

Streszczenie

Obecne, jak i formułowane na przyszłość, wciąż rosnące wymagania dotyczące parametrów układów izolacji elektrycznej, wynikają ze wzrostu oczekiwań odnośnie ich długoterminowej niezawodności, a także wzrostu wartości mocy i napięć znamionowych urządzeń oraz sieci elektrycznych. Powoduje to konieczność prowadzenia badań dla opracowania i wdrożenia do stosowania w przemyśle elektrotechnicznym nowych materiałów elektroizolacyjnych lub optymalizacji właściwości materiałów już stosowanych. Celem badań, których rezultaty opisano w rozprawie, było zbadanie wpływu wybranych nanowypełniaczy nieorganicznych na właściwości dielektryczne kompozytów epoksydowych oraz weryfikacja możliwości zastosowania elektroforezy dla uzyskania wysokonapięciowych, izolacyjnych materiałów kompozytowych, należących do grupy *funkcjonalnych materiałów gradientowych* FGM.

Zastosowaną metodykę badań oparto o weryfikację eksperymentalną i analizę wyników pomiarów laboratoryjnych wytworzonych próbek materiałów nanokompozytowych jednorodnych i niejednorodnych, o różnym rodzaju i zawartości nanowypełniaczy.

W pierwszej grupie *nanokompozytów jednorodnych* zbadano wpływ nanocząstek TiO_2 , SiO_2 oraz Al_2O_3 o różnych rozmiarach i procentowych zawartościach wagowych (0,5 wt%, 1 wt%, 3 wt% i 5 wt%). Próbkę poddano procesom utwardzania i starzenia termicznego (60°C, 130°C i 180°C) w określonych cyklach czasowych. Na każdym etapie badań mierzono wybrane parametry dielektryczne (przenikalność elektryczną względną ϵ_r , współczynnik strat dielektrycznych $\tan\delta$ oraz rezystywność skrośną ρ_v). Dodatkowo, przed i po każdym cyklu dokonano detekcji wyładowań niezupełnych (wnz) oraz wykonano testy wytrzymałości elektrycznej. Uzyskane rezultaty wykazały, że obecność nanocząstek znacząco wpływa na właściwości kompozytów epoksydowych, pozwalając na zależną od wartości wt% modyfikację ich parametrów. Jest to efektem złożoności różnych procesów fizykalnych zachodzących w obszarze interfazy *nanocząstka-polimer bazowy*, których wpływ na właściwości dielektryczne może być wzajemnie przeciwny.

Dla wytworzenia *nanokompozytów niejednorodnych*, o gradientowo modyfikowanych parametrach, zastosowano metodę elektroforetycznego wymuszenia przesunięcia cząstek nanowypełniacza w bazowej żywicy epoksydowej. Procesy transportu nanocząstek stymulowano za pomocą zewnętrznego pola elektrycznego E , podczas fazy płynnej oraz na etapie żelowania mieszaniny kompozytowej utwardzanej w formach o określonych kształtach. Badano próbki z różnymi wypełniaczami (TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , BaTiO_3), o różnych rozmiarach nanocząstek, przy dwóch konfiguracjach elektrod (*płaska-płaska* oraz *ostrze-płaska*) oraz przy trzech wartościach średnich natężenia pola E (125 V/mm, 250 V/mm, 500 V/mm). Wyniki badań wykazały, że elektroforeza może być zastosowana jako narzędzie dla wytworzenia nanokompozytu epoksydowego typu FGM z wymuszonym gradientem przenikalności elektrycznej.

Uzyskane rezultaty badań potwierdziły duży potencjał zastosowań nanokompozytów epoksydowych w obszarze aplikacji wysokonapięciowych w projektach wymagających użycia materiałów o jednorodnej lub quasi-jednorodnej strukturze bazowej, ale o różnych właściwościach dielektrycznych, w tym również materiałów typu FGM. Wpływ danego nanowypełniacza na właściwości kompozytu epoksydowego nie jest oczywisty, bowiem jest on warunkowany wieloma parametrami, np. jego zawartością wt% i rozmiarem nanocząstek.

Anna Dąbka
03.12.2024

Abstract

The current and future ever-increasing requirements regarding the parameters of electrical insulation systems stem from growing expectations for their long-term reliability, as well as the increase in power and rated voltages of devices and electrical networks. This results in the need for research aimed at developing and implementing new electrical insulating materials in the electrotechnical industry or optimizing the properties of materials already in use. The purpose of the research, the results of which are described in this dissertation, was to examine the effect of selected inorganic nanofillers on the dielectric properties of epoxy composites and to verify the feasibility of using electrophoresis to obtain high-voltage insulating composite materials belonging to the group of *functional gradient materials* FGM.

The research methodology was based on experimental verification and the analysis of laboratory measurements of produced samples of both homogeneous and heterogeneous nanocomposite materials, incorporating different types and contents of nanofillers.

In the first group, *homogeneous nanocomposites*, the effect of TiO_2 , SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles of various sizes and weight percentages (0.5 wt%, 1 wt%, 3 wt%, and 5 wt%) was examined. The samples were subjected to curing and thermal aging processes (60°C, 130°C, and 180°C) in specified time cycles. At each stage of the research, selected dielectric parameters were measured (relative permittivity ϵ_r , dielectric loss factor $\text{tg}\delta$, and volume resistivity ρ_v). Additionally, partial discharges (PD) detection was performed before and after each cycle, and electrical strength tests were conducted. The results obtained indicated that the presence of nanoparticles significantly affects the properties of epoxy composites, allowing for the modification of their parameters depending on the wt% value. This is due to the complexity of various physical processes occurring in the *nanoparticle-base polymer* interphase, the influence of which on dielectric properties can be mutually divergent.

To produce *non-homogeneous nanocomposites* with gradient-modified parameters, the method of electrophoretic forcing of nanofiller particles in the base epoxy resin was applied. The nanoparticle transport processes were stimulated using an external electric field during the gelation phase of the composite mixture cured in molds of specific shapes. Samples with different fillers (TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , BaTiO_3), with varied nanoparticle sizes, two electrode configurations (*plane-plane* and *curvature-plane*), and three values of average field stress E (125 V/mm, 250 V/mm, and 500 V/mm) were tested. The research results showed that electrophoresis can be utilized as a tool for producing FGM-type epoxy nanocomposites with a forced gradient of electrical permittivity.

The research results confirmed the significant potential of epoxy nanocomposites for high-voltage applications, particularly in projects requiring materials with a homogeneous or quasi-homogeneous base structure but with different dielectric properties, including FGM-type materials. The impact of a specific nanofiller on the properties of an epoxy composite is complex and influenced by numerous factors, such as its wt% content and the size of the nanoparticles.

Anna Dąb
03.12.2024