

Ocena porównawcza efektywności impregnacji preszpanu izolacyjnego wybranymi estrami dielektrycznymi i olejem mineralnym z wykorzystaniem efektu podciągania kapilarnego

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań eksperymentalnych oceniających efektywność impregnacji preszpanu izolacyjnego wybranymi cieczami dielektrycznymi różniącymi się lepkością kinematyczną. Badania przeprowadzono wykorzystując efekt podciągania kapilarnego przy różnych temperaturach procesu tj. 20, 60, 80 i 100 °C. Wyniki pokazały, że efektywność impregnacji, rozumiana jako szybkość wnikania cieczy w preszpan, jest nierozdzielnie związana z lepkością kinematyczną cieczy. W tym zakresie badany ester mieszany o obniżonej lepkości wykazuje lepsze właściwości impregnacyjne w porównaniu do klasycznego estru naturalnego o właściwościach zgodnych z normą IEC 62770.

Abstract. The article presents the results of experimental studies aiming on assessment of impregnation efficiency of selected liquid dielectrics of different viscosities. The studies were performed using capillary rising effect at different process temperature: 20, 60, 80 and 100 °C. The results showed that impregnation efficiency, understood as the rate of liquid penetration in the pressboard, is strictly linked to the kinematic viscosity of the liquid. In this field the tested blended low viscosity ester shows better impregnation properties in relation to the classical natural ester as per IEC 62770. (Comparative assessment of impregnation efficiency of insulating pressboard by selected dielectric esters and mineral oil using capillary action test).

Słowa kluczowe: estry dielektryczne, olej mineralny, efekt podciągania kapilarnego, impregnacja.

Keywords: dielectric esters, mineral oil, capillary effect, impregnation.

Wstęp

Transformatory energetyczne są jednymi z najważniejszych urządzeń pracujących w systemie elektroenergetycznym służąc do przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej w wysokonapięciowych trójfazowych sieciach elektroenergetycznych oraz z tych sieci do sieci średniego i niskiego napięcia. Większość ogólnej liczby produkowanych transformatorów energetycznych we wszystkich zakresach napięć i mocy stanowią tzw. transformatory olejowe. Podstawą budowy ich układu izolacyjnego są współpracujące ze sobą izolacja ciekła i stała. W tym pierwszym przypadku obok zapewnienia wytrzymałości elektrycznej kanałów olejowych oraz poprawy wytrzymałości elektrycznej komponentów izolacji stałej, ciecz dielektryczna powinna spełniać szereg dodatkowych, istotnych dla poprawnej pracy transformatora funkcji. Wśród nich wymienić należy efektywne odprowadzanie ciepła z uzwojeń transformatora (funkcja chłodząca), ochrona izolacji stałej przed dostępem tlenu (w efekcie ograniczenie procesu starzenia) czy pełniona pośrednio funkcja diagnostyczna (ocena stanu technicznego transformatora na podstawie pomiarów właściwości fizyko-chemicznych i dielektrycznych wypełniającej transformator cieczy). Wobec powyższego niezmiernie istotnym jest by w procesie produkcji urządzenia, jakim jest transformator, zadbać o prawidłowy dobór procesu suszenia i impregnacji jego izolacji stałej tak, by "czas życia" transformatora mógł być jak najdłuższy [1, 2]. W przypadku oleju mineralnego, jako cieczy dielektrycznej zastosowanej w transformatorze, fabryki posiadają wieloletnie doświadczenie w procesie produkcji zapewniając optymalny dobór parametrów procesu impregnacji [3]. Odmianą sytuacją są jednak ciecze alternatywne dla oleju mineralnego (estry syntetyczne, naturalne i mieszane), które charakteryzują się odmiennymi od oleju mineralnego parametrami fizyko-chemicznymi, które mogą mieć istotne znaczenie dla procesu impregnacji izolacji stałej [4-7]. Stąd ważne wydaje się, aby wśród wielu aspektów oceny nowych na rynku transformatorowym cieczy dielektrycznych dokonać oceny ich właściwości impregnacyjnych. Jednym ze względnie prostych i intuicyjnych sposobów oceny tej właściwości cieczy jest test oparty na efekcie podciągania kapilarnego zwany krótko

testem kapilary. W niniejszym artykule test ten wykonano w odniesieniu do trzech cieczy dielektrycznych różniących się właściwościami fizyko-chemicznymi: oleju mineralnego spełniającego kryteria normy IEC 60296 [8], estru naturalnego spełniającego kryteria normy IEC 62770 [9] oraz estru mieszanego o obniżonej lepkości, zaś impregnowanym materiałem był preszpan celulozowy o grubości 2 mm.

Efekt podciągania kapilarnego

Impregnacja materiałów izolacyjnych stałych stosowanych obecnie w transformatorach jest procesem powolnym, którego intensywność maleje asymptotycznie, tak że nie może on być nigdy doprowadzony do końca. Ciecz wnika w materiał izolacyjny praktycznie wzdłuż warstw, stąd nie grubość izolacji stałej a jej szerokość determinuje trudności w procesie nasycania. Wnikanie cieczy w materiał stały pochodzenia celulozowego zawierający pory, które muszą zostać wypełnione cieczą, jest mocno uzależnione od jej lepkości kinematycznej. Aby proces przebiegał sprawniej zwiększa się więc temperaturę procesu nasycania, powodując tym samym zmniejszenie lepkości cieczy, która w takich warunkach łatwiej wnika w porowatą strukturę materiału stałego [1, 6]. Efektywność wnikania cieczy w materiał izolacyjny stały, a więc efektywność impregnacji można ocenić, jak wspomniano we wprowadzeniu, na podstawie efektu podciągania kapilarnego. Efekt ten, w odniesieniu do rozważanego zagadnienia badawczego, zobrazowany został schematycznie na rysunku 1.



Rys.1. Schematyczna prezentacja testu bazującego na efekcie podciągania kapilarnego

Samo podciąganie kapilarne jest definiowane jako zdolność materiału do podciągania cieczy ku górze przy występowaniu sił kapilarnych. Siły te zależą od ilości porów otwartych zawartych w materiale (w rozważanym przypadku w preszpanie) oraz od ich średnic, jak również ciśnienia na zewnątrz i wewnątrz materiału i wspomnianej lepkości cieczy. W celu zilustrowania odpowiednich zależności związanych z efektem podciągania kapilarnego przytoczyć można równanie (1), które bazuje na prawie Hagena-Poiseuille'a opisujące zagadnienie wnikania cieczy w porowatą strukturę materiału celulozowego:

$$(1) \quad \frac{dV}{dt} = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{r^4}{L} (P_E - P_S - P_I),$$

gdzie: V – objętość cieczy wewnątrz poru, r – średni równoważny promień poru, P_E – ciśnienie zewnętrzne, P_S – ciśnienie wytworzone przez oddziaływanie kapilarne cieczy, P_I – ciśnienie wewnętrzne, L – zasięg wnikania cieczy w materiał zmienny w czasie, η – lepkość cieczy.

Ponieważ $V = \pi r^2 L$ to po scałkowaniu równania (1) otrzymać można zależność (2):

$$(2) \quad L = \frac{1}{2} r \cdot \sqrt{\frac{P_E - P_S - P_I}{\eta}} \cdot \sqrt{t},$$

która mówi, że zasięg wnikania cieczy w materiał jest odwrotnie proporcjonalny do pierwiastka jej lepkości.

Procedura pomiarowa i materiał badawczy

W celu oceny wpływu lepkości kinematycznej na efektywność impregnacji wybrano trzy dostępne na rynku cieście różniące się znacząco lepkością. Były to kolejno:

- olej mineralny Shell Diala Oil B spełniający kryteria normy [8],
- ester naturalny Envirotemp™ FR3™ spełniający kryteria normy [9],
- ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970 FLD (norma IEC 63012 w opracowaniu).

W tabeli 1 zestawione zostały podstawowe parametry wybranych cieczy.

Tabela 1. Ciecze dielektryczne wykorzystane w badaniach

Parametr	Ester naturalny zgodny z IEC 62770 (Envirotemp™ FR3™)	Ester mieszany o obniżonej lepkości (Nomex® 970 FLD)	Olej mineralny zgodny z IEC 60296 (Shell Diala Oil B)
Gęstość w 20 °C [kg/dm ³]	0,92	0,89	0,88
Lepkość w 40 °C [mm ² /s]	32	17	10
Temperatura zapłonu [°C]	320	200	140
Temperatura płynięcia [°C]	- 23	- 28	- 42
Biodegradowalność	łatwo biodegradowalny	łatwo biodegradowalny	nie biodegradowalny
Napięcie przebicia AC [kV]	> 70	> 70	> 70
Przenikalność dielektryczna w 20 °C	3,1	2,8	2,2

Szczególną uwagę w przytoczonej tabeli należy zwrócić na ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970 FLD, który charakteryzuje się właściwościami fizyko-chemicznymi pośrednimi pomiędzy typowym olejem mineralnym a

klasycznym estrem naturalnym. Ester mieszany Nomex® 970 FLD podobnie jak pozostałe komercyjnie dostępne estry naturalne bazuje w swej budowie na triglicerydach. Jednakże poprzez zastosowaną przez producenta modyfikację chemiczną ich zawartość w całkowitej objętości cieczy zredukowana została do poziomu 50% na rzecz monoestrów. Uzyskany w ten sposób stosunek zawartości triglicerydów do monoestrów równy 50/50% pozwolił na uzyskanie równowagi pomiędzy lepkością cieczy, jej temperaturą zapłonu oraz biodegradowalnością [10].

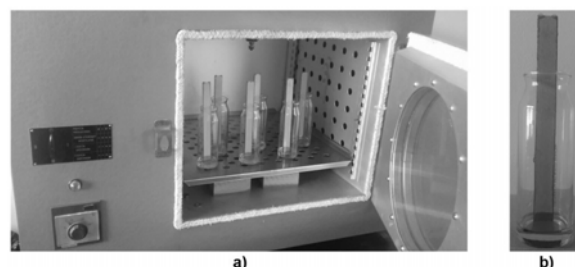
Z kolei parametry zastosowanego preszpanu zestawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe właściwości preszpanu użytego w eksperymencie

Parametr	Jednostka	Wielkość
Grubość	mm	2
Gęstość	g/cm ³	1,25
Zawartość wilgoci	%	5,8
Wytrzymałość elektryczna w oleju	kV/mm	39

Próbki preszpanu do testu kapilary przygotowane zostały w formie pasków o szerokości 2 cm i wysokości 20 cm. Do każdego przypadku, tj. dla wybranej temperatury i danej cieczy impregnującej, przygotowano cztery próbki, przy czym test zrealizowano dwukrotnie dla danego przypadku, badając podczas jednej procedury pomiarowej dwie próbki impregnowane daną cieczą. Tak więc w ciągu jednej procedury pomiarowej w danej temperaturze obserwowano sześć próbek preszpanu, po dwie dla każdej rozważanej cieczy. Przed rozpoczęciem pomiaru boki każdej z próbek pokryte zostały warstwą kleju, aby wnikanie cieczy w preszpan odbywało się równolegle w stosunku do dolnej krawędzi próbki, a nie jej bokami, co wynika bezpośrednio ze zjawiska oddziaływania sił międzycząsteczkowych omówionych wyżej.

Każdą z próbek umieszczono w osobnej kolbie wykonanej z przezroczystego szkła o wysokiej odporności termicznej, którą napełniono daną cieczą dielektryczną tak, by próbka preszpanu po umieszczeniu w kolbie zanurzona była w cieczy do wysokości 1 cm. Wysokość tą uznano jako poziom 0. Wartości temperatury, jakie wybrano do testów, to odpowiednio 20, 60, 80 i 100 °C. Daną temperaturę uzyskano umieszczając próbki w komorze termicznej utrzymującej daną temperaturę podczas całego procesu pomiarowego. Wysokość wnikania słupa cieczy odczytywano z tolerancją 1 mm. Ustalony na podstawie badań w temperaturze 20 °C czas trwania testu wynosił 410 min. Sposób usytuowania próbek w komorze, jak również sposób umieszczenia próbki preszpanu w kolbie pokazano na rysunku 2.

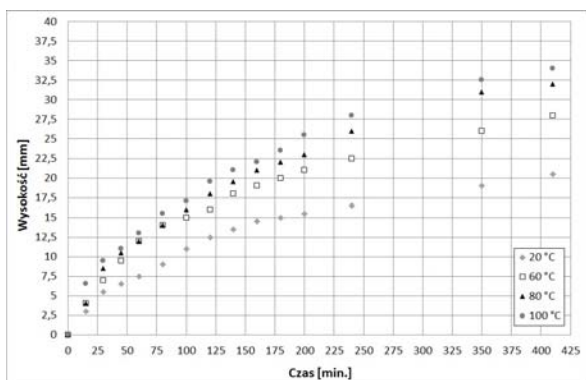


Rys.2. Sposób umieszczenia próbek w komorze termicznej (a) oraz sposób umieszczenia próbki preszpanu w kolbie szklanej (b)

Wyniki

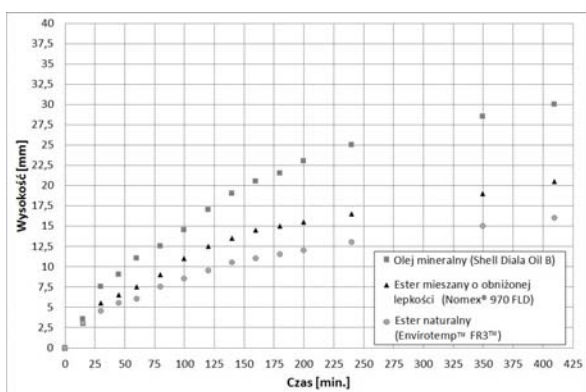
Na rysunku 3 przedstawiona została zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu dla wybranej cieczy dielektrycznej (Nomex® 970 FLD) użytej

podczas badań i czterech założonych wartości temperatury procesu. Wyniki naniesione na wykres są średnią wyników dotyczącą czterech próbek.

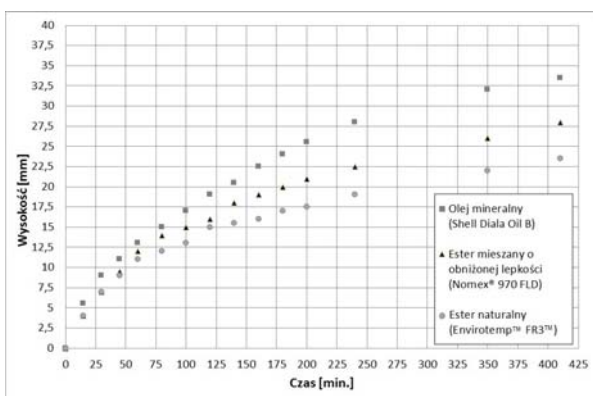


Rys.3. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu kapilary dla różnych wartości temperatur na przykładzie estru mieszanego o obniżonej lepkości Nomex® 970 FLD

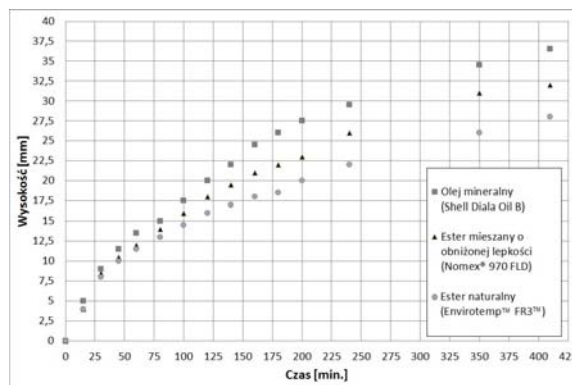
Zgodnie z przewidywaniami wzrost temperatury przyspiesza proces wnikania cieczy w preszpan. Wnikanie to nie ma jednak charakteru liniowego, a logarytmiczny. W pierwszej fazie, tj. do ok. 175 min. czasu trwania testu osiągane jest ok. 70% wysokości wnikania odpowiadającego czasowi maksymalnemu tj. 410 min. Na kolejnych rysunkach od 4 do 7 pokazane zostały natomiast zależności pomiędzy wysokością wnikania słupa cieczy dla danej cieczy a czasem trwania testu dla poszczególnych wartości temperatury.



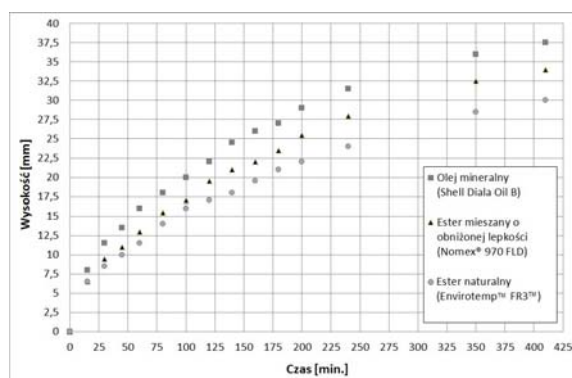
Rys.4. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu kapilary dla temperatury 20 °C



Rys.5. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu kapilary dla temperatury 60 °C



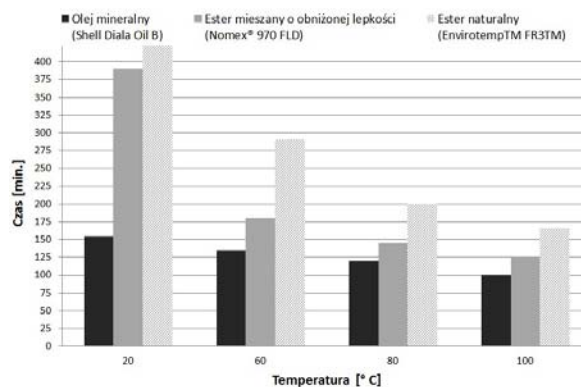
Rys.6. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu kapilary dla temperatury 80 °C



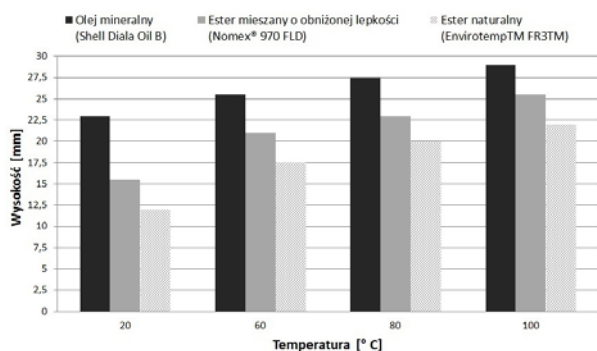
Rys.7. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od czasu trwania testu kapilary dla temperatury 100 °C

Z porównania otrzymanych zależności wyraźnie widać, że proces nasycania silnie związany jest z lepkością kinematyczną cieczy. Kolejno najbardziej efektywne nasycanie zaobserwować można dla oleju mineralnego, następnie estru mieszanego o obniżonej lepkości i klasycznego estru naturalnego. Obserwacja ta jest prawdziwa niezależnie od temperatury procesu, przy czym na uwagę zasługuje fakt, że wzrost temperatury zmniejsza różnice pomiędzy poszczególnymi cieczami na korzyść obu cieczy estrowych.

Aby przybliżyć zaobserwowane różnice pomiędzy badanymi cieczami na rysunkach 8 i 9 pokazane zostały wybrane punkty otrzymanych charakterystyk przedstawione z punktu widzenia wybranej chwili czasowej oraz określonej wysokości wnikania cieczy w preszpan.



Rys.8. Zależność czasu wnikania słupa cieczy do wysokości 20 mm od temperatury



Rys.9. Zależność wysokości wnikania słupa cieczy od temperatury dla czasu 200 min.

Z zależności czasu wnikania słupa cieczy do wysokości 20 mm od temperatury (rysunek 8) widać wyraźnie, że aby w temperaturze 20 °C ester mieszany o obniżonej lepkości osiągnął taką samą wysokość wnikania jak olej mineralny, potrzebuje on ok. 2,5 razy więcej czasu, podczas gdy klasyczny ester naturalny ponad 2,7 (w temperaturze 20 °C w założonym czasie 410 min. ester naturalny nie osiągnął bowiem w ogóle takiej wysokości). Różnice te jak wspomniano maleją z temperaturą i w maksymalnej temperaturze, jaką zastosowano w teście, krotność czasu wnikania na wysokość 20 mm w odniesieniu do czasu wnikania oleju mineralnego wyniosła odpowiednio 1,25 dla estru mieszanego i 1,66 dla klasycznego estru naturalnego. Innymi słowy, na podstawie rysunku 8 można stwierdzić, że aby w tym samym czasie móc osiągnąć wysokość wnikania danej cieczy w preszpan równą 20 mm, proces impregnacji estrem mieszanym o obniżonej lepkości musi być przeprowadzony w temperaturze 80 °C, a klasycznym estrem naturalnym w temperaturze 100 °C, podczas gdy dla oleju mineralnego ten proces można przeprowadzić w temperaturze 20 °C.

Z kolei z rysunku 9 można wywnioskować, że po określonym, ustalonym czasie wnikania cieczy w preszpan najwyższą wysokość obserwuje się zawsze w przypadku oleju mineralnego. W wybranym czasie równym 200 min. podobnie jak przy analizie rysunku 8 widać wyraźnie lepsze właściwości oleju mineralnego w porównaniu z oboma estrami. Stosunek wysokości osiągniętej przez olej mineralny do wysokości wnikania estru mieszanego i estru naturalnego w tym samym czasie 200 min. malał wraz z temperaturą. Dla temperatury 20 °C wynosił on odpowiednio ok. 1,49 dla estru mieszanego o obniżonej lepkości i ok. 1,89 dla klasycznego estru naturalnego by dla temperatury 100 °C zmalał do wartości równych ok. 1,14 i 1,32.

Wnioski

W wyniku przeprowadzenia testu określającego efektywność impregnacji preszpanu celulozowego daną cieczą dielektryczną bazującego na efekcie podciągania kapilarnego uzyskano następujące wnioski:

- zwiększenie temperatury procesu zdecydowanie poprawia wysokość wnikania cieczy w preszpan dla wszystkich badanych cieczy,
- udowodniono, że efektywność impregnacji rozumiana jako szybkość wnikania cieczy w preszpan jest nierozdzielnie związana z lepkością kinematyczną cieczy,

- w każdej temperaturze najbardziej efektywną cieczą okazał się olej mineralny, co nie jest zaskoczeniem zważywszy na najniższą lepkość kinematyczną oleju,

- wraz ze wzrostem temperatury różnice pomiędzy cieczami maleją, co jest efektem korzystnym z punktu widzenia estru mieszanego o obniżonej lepkości i klasycznego estru naturalnego,

- uzyskanie tego samego efektu impregnacyjnego w przypadku zastosowania estrów zamiast oleju mineralnego można osiągnąć poprzez wydłużenie czasu impregnacji lub zwiększenie temperatury procesu,

- wykorzystany w teście ester mieszany o obniżonej lepkości Nomex® 970 FLD wykazuje lepsze właściwości w porównaniu do „klasycznego” estru naturalnego w zakresie efektywności impregnacji; stanowi więc on może alternatywę dla gęstych i lepkich estrów naturalnych i syntetycznych przy zachowaniu właściwości środowiskowych określonych przez poziom biodegradowalności cieczy,

- obecnie kontynuowane są badania porównawcze w w/w zakresie dla różnych materiałów izolacyjnych stałych tj. różnych typów preszpanu.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Różga, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl; mgr inż. Radosław Szewczyk, DuPont Poland Sp. z o. o., E-mail: radoslaw.szewczyk@dupont.com.

LITERATURA

- [1] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa, 1983
- [2] Woźniak P., Ketner A., Świątkowski M., Ekologiczne transformatory energetyczne z esterem syntetycznym Midel 7131®, *Forum Transformatory Energetyczne*, Łódź, 2011, 159-185
- [3] Walak E., Zieliński W., Ketner A., Domaradzka S., Galoch J., Automatyczny proces suszenia i impregnacji transformatorów rozdzielczych w fabryce ABB w Łodzi, VI Konferencja Naukowo-Techniczna "Transformatory energetyczne i specjalne" Kazimierz Dolny, 2006
- [4] Dai J., Wang Z.D., A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 15 (2008), nr.2, 374-381
- [5] Krause Ch., Kaminskis U., Wild A., Rapp K., Sbravati A., Dielectric prototype test of a full scale 420 kV power transformer HV lead exit insulated with natural ester liquid, *Electr. Insul. Conf. (IEC)*, Montreal, Canada, 2016, 129-133
- [6] Przybyłek P., Rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym oraz mieszaninie estru z olejem mineralnym w aspekcie suszenia izolacji celulozowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr.10, 92-95
- [7] Różga P., Stanek M., Comparative analysis of lightning breakdown voltage of natural ester liquids of different viscosities supported by light emission measurement, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 24 (2017), n.2, 991-999
- [8] IEC 60296, Ciecze stosowane w elektrotechnice – świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej, 2012
- [9] IEC 62770, Ciecze stosowane w elektrotechnice – Świeże naturalne estry do transformatorów i podobnych urządzeń elektrycznych, 2014
- [10] Szewczyk R., Vercesi G., Innovative insulation materials for liquid-immersed transformers", DuPont Webinar, Virginia Beach, VA, USA, 2015.