

**Piotr PRZYBYŁEK**POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI  
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań**Wpływ wybranych czynników na temperaturę inicjacji bubble effect**

Dr inż. Piotr PRZYBYŁEK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor i współautor ponad 40 publikacji, głównie z zakresu badań właściwości izolacji papier-olej oraz metod związanych z diagnostyką izolacji transformatora. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 6 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl

**Streszczenie**

Artykuł dotyczy groźnego zjawiska polegającego na wydzielaniu pary wodnej z izolacji papierowo-olejowej nazywanego z ang. *bubble effect*. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu szybkości wzrostu temperatury izolacji celulozowej oraz ciśnienia na wartość temperatury inicjacji *bubble effect*. Zakładając najbardziej niekorzystne warunki pracy izolacji papierowo-olejowej, wyznaczono temperaturę mogącą wywołać *bubble effect*. Dla przyjętych warunków eksperymentu temperatura ta jest równa 92°C.

**Słowa kluczowe:** efekt pęcherzykowania (bąbelkowania), izolacja papierowo-olejowa, transformator.

**Influence of selected factors on bubble effect initiation temperature****Abstract**

The bubble effect releases water from oil-paper insulation. The water vapour released from paper insulation, which is in the electric field, can lead to partial discharges and also to dangerous pressure increase in the transformer tank. The paper presents influence of the temperature (Tabs. 1 and 3) and pressure (Tabs. 2 and 4) rate increase on the bubble effect initiation temperature. Investigations were performed when taking into consideration the water content and ageing degree of the cellulose and gas content in oil. From the presented research results one can draw a conclusion that the influence of the temperature increase rate on the bubble effect initiation temperature is significant (Section 2). However, within the investigated pressure range the significant influence of the pressure on the bubble effect initiation temperature was not stated (Section 3). When assuming very unfavorable conditions of the work of oil-paper insulation, the minimum temperature of the bubble effect initiation was determined. Under the assumed experimental conditions, this temperature is equal to 92°C.

**Keywords:** bubble effect, oil-paper insulation, transformer.

**1. Wprowadzenie**

W niniejszym artykule efekt bąbelkowania (z ang. *bubble effect*) należy rozumieć jako wydzielanie pęcherzy gazu z izolacji celulozowej zaimpregnowanej olejem mineralnym. W pracy [1] wykazano, że wydzielające się w izolacji pęcherze są tworzone przez parę wodną.

*Bubble effect* niesie ze sobą szereg zagrożeń dla urządzeń energetycznych o izolacji celulozowej syconej cieczą izolacyjną. Może prowadzić do wzrostu ciśnienia wewnątrz urządzenia, wyładowań niezupełnych, a nawet do przebicia elektrycznego izolacji. Problem ten dotyczy głównie transformatorów o długim czasie eksploatacji, co wiąże się najczęściej ze znacznym zawilgoceniem ich izolacji. Problem powstaje najczęściej w przypadku potrzeby zwiększenia obciążenia takich jednostek.

Warunkiem koniecznym do wystąpienia *bubble effect* jest osiągnięcie przez izolację celulozową temperatury krytycznej, która zależy od wielu czynników.

Na temperaturę krytyczną inicjacji *bubble effect* mogą mieć wpływ następujące czynniki: zawartość wody w papierze, stopień polimeryzacji celulozy, zawartość gazów w oleju, szybkość wzrostu temperatury izolacji, ciśnienie oraz natężenie pola elektrycznego.

W artykułach [1, 2] autor przedstawił zależność temperatury inicjacji *bubble effect* od zawartości wody w izolacji papierowej nowej oraz zdegradowanej. Wykazano, że w wyniku zesterzenia celulozy (spadku jej stopnia polimeryzacji) dochodzi do znacznego obniżenia temperatury krytycznej.

W pracach [1 i 3] wykazano, że wraz ze wzrostem zawartości gazów w oleju zmniejsza się temperatura inicjacji *bubble effect*.

W niniejszej pracy szczegółowo przeanalizowano wpływ szybkości wzrostu temperatury izolacji oraz wpływ ciśnienia na temperaturę inicjacji *bubble effect*.

Szybkość wzrostu temperatury izolacji transformatora determinują w głównej mierze zmiany jego obciążenia. Szybki przyrost temperatury uwojenia to 2 °C/min, w niektórych warunkach wartość ta może osiągać nawet 8 °C/min [4]. W pracy [5] przytoczono dwa wzory opisujące temperaturę inicjacji *bubble effect* w zależności od zawartości wody dla powolnego (wzór 1) i szybkiego (wzór 2) wzrostu temperatury:

$$T_i = \frac{19,9 - WCP}{0,102}, \quad (1)$$

$$T_i = \frac{12,23 - WCP}{0,064}, \quad (2)$$

gdzie:

$T_i$  – temperatura inicjacji *bubble effect*, °C,  
 $WCP$  – zawartość wody w papierze, %.

Na podstawie wzorów (1) oraz (2) opracowano tablicę 1.

- Tab. 1. Temperatura inicjacji *bubble effect*  $T_i$  w zależności od zawartości wody w papierze  $WCP$  dla wolnego  $V_s$  i szybkiego  $V_r$  wzrostu temperatury, tablica opracowana na podstawie wzorów (1) i (2)  
Tab. 1. Bubble effect initiation temperature  $T_i$  in dependence of water content in paper  $WCP$  for slow  $V_s$  and rapid  $V_r$  temperature increase, the table worked out on the basis of equations (1) and (2)

Temperatura inicjacji <i>bubble effect</i> $T_i$ , °C						
$WCP$ , %	1	2	3	4	5	6
dla $V_s$	185	175	166	156	146	136
dla $V_r$	175	160	144	129	113	97

Z danych przedstawionych w pracy [5] wynika, że szybkość wzrostu temperatury izolacji ma istotny wpływ na inicjację *bubble effect*. Dla szybkiego wzrostu temperatury, wartość temperatury inicjacji efektu bąbelkowania jest mniejsza niż w przypadku jej wolnego wzrostu. Im wyższe zawilgocenie izolacji tym większe różnice wartości temperatury krytycznej. Przykładowo, dla zawartości wody w papierze równej 4%, różnica ta wynosi aż 27 °C. Niestety w publikacji [5] nie podano, jak należy rozumieć wolny i szybki wzrost temperatury. Autorzy nie podali również innych warunków eksperymentu, np. zawartości gazów w oleju, które mają wpływ na wartość temperatury inicjacji *bubble effect*.

W pracy [3] podano wzór (3) opisujący temperaturę inicjacji *bubble effect* w zależności od zawartości wody w papierze, zawartości gazów w oleju oraz ciśnienia całkowitego:

$$T_i = \frac{6996,7}{22,454 + 1,4495 \cdot \ln(WCP) - \ln(P)} - e^{0,473 \cdot WCP} \cdot \frac{G_C^{1,585}}{30} - 273 \quad (3)$$

gdzie:

$P$  – ciśnienie całkowite, Tr; równe sumie ciśnienia atmosferycznego oraz ciśnienia słupa oleju; Tr,  
 $G_C$  – zawartość gazów w oleju, %.

Na podstawie wzoru (3) sporządzono tablicę 2.

Tab. 2. Temperatura inicjacji *bubble effect*  $T_i$  w zależności od zawartości wody w papierze  $WCP$  oraz ciśnienia całkowitego  $P$ , tablica opracowana na podstawie wzoru (3)

Tab. 2. Bubble effect initiation temperature  $T_i$  in dependence of water content in paper  $WCP$  and total pressure  $P$ , the table worked out on the basis of equation (3)

Temperatura inicjacji <i>bubble effect</i> $T_i$ , °C, dla $G_C=6,1\%$						
$WCP$ , %	1	2	3	4	5	6
$P$ , hPa (Tr)						
1000 (750)	168	141	126	116	108	101
1067 (800)	169	142	128	118	110	103
1133 (850)	171	144	129	119	111	104
1200 (900)	173	145	131	120	112	105
1267 (950)	174	147	132	121	113	106
1333 (1000)	176	148	133	123	114	107

Analizując dane zawarte w tablicy 2 widzimy, że wraz ze wzrostem ciśnienia wzrasta temperatura inicjacji *bubble effect*. W przypadku jednostek dużych, gdzie wysokość uzwojenia wynosi około 3 m, różnica wartości temperatury inicjacji *bubble effect* pomiędzy miejscami skrajnie w nim położonymi może sięgać ok. 5 °C (dla  $WCP=4\%$ ). Wynika to z ciśnienia słupa oleju w górnej i dolnej części uzwojenia.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badania zależności temperatury inicjacji *bubble effect* od szybkości wzrostu temperatury dla izolacji nowej i zestarzonej oraz sprawdzono wpływ ciśnienia na rozwój *bubble effect*.

Przyjmując realne wartości wszystkich czynników mających wpływ na rozwój *bubble effect*, analizowanych w niniejszej pracy, oszacowano najniższą temperaturę inicjacji tego zjawiska.

## 2. Wpływ szybkości wzrostu temperatury na inicjację *bubble effect*

Celem badań było wykazanie wpływu szybkości wzrostu temperatury na wartość temperatury inicjacji *bubble effect* oraz porównanie otrzymanych wyników z danymi zawartymi w publikacji [5].

### Opis układu pomiarowego i warunków przeprowadzenia eksperymentu

Na rysunku 1 przedstawiono układ pomiarowy wykorzystany do badania wpływu szybkości wzrostu temperatury na inicjację *bubble effect*. Układ pomiarowy składał się ze szklanego naczynia (1) wypełnionego nowym olejem mineralnym, wewnątrz którego umieszczono grzałkę (2), na którą nawinięty był papier (3). Temperatura papieru mierzona była za pomocą wielokanałowego miernika temperatury (4) z termoparą (5) umieszczoną pomiędzy papierem a grzałką. Poprzez odpowiednią zmianę napięcia zasilającego grzałkę w czasie zmieniano szybkość wzrostu jej temperatury. Zabieg ten pozwalał na prawie liniowy przyrost temperatury w czasie. Regulacja napięcia była możliwa dzięki zastosowaniu autotransformatora (6) z multimetrem (7). Zjawisko *bubble effect* rejestrowano za pomocą kamery (8) i komputera (9).

Badaniom poddano papier nowy o stopniu polimeryzacji  $DP$  równym 1360 i zawartości wody  $WCP$  wynoszącej 5,86% oraz papier zestarzony ( $DP=272$ ,  $WCP=3,14\%$ ). Próbki starzone w powietrzu atmosferycznym w temperaturze 180 °C. Następnie próbki nowe i starzone były zawilgacane jednocześnie przez kontakt z powietrzem otoczenia. Różna chłonność wody próbek nowych i zestarzonych sprawiła, że był inny poziom ich zawilgocenia. Stopień polimeryzacji papieru został wyznaczony przy użyciu metody lepkościowej, zgodnie z normą PN-EN 60450 [6], natomiast zawartość wody zmierzono za pomocą metody miareczkowania Karla Fischera.



Rys. 1. Układ do badania temperatury inicjacji *bubble effect* w zależności od szybkości wzrostu temperatury

Fig. 1. Setup used for investigating the the *bubble effect* initiation temperature in dependence of the temperature increase rate

Inne istotne warunki eksperymentu: ciśnienie całkowite  $P=1022$  hPa, natężenie pola elektrycznego  $E=0$  kV/mm, zawartość gazów w oleju  $G_C=60981$  ppm (w tym  $O_2=18389$  ppm,  $N_2=42348$  ppm,  $CO=66$  ppm,  $CO_2=176$  ppm). Zawartość gazów rozpuszczonych w oleju została wyznaczona za pomocą chromatografu gazowego zgodnie z normą [7].

### Wyniki eksperymentu

W tablicy 3 zestawiono wyniki badań temperatury inicjacji *bubble effect* przeprowadzonych dla papieru nowego i zestarzonego w zależności od szybkości wzrostu temperatury.

Tab. 3. Temperatura inicjacji *bubble effect*  $T_i$  w zależności od szybkości wzrostu  $V_T$  temperatury dla papieru nowego oraz zestarzonego

Tab. 3. Bubble effect initiation temperature  $T_i$  in dependence of temperature increase rate  $V_T$  for new and aged paper

Szybkość wzrostu temperatury, $V_T$	Temperatura inicjacji <i>bubble effect</i> , $T_i$	
	°C	
°C/min	dla papieru nowego $DP=1360$ , $WCP=5,86\%$	dla papieru zestarzonego $DP=272$ , $WCP=3,14\%$
2	103	106
4	100	105
6,5	96	103
9	89	100

Przeprowadzone badania pozwoliły sformułować następujące wnioski. Wraz ze wzrostem szybkości podnoszenia temperatury papieru maleje temperatura inicjacji *bubble effect*. Wniosek ten jest zgodny z wynikami badań przedstawionymi w pracy [5] (tablica 1). Zależność taką zaobserwowano zarówno dla papieru nowego jak i zestarzonego, ale wyników porównywać nie można, gdyż próbki różnią się dwiema cechami.

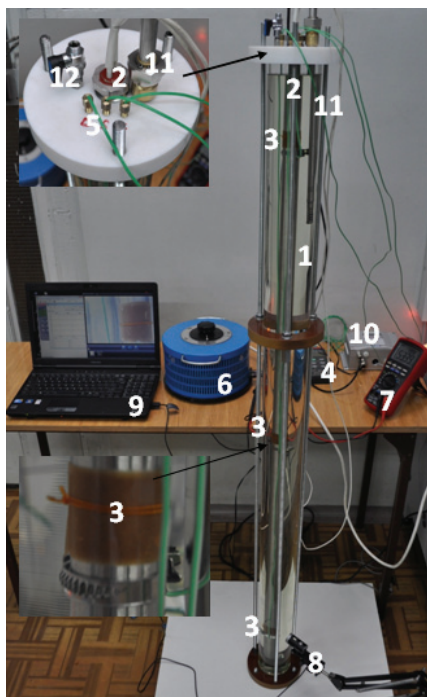
W przypadku papieru nowego ( $DP=1360$ ) o znacznym stopniu zawilgocenia ( $WCP=5,86\%$ ) różnica temperatury inicjacji *bubble effect* pomiędzy szybkim ( $2^\circ\text{C}/\text{min}$ ) i bardzo szybkim ( $9^\circ\text{C}/\text{min}$ ) wzrostem temperatury wynosiła aż  $14^\circ\text{C}$ . Widać więc, że szybkość wzrostu temperatury izolacji w znaczącym stopniu determinuje temperaturę inicjacji *bubble effect*.

### 3. Wpływ ciśnienia na inicjację *bubble effect*

Badania miały na celu sprawdzenie wpływu ciśnienia całkowitego na temperaturę inicjacji *bubble effect*. Badaniom poddano próbki nowe i zestarzone. Ciśnienie całkowite  $P$  należy tu rozumieć jako sumę ciśnienia atmosferycznego i ciśnienia słupa oleju. Otrzymane wyniki porównano z danymi zawartymi w [3].

#### Opis układu pomiarowego i warunków przeprowadzenia eksperymentu

Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2. Składał się on ze szklanego cylindra (1) o wysokości 150 cm wypełnionego olejem mineralnym. Wewnątrz cylindra umieszczona była grzałka (2) o długości 145 cm, na którą w trzech miejscach nawinięty był papier (3). Badaniu poddano papier nowy ( $DP=1360$ ,  $WCP=5,86\%$ ) i zestarzony ( $DP=272$ ,  $WCP=3,14\%$ ). Głębokość zanurzenia nawiniętych na grzałkę próbek papieru była równa 13, 73, 133 cm. Takie rozmieszczenie papieru umożliwiło uzyskanie różnego ciśnienia oddziaływującego na próbki. Ciśnienie atmosferyczne podczas badań wynosiło 1010 hPa. Ciśnienie całkowite  $P$  (tab. 4) oddziaływujące na próbki papieru obliczono poprzez dodanie ciśnienia atmosferycznego do ciśnienia słupa oleju, wynikającego z głębokości zanurzenia próbki.



Rys. 2. Układ do badania temperatury inicjacji *bubble effect* w zależności od ciśnienia

Fig. 2. Setup used for investigating the bubble effect initiation temperature in dependence of pressure

Temperatura nawiniętych na grzałkę próbek papieru była mierzona za pomocą wielokanałowego miernika temperatury (4), do którego podłączone były trzy termopary (5). Poprzez odpowiednią zmianę napięcia zasilającego grzałkę zmieniano temperaturę próbek papieru. Regulacja napięcia była możliwa dzięki zastosowaniu autotransformatora (6) z multimetrem (7). Badania wyko-

nano z szybkością wzrostu temperatury równą ok.  $6^\circ\text{C}/\text{min}$ . Zjawisko *bubble effect* rejestrowano za pomocą kamery (8) i komputera (9). Ponadto układ wyposażony był w miernik zawilgocenia (10) wyposażony w sondę pojemnościową (11). W pokrywie cylindra zamontowany był przepust (12) umożliwiający pobranie próbki oleju do analizy DGA. Stężenie gazów w oleju wynosiło 60981 ppm (w tym  $\text{O}_2=18389$  ppm,  $\text{N}_2=42348$  ppm,  $\text{CO}=66$  ppm,  $\text{CO}_2=176$  ppm). Podczas badania próbki papieru nie były poddane działaniu pola elektrycznego.

#### Wyniki eksperymentu

W tablicy 4 przedstawiono wyniki badań temperatury inicjacji *bubble effect* w zależności od ciśnienia całkowitego uzyskane dla papieru nowego oraz zestarzonego.

Tab. 4. Temperatura inicjacji *bubble effect*  $T_i$  w zależności od ciśnienia całkowitego  $P$  dla papieru nowego oraz zestarzonego

Tab. 4. Bubble effect initiation temperature  $T_i$  in dependence of total pressure  $P$  for new and aged paper

Głębokość zanurzenia papieru, $h$	Ciśnienie całkowite, $P$	Temperatura inicjacji <i>bubble effect</i> , $T_i$	
		°C	
cm	hPa (Tr)	dla papieru nowego $DP=1360$ , $WCP=5,86\%$	dla papieru zestarzonego $DP=272$ , $WCP=3,14\%$
13	1021,4 (766,2)	99	100
73	1074,1 (805,7)	99	101
133	1126,7 (845,2)	101	102

Na podstawie uzyskanych wyników badań można wyciągnąć wniosek, że wzrost ciśnienia całkowitego powoduje wzrost temperatury inicjacji *bubble effect*. Dotyczy to zarówno papieru nowego jak i zestarzonego. Wniosek ten jest zgodny z wynikami ujętymi w tablicy 2.

Dla przyjętych warunków eksperymentu, w przypadku zwiększenia ciśnienia całkowitego o 105 hPa, zaobserwowano jedynie niewielki wzrost temperatury inicjacji *bubble effect* zarówno dla papieru nowego jak i zestarzonego. Wzrost ten wyniósł zaledwie  $2^\circ\text{C}$ .

### 4. Najniższa temperatura mogąca zainicjować *bubble effect*

Zakładając bardzo złe warunki pracy izolacji papierowo-olejowej, mogące wystąpić w transformatorze, wyznaczono temperaturę inicjacji *bubble effect*.

#### Opis układu pomiarowego i warunków przeprowadzenia eksperymentu

Do badań wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 1. Aby wyznaczyć najniższą temperaturę inicjacji *bubble effect* założono warunki najbardziej sprzyjające jej obniżeniu. Badaniu poddano papier o trzech poziomach zestarzenia  $DP$  oraz o znacznym stopniu zawilgocenia  $WCP$  (tablica 5). Do badań wykorzystano olej o dużej zawartości gazów  $G_c=99001$  ppm (w tym  $\text{O}_2=33143$  ppm,  $\text{N}_2=65368$  ppm,  $\text{CO}=25$  ppm,  $\text{CO}_2=465$  ppm). Szybkość wzrostu temperatury papieru wynosiła aż  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , natomiast ciśnienie całkowite było równe tylko 1021 hPa.

#### Wyniki eksperymentu

W tablicy 5 zestawiono wyniki badań temperatury inicjacji *bubble effect*, przy założeniu warunków sprzyjających jej obniżeniu, które mogą wystąpić w transformatorze.



Najniższą temperaturę inicjacji *bubble effect* równą 92 °C uzyskano dla izolacji o stopniu polimeryzacji równym 464 i zawartości wody 4,1%. W przypadku izolacji najbardziej zestarzonej o stopniu polimeryzacji 272, ale o mniejszej chłonności wody (3,14%) temperatura inicjacji wynosiła 93 °C.

Tab. 5. Najniższa temperatura inicjacji *bubble effect*  
Tab. 5. The lowest temperature of bubble effect initiation

Stopień polimeryzacji papieru, <i>DP</i>	Zawartość wody w papierze, <i>WCP</i>	Temperatura inicjacji <i>bubble effect</i> , $T_i$
-	%	°C
670	5,14	99
464	4,10	92
272	3,14	93

## 5. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań oraz analizy literatury wyciągnięto niżej przedstawione wnioski.

- 1) Szybkość wzrostu temperatury ma bardzo duży wpływ na inicjację *bubble effect*. Wraz ze wzrostem szybkości narastania temperatury obserwowano spadek temperatury inicjacji *bubble effect*. Dla przyjętych warunków eksperymentu różnica temperatury inicjacji *bubble effect* pomiędzy szybkim (2 °C/min) a bardzo szybkim (9 °C/min) wzrostem temperatury wynosiła w przypadku papieru nowego aż 14 °C.
- 2) Wzrost ciśnienia powoduje wzrost temperatury inicjacji *bubble effect*. Ze względu na ciśnienie, najbardziej prawdopodobne jest wystąpienie *bubble effect* w górnej części kadzi, gdzie jest ono najniższe.
- 3) Uwzględniając wszystkie wielkości wpływające na rozwój *bubble effect* – a więc zawilgocenie, stopień zesterzenia, zawar-

tość gazów, szybkość wzrostu temperatury, ciśnienie – wyznaczono najniższą temperaturę inicjacji zjawiska. Temperatura ta, dla realnych warunków mogących wystąpić w transformatorze, wynosi 92 °C.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2011-2013 jako projekt badawczy własny nr N N510 357336.*

## 6. Literatura

- [1] Przybyłek P.: Badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania w izolacji papier-olej, Przegląd Elektrotechniczny, nr 11b/2010, s. 166-169.
- [2] Przybyłek P.: The influence of cellulose insulation aging degree on its water sorption properties and bubble evolution, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, Vol. 17, No. 3, pp. 906-912, June 2010.
- [3] Oommen T.V., Lindgren S.R.: Bubble evolution from transformer overload, Transmission and Distribution Conf. Exposition, IEEE/PES, vol. 1, pp. 137-142, 2001.
- [4] Cigre Brochure 349, Moisture equilibrium and moisture migration within transformer insulation systems, 2008.
- [5] Sakai M., Maki K., Taniguchi Y., Daikuhara N., Yanabu S.: A research of critical temperature on bubble formation under overloaded oil-immersed transformer, Trans. Inst. Electr. Eng. Japan, Vol. 121-B, pp. 500-506, 2001.
- [6] PN-EN 60450, Pomiary średniego lepkościowego stopnia polimeryzacji nowych i starzonych elektroizolacyjnych materiałów celulozowych, 2005.
- [7] PN-EN 60567, Urządzenia elektryczne olejowe. Pobieranie próbek gazów i oleju do analizy gazów wolnych i rozpuszczonych. Wytyczne, 2006.

otrzymano / received: 23.01.2011  
przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Newsletter PAK

Wydawnictwo PAK wysyła drogą e-mailową do osób zainteresowanych Newsletter PAK, w którym są zamieszczane:

- spis treści aktualnego numeru miesięcznika PAK,
- kalendarz imprez branżowych,
- ważniejsze informacje o działalności Wydawnictwa PAK.

Newsletter jest wysyłany co miesiąc do osób, które w jakikolwiek sposób współpracują z Wydawnictwem PAK (autorzy prac opublikowanych w miesięczniku PAK, recenzenci, członkowie Rady Programowej, osoby które zgłosiły chęć otrzymywania Newslettera).

Celem inicjatywy jest umocnienie w środowisku pozycji miesięcznika PAK jako ważnego i aktualnego źródła informacji naukowo-technicznej.

Do newslettera można zapisać się za pośrednictwem:

- strony internetowej: [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl), po dodaniu swojego adresu mailowego do subskrypcji,
- adresu mailowego: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl), wysyłając swoje zgłoszenie.

Otrzymywanie Newslettera nie powoduje żadnych zobowiązań ze strony adresatów. W każdej chwili można zrezygnować z otrzymywania Newslettera.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK