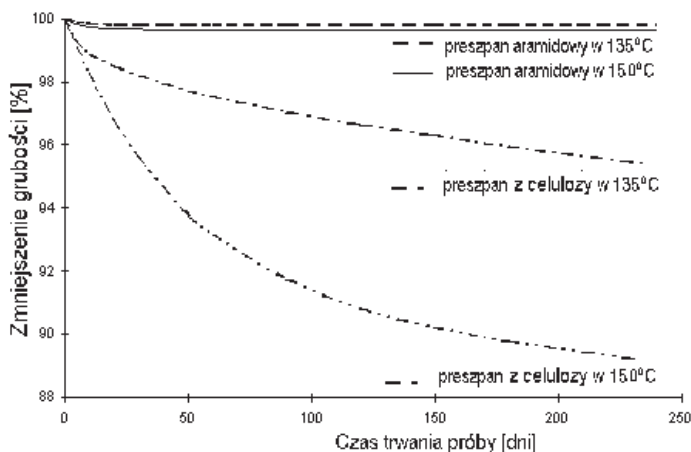


**Rys. 7.** Zależność całkowitych strat transformatora prostownikowego 6,6 MVA w izolacji konwencjonalnej (celuloza) oraz w dwóch wariantach izolacji mieszanej (Nomex #1 i #2) od obciążenia wyrażonego w procentach mocy maksymalnej  $L_n$ .

## 5. Odporność na działanie sił dynamicznych od prądów zwarciovych

Preszpan aramidowy poddany mechanicznym naprężeniom ściskającym jest mocniejszy i bardziej stabilny niż preszpan z celulozy. Wyniki prób [2] wskazują, że podwyższenie temperatury oleju praktycznie nie zmniejsza wytrzymałości na ściskanie materiałów z włókien aramidowych, natomiast powoduje znaczną utratę sprężystości izolacji wykonanej z celulozy. Dzięki temu można ciasno nawijać uzwojenia w izolacji aramidowej bez obawy o ich uszkodzenie przez siły dynamiczne wywołane prądem zwarcia. Wyniki badań porównawczych preszpanu aramidowego oraz z celulozy przedstawia rysunku 8.

Wysoka wytrzymałość mechaniczna izolacji aramidowej jest szczególnie cenna w transformatorach zasilających sieć trakcyjną, ze względu na częste przeciążenia i zwarcia, które wywołują siły dynamiczne mogące odkształcić bądź przesunąć uzwojenia.



**Rys. 8.** Zmniejszenie grubości preszpanu aramidowego i z celulozy, które poddano długotrwałemu naciskowi 10 MPa w temperaturze 105°C oraz 150°C



## 6. Zestawienie transformatorów w izolacji mieszanej NOMEX-celuloza zasilających sieć trakcji elektrycznej w Chinach

Izolacja mieszana Nomex-celuloza została zastosowana do transformatorów zasilających trakcję kolejową w Chinach, z uwagi na oszczędność energii i mniejsze nakłady inwestycyjne przy instalowaniu transformatorów o mniejszych wymiarach i wadze. Poniżej zestawienie ilości takich transformatorów.

Rok	Ilość	Napięcie	Moc znamion.	Straty obciążen.	Straty biegu jałowego
		[kV]	[MVA]	[kW]	[kW]
1997	2	110	10	64,0	11,5
1998	4	110	20	126,0	23,0
1998	2	110	25	150,0	27,2

$I_n$	T
[%]	[godz.]
60	18.0
120	1.8
200	0.2

## 7. Wnioski

- Moc skuteczna dostarczana w ciągu doby przez transformator prostownikowy zasilający sieć trakcyjną jest kilkakrotnie mniejsza od mocy chwilowej. Moc ta jest równa znamionowej, jeśli zastosowano konwencjonalną izolację z celulozy.
- W konsekwencji transformator taki rozprasza w sposób ciągły znaczne straty biegu jałowego, które wzrastają z wielkością transformatora i jego mocą znamionową.
- Zastosowanie izolacji mieszanej: z materiału syntetycznego (Nomex), a także celulozy tam gdzie nie występują przegrzania i naprężenia dynamiczne, pozwala na zmniejszenie mocy znamionowej, wymiarów i wagi, oraz strat biegu jałowego a także na polepszenie wytrzymałości mechanicznej uzwojeń.

## 8. Literatura

- [1] **Malewski, R., Ferrari, S., Duart, J.C.:** *Aramidowa i Mieszana Izolacja Zwiększa Obciążalność Transformatorów*, VII Sympozjum AGH: Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych WN, Zakopane, październik, 1999
- [2] **Schneider, E.:** *Static compression of NOMEX®*, Weidmann Final Report from Investigations SN/HI-em, 1991/1992