

Ewelina LITWINOWICZ

Politechnika Śląska
Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki

WPŁYW PARAMETRÓW PRASOWANIA

NA WSPÓŁCZYNNIK STRAT DIELEKTRYCZNYCH PŁYT WARSTWOWYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań opartych na planowaniu czynnikowym typu 2^j i analizie wariancji płyt warstwowych papierowo-fenolowych. Sprawdzono istotność wpływu temperatury i ciśnienia prasowania oraz zawartości żywicy w nośniku na wartość $\tan \delta$ tych płyt.

Wstęp

Wobec stałego dużego zapotrzebowania na materiały elektroizolacyjne z tworzyw termoutwardzalnych, przy często zmieniających się własnościach stosowanych żywic syntetycznych, nie jest rzeczą obojętną, jakim nakładem kosztów i czasu zostaną rozpoznane własności elektroizolacyjne gotowego wyrobu. Badania dotyczące własności płyt warstwowych prasowanych są przeważnie badaniami określającymi wpływ pewnych parametrów na właściwości i cechy badanego materiału.

Liczba parametrów, które dalej nazywać będziemy czynnikami, wpływających na własności elektroizolacyjne i mechaniczne uzyskanego wyrobu jest bardzo duża. Mogą to być parametry zastosowanych surowców, parametry powlekania (a więc etap otrzymywania półproduktu) lub też parametry prasowania. Wymieniono tu tylko trzy podstawowe etapy procesu technologicznego produkcji płyt warstwowych. Do zmiennych niezależnych należą również takie czynniki, jak sposób i czas przechowywania półproduktu, wpływ pracownika i obsługiwanego przez niego urządzenia i wiele innych.

Znaczna liczba oraz losowy charakter czynników wpływających na jakość wyrobu determinują konieczność ograniczenia ich ilości, o ile to tylko możliwe, do najbardziej istotnych czynników technologicznych. Tradycyjna metoda przeprowadzania doświadczeń polega na badaniu kolejno skutków działania jednego czynnika przy ustalonych pozostałych. Aby uzyskać miarodajne wyniki wymaga to, nawet już przy niewielkiej liczbie zmiennych, dużej liczby prób i replikacji. W dziedzinie technologii nawet w warunkach laboratoryjnego wytwarzania trudno jest zapewnić niezmienną wartość warunków do-

świadczenia, a więc uniknąć wpływu czynników niekontrolowanych na wynik końcowy. Korzystne jest więc wprowadzenie statystycznych metod planowania doświadczeń opartych o analizę wariancji.

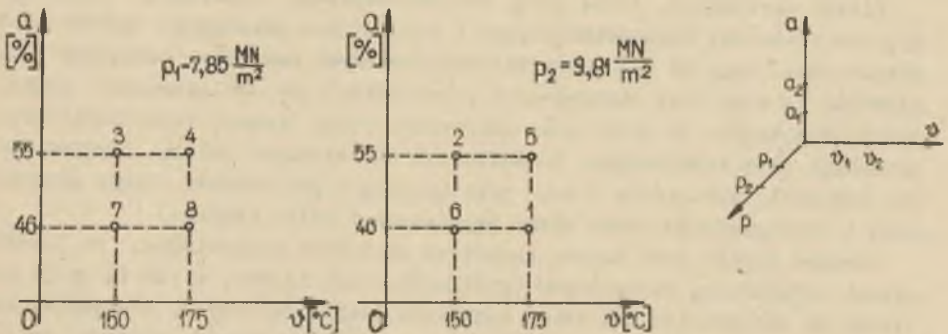
W doświadczeniach typu czynnikowego, w odróżnieniu od metod tradycyjnych, można zbadać równocześnie wpływ kilku wybranych parametrów na tle niekontrolowanych czynników.

Przeprowadzone badania

Celem badań była ocena istotności wpływu trzech czynników: ciśnienia prasowania, temperatury prasowania oraz zawartości żywicy w nośniku na stratność dielektryczną płyt warstwowych papierowo-fenolowych PcFE i sprawdzenie możliwości wyeliminowania z dalszych badań ciśnienia jako zmiennej niezależnej.

Badania te wykonano w oparciu o układ czynnikowy typu 2^3 . Poziomy zostały dobrane tak, aby efekty ich działania oraz współdziałań były łatwo rozróżnialne. Analiza układu czynnikowego typu 2^n stanowi szczególny przypadek ogólnej analizy czynnikowej [2]. W badaniach eliminacyjnych i wstępnych, jeżeli celem badań jest jedynie ustalenie istotności działania jakiegoś czynnika, co ma miejsce w naszym przypadku, układ czynnikowy typu 2^n jest szczególnie wygodny, a analizę wariancji można przeprowadzić w sposób bardzo prosty.

Plan przyjętego doświadczenia czynnikowego (rys. 1) był całkowicie zrównoważony, przy czym kolejność wykonania poszczególnych prób była ustalona losowo na podstawie tablicy liczb losowych [5].



Rys. 1. Plan badań czynnikowych

1, 2, ..., 8 - kolejność losowa wykonania prób; a - zawartość żywicy w nośniku, t - temperatura prasowania, p - ciśnienie prasowania

Obliczenie efektów głównych i interakcji oraz odpowiadających sum kwadratów wykonano przy pomocy metody Yatesa [2]. Jak to wynika z planu doświadczeń czynnikowych, przedstawionego na rys. 1, przyjęto dla jednostkowego ciśnienia prasowania dwie wartości: $7,85 \text{ MN/m}^2$ oraz $9,81 \text{ MN/m}^2$.

Ciśnienie jednostkowe $7,85 \text{ MN/m}^2$, przyjęte jako poziom niższy, jest zalecane dla produkcji płyt PcFE. Ciśnienie $9,81 \text{ MN/m}^2$ przyjęto jako poziom wyższy tego czynnika. Zwiększenie ciśnienia jeszcze o $1,96 - 2,94 \text{ MN/m}^2$ w małym już stopniu polepsza własności tworzywa. Temperaturę prasowania przyjęto na tej samej zasadzie, a mianowicie poziom niższy $t_1 = 150^\circ\text{C}$ wybrano z zalecanego zakresu temperaturowego dla tych płyt (w literaturze $150-160^\circ\text{C}$), zaś poziom wyższy przyjęto równy 175°C . Temperatura prasowania jeszcze wyższa nie ma już praktycznego sensu ze względu na wytrzymałość termiczną nośnika.

Ostatnim parametrem przyjętym w eksperymencie jako zmienna niezależna była zawartość żywicy w nośniku, którą ustalono na poziomie niższym równą 46% a na poziomie wyższym - 55%. Półprodukt uzyskano w skali technicznej na bazie standardowej żywicy rezolowej K-4. Nośnikiem był papier elektroizolacyjny o gramaturze 80 g/m^2 . Próby przeprowadzono w skali półtechnicznej na 250-tonowej prasie hydraulicznej z półkami ogrzewanymi elektrycznie, zaś medium chłodzącym była woda.

Czas prasowania przyjęto stały; wynosił on $t = 60 \text{ min}$. Prasowano płyty o grubości 3 mm o wymiarach $500 \times 500 \text{ mm}$, które po obcięciu brzegów i przygotowaniu próbek poddano klimatyzacji zgodnie z PN-73/E-29080 "Płyty warstwowe fenolowe" pkt 5.4.d. i pomierzono współczynnik strat dielektrycznych zgodnie z PN-69/E-04403 "Pomiary przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych" przy częstotliwości 50 Hz. Ponadto na tych samych próbkach bez dodatkowej klimatyzacji wykonano pomiary $\text{tg} \delta$ na automatycznym mostku: typu E 315A przy częstotliwości $f = 1 \text{ kHz}$.

Wartości średnie z pomiarów, dla poszczególnych kombinacji czynników, uszeregowane w "kolejności standardowej", przedstawiono w kolumnach 3 tabelic I i II.

Analiza wyników badań

Tablice I i II zawierają rachunek analizy wariancyjnej dla układu czynnikowego typu 2^3 . Obliczono średni wpływ poszczególnych czynników w kolumnie 7. Znak dodatni wpływu czynnika wskazuje, że wynik oznaczony w kolumnie 2 wpisaniem symbolu czynnika był wyższy niż wynik eksperymentu oznaczony brakiem symbolu i odwrotnie. Przykładowo: kombinacja czynników oznaczona w kolumnie 2 jako ψp mówi, że próbę wykonywano przy wyższym poziomie czynników ψ oraz p , zaś nie oznaczona tu zawartość żywicy w nośniku a była w tej próbie na poziomie niższym. W kolumnie 8 obliczono sumę kwadratów dla efektów głównych: zawartości żywicy w nośniku - a, tem-

Tabela I

| Rachunek analizy wariancyjnej dla wyników tgδ przy 50 Hz | | | | | | | | | | Test istotności dla wyników tgδ przy 50 Hz | | | |
|--|-----------------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|------------------------|------------------|------------------------|--|----------------------------|---------------------------|--|
| Kolej- ność losowa prób | Kombi- nacja czyn- ników | Wartoś- ci śred- nie wy- ników pomia- rów | 1 suma i róż- nica | 2 suma i róż- nica | Wpływ całko- wity | Wpływ średni | Suma kwadra- tów | Efekt (wpływ) | Suma kwadra- tów | f Stop- nie swob. | Stosunek F ₀ | Poziom istot- ności | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | a | 0,05330 | 1 | 969,09 | 0,05 | |
| 7 | (1) | 0,150 | 0,588 | 1,665 | 3,323 | | | ϕ | 0,16445 | 1 | 2990,0 | 0,05 | |
| 3 | a | 0,438 | 1,077 | 1,658 | 0,653 | 0,16320 | 0,0533 | aϕ | 0,00515 | 1 | 93,63 | - | |
| 8 | ϕ | 0,440 | 0,500 | 0,485 | 1,147 | 0,28670 | 0,16445 | p | 0,000006 | 1 | 9,17 | - | |
| 4 | aϕ | 0,637 | 1,158 | 0,168 | -0,203 | -0,05070 | 0,00515 | ap | 0,01256 | 1 | 228,36 | 0,05 | |
| 6 | p | 0,180 | 0,288 | 0,489 | -0,007 | -0,00170 | 0,000006 | ϕp | 0,00357 | 1 | 64,90 | - | |
| 2 | ap | 0,320 | 0,197 | 0,658 | -0,317 | -0,07920 | 0,01256 | "błąd" | 0,000055 | 1 | | | |
| 1 | ϕp | 0,565 | 0,140 | -0,091 | 0,169 | 0,04225 | 0,00357 | | | | | | |
| 5 | aϕp | 0,593 | 0,028 | -0,112 | -0,021 | -0,00525 | 0,000055 | | | | | | |
| $F_{0,01;1;1} = 4052$ | | | | | | | | | | | | | |
| $F_{0,05;1;1} = 161$ | | | | | | | | | | | | | |
| $\sum x = 3,323$ | | | | | | | | | | | | | |

Tablica II

| Rachunek analizy warianowej dla wyników tgδ przy 1 kHz | | | | | | | Test istotności dla wyników tgδ przy 1 kHz | | | | | |
|--|----------------------|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|--|---------------|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Kolejność losowa prób | Kombinacja czynników | Wartości średnie wyników pomiarów | 1 suma i różnica | 2 suma i różnica | Wpływ całkowity | Wpływ średni | Suma kwadratów | Efekt (wpływ) | Suma kwadratów | f Stopnie swob. | Stosunek F _o | Poziom istotności |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | | | |
| 7 | (1) | 0,04760 | 0,20183 | 0,58016 | 1,22834 | | | a | 0,01791 | 1 | 8,955 | 0,05 |
| 3 | a | 0,15423 | 0,37833 | 0,64818 | 0,37852 | 0,0946 | 0,01791 | ∅ | 0,02238 | 1 | 11,190 | 0,05 |
| 8 | ∅ | 0,11353 | 0,20078 | 0,25790 | 0,42312 | 0,1057 | 0,02238 | p | 0,000578 | 1 | 3,460 | - |
| 4 | a∅ | 0,26480 | 0,44740 | 0,12062 | -0,09038 | -0,0226 | 0,00102 | "błąd" | | | | |
| 6 | p | 0,03648 | 0,10663 | 0,17650 | 0,06802 | 0,0170 | 0,000578 | (a∅; ∅p; a∅p) | 0,00200 | 4 | | |
| 2 | ap | 0,16430 | 0,15127 | 0,24662 | -0,13728 | -0,0343 | 0,002356 | | | | | |
| 1 | ∅p | 0,22730 | 0,12782 | 0,04464 | 0,07012 | 0,0175 | 0,000614 | | | | | |
| 5 | a∅p | 0,22010 | -0,0072 | -0,13502 | -0,17966 | -0,0449 | 0,004035 | | | | | |
| $\sum x = 1,22834$ | | | | | | | | | | | | |
| $F_{0,01;1;4} = 21,2$ $F_{0,05;1;4} = 7,71$ | | | | | | | | | | | | |

peratury prasowania - ψ , ciśnienia prasowania - p oraz interakcji $a\psi$, ap , ψp , $a\psi p$. Istotność odpowiednich sum kwadratów sprawdzono za pomocą testu F. Jako oszacowanie wariancji błędu zastosowano sumę kwadratów współdziałania najwyższego rzędu oraz mniejszych, co zaznaczono w tabelach, otrzymując test F bardziej czuły.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń oraz testu istotności nasuwają się następujące uwagi.

Przeprowadzone obliczenia i test istotności dla wyników $tg\delta$ przy 50 Hz i 1 kHz zgodnie stwierdzają, że przyjęty przedział zmian ciśnienia prasowania nie wpływa w istotny sposób na wielkość współczynnika strat dielektrycznych, z ryzykiem popełnienia błędu mniejszym niż 1%. Średni wpływ efektu p oraz odpowiadająca mu suma kwadratów jest znacznie mniejsza od wpływu współdziałania najwyższego rzędu.

Nieistotność wpływu ciśnienia prasowania na wielkość współczynnika strat dielektrycznych w badanym zakresie 7,85-9,81 MN/m² potwierdzają pośrednio dane literaturowe. Zmiana nasiąkliwości wodą w funkcji ciśnienia prasowania dla laminatów na nośniku papierowym przy dwóch zawartościach żywicy, przedstawiona na rys. V-40 [4] oraz na nośniku tkaninowym rys.183 [1], w zakresie ciśnień od około 6,87 MN/m² wzwyż jest bardzo mała. Duże zmiany występują przy ciśnieniach rzędu 0,98-4,9 MN/m². Badania $tg\delta$, wykonane na próbkach prasowanych przy dwóch różnych ciśnieniach - 8,83 i 9,81 MN/m² [3] również nie stwierdziły istotności wpływu ciśnienia na uzyskane wyniki.

Pozostałe wpływy główne, tzn. temperatura prasowania oraz zawartość żywicy w nośniku, są dodatnie i istotne na poziomie 0,05, przy czym wpływ temperatury jest tu najwyraźniejszy. Nie stwierdzono istotności wpływu współdziałań $a\psi$ oraz ψp przy tak oszacowanych wariancjach błędu. Jeżeli jako oszacowanie wariancji błędu zastosujemy jedynie sumę kwadratów współdziałania najwyższego rzędu (tabela 1), to istotny staje się na poziomie 0,05 wpływ ap , dla którego $F^0 = 228,36 > F_{0,05} 1:1 = 161$. Zmniejszenie zawartości żywicy zwiększa chłonność wody laminatu, co z kolei powoduje konieczność stosowania wyższych ciśnień przy prasowaniu. Ujemny znak średniego wpływu i wpływu całkowitego współdziałań ap , $a\psi$, $a\psi p$ wskazuje, że przy wyższych wartościach wymienionych kombinacji czynników otrzymamy mniejsze wartości $tg\delta$.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastosowana metodyka badań płyt warstwowych daje pożądane efekty w rozpoznaniu współdziałań parametrów technologicznych na określone właściwości wyrobu przy bardzo małej liczbie eksperymentów.

LITERATURA

- [1] Barg E.I.: Technologia tworzyw sztucznych, PWT, Warszawa 1957.
- [2] Oktaba W.: Elementy statystyki matematycznej i metodyka doświadczalności, PWN, Warszawa 1974.
- [3] Podgórska H.: Płyty elektroizolacyjne papierowo-fenolowe typu Hp 2061,5 wg DIN 7735 ... Praca badawcza ZTS "Erg" Gliwice 1974.
- [4] Sulima T., Dobraczyński A., Chudzyński S.: Tworzywa sztuczne w elektrotechnice, PWT, Warszawa 1960.
- [5] Vielrose E.: Zadania ze statystyki matematycznej, PWN, Warszawa 1956.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ СЛОИСТЫХ ПЛИТ

Р е з ю м е

Представлены результаты исследований бумажно-феноловых слоистых плит, на основании факторного планирования типа 2^3 и дисперсионного анализа. Проверена существенность влияния температуры, давления прессования и содержания смолы в носителе на значение $tg\delta$ исследуемых плит.

INFLUENCE OF PRESSING PARAMETERS ON THE LOSS COEFFICIENT
IN DIELECTRIC LAMINAR PLATES

S u m m a r y

Investigation results based on factor planning of the 2^3 type and variance analysis of paper and phenol laminar plates have been presented in the paper. Significance of pressing pressure and temperature have been checked as well as the resin content in the carrier as affecting the $tg\delta$ value of the plates.