

Spis treści

| | |
|--|-----|
| Wykaz oznaczeń i symboli | 5 |
| Wykaz skrótów i nazw | 9 |
| 1. Wstęp | 11 |
| Literatura | 14 |
| 2. Morfologia warstwowych układów izolacyjnych | 17 |
| 2.1. Budowa warstwowej izolacji kompozytowej | 17 |
| 2.1.1. Zarys procesów sieciowania | 17 |
| 2.1.2. Stan szklisty | 18 |
| 2.1.3. Budowa morfologiczna i struktura siatki przestrzennej | 19 |
| 2.1.4. Morfologia napełnionych kompozytów izolacyjnych | 22 |
| 2.1.5. Morfologia izolacji warstwowej maszyn WN | 27 |
| 2.2. Budowa warstwowej izolacji papierowo-olejowej | 30 |
| 2.3. Przemiany morfologiczne w procesie starzenia | 34 |
| 2.3.1. Wpływ starzenia na morfologię izolacji kompozytowej | 34 |
| 2.3.2. Wpływ starzenia na morfologię izolacji papierowo-olejowej | 39 |
| Literatura | 46 |
| 3. Podstawy przewodnictwa stałoprądowego polimerów | 51 |
| Literatura | 63 |
| 4. Przewodnictwo warstwowej izolacji kompozytowej | 67 |
| 4.1. Wstęp | 67 |
| 4.2. Wpływ fizykochemicznej struktury matrycy polimerowej na przewodnictwo | 68 |
| 4.3. Wpływ granicy faz na przewodnictwo kompozytów izolacyjnych | 81 |
| 4.4. Wpływ elektrod na przewodnictwo kompozytów izolacyjnych | 89 |
| Literatura | 96 |
| 5. Przewodnictwo izolacji papierowo-olejowej | 101 |
| 5.1. Przewodnictwo kanału olejowego | 101 |
| 5.2. Przewodnictwo impregnowanego preszpanu | 104 |
| Literatura | 111 |
| 6. Podstawy relaksacji dielektrycznej polimerów | 113 |
| 6.1. Procesy relaksacji dielektrycznej w polimerach | 113 |
| 6.2. Relaksacja na granicy faz układów izolacyjnych | 123 |
| 6.3. Modele relaksacji w układach izolacyjnych | 126 |
| Literatura | 129 |
| 7. Relaksacja dielektryczna izolacji kompozytowej | 131 |
| 7.1. Relaksacja dielektryczna w obszarze przejścia fazowego | 131 |

| | |
|---|-----|
| 7.2. Fenomenologiczny model relaksacji w izolacji kompozytowej | 137 |
| 7.3. Odpowiedź dielektryczna izolacji kompozytowej maszyn | 147 |
| Literatura | 150 |
| 8. Wpływ czynników starzeniowych na relaksację izolacji kompozytowej | 153 |
| 8.1. Wpływ termicznego starzenia na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości .. | 153 |
| 8.2. Wpływ termicznego starzenia na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie czasu | 163 |
| 8.3. Wpływ wilgoci na relaksację dielektryczną w izolacji warstwowej | 167 |
| 8.4. Wpływ zmiennych naprężeń mechanicznych na relaksację dielektryczną izolacji „epoksy–mika–szkło” | 176 |
| 8.5. Relaksacja izolacji maszyn WN w pomiarach eksploatacyjnych | 179 |
| 8.5.1. Wpływ różnych warunków eksploatacji na odpowiedź dielektryczną izolacji typu „epoksy–mika–szkło” | 179 |
| 8.5.2. Wpływ technologii wykonania na zmiany relaksacji podczas eksploatacji | 186 |
| Literatura | 187 |
| 9. Relaksacja dielektryczna izolacji papierowo-olejowej | 191 |
| 9.1. Schemat elektryczny izolacji papierowo-olejowej | 191 |
| 9.2. Procesy relaksacyjne w kanale olejowym | 193 |
| 9.3. Procesy relaksacyjne w impregnowanym preszpanie | 202 |
| 9.4. Procesy relaksacyjne w warstwowej izolacji papierowo-olejowej | 210 |
| 9.4.1. Wprowadzenie | 210 |
| 9.4.2. Odpowiedź dielektryczna warstwowej izolacji papierowo-olejowej w dziedzinie czasu | 212 |
| 9.4.3. Odpowiedź dielektryczna warstwowej izolacji papierowo-olejowej w dziedzinie częstotliwości | 217 |
| Literatura | 224 |
| 10. Procesy nieliniowe w izolacji warstwowej | 227 |
| 10.1. Procesy nieliniowe w izolacji kompozytowej | 227 |
| 10.2. Procesy nieliniowe w izolacji papierowo-olejowej | 235 |
| Literatura | 237 |
| Summary | 239 |
| Zusammenfassung | 241 |

Wstęp

Rozwój warstwowych układów izolacyjnych opartych na kompozytach polimerów termoutwardzalnych jest doskonałym przykładem pewnej prawidłowości, która dotyczy niektórych dziedzin nauki i techniki o dużym nasyceniu chemiczną technologią tworzyw sztucznych. Polega ona na tym, że bardzo często opracowane doświadczalnie technologie znacznie wyprzedzają dokładne rozpoznanie i teoretyczny opis zjawisk. Warto przypomnieć, że pierwsze wzmocnione laminaty żywiczne wykonano na przełomie lat 30. i 40. ubiegłego wieku w postaci popularnego tekstolitu. Już w latach 50. stosowano izolację typu szelak–mika. Na przełomie lat 50. i 60. wykorzystano żywice epoksydowe. W 1964 roku firma Alstom ze Szwajcarii opracowała warstwowy układ izolacyjny Micadur[®] [8]. Jest on nadal stosowany i rozwijany [18, 23]. Znacznie później opisano kompletną strukturę przestrzenną żywicy epoksydowej i typy reakcji sieciujących [3, 17, 24]. Na przełomie lat 70. i 80. ubiegłego wieku zaczęto teoretycznie analizować zjawiska zachodzące w interfacie, w tym zagadnienie adhezji między żywicą a napełniaczem oraz korozji chemicznej wzmocnienia [2, 4, 12, 15]. Obecnie jest co najmniej kilka teorii dotyczących ich natury, podobnie, jak wiele jest koncepcji teoretycznych dotyczących fizyki polimerów usieciowanych, w tym procesów relaksacji fizycznej, której rola w trwałości układu izolacyjnego jest istotna [22].

Podobne prawidłowości dotyczą również stosowanego do wysokonapięciowej izolacji urządzeń elektrycznych papieru lub preszpanu impregnowanego olejem mineralnym. Ten typ izolacji zaczęto używać kilkadziesiąt lat wcześniej niż kompozyty termoutwardzalne, bo od przełomu XIX i XX wieku. Firma Weidmann produkuje preszpan i papier elektrotechniczny w niezmiennie praktycznie postaci od przeszło sześćdziesięciu lat, a wydane przez nią w 1979 i 1987 roku podręczniki autorstwa Mosera i Dahindena „Transformerboard” oraz „Transformerboard II” [19] nie straciły aktualności do dziś. Warstwowy układ papierowo-olejowy nadal jest podstawowym systemem izolacyjnym stosowanym w transformatorach energetycznych, łącząc dobre właściwości elektryczne i cieplne z łatwą technologią wytwarzania i relatywnie niską ceną produktu. Dokonane w ostatnich dwudziestu latach dokładniejsze rozpoznanie termodynamiki migracji wody w układzie papierowo-olejowym, procesów elektryzacji, problematyki starzenia czy też fizyki zjawisk elektrycznych i relaksacyjnych pozwala optymalizować geometrię izolacji i stwarza perspektywę używania tego systemu przez kolejne kilkadziesiąt lat [1, 7, 20, 21].

W obu rodzajach warstwowych systemów izolacyjnych podczas eksploatacji występują procesy starzeniowe, których natura jest odmienna dla kompozytów termoutwardzalnych i układu papierowo-olejowego. Jednak łączy je to, że teoretyczne modele kinetyki rozwoju starzenia powstały w latach 80. i 90. ubiegłego wieku. Są one nadal przedmiotem wielu dyskusji i obecnie nie ma jednoznacznej odpowiedzi, który z nich jest najbardziej zbliżony do naturalnych procesów starzeniowych [9, 25]. Dopiero pod koniec lat 90. podano pełny opis procesów fizykochemicznych, odpowiedzialnych za drzewienie elektryczne w warstwionej

izolacji oraz utratę właściwości elektrycznych i mechanicznych w trakcie starzenia. Stał się on podstawą konstrukcji fenomenologicznego modelu procesów starzeniowych. Stąd wydaje się, że największe nadzieje należy wiązać bardziej z opisem fenomenologicznym niż z istniejącymi modelami teoretycznymi [16].

Postępująca optymalizacja warstwowych układów izolacyjnych, a także nowe możliwości technologiczne i materiałowe rodzą zapotrzebowanie na bardziej zaawansowane metody diagnostyczne. Konsekwencją rozwoju ich konstrukcji oraz stawianych przez rynek wymagań jest przede wszystkim zmniejszenie tzw. zapasów izolacyjnych, co powoduje, że systemy izolacyjne są relatywnie bardziej wrażliwe na stropy eksploatacyjne. Stąd wynika naturalna konieczność stosowania nowych metod oceny stanu technicznego zarówno na etapie wytwarzania, jak i eksploatacji. Stosowane od kilkadziesiąt lat proste testy diagnostyczne coraz częściej okazują się niewystarczające. W tym względzie duże nadzieje pokłada się w dynamicznych pomiarach różnych procesów fizycznych w połączeniu z ich spektralną analizą. Szybki rozwój elektroniki i informatyki w ostatnich dwudziestu latach niewątpliwie przyczynił się do znacznego rozwoju takich metod. Między innymi spektakularne postępy osiągnięto w diagnostyce izolacji za pomocą pomiarów wyładowań niezupełnych.

W zastosowaniu spektroskopowych pomiarów odpowiedzi dielektrycznej na potrzeby oceny jakości izolacji notowano podobne trendy. Jednak w tym przypadku, techniczne możliwości pomiarowe znacznie wyprzedziły teoretyczną wiedzę dotyczącą zjawisk fizyki. Warto wiedzieć, że Andrzej Jonscher pierwsze prace dotyczące uniwersalnego prawa relaksacji opublikował w latach 70. ubiegłego wieku, a dopiero po przeszło dwudziestu latach zaczęto je stosować do opisu procesów w izolacji [13, 14]. Również niedawno ukazały się prace całościowo opisujące dielektryczną relaksację w czasie przejścia fazowego polimerów, które umożliwiają wykrywanie nieprawidłowo utwardzonych kompozytów już na etapie kontroli międzyoperacyjnej [11]. Nadal odczuwa się brak pełnej wiedzy dotyczącej procesów elektrycznych na granicy faz izolacji ciekło-stałej oraz w objętości impregnowanego preszpanu, np. nie do końca rozpoznany jest wpływ morfologii izolacji ciekło-stałej na przewodnictwo stałe i zmiennoprądowe, odpowiedź dielektryczną w zakresie ULF, efekty quasi-relaksacji czy też zachowania nieliniowe. Z konieczności, w analizie procesów dielektrycznych i jej aplikacji w diagnostyce, utrwaliło się klasyczne podejście oparte głównie na fizyce ciała stałego i teorii relaksacji dielektrycznej układów jednorodnych, przy czym wiele używanych deskryptorów ocennych wyznaczanych jest fenomenologicznie. Obserwuje się je w obowiązujących wymaganiach technicznych, a nawet w najnowszych technologiach diagnostycznych, stosujących analizę dynamicznych pomiarów, np. w ocenie kondycji izolacji nadal podstawą oceny są pomiary rezystancji izolacji, współczynnika strat $\tan\delta$ przy częstotliwości 50 Hz, współczynnika absorpcji czy też sprawdzenie doraźnej wytrzymałości elektrycznej, mimo że ich przydatność jest znacznie mniejsza niż kilkadziesiąt lat temu. W tym względzie duże nadzieje pokłada się obecnie w intensywnie rozwijanych spektroskopowych pomiarach relaksacji w zakresie niskich częstotliwości. Pozwalają one wyznaczać impedancję zespoloną układu przy zastosowaniu sinusoidalnej fali napięciowej lub prostokątnego impulsu napięcia stałego. Zakłada się przy tym pełną adekwatność obu tych sposobów. Podejście takie daje doskonałe rezultaty w polimerach jednorodnych, np. w diagnostyce kabli XLPE. Natomiast w przypadku

warstwowej izolacji kompozytowej lub papierowo-olejowej odwracalność procesów nie zawsze jest spełniona, co wiąże się z wieloma trudnościami interpretacyjnymi. Wynikają one ze złożonej budowy takiej izolacji, którą tworzą wzajemnie przenikające się struktury quasi-krystaliczne oraz amorficzne i quasi-elektrolityczne ze skłonnością do zachowań nieliniowych i aktywnej reakcji na pole elektryczne.

Inną specyficzną cechą warstwowych układów izolacji kompozytowej i ciekło-stałej jest brak równowagi termodynamicznej podczas eksploatacji. Dlatego ich morfologia i właściwości elektryczne są zmienne w czasie i zależą od wielu czynników, takich jak historia technologiczna, zespołu narażeń środowiskowych czy też czasu pracy. Zmiany te mogą wystąpić nawet podczas testów, powodując że odpowiedź jest funkcją stosowanej metody pomiarowej. Dobrym przykładem jest zachowanie się układu papierowo-olejowego, w którym podczas badań spektroskopowych zmienia się rozkład napięcia między warstwami i następuje kumulacja ładunku przestrzennego, powodując w skrajnych przypadkach inną odpowiedź prądową na dodatnią i ujemną połówkę sinusoidalnej fali napięciowej. Dlatego coraz częściej w analizie wyników subtelnych testów diagnostycznych należy uwzględniać aktywną reakcję układu na pole elektryczne. Zrozumienie tych właściwości wymaga głębokiej wiedzy zarówno z zakresu fizykochemii polimerów i cieczy izolacyjnych, jak również fizyki dielektryków i układów niejednorodnych. Przełomowe badania łączące obie te dziedziny wykonali m.in. Havriliak, Negami i Jonscher [10, 14]. Fundamentalną pracę, dotyczącą dielektrycznej i mechanicznej relaksacji w materiałach polimerowych, opublikowali w 1997 roku Havriliak i Havriliak Jr, a w latach 1999–2001 Das-Gupta [5, 10]. Sformułowana przez Dissado i Hilla [6] interpretacja fizyczna fenomenologicznego uniwersalnego prawa odpowiedzi dielektrycznej umożliwiła rozszerzenie stosowania równań relaksacyjnych Havriliaka–Negamiego do opisu relaksacji niskoczęstotliwościowej.

Mając na uwadze przedstawiony opis warstwowych układów izolacyjnych Autor postawił sobie za cel:

1. Zebranie i przedstawienie kompendium wiedzy dotyczącej zmian morfologicznych i procesów elektrycznych podczas wytwarzania i eksploatacji izolacji kompozytowej;
2. Ukazanie związków między przemianami strukturalnymi izolacji warstwowej a ich właściwościami elektrycznymi;
3. Ukazanie praktycznych możliwości wykorzystania tych związków do właściwej interpretacji procesów elektrycznych i diagnozowania warstwowych układów izolacyjnych.

Autor jest przekonany, że zebranie w jedną całość zagadnień z tak pozornie odległych dziedzin, jak: technologia chemiczna, fizyka ciała stałego, elektrotechnologia i diagnostyka urządzeń elektrycznych, sprzyjać będzie lepszemu zrozumieniu złożonej problematyki eksploatacji układów izolacyjnych. Praca adresowana jest zarówno do środowiska akademickiego, studentów, jak i inżynierów praktyków. Wyjaśnienie podstawowych relacji między chemiczną i morfologiczną strukturą izolacji warstwowej a zjawiskami przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej pozwoli na weryfikację, stosowanych obecnie, metod diagnostycznych opartych na pomiarze wielkości elektrycznych oraz stworzy podstawy do opracowania nowych, bardziej adekwatnych technologii oceny jej kondycji technicznej. Z tego powodu Autor uznał za stosowne umieścić w niniejszej pracy rozdziały dotyczące podstawowych

zagadnień dotyczących fizykochemii i technologii przetwórstwa polimerów (do polimerów należy również zaliczyć olej mineralny i celulozę), przemian morfologicznych w interfacie i objętości przy przejściu fazowym oraz podczas starzenia, bowiem znajomość tych zjawisk wydaje się niezbędna do zrozumienia i interpretacji procesów elektrycznych. Dotyczy to zwłaszcza istotnej roli granicy faz oraz procesów transportu masy jonowej, a także zachowań niskoczęstotliwościowych. Zjawiska te często są pomijane w zastępczych schematach izolacji uwarstwionej oraz przy analizie zarówno przewodnictwa, jak i relaksacji dielektrycznej.

Staraniem Autora było w miarę proste przedstawienie omawianych zagadnień, ponieważ zdaje sobie sprawę, że zrozumienie problematyki, np. chemicznej technologii przetwórstwa kompozytów termoutwardzalnych, dla inżyniera elektryka może być bardzo trudne. Pomimo to, kierując się długoletnim doświadczeniem badawczym z zakresu elektrotechnologii oraz praktyką diagnozowania izolacji wysokonapięciowej, Autor uważa, że znajomość ta jest podstawą do zrozumienia zachowań izolacji warstwowej podczas eksploatacji oraz rozwoju nowoczesnych, zaawansowanych metod diagnostycznych wykorzystujących pomiary właściwości elektrycznych.

Literatura

- [1] Atkins P.W.: *Chemia Fizyczna*, Warszawa, PWN 2001
- [2] Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.: *Żywice epoksydowe*, Warszawa, WNT 1982
- [3] Cuthrell R.E.: Epoxy Polymers II, Macrostructure, in: *J. Appl. Polymer Sci.*, 1968, Vol. 12, s. 1263–1278
- [4] Czernin I.Z., Smiechow F.M., Zerdew J.W.: *Epoksidnyje polimery i kompozycji*, Moskwa, Chimia 1982
- [5] Das-Gupta D.K., Scarpa P.C.N.: Modeling of Dielectric Relaxation Spectra of Polymers in the Condensed Phase, in: *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1999, Vol.15, No 2, s. 23–32
- [6] Dissado L.A., Hill R.M.: A Cluster Approach to the Structure of Imperfect Materials and Their Relaxation Spectroscopy, in: *Proc. Roy. Soc. London*, 1983, Vol. 390, s. 131–180
- [7] Fabre J., Pichon A.: Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers, in: *1960 International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE)*, Paris, France, Paper 137, 1960
- [8] *Finished Insulation Material Including Mica As A Component Thereof, For Use On Electrical Coils Of Dynamo-Electric Machinery, Particularly For Stator Windings Or High Voltage Machines*: United States Patent and Trademark Office, Serial Number: 72192540, Registration Number: 0809828, Filing Date: 5.04.1964,
- [9] Gram H., Fröhlich K.: A Multi-Stress Aging Method for Fibe Reinforced Insulation Materials, in: *10th ISH*, Montreal, 1997
- [10] Havriliak S.Jr., Havriliak S.J.: *Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials. Analysis, Interpretation, and Application to Polymers*, Munich–Vienna–New York, Hanser Publishers 1997
- [11] Helgeson A.: *Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin-Rich Insulation During Processing*, Stockholm, Kungl Tekniska Högskolan, Depart. Electric Power Eng. 2000
- [12] *Interfaces in Composites*, ASTM Special Technical Publication 452, Philadelphia, 1969
- [13] Jonscher A.K.: *Nature*, 1977, 267, 673.
- [14] Jonscher A.K.: *Dielectric Relaxation in Solids*, London, Chelsea Dielectric Press 1983

-
- [15] Królikowski W.: *Tworzywa wzmocnione i włókna wzmacniające*, Warszawa, WNT 1988
- [16] Kutil A.: Qualification of Fiber-reinforced Insulating Materials Based on PD Analysis, *IEEE Trans. DEI*, 1998, Vol.5, No 4, s. 603–611
- [17] Luttgert K.E., Bonart R.: *Proc. Colloid Polymer Sci.*, 1968, 64, s. 38
- [18] MICADUR – COMPACT INDUSTRY Insulation System for Rotating Electrical Machines - <http://www.docstoc.com/docs/45767522/MICADUR-COMPACT-INDUSTRY-Insulation-System-for-Rotating#>, 20.04.2012
- [19] Moser H.P., Dahinden V.: *Transformerboard II – Properties and application of Transformer-board of different fibres*, Zürich, Weidmann AG 1987
- [20] Oommen T. V.: Moisture Equilibrium in Paper-Oil Systems, in: *Proceedings of the 16th Electrical/Electronics Insulation Conference*, Chicago, October 3–6, 1983
- [21] Oommen T.V., Lindgren S.R.: Bubble evolution from transformer overload, in: *Transmission on Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, USA, 2001, Vol.1, s. 137–142
- [22] Przygocki W., Włochowicz A.: *Fizyka polimerów*, Warszawa, PWN 2001
- [23] Rogowicz Cz.: Impregnacja próżniowo-ciśnieniowa uzwojeń VPI, w: *III Seminarium Techniczne – Materiały i Układy Elektroizolacyjne w Przemysle Elektrotechnicznym*, Jaszowiec, 1996, s.114–119
- [24] Rozenberg B.A.: Doklady 1-oj Wsiesojuznoj konfierencji po chemii, fizikochimii polimerizacjonnosposobnych oligomerow, Czernoglowka, Cz.2, 1977, s.392–421
- [25] Schrijver C., Herden A., Kärner H.: Fundamental Ageing Mechanisms of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Insulators, in: *10th ISH*, Montreal, 1997