ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Górnictwo z. 58 Nr kol. 399

Florian Krasucki

WPŁYW WILGOCI NA NIEKTÓRE WŁAŚCIWOŚCI ORGANICZNYCH MATERIAŁÓW ELEKTROIZOLACYJNYCH

Streszczenie. Analizowano przydatność materiałów organicznych dla urządzeń elektrycznych górniczych, a w szczególności wpływ powłok kabli i przewodów oponowych górniczych na intensywność zawilgocenia izolacji. Podano końcowe wyniki badań laboratoryjnych właściwości elektrycznych kabli i przewodów, poddanych próbie rocznego zanurzenia w wodzie i odciążanych prądem roboczym oraz badań odporności na wyładowania powierzchniowe wybranych materiałów elektroizolacyjnych.

1. Wstęp

Materiały elektroizolacyjne stosowane w górniczych urządzeniach elektrycznych eksploatowane są w atmosferze o dużej wilgotności względnej lub nawet bezpośrednio w wodzie. Dotyczy to w szczególności kabli i przewodów oponowych górniczych.

Wilgotność względną powietrza φ określa się stosunkiem koncentracji N, pary wodnej zawartej w powietrzu do ilości N_k pary wodnej potrzebnej dla osiągnięcia stanu nasycenia w tej samej temperaturze, bądź też stosunkiem ich ciśnienia

$$\varphi = \frac{N}{N_k} = \frac{p}{p_k}$$

W wyniku cyklicznych zmian obciążenia występuje zjawisko kondensacji pary wodnej na materiałach izolacyjnych i gromadzenie się wody wewnątrz obudowy urządzeń. Zjawiska te zachodzą praktycznie niezależnie od wilgotności względnej atmosfery pomieszczeń podziemnych. Kondensat ten jest zanieczyszczony kwasami azotowym i węglowym, produktami rozkładu izolacji i styków (działanie łuku elektrycznego) oraz pyłem z węgla i skał płonnych.

2. Absorpcja i dyfuzja wody przez materiały organiczne

Każdy materiał izolacyjny zależnie od struktury fizykochemicznej wchłania wodę. Zdolność do pochłaniania wody, zwaną higroskopijnością lub nasiąkliwością, wyraża się współczynnikiem absorpcji. Określa się go przyro-

stem ΔG ciężaru próbki materiału po określonym czasie przebywania w środowisku o φ = 96-100% bądź w wodzie, odniesionym do ciężaru próbki przed próbą.

Proces wchłaniania wilgoci opisuje krzywa kinetyki absorpcji. Jest to zależność koncentracji pary wodnej w funkcji czasu przy stałej temperaturze. Jeżeli materiał nie jest nasiąkliwy, na przykład szkło lub porcelana, to na jego powierzchni następuje kondensacja pary wodnej (adsorpcja) w postaci warstewki, której grubość zwiększa się ze wzrostem wilgotności względnej.

Wszystkie materiały organiczne wchłaniają oraz przepuszczają wodę pod wpływem różnicy ciśnienia pary. W warunkach stałej wilgotności i temperatury następuje po pewnym czasie ustalenie się zawartości wody w materiale. Maksymalną koncentrację pary wodnej N, jaką może pochłonąć materiał w danych warunkach, nazywamy zawilgoceniem [6] i wyrażamy w kg/m^3.

Różne materiały izolacyjne posiadają różną zawartość wody w stanie nasycenia i stan ten osiągają po różnym czasie. Przykładowo można podać, że w wyniku badań nasiąkliwości gumy chloroprenowej w wodzie destylowanej w ciągu 24 godzin, wykonanych na próbkach z opon przewodów górniczych produkcji krajowej i zagranicznej, uzyskano wartości współczynnika absorpcji od 0,05% do 0,82%.

W podobnych próbach polwinitów izolacyjnego i oponowego uzyskano [5]: 0,04-0,05% po 24 godzinach oraz 0,18-0,27% po 900 godzinach.

Wchłaniana woda może być zatrzymana i rozpuszczona w materiale (sorpcja) oraz może przenikać przez niego (dyfuzja). Zjawisko sorpcji interesuje nas przede wszystkim w powłokach izolacyjnych, a przenikalność w powłokach ochronnych, zapobiegających wnikaniu wody do ośrodka przewodu.

Wnikanie wody w materiały izolacyjne (np. kablowe) może zachodzić przez mikroskopijne pory i naczynia włoskowate. Jest to sorpcja nieaktywowana [4]. Przy wilgotności względnej większej od 80% zachodzi wewnątrz materiału adsorpcja cząsteczek wody na ściankach kapilar. Ten rodzaj sorpcji występuje głównie w materiałach nieorganicznych. W materiałach organicznych ma miejsce przede wszystkim sorpcja aktywowana (dyfuzja), a przy dużej wilgotności również osmoza. Cząsteczki wody wnikają w głąb materiału pomiędzy jego cząsteczki. Ilość wody w określonym czasie zależy od stopnia gęstości makrocząsteczek i odstępów międzycząsteczkowych oraz zawartości dodatków i grup polarnych.

Ilość wody N_o rozpuszczonej w jednostce objętości materiału izolacyjnego zależy od współczynnika rozpuszczalności h i ciśnienia pary wodnej p. Można ją wyznaczyć ze wzoru ogólnego

$$N_o = hp^n,$$

gdzie

h - współczynnik rozpuszczalności, charakteryzujący proces rozpuszczania pary wodnej w jednym m^3 materiału przy różnicy ciśnień 1 N/m^2 przy określonej temperaturze środowiska, kg/N.m

p - cząstkowe ciśnienie pary wodnej w środowisku, N/m^2

n - wykładnik potęgowy zależny od rodzaju materiału.

Uwzględniając, że $n = 1$ dla takich materiałów jak polietylen i parafina oraz $n > 1$ dla materiałów takich jak papier i guma, możemy napisać

$$N_o \geqslant h \varphi p_k.$$

W przypadku przepływu prądu przez żyły robocze następuje częściowe podsuszanie izolacji na skutek wzrostu temperatury żyły $\Theta_ż$ ponad temperaturę otoczenia Θ_o. Do określenia przybliżonej zmiany zawilgocenia można [6] skorzystać z równania charakterystycznego Clapeyrona.

Otrzymuje się więc

$$N_ż \approx N_o \frac{\Theta_o}{\Theta_ż}.$$

Proces dyfuzji przez materiał higroskopijny opisany jest podstawowymi równaniami Ficka [1, 4]

$$dN = DS \frac{dp}{dx} dt$$

$$\frac{\partial N_o}{\partial t} = \frac{D}{h} \frac{\partial^2 N_o}{\partial x^2}$$

w których

dN - ilość wody, przechodzącej przez warstwę dx materiału o powierzchni S w czasie dt przy różnicy ciśnień dp,

D - współczynnik dyfuzji, charakteryzujący proces przechodzenia pary wodnej przez materiał o powierzchni $S = 1\ m^2$ i grubości $x = 1$ m przy różnicy ciśnień 1 N/m^2 w ciągu 1 s w określonej temperaturze, kg . m/N . s

$\frac{D}{h}$ - współczynnik intensywności dyfuzji, m^2/s.

Z wzorów tych, znając wartości współczynników, obliczyć można przybliżoną ilość wody, która w określonym czasie i temperaturze może przeniknąć przez niemetaliczne powłoki ochronne.

Znając dopuszczalne zawilgocenie izolacji określić można czas nienagannej pracy urządzenia (kabla lub przewodu oponowego) w danych warunkach eksploatacji.

Współczynniki rozpuszczalności i przenikalności izolacyjnych materiałów kablowych zależą przede wszystkim od ich rodzaju i składu chemicznego oraz wilgotności i temperatury otoczenia. Po przekroczeniu wilgotności względnej 70%, zwiększa się wartość współczynnika rozpuszczalności - koncentracja pary wodnej dla tych materiałów nie jest liniową funkcją czasu. Współczynniki dyfuzji i intensywności dyfuzji wzrastają ze wzrostem temperatury. Wzrost ten można opisać funkcją wykładniczą [4]. Wartości współczynników podawane w literaturze dla tych samych materiałów są różne. Przyczyną jest odmienność budowy fizykochemicznej oraz metod i badań. Niektóre wartości współczynników [1, 3, 4] przytoczono przykładowo w tabeli 1 po przeliczeniu na międzynarodowy układ jednostek.

Tabela 1

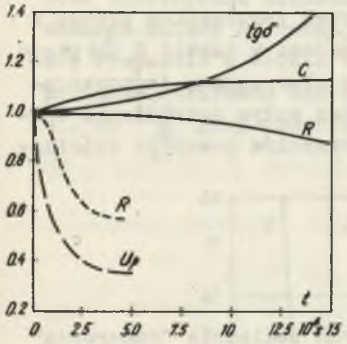
Współczynniki dyfuzji D i rozpuszczalności h dla niektórych materiałów izolacyjnych, w temperaturze 293,15°K

Materiał	D, kg . m/N . s	h, kg/N . m
Guma izolacyjna i oponowa	$2.10^{-15} - 4.10^{-14}$	$1,55.10^{-4} - 1,05.10^{-2}$
Papier	$8 . 8 . 10^{-16}$	$7 . 10^{-3}$
Polwinit	$5,8.10^{-16} - 3,5.10^{-15}$	$5.10^{-4} - 7,5.10^{-3}$
Polietylen	$6,25.10^{-17} - 1,37.10^{-15}$	$1,65.10^{-4} - 1,6.10^{-3}$
Tekstolit	$1,85 . 10^{-14}$	$4,2 . 10^{-2}$

3. Powłoki ochronne w kablach i przewodach

W tym samym okresie czasu może wniknąć do izolacji przewodu różna ilość wody - zależnie od zastosowanych materiałów oraz wilgotności środowiska i temperatury. Jednocześnie ta sama ilość wchłoniętej wody może powodować inne zmiany podstawowych własności przewodu. Dlatego też określenie dopuszczalnego zawilgocenia izolacji powinno być wynikiem badań eksperymentalnych dla danych konstrukcji i przeznaczenia przewodów. Zazwyczaj jako kryterium dopuszczalnego zawilgocenia przewodów elektroenergetycznych, dla określenia czasu ich poprawnej pracy, przyjmowana jest wytrzymałość elektryczna izolacji. Kryterium to charakteryzuje jednak tylko miejscowe pogorszenie izolacji, na przykład w wyniku mechanicznego uszkodzenia powłok. Natomiast w przypadku ogólnego zawilgocenia opór izolacji ulegnie bardzo dużemu zmniejszeniu, a mimo to jej wytrzymałość dielektryczna może być dostateczna. Wpływ czasu zawilgacania przedstawiono przykładowo na rys. 1. Podano na nim po opracowaniu częściowe wyniki próby moczenia w wodzie wiertarkowego przewodu oponowego z zabezpieczonymi końcami [1], oraz próbki gumy izolacyjnej [3] i kabla o izolacji papierowej nasyconej z uszkodzoną powłoką ołowianą [2].

Dla kabli i przewodów górniczych, uwzględniając ich praktyczny okres eksploatacji, decydujący wpływ na stopień zawilgocenia mają uszkodzenia powłok zewnętrznych oraz sposób uszczelnienia połączeń i zakończeń. Dotyczy to przede wszystkim kabli o izolacji papierowej rdzeniowej.



Rys. 1. Względna zamiana oporu wskrośnego izolacji R, pojemności C oraz stratności tg δ i wytrzymałości elektrycznej U_p w funkcji czasu nawilżania t

——— OG, ····· KSFt, -·-·-·- próbka gumy izolacyjnej

Badania wpływu długotrwałego zanurzenia w wodzie przewodów o powłokach niemetalowych na wartość rezystancji izolacji przeprowadzono na próbkach następujących przewodów i kabli 1000 V: OnG 5 x 4 mm^2, OnGek 5 x 4 mm^2, OnG 4 x 50 mm^2 + 3 x 2,5 mm^2, OnGekżFpy 3 x 95 mm^2 + 50 mm^2, YKYFoy 4 x x 35 mm^2.

Próbki o długości około 6 m zanurzono w wodzie wodociągowej na głębokości 1 m. Końce nieuszczelnione wystawały około 0,5 m ponad powierzchnię wody, w pomieszczeniu o wilgotności względnej ca 70%. Dla każdego rodzaju przewodu badano po dwie próbki, przy czym żyły robocze próbek oznaczonych "I" obciążono prądem elektrycznym o natężeniu od 50-100% obciążenia dopuszczalnego długotrwałe.

Obciążenie realizowano w cyklu tygodniowym jednozmianowym, przy pomocy transforma-

Tabela 2

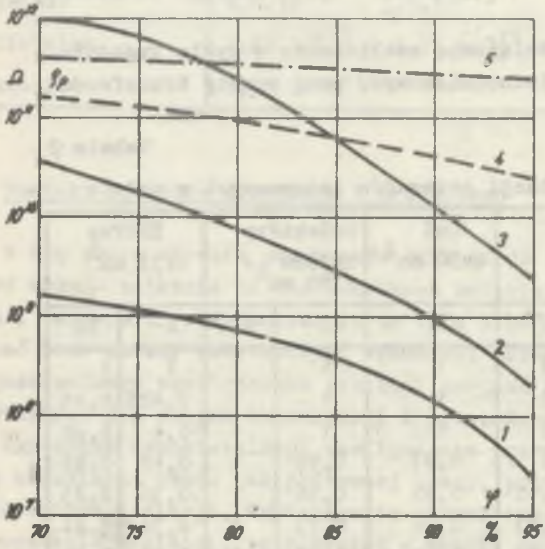
Względna zmiana rezystancji izolacji przewodów zanurzonych w wodzie

Okres badań		OnG 5x4 mm^2		OnGek 5x4 mm^2		OnG 4x50 mm^2	OnGekżFpy 3x95mm^2+ + 50 mm^2		YKYFoy 4x35 mm^2	
d	10^6s	I	II	I	II	I	I	II	I	II
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0,864	0,74	0,77	1	1	1	1	1	0,425	0,48
14	1,2096	0,69	0,75	1	1	1	1	1	0,4	0,48
28	2,4192	0,5	0,68	1	1	0,97	0,98	1	0,42	0,45
46	3,9744	0,4	0,65	0,88	0,95	0,95	0,96	1	0,36	0,43
60	5,184	0,39	0,63	0,85	0,93	0,96	0,93	1	0,34	0,41
90	7,776	0,34	0,63	0,79	0,87	0,95	0,97	1	0,32	0,39
180	15,552	0,31	0,64	0,76	0,85	0,93	0,96	1	0,33	0,4

torów wielkoprądowych. W próbkach przewodu OnG 5 x 4 mm^2 oraz kabla YKYFoy uszkodzono powłoki zewnętrzne. Badania przeprowadzano przez okres 360 dni. Okresowe pomiary oporu izolacji wykonywano megaomomierzem lampowym co najmniej po 20 godzinach od chwili wyłączenia obciążenia - odczyty po 60 i 300 sekundach pomiaru. Wartości średnie z obu pomiarów sprowadzano do temperatury 20°C i porównywano z wynikami pomiaru przed zanurzeniem próbek w wodzie. Opracowane w ten sposób wyniki pomiarów podano w tabeli 2 dla pierwszych 180 dni badań. W dalszych dniach badań nie obserwowano jednoznacznego zmniejszania się oporu izolacji. Widoczny jest wpływ uszkodzenia opony zewnętrznej. Podobnie cykliczne nagrzewanie przewodów powoduje dodatkowy wzrost zawilgocenia po wyłączeniu obciążenia.

4. Odporność powierzchniowa

W przypadku organicznych materiałów izolacyjnych względnie "odpornych" na wnikanie wilgoci (np. guma, żywica epoksydowa, polietylen, polwinit) ujemne oddziaływanie wilgotnego i zapylonego środowiska przejawia się zmniejszeniem oporu powierzchniowego, a w następstwie wzrostem wartości prądów upływu po powierzchni materiału (prądów pełzających).

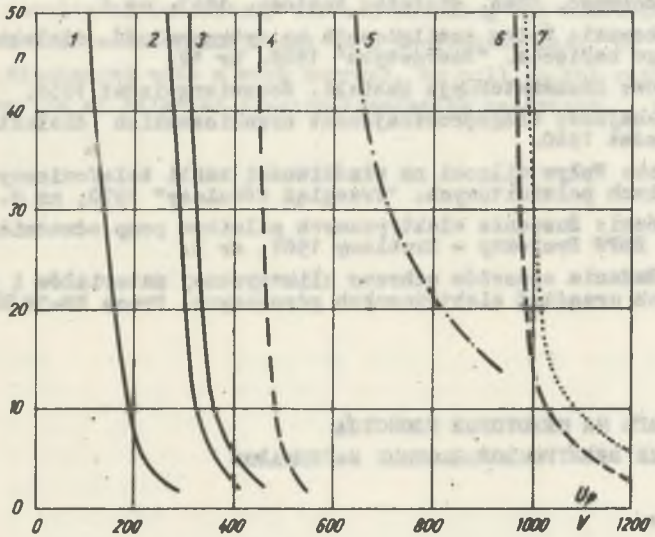


Rys. 2. Rezystywność powierzchniowa ρ_p materiałów izolacyjnych w funkcji wilgotności względnej φ powietrza

1 - płyty bakielitowo-tekstylne, 2 - płyty bakielitowo-tekstylne pokryte żywicą "epidian 5", 3 - żywice "epidian 5", 4 - olejna taśma elektroizolacyjna, 5 - ceratka szkło-silikonowa

Pomiary wpływu wilgotności powietrza na rezystancję powierzchniową przeprowadzano na próbkach materiałów umieszczonych w komorze prób klimatycznych (w ZKMPW). Badane próbki przed pomiarem umieszczano w atmosferze o temperaturze 300-310°K i wilgotności względnej 60%. Pomiary wykonywano przy stałej temperaturze 308°K i ustalonych wilgotnościach względnych przestrzeni probierczej: 60, 65, 70, 75, 79, 82, 85, 89 93 i 96%. Mierzono opór między elektrodami ustawionymi na powierzchni próbek. Na podstawie analizy wyników pomiarów poszukiwano sposobów uodpornienia badanych materiałów na wpływ wilgoci. Niektóre wyniki tych badań podano wykreślnie na rys. 2.

Również pyły kopalniane osadzają się na powierzchni materiałów powodując dodatkowe zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej. Szczególnie ma to znaczenie przy zwiększaniu napięcia zasilania maszyn górniczych. Przewodność elektryczna mieszaniny wody destylowanej (kondensatu) i pyłu kopalnianego zależy od rodzaju i ilości pyłu - ilości substancji, które mogą się rozpuścić w wodzie tworząc elektrolit. Przykładowo można podać, że z pomiarów otrzymano następujące orientacyjne wartości w temperaturze 293 K: $6 \cdot 10^{-3} \frac{S}{m}$ przy zawartości pyłu 1 kg/m^3 oraz $18 \cdot 10^{-3} \frac{S}{m}$ dla 4 kg/m^3.



Rys. 3. Odporność materiałów izolacyjnych na prądy pełzające - liczba kropel n w funkcji napięcia probierczego U_p

1 - polwinit powłokowy, żywica epoksydowa "epidian 2", 2 - polwinit suspensyjny i polichloropren po próbach starzenia cieplnego, 3 - polwinit i polichloropren, 4 - "epidian 5" z utwardzaczem szybkoreagującym BA86, 5 - "epidian 5" utwardzany trójetylenoczteroaminą w temperaturze otoczenia, 6 - polwinit pokryty warstwą żywicy epoksydowej na podkładzie emalii chlorokauczukowej, 7 - guma izolacyjna

Niewielkie początkowo prądy powierzchniowe powodują "wypalanie" ścieżek przewodzących, a w konsekwencji zwarcia doziemne i międzyprzewodowe. Odporność na prądy pełzające układów złożonych uwarunkowana jest odpornością najsłabszego elementu składowego. Odporność tę bada się na próbkach materiałów metodą kroplową według PN-58/E-04407 oraz metodą wysokonapięciową według PN-64/E-04442. Miarą odporności w metodzie kroplowej jest liczba kropel 0,1% roztworu chlorku amonowego w wodzie destylowanej, które muszą spaść między elektrody probiercze dla wywołania trwałego zwarcia przy określonym napięciu probierczym. Porównanie zdefiniowanej w ten sposób odporności niektórych materiałów podano na rys. 3.

Są to wartości przeciętne uzyskane z wielu badań. Pozwalają one na wstępną ocenę przydatności tych materiałów dla warunków pracy w podziemiach kopalń.

LITERATURA

1. S. Bladowski, R. Włodek: Wpływ wilgoci na właściwości izolacyjne przewodu oponowego, CBKK, Biuletyn Kablowy, 1963, nr 6.
2. S. Grzybowski: Wpływ zawilgocenia na wytrzymałość dielektryczną kabli wysokiego napięcia. "Energetyka" 1965, nr 12.
3. W. Linkow: Ekskawatornyje kabieli. Goseniergoizdat 1958.
4. M.M. Michajłow: Włagopronicajemost organiczeskich dielektrykow. Goseniergoizdat 1960.
5. R. Włodek: Wpływ wilgoci na właściwości kabli telefonicznych górniczych w powłokach polwinitowych. "Przegląd Górniczy" 1970, nr 9.
6. T. Zarański: Suszenie elektrycznych silników pomp odwadniania głównego kopalń. BBPW Projekty - Problemy 1967, nr 3.
7. ZKMPW: Badania sposobów ochrony klimatycznej materiałów i układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych górniczych. Praca EB-38/NB4, 1969.

ВЛИЯНИЕ ВЛАГИ НА НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА
ОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р е з ю м е

Проведён анализ пригодности органических материалов для горного электрического оборудования, в особенности влияния оболочек кабелей и горных проводов в резиновой трубке на интенсивность отсырения изоляции.

Поданы окончательные результаты лабораторных исследований свойств электрических кабелей и проводов, подвергнутых испытаниям на годичное погружение в воде и подвергаемых нагрузке рабочим током, а также результаты исследований прочности к действию поверхностных разрывов выбранных электроизоляционных материалов.

THE INFLUENCE OF HUMIDITY ON SOME PROPERTIES
OF ORGANIC ELECTROINSULATION MATERIALS

S u m m a r y

The usability of some organic materials for mining electrical appliances, in particular the influence of mining cables and tyre conduits on the intensity of humidity of insulations, have been investigated.

The final results of laboratory tests concerning the electrical properties of cables and conduits subjected to a whole-year test of immersion in water and discharged with a work current, as well as the resistance to surface discharges of selected electro-insulating materials, have been given.