

Stanisław Azarewicz, Bogumił Węgliński  
Politechnika Wroclawska, Wrocław

## UKŁAD IZOLACYJNY WYSOKONAPIĘCIOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PRACUJĄCYCH W CIEKŁYCH GAZACH

### INSULATION SYSTEM OF HIGH VOLTAGE INDUCTION MOTORS OPERATED IN LIQUID GASES

**Abstract:** Issues concern selection of windings insulation system of high voltage cage induction motors predicted for operation in liquid gases, and particularly in liquid natural gas (LNG), are described in the paper. Particular attention was put on turn-to-turn insulation and the main insulation of coils. Basic differences, which take place at selection of these insulations for motors working in liquid gas and typical conditions, are discussed. Dielectric liquid gas interaction on the coil insulation system is very positive regarding its electrical strength, due to removal effects of eventual cracks of the insulation, as effect of such cracks filling with gas being dielectric. Simultaneously, cooling down of the winding to very low temperature introduce hazards created by possible freezing of moisture content in eventual porosity of the insulation, and relocation of the winding wires caused by thermal shrinkage of the system. Such relocation can cause turn-to-turn short-circuits, due to rubbing of the wire insulation. Results of techno-climatic tests of materials and insulating system selected for application in the model motor of power 785 kW; and voltage 6 kV, predicted for operation in LNG (at temperature  $-161^{\circ}\text{C}$ ), are presented. Proposals and design recommendations, concern insulating system of such type of high voltage motors, were elaborated on the base of the above mentioned insulating materials and system tests.

#### 1. Wstęp

Rozwój technologii związany z nowymi źródłami energii powoduje, między innymi, zapotrzebowanie na nowe konstrukcje maszyn i urządzeń elektrycznych.

Intensywne badania prowadzone na świecie nad rozwojem urządzeń przeznaczonych do gazu naturalnego LNG wskazują, że najlepsze efekty uzyskuje się, gdy silniki elektryczne oraz urządzenia pracują w zanurzeniu w ciekłym gazie.

Pierwsze silniki do pracy w zanurzeniu w gazie LNG o temperaturze  $-161^{\circ}\text{C}$  wprowadzono pod koniec lat 50-tych. Bazowały na typowej technologii stosowanej w silnikach powszechnego użytku. Szybko jednak okazało się, że zastosowane materiały izolacyjne, lakiery i technologie realizacji izolacji nie spełniały wymagań w warunkach kriogenicznych.

Także metodologia obliczeń i projektowania silników nie była właściwa, gdyż zaprojektowane silniki wg klasycznych zasad nie osiągały założonych parametrów. Podstawowym problemem, który uniemożliwił stosowanie klasycznej technologii izolowania uzwojeń w silnikach kriogenicznych było wystąpienie przebieg izolacji na końcach pakietów blach stojana.

Przeprowadzone testy z różnymi materiałami izolacyjnymi w zasadzie nie spowodowały poprawy. Dopiero wprowadzenie izolacji złożonej

z warstw różnych materiałów pozwoliło uzyskać pozytywny rezultat. W efekcie badań ustalono że, aby uzyskać izolację cewki odporną na doziemienie w punkcie jej wyjścia ze żłobka należy zastosować co najmniej dwie warstwy różnych fizycznie materiałów izolacyjnych. Dwie warstwy tej samej izolacji dają efekt niekorzystny, podobnie jak pogrubiona izolacja jednego typu. Zjawisko to nie zostało dotychczas jednoznacznie wyjaśnione. [3] Przypuszcza się, że przyczyną są różnice rozszerzalności temperaturowej pomiędzy blachami stojana, a dwoma materiałami izolacyjnymi.

Oddzielnym problemem było zastosowanie odpowiednich lakierów do impregnacji uzwojeń. Szybko okazało się, że lakiery poliestrowe nie są odporne na długotrwałe działanie temperatur kriogenicznych. Prowadzone badania w różnych ośrodkach wykazały, że najlepiej do impregnacji uzwojeń silników pracujących w ciekłych gazach nadają się żywice epoksydowe, a jako technologia impregnacji – próżniowo-ciśnieniowa (VPI).

Rozwiązanie problemu technologii wykonania izolacji głównej nie zapewniło jednakże wysokiej niezawodności pracy silników kriogenicznych. Przyczyną tego były uszkodzenia izolacji

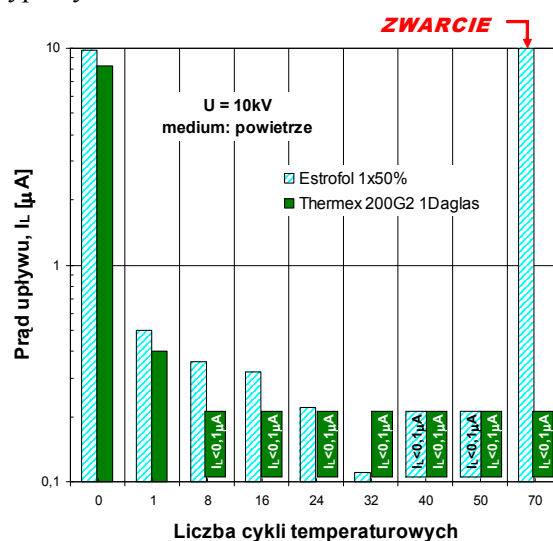
międzyzwojowej. Prowadzone badania wykazały, że wystąpiły tu dwie przyczyny powstawania uszkodzeń. Pierwszą z nich było występowanie niewielkich obszarów wewnątrz uzwojeń nie wypełnionych izolacją epoksydową, co mogło prowadzić do wibracji przewodów i powstawania zwarć. Drugi powód zwarć zwojowych był trudniejszy do ustalenia. Pomocne tu okazało się stwierdzenie, że awarie występowały głównie podczas przepięć i gwałtownych skoków napięcia. Dobrym rozwiązaniem okazało się zastosowanie na przewodach uzwojenia dwóch warstw różnych izolacji, z zewnętrzną dobrze łączącą się z lakierem epoksydowym.

## 2. Dobór izolacji przewodów i cewek uzwojenia wysokonapięciowego silnika kriogenicznego

### 2.1 Dobór izolacji przewodów nawojowych

Dobierając izolację przewodów nawojowych kriogenicznego silnika modelowego o mocy 785 kW, 6 kV bazowano zarówno na danych literaturowych, jak również na badaniach własnych. Dane literaturowe dawały bowiem jedynie ogólne wskazówki, jednakże z oczywistych względów nie podawały konkretnych rozwiązań. Należy także uwzględnić, że wraz z rozwojem systemów sterowania napędami elektrycznymi silniki są coraz częściej zasilane z przemienników częstotliwości lub półprzewodnikowych regulatorów napięcia. Wprowadzają one dodatkowe narażenia izolacji zwojowej ze względu na bardzo wysoką stromość narastania napięcia zasilającego silnik i związane z tym zjawiska falowe. W związku z powyższym dąży się, aby silniki w odpowiedzialnych napędach zasilane były z przemienników częstotliwości poprzez filtry silnikowe. Negatywnym efektem tego rozwiązania są straty w filtrze powodujące zmniejszenie sprawności całego napędu. Dla potrzeb silnika modelowego wybrano i przeprowadzono badania porównawcze dwóch typów przewodów nawojowych: dobrego przez autorów optymalnie do wymagań silnika kriogenicznego z izolacją typu Termex i oprzędem szklanym oraz przewodów w izolacji preferowanej do silników wysokonapięciowych przez zakłady remontujące silniki elektryczne, również wzmocnionej oprzędem szklanym. Oba typy przewodów posiadały izolację złożoną z dwóch warstw izolacyjnych różnych pod względem fizycznym. Izolacja typu Termex

zawiera lakier poliamidoimidowy, zaś izolacja drugiego przewodu to obwój z taśmy poliestrowej klejonej do przewodu lakierem epoksydowym. Celem porównania jakości struktur izolacyjnych przeprowadzono podstawowe badania wybranych przewodów nawojowych w ciekłym azocie o temperaturze  $-196^{\circ}\text{C}$ . [1] [2] Badania w ciekłym azocie, który również jest gazem dielektrycznym, a jego temperatura jest niższa od gazu LNG umożliwiają wnioskowanie co do zachowania się przewodów w ciekłym LNG, a jednocześnie prowadzenie badań nie wiąże się z zagrożeniem bezpieczeństwa. Przewody nawojowe poddano cyklom okresowych narażeń temperaturowych odwzorujących maksymalne możliwe narażenia temperaturowe jakim mogą być poddane przewody wewnątrz uzwojenia silnika kriogenicznego. Sposób prowadzenia badań przewodów był zgodny z zaleceniami odnośnych norm. W badaniach uwzględniono, że okresowo silniki mogą znajdować się poza ciekłym gazem. Wybrane wyniki badań przewodów nawojowych w funkcji liczby cykli narażeń termicznych przedstawiono na rysunku 1. Przedstawione wyniki badań jednoznacznie wskazują na konieczność prawidłowego i pełnego utwardzenia żywicy epoksydowej znajdującej się na powierzchni przewodów nawojowych. Jest to istotna wskazówka dla realizatorów uzwojenia, gdyż niedokładne utwardzenie w przypadku silnika kriogenicznego nie będzie zniwelowane podczas nagrzewania się uzwojeń w czasie pracy, jak ma to miejsce w typowych silnikach.



Rys. 1. Zmiany wartości prądu upływu badanych przewodów nawojowych w powietrzu w funkcji liczby cykli termicznych

Drugim istotnym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest to, że nie można stosować przewodów owijanych folią poliestrową. Ten sposób jest często stosowany przy produkcji jednostkowej silników w zakładach remontowych gdy wymagany przekrój przewodu w odpowiedniej izolacji nie jest dostępny. Naturalne ruchy termiczne związane z chłodzeniem i nagrzewaniem uzwojeń silnika mogą prowadzić do przerwania ciągłości izolacji w wyniku przesuwania taśmy, a tym samym powodować zwarcia zwojowe. Efekt ten zaobserwowano na badanej próbce przewodów nawojowych.

## 2.2 Izolacja cewki silnika kriogenicznego

Izolacja cewki narażona jest zarówno na działanie niskiej temperatury gazu, jak również na oddziaływanie składników chemicznych gazu. Pozytywną cechą jest to, że gaz LNG jest dobrym dielektrykiem, co zwiększa wytrzymałość izolacji i eliminuje szereg niekorzystnych zjawisk występujących typowo w silnikach. Zależała ta uwidacznia się podczas pracy silnika w zanurzeniu. Nietypowe warunki jak np. chwilowe przemieszczenie silnika poza zbiornik wiążą się może ze skraplaniem wilgoci na jego elementach, a także zasysaniem wilgoci w pory izolacji powodując zagrożenie dla systemu izolacyjnego. Na podstawie analizy teoretycznej wymagań stawianych materiałom izolacyjnym wybrano na izolację główną uzwojeń silników materiały izolacyjne, które następnie poddano narażeniom termicznym w cyklach analogicznych jak dla przewodów nawojowych. Wybrane materiały izolacyjne przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wykaz materiałów izolacyjnych wybranych do badań

Materiał izolacyjny	Struktura izolacji	Zastosowana żywica
Epoksterm 3	Fp-Pm-Ts-Fp	EP
Epoksterm 5	Fp-Pm-Ts	E
Epoksterm 8 0.15 mm	Fp-Pm-Ts-Fp	Pu
Epoksterm 8 0.12 mm	Fp-Pm-Ts-Fp	Pu
Epoksterm 11	Fp-Pm-Fp	Pu
Ergofol NKN	N-K-N	Pu
Ergofol EW-2	W-Fp-W	E
Ergofol W-2/E	W-Fp-W	Pu
Ergofol W-2	W-Fp-W	Pu
Ergofol W-1	W-Fp	Pu
NEN dwustronny	Fp-N	Pu
Mylar A	Fp	-
Szkłoflex F dwustronny	Fp-Ts-Fp	Pu

Oznaczenia użyte w tabeli:

Fp –folia poliestrowa,

Pm – papier mikowy,

Ts – tkanina szklana,

E – żywica epoksydowa,

EP – żywica poliestrowo-epoksydowa,

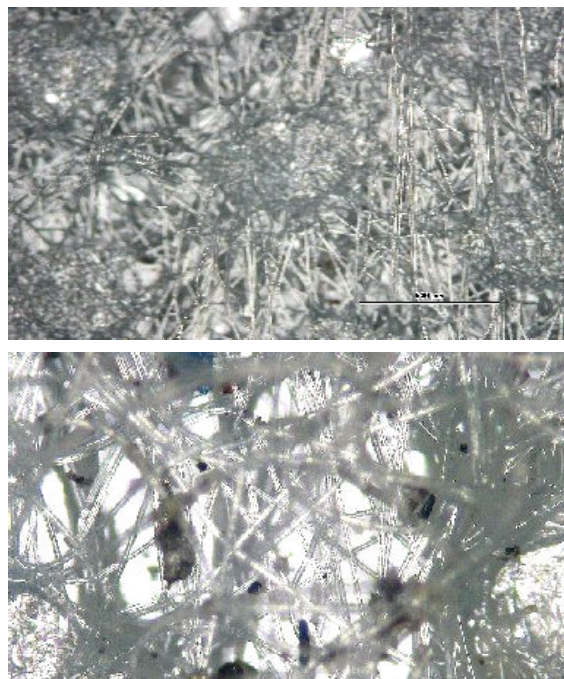
Pu –żywica poliuretanowa,

N –Nomex papier poliamidowy,

K –folia poliimidowa,

W –włóknina poliestrowa.

Badaniom poddano próbki izolacji oraz struktury izolacyjne odwzorowujące układ izolacyjny cewek przeznaczonych dla silnika wysokonapięciowego, budowy otwartej, pogrążonego w LNG. [1] [2]. Badania skoncentrowano głównie na analizie zmian mechanicznych i wytrzymałości elektrycznej próbek wybranych do badań materiałów izolacyjnych. Badania mechanicznych zmian prowadzono metodą analizy mikroskopowej zmian strukturalnych. Stan struktury rejestrowano przed rozpoczęciem cykli narażeń temperaturowych oraz po ich określonej liczbie. Wyniki badań wykazały, że w niektórych materiałach zawierających żywice wystąpiło przemieszczanie i lokalne gromadzenie się nieutwardzonej żywicy. Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono zjawisko gromadzenia się nieutwardzonej żywicy w próbce Ergofol EW – 2 przed i po 120 cyklach narażeń termicznych.



Rys. 2. Widok pod mikroskopem badanej próbki materiału izolacyjnego przed i po 120 cyklach narażeń termicznych

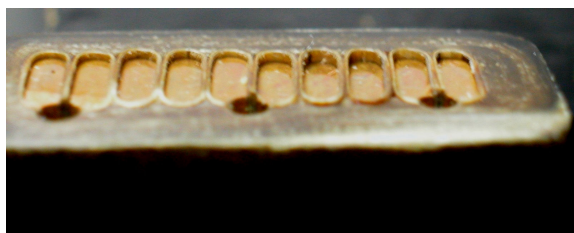
W rezultacie prowadzonych badań materiałów izolacyjnych, które miały na celu prawidłowe dobranie tych materiałów dla silników pracujących w ciekłym gazie LNG stwierdzono, że izolacje: Conductofol, Ergofol NKN, Remikaflex i NEN dwustronny FpPuPpa nie spełniają wymagań stawianych materiałom izolacyjnym dla silników kriogenicznych wysokiego napięcia. Natomiast izolacje: Epoksterm 3;5;8;11, Ergofol EW-2; W-2/E; W-2 i W-1 oraz Relamex, Mylar A, Szkłoflex F dwustronny mogą być stosowane w tych silnikach pod warunkiem prawidłowego ich utwardzenia. Oczywiście oprócz wymienionych wymagania mogą spełniać także inne materiały izolacyjne. Prowadzona analiza wskazała parametry techniczne jakie te materiały muszą spełniać.

### 2.3. Wyniki badań struktur izolacyjnych cewek stojana przeznaczonych do silnika kriogenicznego

Badaniom poddano następujące fragmenty cewek:

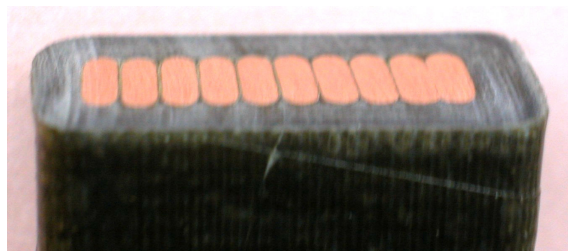
- z przewodem nawojowym w izolacji z folii poliestrowej i oprzędu szklanego (cewka 1),
- z przewodem nawojowym z izolacją Termex 200G2 1Daglas (cewka 2).

Izolacje główne cewek wykonano analogicznie używając materiałów izolacyjnych wybranych w wyniku prowadzonych badań. Jako materiały impregnujące wykorzystano żywice epoksydowe. Struktury izolacyjne cewek utwardzono. Przeprowadzone badania struktur izolacyjnych cewek wykazały, że folia poliestrowa, którą wykorzystano jako izolację podstawową przewodu nawojowego cewki 1 charakteryzuje się słabą przyczepnością do przewodu miedzianego. Umożliwiło to przemieszczanie się przewodu względem izolacji po jego schłodzeniu. Zjawisko to wystąpiło już po pierwszym cyklu badań termicznych. Przemieszczenie się przewodów nawojowych względem izolacji zwojowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przekrój próbki cewki z przewodem nawojowym o izolacji zawierającej folię poliestrową

Zjawiska przesuwania się przewodów względem izolacji nie wystąpiły w przypadku cewki 2 z przewodem Termex 200G2 1Daglas. Przekrój cewki 2 przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przekrój próbki cewki z przewodem nawojowym o izolacji zawierającej żywicę poliaimidową.

Badania mikroskopowe obu rodzajów struktur izolacyjnych cewek wykazały, że w atmosferze ciekłego azotu następuje rozpuszczanie, a także wypłukiwanie nietwardzonej żywicy zawartej w taśmach izolacyjnych cewek. Skutkuje to powstawaniem szczelin między warstwami izolacji, a izolacją przewodów nawojowych. Prowadzić to może do zwiększenia higroskopijności układu izolacyjnego.

Badane próbki struktur izolacyjnych cewek wykazały, że rezystancja izolacji zwojowej cewki nr 1 po jej zanurzeniu w ciekłym azocie uległa istotnemu zmniejszeniu. Jest to prawdopodobnie wynik przemieszczania się przewodu nawojowego względem zastosowanej izolacji. W rezultacie przemieszczenia mogły wystąpić przerwy w ciągłości wewnętrznej izolacji przewodu. Potwierdzeniem tego może być gwałtowne zmniejszenie rezystancji próbki cewki po wyjęciu jej z ciekłego azotu. Rezystancja izolacji zmalała wówczas około 1500 razy, co mogło być skutkiem zasysania wilgoci do wnętrza układu izolacyjnego nie stanowiącego monolitu. Zjawisko to może być potęgowane w przypadku niedokładnego utwardzenia żywicy i wypłukiwania jej przez ciekły gaz.

W przypadku badanej cewki 2 (z przewodem nawojowym w izolacji Termex) nie wystąpiło zjawisko zmniejszania się rezystancji izolacji, co świadczy o prawidłowym doborze zarówno materiału izolacyjnego jak i struktury izolacyjnej cewki.

### 3. Wnioski

Przeprowadzone badania próbek izolacji wykazały, że pod wpływem różnych współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych warstw materiałów wchodzących w skład izola-

cji, podczas głębokiego schładzania następuje w wielu przypadkach rozwarstwienie się materiałów izolacyjnych takich jak Ergofol NKN i NEN dwustronny FpPuPpa.

Rozwarstwienia nie powodują co prawda zmniejszenia ich wytrzymałości elektrycznej na przebicie, jednakże zmniejszają wytrzymałość mechaniczną materiału i powodują degradację ich struktury. Może pojawić się również niebezpieczeństwo przemieszczania się poszczególnych warstw izolacji względem siebie, co może skutkować uszkodzeniem izolacji pod wpływem drgań mechanicznych, jak i elektrycznych, które są powodowane przez siły elektrodynamiczne podczas pracy silnika.

Należy zatem wnioskować, że materiały te nie powinny być używane w zastosowaniach kriogenicznych. Konieczne jest także uwzględnienie niekorzystnego oddziaływania składników gazu na izolację.

Badania sprawdzające przeprowadzone w ciekłym gazie LPG, stosowanym powszechnie w przemyśle wykazały, że gaz ten bardzo dobrze rozpuszcza żywice nieutwardzone stosowane na przykład w takich materiałach jak Epoksterm 5, Remikaflex, Conductofol. Ze względu na słabą adhezję niewskazane jest również stosowanie folii poliesterowej w postaci obwoju jako izolacji przewodów nawojowych.

Izolacja przewodów nawojowych stosowanych w urządzeniach pracujących w temperaturach kriogenicznych powinna być trwale zespolona z przewodem tak, aby uniknąć możliwości wzajemnego przemieszczania się warstw izolacji. Właściwym rozwiązaniem są lakiery poliamidoimidowe odporne na działanie ciekłych gazów.

Istotnym wnioskiem z badań, a także z danych literaturowych, jest konieczność stosowania do silników kriogenicznych zarówno przewodów nawojowych, jak i w izolacji cewek układu izolacyjnego złożonego z dwóch różnych materiałów izolacyjnych bazowanych na żywicach epoksydowych, odpowiednich lakierach (np. poliamidoimidowych) lub innych materiałach spełniających specyficzne wymagania silników kriogenicznych.

Ze względu na możliwość zasilania silników z przemienników częstotliwości należy dobierać przewody nawojowe z izolacją przeznaczoną do tego typu zasilania.

W przypadku pozostałych badanych materiałów izolacyjnych w ciekłym azocie nie zauważono zmian mogących wpływać niekorzystnie na ich

właściwości mechaniczne i elektryczne. Mogą one być z powodzeniem stosowane w konstrukcjach maszyn przeznaczonych do pracy w temperaturach kriogenicznych, pod warunkiem bardzo dokładnego utwardzenia izolacji.

#### 4. Literatura

- [1]. Azarewicz S., Węgliński B.: *Zagadnienia doboru materiałów i kompozytów izolacji przewodów i cewek silników indukcyjnych wysokonapięciowych pracujących w ciekłych gazach* Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 60, 2007, s. 128-139.
- [2]. S. Azarewicz, D. Gaworska, J. Koniarek, B. Węgliński: *Wpływ ciekłych gazów na izolację cewek silnika WN* Kompozyty 2006 nr 2K.
- [3]. R. Shiveley: *Submerget cryogenic motor materials development*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no 3.
- [4]. K. Adamczyk, S. Azarewicz, P. Kisielewski, B. Węgliński *Raport SPR nr11/2005 „Pomiary prądu upływu przewodu nawojowego i uzwojenia cewki modelowej wysokonapięciowego silnika kriogenicznego”*.

#### Adres Autorów:

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn,  
Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław  
e-mail: stanislaw.azarewicz@pwr.wroc.pl  
bogumil.weglinski@pwr.wroc.pl