

Jan SUBOCZ, Marek ZENKER

ZACHODNIOPOMORSKI UNIwersYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGII I DIAGNOSTYKI
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Wpływ zawilgocenia na relaksację dielektryczną impregnowanego olejem mineralnym Nomexu na podstawie pomiarów PDC

Prof. dr hab. inż. Jan SUBOCZ

Autor ponad 170 prac z zakresu elektrotechnologii, fizyki procesów relaksacyjnych w dielektrykach oraz diagnostyki urządzeń elektrycznych. Członek Komisji Nauk Elektrycznych o/Poznań PAN, PKME SEP, IEEE, PKWSE/CIGRE.



e-mail: jan.subocz@zut.edu.pl

Dr inż. Marek Łukasz ZENKER

Adiunkt w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki. Absolwent Wydziału Elektrycznego w kierunku fizyka techniczna oraz elektrotechnika. Autor 20 publikacji z zakresu procesów relaksacyjnych w polimerach oraz wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: zenekm@wp.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano pomiary PDC (Polarization Depolarization Current) impregnowanego olejem transformatorowym Nomexu o różnym zawilgoceniu. Analizę jakościową procesów relaksacyjnych przeprowadzono za pomocą aproksymacji prądów polaryzacji funkcją Jonschera LFD. Badania wykazały, że szacowanie zawilgocenia Nomexu za pomocą metody PDC może być utrudnione dla zawartości wody 1÷3,5%. Następnie wyniki badań zweryfikowano z wynikami pomiaru metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy).

Słowa kluczowe: Nomex, relaksacja dielektryczna, PDC, FDS.

Influence of moisture content on dielectric relaxation of oil impregnated Nomex basing on PDC measurements

Abstract

Nomex has been introduced to electrotechnical industry mainly as a high voltage insulating material, used for example in power transformers. The aim of this paper is to identify the influence of moisture on dielectric relaxation of solid-liquid insulation consisting of Nomex impregnated with transformer oil. To perform such research, there was constructed a special measurement set-up with steel electrodes 20x20 cm large. A sheet of Nomex 410, 0.76 mm thick, was placed between these electrodes. The required values of moisture level were achieved by drying Nomex at 150°C in a laboratory vacuum chamber or through moisturization in a Feutron climate chamber at the relative air humidity 90% and the temperature 24°C. The moisture level was estimated on the basis of measurements of weight changes. Relaxation processes were measured with the PDC method (Polarization Depolarization Current). The research showed that assessment of the moisture content with the PDC method can be difficult for the values from the range 1-3%. The experimental results were verified with FDS (Frequency Domain Spectroscopy) measurements. The analysis of the relaxation process of oil impregnated Nomex showed that: a) water content in Nomex results in significant increase in dielectric losses, which seems to be caused by water particles, b) in the moisture range 1-3% dielectric response of Nomex is practically the same and does not depend on the moisture level. The same effect was observed for both relaxation process and conductivity, c) for the water content above 3-3,5% there is a rapid increase in the conductivity and dielectric losses. It is probably due to the exceeding percolation threshold of water particles gathered between aramid fibres.

Keywords: Nomex, dielectric relaxation, PDC, FDS.

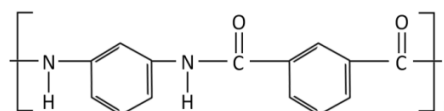
1. Wstęp

W 1964 roku po raz pierwszy Grupa badaczy prowadzona przez Stephanie L. Kwolek, amerykańkę polskiego pochodzenia dokonała syntezy aramidu. W następstwie odkrycia Kevlaru, zespół kierowany przez Wilfred'a Sweeney'a wynalazł Nomex który wprowadzono do sprzedaży w 1967 roku. W latach 70 ubiegłego wieku na

terenie dawnego Z.S.R.R. rozpoczęto produkować materiał znany w literaturze jako Fenilon lub Fenilon (ros. Фенилон) będący odpowiednikiem amerykańskiego Nomexu. W 1972 roku pracownicy holenderskiej firmy AKZO odkryli aramid Arenka, który wprowadzono do produkcji w 1977 roku, dziś znany jako Twaron, chemiczny odpowiednik Kevlaru, zaś 1987 roku rozpoczęto sprzedaż poliamidu aromatycznego o nazwie Technora o nowej budowie chemicznej. W tym samym czasie nad nowym aramidem pracowała Kolon Industries, Inc. aby w 1983 uzyskać amerykański patent na Heracron wprowadzony do produkcji dopiero w 2005 roku. Użyta w artykule nazwa handlowa badanego materiału należy do amerykańskiej firmy DuPont założonej w 1802 roku i będącej w posiadaniu patentów również na inne znane materiały izolacyjne takie jak Teflon czy Freon [1].

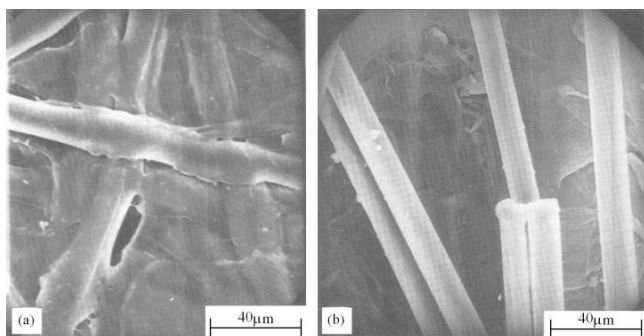
Nomex jest aramidem należącym do rodziny tworzyw sztucznych zwanych poliamidami aromatycznymi (PA), nazywanymi potocznie syntetycznym jedwabiem, gdyż ich wytrzymałość przy tej samej masie jest do pięciu razy większa niż stali. Charakteryzują się wysoką odpornością mechaniczną, są stosunkowo lekkie, niepalne, nietopliwe, odporne na działanie agresywnych chemikaliów. Stosowany w elektrotechnice Nomex w porównaniu do innych aramidów ma niższą temperaturę rozkładu oraz mięknięcia, łatwiej rozpuszcza się w kwasie siarkowym przez co jego przetwarzanie jest tańsze.

Z uwagi na sztywną i pałeczkową budowę, makrocząsteczki aramidu łatwo ulegają krystalizacji, zarówno na etapie produkcji jak i obróbki. Nomex w temperaturze 340-360°C krystalizuje do tzw. fibryli. Ponadto para-aramidy w roztworach potrafią tworzyć stan ciekłokrystaliczny, co ułatwia proces przetwórstwa. Budowę chemiczną Nomexu przedstawiono na rysunku 1.

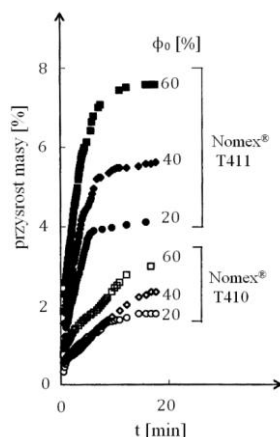


Rys. 1. Wzór chemiczny materiału Nomex
Fig. 1. Chemical formula of Nomex

Zdjęcia rentgenowskie wykazały, że cząsteczki wody wnikają w wolne przestrzenie między pałeczkowatymi cząsteczkami poliamidów aromatycznych, nie naruszając krystalicznej struktury polimeru, co sprawia że zawilgacanie aramidów jest procesem odwracalnym. Ilość i wielkość przestrzeni w której może gromadzić się woda zależy od stopnia upakowania włókien. Kalandrowane aramidy (przykładowo Nomex typ 410) cechuje większe upakowanie i bardziej krystaliczna struktura (rys. 2), co powoduje m.in. mniejszą sorpcję wody (rys. 3) [2].



Rys. 2. Fotografia SEM Nomexu typu: 410 (a) i 411(b) [2]
Fig. 2. SEM picture of Nomex type: 410 (a) and 411(b) [2]



Rys. 3. Krzywe sorpcji wody Nomexu dla różnych wilgotności względnych powietrza [2]
Fig. 3. Curves of water sorption of Nomex for various relative moisture levels of air [2]

Z aramidów produkuje się hełmy i kaski ochronne, kamizelki kloodoporne, membrany głośników, elementy wzmacniające odzież i pojazdy, kije do golfa, powłoki nart, kajaków, rakiet tenisowych i żagle jachtów. Ponadto z włókien aramidowych tworzy się bieliznę i specjalistyczne kombinezony. W branży elektrotechnicznej Nomex znalazł ważne zastosowanie jako wysokonapięciowy materiał izolacyjny o dużej odporności termicznej.

Niniejsza publikacja dotyczy rozpoznania wpływu zawilgocenia na relaksację dielektryczną stało-ciekłej izolacji złożonej z Nomexu impregnowanego olejem transformatorowym.

2. Obiekt i metodyka

W celu przeprowadzenia badań wpływu zawilgocenia na relaksację dielektryczną Nomexu zbudowano stanowisko badawcze, złożone ze stalowych elektrod o wymiarach 20×20 cm. Pomiędzy elektrodami umieszczano arkusz Nomexu typu 410 o grubości 0,76 mm. Żądane wartości zawilgocenia w zakresie 0 ÷ 6% uzyskiwano poprzez suszenie Nomexu w temperaturze 150 °C w komorze próżniowej i późniejsze zawilgacanie w komorze klimatycznej Feutron KPK 400, przy względnej wilgotności powietrza 90% w temperaturze 24 °C. Wartość zawilgocenia ustalano na podstawie pomiaru zmiany masy. Papier aramidowy po zaimpregnowaniu suchym olejem transformatorowym Nyrto Taurus ponownie umieszczono w komorze klimatycznej, w celu przeprowadzenia pomiarów w temperaturze 24 °C.

Procesy relaksacyjne w dziedzinie czasu badano metodą PDC (Polarization Depolarization Current), natomiast w dziedzinie częstotliwości metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy). Do wykonania pomiarów użyto elektrometru Keithley 6517A oraz systemu DIRANA OMICRON. Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program Origin v.8.0 oraz WinFit firmy Novocontrol. Charakterystyki w dziedzinie czasu prądu polaryza-

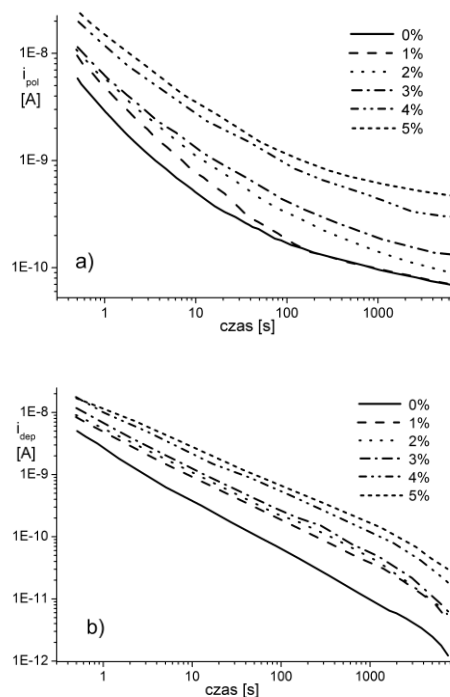
cji aproksymowano równaniem Jonschera LFD danym w szerokim przedziale czasowym, w postaci [3]:

$$f(t) = A_1 t^{-n_1} + A_2 t^{-n_2} \quad (1)$$

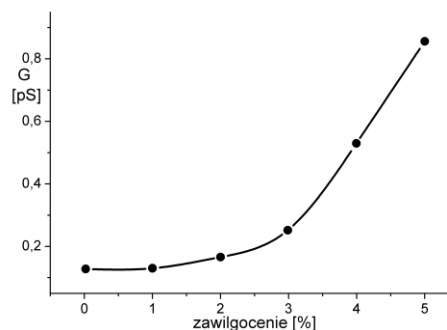
gdzie: t – czas, A_1, A_2, n_1, n_2 – współczynniki relaksacji

3. Wyniki badań

Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk PDC Nomexu impregnowanego olejem transformatorowym (rys. 4). Wynika z nich, że wzrost zawilgocenia powoduje wzrost wartości prądu polaryzacji i depolaryzacji w całym zakresie rejestrowanego czasu. Cechą charakterystyczną odpowiedzi dielektrycznej zawilgoczonego Nomexu jest to, że dla zawartości wody powyżej 3% jest widoczny znaczący przyrost prądu polaryzacji w porównaniu do próbek o mniejszym zawilgoceniu (rys. 4a). Podobny efekt zaobserwowano podczas procesu depolaryzacji (rys. 4b). Zwrócono uwagę na fakt, że zmiana zawilgocenia w przedziale 1÷3% w niewielkim stopniu wpływa na wartość prądu oraz dynamikę procesu polaryzacji i depolaryzacji.



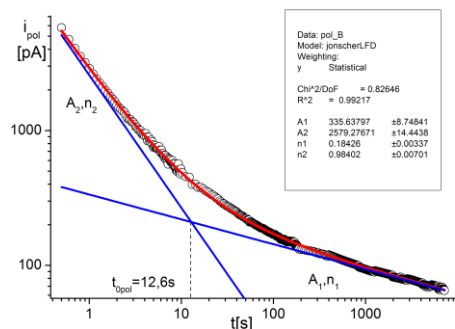
Rys. 4. Charakterystyki prądu polaryzacji (a) i depolaryzacji (b) Nomexu impregnowanego olejem mineralnym o różnej zawartości wilgoci
Fig. 4. Polarization (a) and depolarization (b) current of mineral oil impregnated Nomex of various moisture content



Rys. 5. Wpływ zawilgocenia na konduktancję próbek impregnowanego Nomexu
Fig. 5. Influence of moisture content on conductivity of impregnated Nomex samples

Na rysunku 5 pokazano wpływ zawilgocenia na konduktancję próbek impregnowanego Nomexu. W badanym przedziale zawilgocenia jej zmiany były relatywnie niewielkie i zawierały się w jednym rzędzie wielkości. Jednak dla zawilgocenia większego od 3% obserwuje się gwałtowny wzrost przewodnictwa Nomexu.

Analizę jakościową odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu impregnowanego Nomexu o różnym stopniu zawilgocenia przeprowadzono przy zastosowaniu zależności Jonschera LFD (1). Przykładową analizę dla impregnowanej ale suchej próbki Nomexu pokazano na rysunku 6. Natomiast w tabeli 1 zawarto parametry relaksacji dla całej populacji próbek.



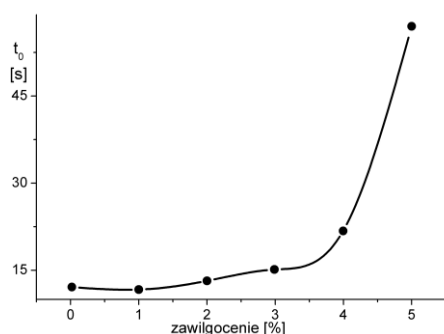
Rys. 6. Analiza procesu relaksacji w dziedzinie czasu suchego Nomexu impregnowanego olejem mineralnym

Fig. 6. Analysis of the relaxation process in time domain for dry Nomex impregnated with mineral oil

Tab. 1. Parametry relaksacji impregnowanego Nomexu o różnym zawilgoceniu
Tab. 1. Relaxation parameters of impregnated Nomex of various moisture content

zawilgocenie X [%]	A ₁	A ₂	n ₁	n ₂	t ₀
0	335.64	2579.28	0.18	0.98	12,6
1	286.10	4669.47	0.21	0.91	11,6
2	804.77	5406.18	0.15	0.86	13,6
3	942.01	6560.03	0.26	0.82	15,8
4	1568.94	10254.34	0.19	0.78	21,4
5	1153.67	14335.54	0.11	0.73	57

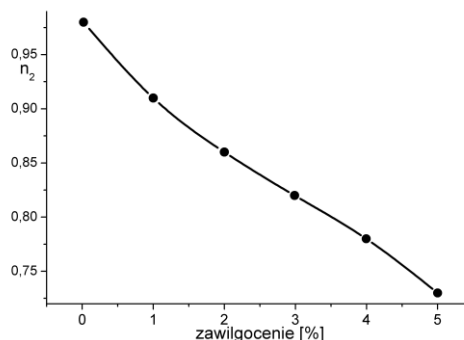
Przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć parametr t₀ dla różnego zawilgocenia Nomexu. Interpretacja fizyczna parametru t₀ utożsamia go z czasem charakterystycznym po którym następuje zmiana procesu relaksacyjnego. W zakresie zawilgocenia Nomexu do 3% czas t₀ nieznacznie wydłuża się, natomiast dla większej zawartości wody następuje jego dynamiczne wydłużenie (rys. 7).



Rys. 7. Zależność parametru t₀ od zawilgocenia impregnowanego Nomexu
Fig. 7. Dependence of parameter t₀ on the moisture content of impregnated Nomex

Parametr n₂ charakteryzuje dynamikę szybkozmiennego procesu relaksacyjnego. Wraz ze wzrostem zawilgocenia Nomexu

parametr n₂ maleje w sposób liniowy. Dla badanych próbek Nomexu wartość parametru n₂ wynosi 0,73 ÷ 0,98 (rys. 8).



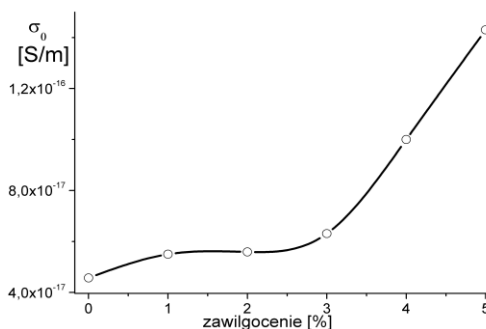
Rys. 8. Zależność parametru n₂ od zawilgocenia impregnowanego Nomexu
Fig. 8. Dependence of parameter n₂ on the moisture content of impregnated Nomex

Z przeprowadzonej analizy nasuwa się wniosek, że szacowanie zawilgocenia izolacji WN złożonej z Nomexu i oleju może być utrudnione w zakresie zawilgocenia 0÷3,5%. Wynika to z małej wrażliwości odpowiedzi dielektrycznej na zawilgocenie impregnowanego Nomexu. Podobne wnioski wynikają z pomiarów procesów relaksacyjnych Nomexu w dziedzinie częstotliwości, które autor zaprezentował w literaturze [4]. Analizę jakościową odpowiedzi dielektrycznej impregnowanego Nomexu w badanym spektrum częstotliwości (10⁻⁴÷5·10³ Hz) o różnym stopniu zawilgocenia wykonano za pomocą wieloskładnikowego równania H-N w postaci [4]:

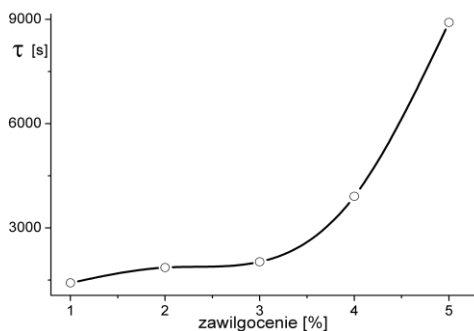
$$\epsilon(\omega) = -j \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0 \omega} \right)^N + \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\Delta \epsilon_k}{(1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k})^{\beta_k}} + \epsilon_{\infty k} \right) \quad (2)$$

gdzie: Δε – polaryzowalność, τ – czas relaksacji, ε_∞ – przenikalność optyczna, α, β – stałe H-N, σ₀ – parametr konduktywności zmiennoprądowej.

Wynika z nich, że najbardziej istotne właściwości takie jak: przewodnictwo, straty dielektryczne, parametr konduktywności zmiennoprądowej oraz czasy relaksacji w zakresie zawilgocenia do 3% są praktycznie niezmiennie. Powoduje to duże trudności w szacowaniu małych zawartości wody w impregnowanym Nomexie. Natomiast dla zawilgocenia powyżej 3÷3,5% następuje szybki przyrost przewodnictwa oraz stałej czasowej głównego procesu relaksacyjnego co prawdopodobnie związane jest z przekroczeniem progu perkolacji cząsteczek wody zawartej pomiędzy włóknami aramidowymi Nomexu (rys. 9, 10).



Rys. 9. Zależność parametru konduktywności zmiennoprądowej σ₀ od zawilgocenia impregnowanego Nomexu
Fig. 9. Dependence of parameter σ₀ on the moisture content of impregnated Nomex



Rys. 10. Wpływ zawilgocenia impregnowanego Nomexu na zmiany stałej czasowej τ niskoczęstotliwościowego procesu relaksacyjnego

Fig. 10. Influence of the moisture content of impregnated Nomex on the values of time constant τ of the low frequency relaxation process

4. Podsumowanie

Pomiary PDC impregnowanego olejem mineralnym Nomexu o różnym zawilgoceniu wykazały, że:

- istnieją dwa przedziały w których odpowiedź dielektryczna znacząco się różni w całym zakresie czasu pomiaru,
- w zakresie zawilgocenia 0÷3% wartości konduktancji są praktycznie niezmiennie. Podobnie zmiana mechanizmu relaksacji występuje później, gdyż proces polaryzacji przebiega z mniejszą dynamiką i trwa dłużej,
- dla zawilgocenia powyżej 3÷3,5% następuje szybki wzrost prądu przewodnictwa oraz znaczne wydłużenie się procesu relaksacji, co prawdopodobnie związane jest z tworzeniem du-

żych aglomeratów wody lub przekroczeniem progu perkolacji czasteczek wody w strefie włókien aramidowych Nomexu,

d) porównanie wyników badań metodami PDC i FDS pozwala wyciągnąć wniosek, że wykorzystanie procesów polaryzacji i przewodnictwa do szacowania zawilgocenia impregnowanego olejem Nomexu może być bardzo utrudnione w porównaniu do izolacji papierowo-olejowej [5-7].

5. Literatura

- <http://www2.dupont.com> (zasoby internetowe w dniu 13.05.12).
- Jain A, Vijayan K., Effect of penetrants on the aramid Nomex, Bulletin of Materials Science, T. 23 (2000), nr 3, 211–214.
- Jonscher A.: The Universal Dielectric Response and Its Physical Significance, IEEE Trans. El. Insulation, vol. 27, No 3, (1992), 407-423.
- Subocz J., Wpływ zawilgocenia na relaksację dielektryczną impregnowanego olejem Nomexu na podstawie pomiarów FDS, Przegląd Elektrotechniczny, (2013), materiały w druku.
- Zenker M., Spektroskopia dielektryczna układu papier-olej z osadami na celulozie, Przegląd Elektrotechniczny, 11b (2010), 82-85.
- Szymański J., Graczkowski A., Mościcka-Grzesiak H., Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie czasu i częstotliwości izolacji papierowo-olejowej o znacznym stopniu niejednorodności zawilgocenia, Przegląd Elektrotechniczny, 10 (2008), 32-35.
- Zenker M., Analiza relaksacji modelu kanału olejowego transformatora na podstawie pomiarów PDC, Energetyka, 11 (2007), 9-13.

otrzymano / received: 28.11.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.01.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Szanowni Autorzy artykułów publikowanych w PAK

W trosce o jak najwyższy poziom punktacji miesięcznika PAK zwracam się z prośbą o cytowanie artykułów opublikowanych w PAK w innych artykułach, zwłaszcza tych publikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej. Ma to bezpośredni wpływ na współczynnik IF (Impact Factor) miesięcznika PAK.

W algorytmach oceny czasopism współczynnik IF ma największą wagę. Na zwiększenie wartości współczynnika IF redakcja czasopisma nie ma żadnego wpływu, ale wszystko zależy od Autorów cytujących. W przypadku miesięcznika PAK aktualnie każde cytowanie zwiększa IF o około 0,002. Oczywiście cytowanie artykułu tylko wtedy jest uzasadnione, jeżeli jest on tematycznie związany z artykułem cytującym, a autor korzystał z niego przy przygotowaniu pracy.

Aby ułatwić Autorom korzystanie z artykułów opublikowanych w PAK (a także możliwość cytowania) została opracowana przez redakcję PAK „Wyszukiwarka”, umożliwiająca wyszukiwanie artykułów według nazwiska autora, słowa tytułu artykułu, albo frazy kluczowej.

Aby skorzystać z „Wyszukiwarki” należy:

- wejść na stronę: www.pak.info.pl
- w menu „Wyszukiwarka” (po lewej stronie ekranu) wybrać „Artykuły”.

Strona zawiera również szereg innych łatwo dostępnych funkcjonalności, m.in. wykazy artykułów opublikowanych w PAK, a cytowanych w artykułach opublikowanych w czasopismach z listy filadelfijskiej.

Zdając sobie sprawę, że redakcje niektórych czasopism usuwają cytowania artykułów publikowanych w czasopismach spoza listy filadelfijskiej, np. argumentując, że są one mało dostępne. Taka argumentacja będzie mniej uzasadniona, jeżeli tytuł naszego miesięcznika oraz tytuły artykułów będą podane w cytowaniach w języku angielskim. Proszę zauważyć, że oficjalny tytuł anglojęzyczny miesięcznika PAK (występujący na okładce) ma formę: Measurement, Automation and Monitoring (MA&M), a wszystkie artykuły naukowe publikowane w PAK są napisane albo w języku angielskim, albo mają rozszerzone abstrakty w tym języku.