

**Andrzej P. NOWAK**

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA, KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ  
ul. Willowa 2, 43-200 Bielsko-Biala

**Pomiarowa ocena jakości drgań sekcji elektrod zbiorczych elektrofiltru**

Dr inż. Andrzej P. NOWAK

Jest adiunktem w Katedrze Informatyki Stosowanej, ATH w Bielsku-Białej. Autorstwo/współautorstwo ponad 20 artykułów w czasopiśmie krajowych i zagranicznych (w tym 3 punktowane z listy filadelfijskiej). Wygłosił kilkanaście referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych. Brał udział w projektach badawczych z zakresu: dyspersji zanieczyszczeń pochodzenia motoryzacyjnego, modelowania w dynamice maszyn



e-mail: a.nowak@ath.eu

**Streszczenie**

W artykule scharakteryzowano zastosowaną aparaturę pomiarową oraz sposób realizacji pomiarów przyspieszeń w punktach kontrolnych elektrod zbiorczych. Przedstawiono własną metodologię opracowywania wyników pomiarów, umożliwiającą jej stosowanie do walidacji modeli numerycznych lub oceny jakości drgań sekcji elektrod. Wstępne analizy, przeprowadzone na usystematyzowanych zbiorach danych, wskazały kierunki postępowania przy walidacji modeli numerycznych stosowanych do symulacji dynamicznych.

**Słowa kluczowe:** elektrofiltr suchy, elektroda zbiorcza, drgania, weryfikacja pomiarowa.

**Measuring quality assessment of collecting electrode vibrations of electrostatic precipitators****Abstract**

Electrostatic precipitators (Fig. 1) are used for dust removal and their efficiency influences the environment. However, the effectiveness of these devices depends on many factors [1-10]. One of them is the efficiency of a periodic cleaning of the collecting electrodes (Fig. 1, pos. nZE) – the dust is removed by inducing vibrations at accelerations. These vibrations are caused by axial impact of a beater (Fig. 2, pos. US) on a dust-removal bar. In the course of impact and after its finish the impact stresses are produced in both – shaking down and collecting electrodes – systems. These processes have been the subject of numerous works, e.g. they are dealt with in [11, 12, 13] and many others. The results of calculations obtained by means of the method described in [14] are compared with those obtained from measurements. The paper briefly characterizes the measurement equipment (Tab. 1) used and the manner of measurements (Fig. 2). The author also presents his own methodology (Section 3), enabling applying it for validation of numerical models (Section 4) of one of the collecting electrode sections (Fig. 1, pos. ZEP). In conclusion it can be stated that the preliminary analysis carried out on such a systematic collection of data shows the directions for further procedures on validating numerical models for dynamic simulations.

**Keywords:** electrostatic precipitator, collecting electrode, vibration, measurement verification.

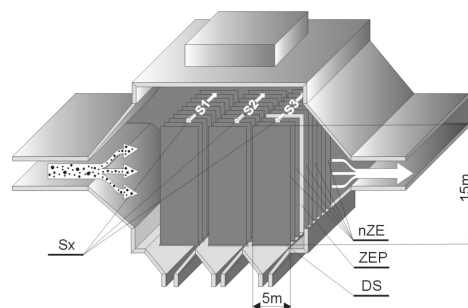
**1. Wstęp**

Elektrofiltry suche są dużymi urządzeniami przemysłowymi, przeznaczonymi do bardzo dokładnego oczyszczania gazów spalinyowych z cząstek stałych. Stanowią one obecnie wyposażenie kilkuset kotłów parowych o wydajności pary od 100 t/h do 1650 t/h. Odznaczają się wysoką sprawnością odpylania (98÷99,9%) i umożliwiają zatrzymywanie z aerozoli bardzo drobnych cząstek pyłów (poniżej 1  $\mu\text{m}$ ) przy natężeniu przepływu spalin nawet ponad 2 mln  $\text{m}^3/\text{h}$  [1]. Efektywność elektrofiltrów zależy między innymi od warunków przepływu gazów, wytwarzanego pola elektrycznego, ale także od parametrów geometrycznych elektrofiltru. Redukcja emisji zanieczyszczeń pyłowych z zastosowaniem

elektrofiltrów pozostaje ciągle istotnym i aktualnym zagadnieniem badawczym. Analizowane są zarówno pole elektryczne w komorach elektrofiltrów [2, 3], jak i przepływy spalin przez sekcje elektrod osadczyczych [4], w tym z zastosowaniem modeli numerycznej mechaniki płynów [5]. Prowadzone badania obejmują ponadto analizę przebiegu procesu odpylania [6] i wpływu parametrów geometrycznych na efektywność elektrofiltru [7, 8, 9, 10].

Należy zauważyć, że w każdym elektrofiltrze suchym są równocześnie realizowane dwa procesy, które pozornie wzajemnie się wykluczają. Pierwszy odpowiada za skuteczne przechwytywanie cząstek stałych z przepływającego gazu i ich zbieranie na powierzchniach elektrod zbiorczych. Drugi, to proces okresowego oczyszczania tych powierzchni z nagromadzonego pyłu poprzez wzbudzenie w nich drgań. Źródłem drgań są układy strzepywaczy, a ich bezpośrednią miarą – wartości składowych stycznych i normalnej przyspieszeń w punktach kontrolnych. Niewłaściwie dobrane wielkości drgań mogą być zbyt małe, aby oderwać pył od powierzchni i wówczas dochodzi do wyładowań koronowych i gwałtownego spadku potencjału pola elektrycznego. Jeśli zaś wzbudzone drgania są zbyt duże to, w wyniku powstałej chmury pyłu, może dochodzić do wtórnego zanieczyszczenia gazów. W obu przypadkach spada efektywność działania elektrofiltru. Opisane w niniejszej pracy pomiary oraz związane z nimi analizy stanowią jeden z końcowych etapów prac realizowanych w ramach projektu badawczego rozwojowego nr NR03-0036-04/2008, finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Jednym z użytych celów projektu jest opracowanie modeli dyskretnych sekcji elektrod zbiorczych, przy użyciu których wykonywane będą analizy dynamiczne konstrukcji już na etapie projektowania koncepcyjnego. Po zrealizowaniu tego etapu będzie można przeprowadzić walidację modeli numerycznych, opisanych w [11, 12, 13, 14].

Pomiary przeprowadzono w nowo wybudowanym elektrofiltrze suchym jednej z większych elektrociepłowni miejskich w kraju. Schemat elektrofiltru przedstawiono na rys. 1. Elektrofiltr składa się z trzech stref ( $S_x$ ). Strefy zbudowane są z kilkudziesięciu sekcji (nZE). Każda sekcja składa się z 8 lub 9 piętnastometrowych elektrod typu SIGMA zawieszonych na wspólnej belce nośnej i spiętych w dolnej części drągiem strzepującym (DS.), zakończonym od strony strzepywaczy kowadłem.



Rys. 1. Schemat elektrofiltru suchego

Fig. 1. Schematic diagram of electrostatic precipitator

**2. Charakterystyka aparatury pomiarowej**

Głównymi elementami aparatury pomiarowej były:

- 16-to kanałowy rejestrator TEAC lx110,
- przenośny komputer z oprogramowaniem LX Navi,
- 5 trójosiowych czujników drgań ICP typu 356A02 firmy PCB Piezotronics.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry w/w aparatury pomiarowej.

Tab. 1. Parametry techniczne czujników i rejestratora  
Tab. 1. Technical parameters of the of sensors and recorder

Trójosiowy czujnik IPC 356A02	
czułość ( $\pm 10\%$ )	1.02 mV/(m/s <sup>2</sup> )
zakres pomiarowy	$\pm 4900$ m/s <sup>2</sup> pk
pasmo przenoszenia ( $\pm 5\%$ )	1 ÷ 5000 Hz
masa	10.5 g
Rejestrator TEAC Ix110	
ilość kanałów	16
masa	3.9kg
częstotliwość próbkowania	96 / 48 / 24 / 12 / 6 / 3 / 1.5 kHz
rodzaj wejścia	DC
impedancja wejściowa	1 M $\Omega$
zakres wejściowy (z dopuszczalnym przekroczeniem zakresu $\pm 127\%$ )	$\pm 0.5/1/2/5/10/20/50$ V
liniowość	<( $\pm 0.1\%$ )
zniekształcenie	<( $\pm 0.1\%$ )
zakres napięcia wejściowego	11÷30V

Obróbkę uzyskanych sygnałów przeprowadzono za pomocą własnych programów oraz pakietu FlexPro 8.0.

W trakcie realizacji pomiarów, sygnały były rejestrowane z częstotliwością próbkowania 24 kHz (na każdy kanał). Każdorazowo rejestrowano odpowiedź na pojedyncze wymuszenie impulsowe (uderzenie młotką) – takie zdarzenie pomiarowe będzie dalej nazywane serią pomiarową, lub krótko serią. Ruch młotki wymuszano ręcznie, przy wyłączonym napędzie mechanicznym. Czujniki były mocowane do powierzchni elektrod za pomocą kleju. Wszystkie rejestrowane pomiary były wyświetlane na bieżąco na ekranie komputera, w panelu podglądu programu FlexPro. Dzięki temu możliwe było sprawdzenie poprawności przeprowadzonych badań i wykrycie ewentualnego poluzowania czujników lub ich odpadnięcia z powierzchni elektrody.

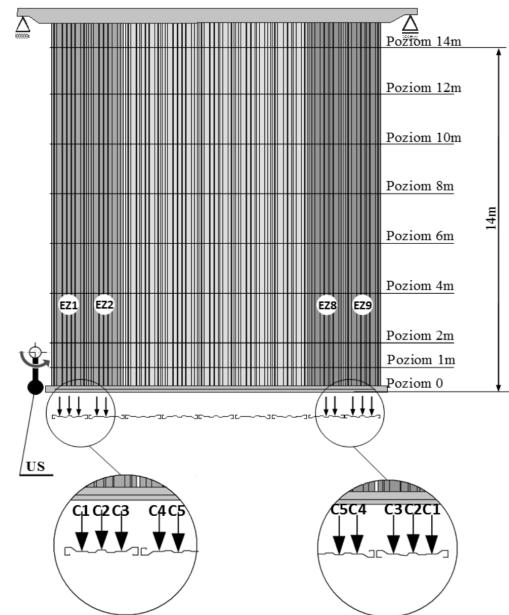
### 3. Metodologia opracowania wyników pomiarów

Ze względu na uwarunkowania techniczne, mierzono przyspieszenia w wybranych punktach 4 skrajnych elektrod sekcji ZEP (rys. 1) – dwóch najmniej i dwóch najbardziej oddalonych od zespołu strzepywaczy, którego jeden z młotków (rys. 2, oznaczenie US) był używany do wzbudzenia impulsu siły w kowadło drąga strzepyjącego.

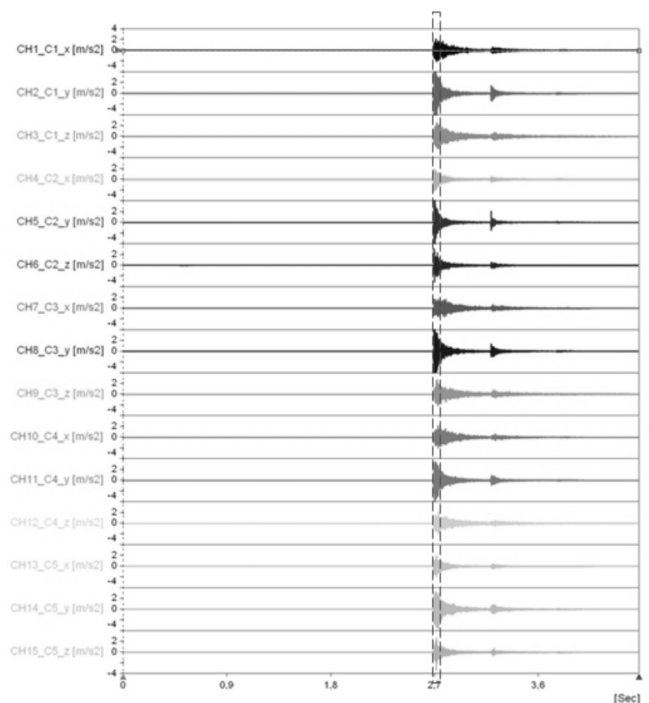
W trakcie pomiarów rejestrowano  $n=10\div 25$  serii pomiarowych dla każdej konfiguracji rozmieszczenia czujników (rys. 2, poziomy 0–14m), spośród których po wstępnej selekcji pozostawiono  $k$  serii do dalszego przetwarzania ( $k \leq n$ ).

Na rys. 3 zamieszczono fragmenty przykładowych przebiegów, zarejestrowane w pojedynczej serii pomiarowej na jednym z poziomów za pomocą czujników przyklejonych na elektrodach 1 i 2. Obwódką prostokątną (linia przerywana) zaznaczono okno ograniczające przedział czasu będącego przedmiotem dalszych analiz.

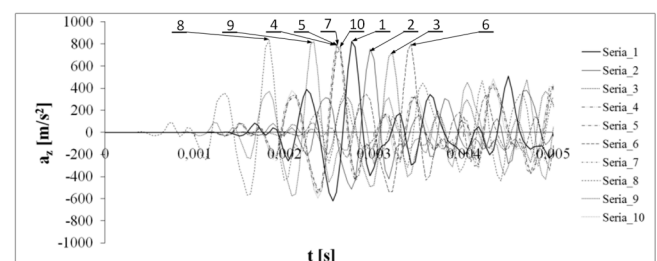
Przyjęto, że szerokość okna będzie odpowiadać 4096 wartościom zarejestrowanego sygnału. Po przetworzeniu w opisany sposób wszystkich serii pomiarowych zarejestrowanych dla danej konfiguracji położenia czujników, dla każdej składowej przyspieszenia otrzymano  $k$  przebiegów czasowych, gdzie  $k$  oznacza liczbę pozytywnie zweryfikowanych serii, zarejestrowanych w danej konfiguracji.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego  
Fig. 2. Schematic diagram of measuring system

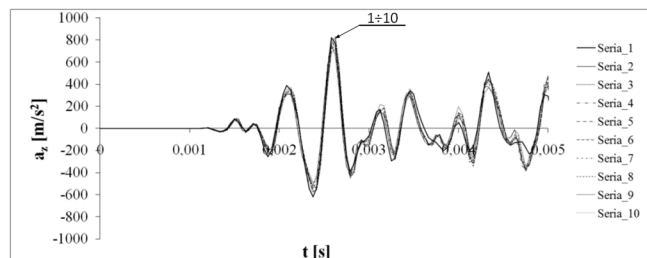


Rys. 3. Przykładowy przebieg czasowy przed obróbką numeryczną  
Fig. 3. Example of time course before numerical treatment



Rys. 4. Przebiegi czasowe  $a_z^{(i)}(t)$  przed synchronizacją  
Fig. 4. Time courses  $a_z^{(i)}(t)$  before synchronization

Ponieważ w trakcie pomiarów nie było możliwości zastosowania automatycznego wyzwalacza rejestracji mierzonych sygnałów, uzyskane przebiegi, chociaż uzyskane w tym samym punkcie pomiarowym i przez ten sam czujnik, były jednak wzajemnie wobec siebie przesunięte w czasie (rys. 4, oznaczenia 1, 2, ..., 10).



Rys. 5. Przebiegi czasowe  $a_z^{(i)}(t)$  po synchronizacji

Fig. 5. Time courses  $a_z^{(i)}(t)$  after synchronization

Z tego powodu sygnały poddano synchronizacji - na rys. 4 przedstawiono fragmenty przykładowych przebiegów czasowych składowej  $a_z$  zarejestrowane przez czujnik C2 na elektrodzie 1 w 10 seriach pomiarowych na jednym z poziomów przed synchronizacją, a na rys. 5 po jej wykonaniu (wartości sygnałów odpowiadające tej samej fazie drgań występują w tej samej chwili czasu (rys. 5, oznaczenia 1÷10).

#### 4. Analiza przyspieszeń w wybranych punktach pomiarowych

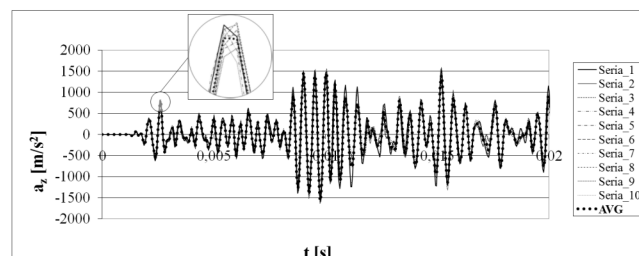
W dotychczasowej praktyce (projektowej, eksploatacyjnej), zarówno wśród producentów elektrofiltrów, jak i ich kontrahentów, podstawowym kryterium oceny skuteczności oczyszczania powierzchni elektrod zbiorczych było porównywanie wartości składowej przyspieszenia normalnej do powierzchni elektrody w punkcie pomiarowym. Zakładano, że układ strzepujący dobrze spełnia swoje zadanie, jeśli w każdym punkcie kontrolnym sekcji wartość maksymalna tej składowej (co do modułu) przekracza 100g (g-przyspieszenie ziemskie). Takie podejście często było wymuszone klasą posiadanego sprzętu pomiarowego. Obecnie, dzięki rozwojowi techniki pomiarowej, coraz częściej bierze się pod uwagę wartości pozostałych składowych przyspieszenia, wartości przyspieszenia wypadkowego, ale też poszukuje się zupełnie nowych miar do oceny drgań. W związku z tym, wstępnie przetworzone sygnały posłużyły do wyznaczenia wartości maksymalnych co do modułu składowych i wypadkowych przyspieszeń punktów kontrolnych dla  $k$  serii, dla których wyliczono wartość średnią  $\bar{a}_{id}^{(k)}$  oraz odchylenie standardowe  $\sigma_{(a_{id})}^{(k)}$ , gdzie  $id$  jest identyfikatorem składowej lub wypadkowej ze składowych ( $id=\{x, y, z, (x,y), (x,y,z)\}$ ). W tabeli 2 zamieszczono przykładowe zestawienie wyników dla jednego z punktów pomiarowych.

Tab. 2. Wartości maksymalne przyspieszeń, ich średnia i odchylenie standardowe dla wybranego punktu pomiarowego

Tab. 2. The values of maximum acceleration, the mean and standard deviation for a sample data point

	$k$										Wartość średnia $\bar{a}_{id}^{(k)}$	Odchylenie standardowe $\sigma^{(k)}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			11
	[ms <sup>-2</sup> ]										[ms <sup>-2</sup> ]	[ms <sup>-2</sup> ]	
$ a_x _{max}$	3042	2853	2987	3062	2977	2980	2991	3082	3081	2850	2954	2987	80,3
$ a_y _{max}$	4208	4207	4208	4208	4208	4208	4208	4208	4208	4208	4208	4208	0,3
$ a_z _{max}$	2852	2702	2741	2822	2666	2706	2788	2667	2707	2608	2700	2724	72,2
$ a_{x,y} _{max}$	4437	4361	4375	4455	4453	4412	4480	4450	4520	4403	4552	4445	57,8
$ a_{x,y,z} _{max}$	4659	4544	4602	4656	4493	4568	4642	4571	4578	4610	4631	4596	51,1

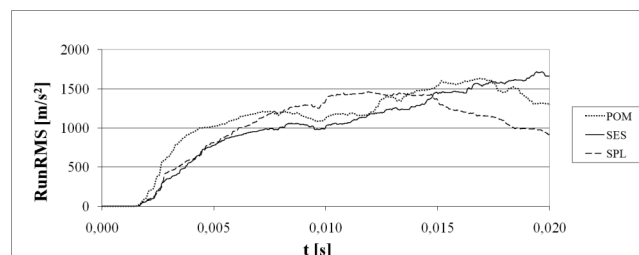
Jednakże, aby można było zastosować zarejestrowane w pomiarach przebiegi do walidacji opracowanych modeli numerycznych układu elektrod zbiorczych, a w szczególności do oceny jakościowej zgodności przebiegów z symulacji pomiarów (np. przez porównanie amplitud i okresów drgań), dla wybranych punktów kontrolnych wyliczono przebiegi uśrednione składowych przyspieszeń dla  $k$  serii (rys. 6).



Rys. 6. Przebiegi czasowe składowej normalnej  $a_z$  10 serii i przebiegu uśrednionego (AVG)

Fig. 6. Time courses of the normal component  $a_z$  of 10 series and averaged one (over the courses of 10 series – denoted as AVG)

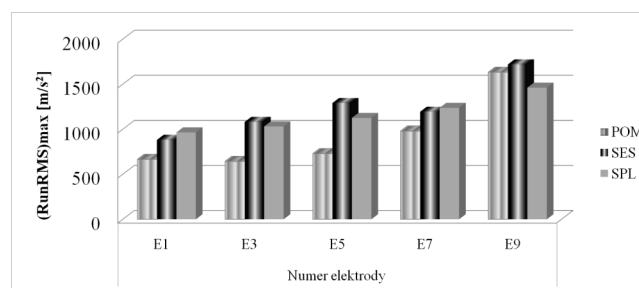
Dopiero przebiegi w takiej postaci mogą być zastosowane do walidacji modeli numerycznych – posłużą one do określania, m.in. wartości skutecznych sygnału (RMS/RunRMS), analiz fourierowskich, itp.



Rys. 7. Przebiegi czasowe ruchomego RMS przyspieszenia wypadkowego

Fig. 7. Time courses of RunRMS of the total acceleration

Na rys. 7 pokazano zestawienie przebiegów dynamicznych wartości skutecznych (RunRMS) dla sygnałów otrzymanych z symulacji (2 modele własne – oznaczenie: SES i SPL) oraz sygnału pomiarowego (oznaczenie POM) wyznaczonych dla przyspieszenia wypadkowego w wybranym punkcie kontrolnym. Przebiegi tego typu pozwalają na wyznaczenie chwilowych maksymalnych wartości skutecznych analizowanych sygnałów, które w dalszym postępowaniu będą stanowić jedno z kryteriów oceny jakości modeli dyskretnych. Przykładowe zestawienie chwilowych maksymalnych wartości skutecznych przyspieszeń wypadkowych w 5 punktach kontrolnych na jednym z poziomów pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Maksymalne wartości skuteczne przyspieszenia wypadkowego w 5 punktach kontrolnych

Fig. 8. Maximum values of RunRMS of the total acceleration at 5 checkpoints

## 5. Wnioski

Dzięki przedstawionej w pracy metodologii przetwarzania sygnałów pomiarowych można uzyskać pewien usystematyzowany zbiór przebiegów czasowych, który następnie może być stosowany do walidacji modeli numerycznych lub oceny jakości drgań elektrod zbiorczych elektrofiltrów.

W oparciu o dotychczas przeprowadzone analizy wyników pomiarów stwierdzono, że nie jest możliwe uzyskanie zgodności wyników symulacyjnych w modelach numerycznych w zakresie bezpośrednich zestawień przebiegów przyspieszeń z przebiegami pomiarowymi. Wynika to m.in. z faktu stosowania w modelowaniu dość znacznych uproszczeń w opisie matematycznym badanego układu, wymuszonych względami obliczeniowymi. W opracowanych modelach numerycznych, pomimo uzyskanej zbieżności wyników ze względu na zagęszczanie siatki dyskretyzacji elektrod zbiorczych, nie można było uwzględnić pewnych niuansów konstrukcyjnych układu, bez znacznego zwiększenia kosztów w zakresie czasu obliczeń. Nie dyskwalifikuje to jednak wspomnianych modeli, gdyż uzyskane przy ich użyciu przebiegi czasowe, zastosowane np. w analizach fourierowskich, pozwalają na wykonywanie porównań, dzięki którym już na etapie wstępnych prac projektowych można będzie wnioskować na temat przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. W szczególności można ocenić wpływ wielkości impulsu siły na jakość drgań w wybranych punktach kontrolnych, a to ma istotne znaczenie przy doborze typu i wielkości młotków w układach strzepujących.

## 6. Literatura

- [1] Zhao X., Luo S.: A Discussion on the ESP-FF Hybrid Precipitator, Electrostatic Precipitation Precipitator, 11th International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP XI), Hagzhou, China, 2008, Zhejiang University Press, Springer, pp. 472-474.
- [2] Long Z., Yao Q., Song Q., Li S.: A second-order accurate finite volume method for the computation of electrical conditions inside a wire-plate electrostatic precipitator on unstructured meshes, *Journal of Electrostatics* 67(4), 2009, pp. 597-604.
- [3] Neimarlija N., Demirdžić I., Muzaferij S.: Finite volume method for calculation of electrostatic fields in electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics* 67(1), 2009, pp. 37-47.
- [4] Sarna M.: Wpływ rozdziału spalin w elektrofiltrze na skuteczność odpylania, *Materiały VI Ogólnopolskiego Sympozjum „Zastosowanie mechaniki płynów w inżynierii środowiska 99”*, Gliwice - Wisła 1999.
- [5] Sarna M., Ryguła C.: Komputerowa analiza przepływu spalin w kanałach doprowadzających na przykładzie elektrofiltru dwusekcyjnego, *ElektroFiltry*, Nr 12, Biuletyn Informacyjny Techniki Elektrofiltrów i Transportu Popiołu Fabryki Elektrofiltrów ELWO S.A.
- [6] Janka R.M.: Wpływ warunków eksploatacji na skuteczność odpylania, dyspozycyjność oraz trwałość odpylaczy elektrostatycznych, *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 2, 1995.
- [7] Bach S., Szwed H., Wróbel J.: Wpływ sposobu połączenia belki mechanizmu strzepującego z elektrodą osadczą w elektrofiltrze na wartość przyspieszeń elektrody, *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, 3, 1996.
- [8] Szwed H.: Konstrukcyjne rozwiązania elektrofiltrów a ich skuteczność działania. *Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Eksploatacja elektrofiltrów w energetyce”*, Kraków 1992.
- [9] Talaie M.R.: Mathematical modeling of wire-duct single-stage electrostatic precipitators, *Journal of Hazardous Materials* 124 (1-3), 2005, pp. 44-52.
- [10] Yang X.F., Kang Y.M., Zhong K.: Effects of geometric parameters and electric indexes on the performance of laboratory-scale electrostatic precipitators, *Journal of Hazardous Materials* 169 (1-3), 2009, pp. 941-947.
- [11] Adamiec-Wójcik I., Nowak A., Wojciech S.: Dynamic analysis of electrostatic precipitators using finite strip method, *DSTA 2009 Conference Proceedings*, Łódź, 2009, Vol. 2, p. 889-896.
- [12] Nowak A.P., Adamiec-Wójcik I.: Vibration analysis of collecting electrodes of precipitators by means of the hybrid finite element method, *Multibody Dynamics, ECCOMAS Thematic Conference*, Warsaw, 2009, pp. 214-217.
- [13] Nowak A.P., Wojciech S.: Optimisation and experimental verification of a dust-removal beater for the electrodes of electrostatic precipitators, *Computers and Structures* (2004), Volume 82, Issue 22, pp. 1785-1792.
- [14] Adamiec-Wójcik I., Nowak A., Wojciech S.: Comparison of methods for vibration analysis of electrostatic precipitators, *Acta Mechanica Sinica*, w druku.

otrzymano / received: 17.12.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.02.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Nowy dział „Niepewność wyników pomiarów” na stronie internetowej Wydawnictwa PAK

Uprzejmie informuję, że na stronie internetowej Wydawnictwa PAK ([WWW.pak.info.pl](http://WWW.pak.info.pl)) został utworzony dział „Niepewność wyników pomiarów”. Na p.o. redaktora działu został powołany dr inż. Paweł Fotowicz.

Dr P. Fotowicz jest ekspertem w zakresie problematyki niepewności, autorem szeregu wartościowych publikacji w czasopiśmie krajowych i zagranicznych. Prezentował swoje prace na licznych konferencjach i warsztatach szkoleniowych.

W dziale „Niepewność wyników pomiarów”, obok dostępu do aktualnych wybranych opracowań dotyczących niepewności jest możliwość zadawania „Pytań do eksperta”. Pytania powinny być konkretne i szczegółowo sprecyzowane.

Pytania i odpowiedzi o istotnym znaczeniu dla szerszego grona metrologów będą archiwizowane i dostępne dla użytkowników strony internetowej Wydawnictwa PAK.

Zapraszam do odwiedzania działu „Niepewność wyników pomiarów” i do udziału w jego rozwoju.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK