

Technika elektrodynamiczna pomiaru zapylenia



Autor: William Averdieck, PCME Ltd

Technika elektrodynamiczna

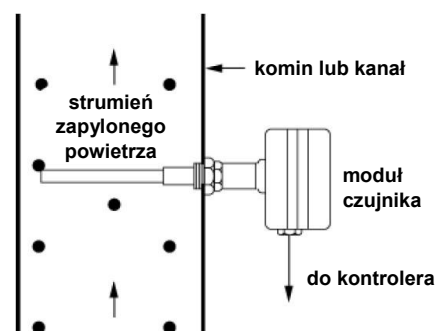
Elektrodynamiczna zasada pomiaru zapylenia bazuje na pomiarze sygnatury elektrycznej pochodzącej od interakcji cząstek w strumieniu powietrza z prętem czujnika zainstalowanym w poprzek kanału lub komina. Rozkład cząstek wewnątrz strumienia generuje odpowiedź w postaci częstotliwościowej indukcji ładunków elektrycznych, wprost proporcjonalną do stężenia cząstek pyłowych*. Akumulacja materiału na powierzchni sondy nie wywiera wpływu na pomiar, co może mieć miejsce w systemach tryboelektrycznych w postaci dryftu zera i kalibracji. Unikalne cechy techniki elektrodynamicznej umożliwiają także pomiar bardzo niskich stężeń pyłów. Zależność stanowiąca podstawę tej techniki została potwierdzona przez kilka niezależnych laboratoriów. Technika elektrodynamiczna pozwala również korzystać z sond całkowicie izolowanych, niezdędnych w przypadku strumieni gazów mokrych i silnie zawilgoconych, udostępnia także zastosowania z dużymi obciążeniami od pyłów przewodzących.

W systemie tego typu sonda czujnika jest zainstalowana w poprzek sekcji komina w której występuje reprezentatywny profil emisji cząstek pyłowych. Cząstki indukują w sondzie odpowiedź częstotliwościową, wynikającą z dwóch rodzajów interakcji:

1. bezpośrednie zderzenia,
2. indukcja ładunku (w czasie przechodzenia ładunek na cząstce odpycha ładunek wewnątrz sondy).

Zmienność rozkładu cząstek skutkuje przemiennością częstotliwości generowanego prądu, i ze względu na fakt, iż rozkład cząstek ma charakter rozkładu Poissona, poziom zmienności jest wprost proporcjonalny do liczby cząstek. Dzięki temu odpowiedź częstotliwościowa jest proporcjonalna do stężenia pyłów*.

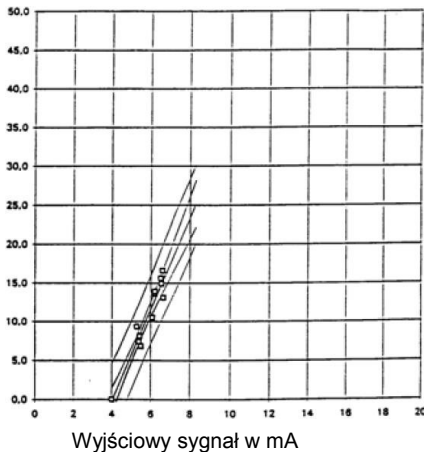
W trakcie prowadzenia pomiaru elektrodynamicznego generowany jest również prąd stały, czy też tryboelektryczny, pochodzący od cząstek zderzających się z prętem czujnika, jednak ten składnik jest specyficznie odfiltrowywany przez elektronikę, a pozostaje sam sygnał prądowy indukowany częstotliwościowo.



Proporcjonalność i powtarzalność związku pomiędzy sygnałem elektrodynamicznym a stężeniem pyłów* zostały potwierdzone przez niezależne organizacje, takie jak The Warren Spring Laboratory i niemiecki TÜV, oraz w systemie akredytacji MCERTS zarządzanym przez brytyjską Environment Agency.

Badania elektrodynamicznego przyrządu firmy PCME wykonane przez TÜV doprowadziły do wydania aprobaty dla przyrządu, potwierdzającej jego przydatność oraz spełnienie wymagań prawnych stawianych wobec urządzeń monitorowania emisji cząstek pyłowych w Niemczech. Badania te wykazały liniową zależność między sygnałem przyrządu a stężeniem pyłów. Co ważne, zademonstrowały również, że kalibracja przyrządu jest stabilna, i nie uległa zmianie w trakcie trzymiesięcznej próby terenowej zrealizowanej na przemysłowym filtrze workowym.

* w granicach parametrów (zob. sekcja omawiająca ograniczenia).



Wyjściowy sygnał w mA

Wyniki badania liniowości

Różnice pomiędzy systemami elektrodynamicznymi a tryboelektrycznymi

Systemy tryboelektryczne działają na zasadzie wzmacniania i pomiaru tryboelektrycznego prądu stałego wytwarzanego w wyniku zderzeń cząstek pyłowych z uziemionym prętem czujnika zainstalowanym w kominie oraz ocierania się cząstek o tenże pręt. Wynikowy prąd stały, generowany przez opisane interakcje mechaniczne pomiędzy cząstkami a sondą, jest tym samym sygnałem który jest specyficznym odfiltrowany w systemie elektrodynamicznym. Natężenie tego prądu stałego można skorelować ze stężeniem pyłów, jednakże jest ono również uzależnione od każdego parametru wpływającego na wielkość transferu ładunku, w tym od typu pyłu, energii uderzeń cząstek oraz materiału powierzchni sondy, zanieczyszczeń na sondzie i od prędkości.

Przyrządy elektrodynamiczne znacząco różnią się od tryboelektrycznych charakterystyką roboczą, gdyż sygnał elektrodynamiczny bazuje na indukowanej odpowiedzi częstotliwościowej wynikającej ze zmienności rozkładów cząstek mijających sondę, podczas gdy sygnał tryboelektryczny bazuje na całkowitej liczbie cząstek uderzających w sondę.

W porównaniu z systemami tryboelektrycznymi prądu stałego, systemy elektrodynamiczne oferują zalety eksploatacyjne w zastosowaniach w których występują następujące warunki:

- niskie stężenia pyłów ($< 1 \text{ mg/m}^3$),
- wysoka wilgotność (za suszarkami procesowymi),
- pyły powlekające sondę,
- zmienna prędkość w filtrach workowych,
- wymagana wysoka dokładność.

Przyczyny tych różnic są bezpośrednio związane z odmiennością zasad pomiaru oraz zaawansowaną charakterystyką konstrukcji elektronicznych. Różnice te są zestawione poniżej oraz opisane w kolejnych sekcjach:

	Elektrodyn.	Tryboelektr.
Próg detekcji	0,01 mg/m ³	Okolo 1 mg/m ³
Wpływ akumulacji pyłów na sondzie	Brak	Dryft kalibracji
Niezawodność w wilgotnych środowiskach	Dobra z sondą o konstrukcji izolowanej	Wrażliwość na fałszywe sygnały, nawet powietrze przedmuchu
Wpływ prędkości	Praktycznie zerowy	Nieprzewidywalny, nieliniowy
Stabilność sygnału	Dobra*	Nieprzewidywalna

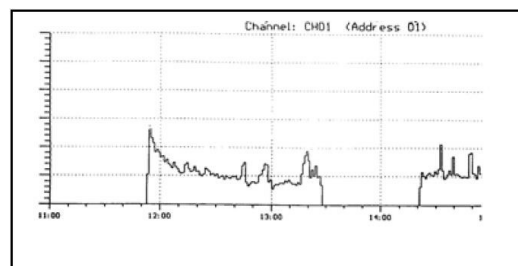
* Przy założeniu prędkości cząstek powyżej 8 m/s

Próg detekcji

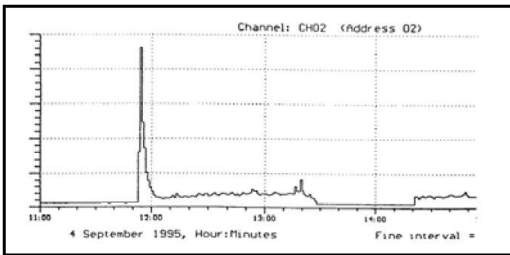
Przyrządy elektrodynamiczne mogą mierzyć niższe stężenia pyłów od systemów tryboelektrycznych, gdyż działają na wyższych poziomach wzmocnienia bez zakłóceń pochodzących od szumów elektronicznych. Silnie wzmacniany proces (do 10¹⁵:1) w systemie DUSTALERT produkcji firmy PCME nie jest uzależniony od liniowych poprawek natężenia prądu stałego uwzględniających zmiany temperatury wewnątrz wzmacniaczy, natomiast w systemie tryboelektrycznym wymienione poprawki są przyczyną błędów pomiarowych których wyzerowanie nie jest możliwe.

Poniższe wykresy porównują wyjściowe sygnały przyrządu elektrodynamicznego i tryboelektrycznego przy włączonym oraz wyłączonym urządzeniu odpylającym. Offset (poprawka liniowa) natężenia prądu stałego w systemie tryboelektrycznym wynika z offsetów wzmacniaczy.

Wyjściowy sygnał elektrodynamiczny



Wyjściowy sygnał tryboelektryczny

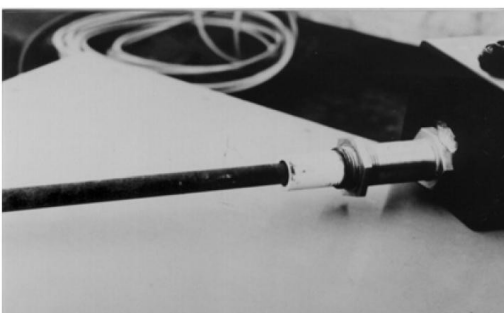


Porównanie pomiędzy systemami elektrodynamicznym a tryboelektrycznym

Offset systemu tryboelektrycznego zmniejsza wartość ilorazu sygnał/zakłócenia, przez co ogranicza jego rozdzielczość do poziomu około 1 mg/m^3 , w dobrych przyrządach, w porównaniu z wartością około $0,01 \text{ mg/m}^3$ dla systemu elektrodynamicznego.

Wpływ akumulacji pyłów

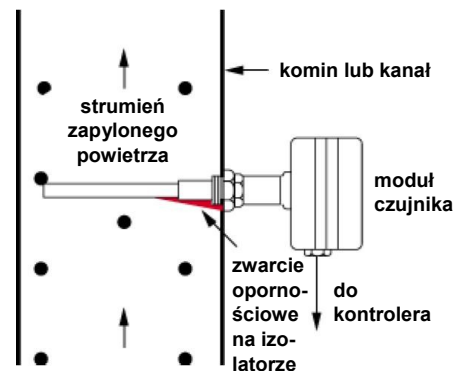
W systemach elektrodynamicznych największa część sygnału pochodzi od zjawiska indukcji towarzyszącego przechodzeniu cząstek obok sondy. Zjawisko to jest uzależnione wyłącznie od ładunków występujących na cząstkach oraz od rozkładu tych ładunków, a niezależne od stanu czystości powierzchni sondy. Sytuacja wygląda inaczej w systemach tryboelektrycznych, w których poziom transferu ładunków jest uzależniony od materiału powierzchni w którą uderzają cząstki. Akumulacja na sondzie zmienia materiał powierzchni sondy, i tym samym wpływa na odpowiedź sondy systemu tryboelektrycznego.



Niezawodność w zastosowaniach z wysoką wilgotnością i pyłem przewodzącym (duże obciążenia)

Jednym z mechanizmów powstawania usterek systemów tryboelektrycznych w zastosowaniach z wysoką wilgotnością lub pyłem przewodzącym jest powstawanie zwarcia opornościowego na izolatorze, generującego fałszywe sygnały wskutek:

1. upływów sygnału do komina,
2. zakłóceń pochodzących od prądów w kominie,
3. wytwarzania ładunków w utworzonej celi.



W systemach elektrodynamicznych opisany problem można zminimalizować wykorzystując całkowicie izolowaną sondę (pręt czujnika jest izolowany na całej długości), pozbawioną opornościowego połączenia z uziemieniem. Izolowana sonda nieprzerwanie realizuje pomiar pomimo obecności powłoki izolującej, gdyż zjawiska indukcyjne nie wymagają kontaktu pomiędzy cząstkami a prętem czujnika. Sonda izolowana jest chroniona kilkoma patentami własności firmy PCME.

Z kolei dla systemów tryboelektrycznych główną metodą unikania zwarć rezystancyjnych jest korzystanie z powietrza przedmuchu. Ta metoda nie oferuje w praktyce stuprocentowej niezawodności, gdyż problematyczne jest już utrzymywanie czystości i suchości izolatora przy użyciu powietrza które samo może zawierać wilgoć w wyniku rozprężania.

Zasadniczo, systemy elektrodynamiczne dają lepsze rezultaty w warunkach wysokiego zawilgocenia, gdyż akumulacja pyłów w takich środowiskach nie wpływa w żaden sposób na realizowany pomiar*+.

Wpływ prędkości

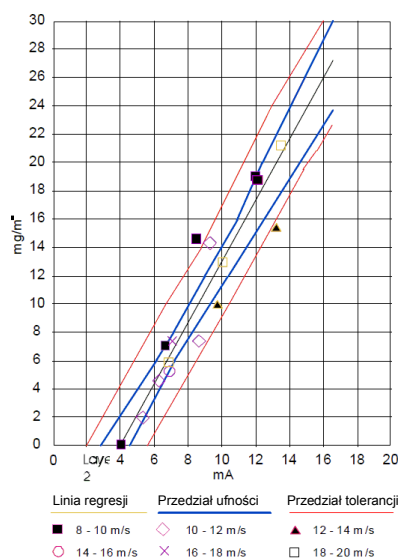
Do roku 1995 jedna z form technologii TriboACE® była wykorzystywana zasadniczo wyłącznie w zasto-

sowaniach ze względną stałą prędkością (+/- 30 %). Przyczyną były wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla dużych cząstek (> 100 µm) oraz przy niskich prędkościach (1–2 m/s), które wykazały zależność od prędkości. Po opracowaniu przez firmę PCME techniki elektrodynamicznej bardziej szczegółowe badania wykazały, że w zakresie prędkości występujących za filtrami workowymi (> 8 m/s) prędkość nie ma znaczącego wpływu na sygnał. Jest to wynikiem względnie niewielkiego wpływu zmian prędkości na sygnał indukowany częstotliwościowo. Opisana właściwość, braku zależności od prędkości, została już niezależnie zweryfikowana w laboratoriach TUV w Niemczech.

Systemy tryboelektryczne reagują na zmiany prędkości cząstek, ponieważ proces przekazywania ładunku przy uderzeniu jest uzależniony od energii uderzenia cząstki. Większość producentów podaje, że prąd tryboelektryczny jest proporcjonalny do kwadratu prędkości dla większości typów materiałów.

* Zob. raport z badania Gyproc, 04/96

+ Zob. raport z badania TUV DA60



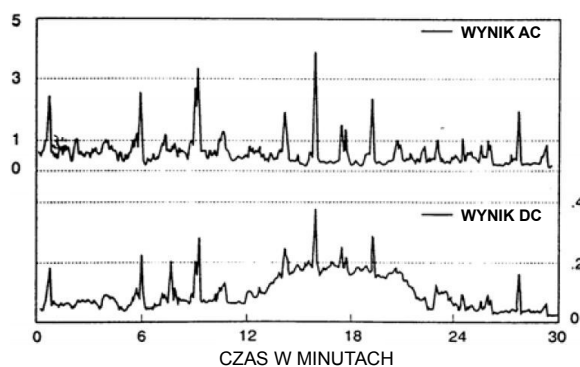
Wykres demonstrujący brak zależności od prędkości dla urządzenia DustAlert

Stabilność sygnału

Badania doświadczalne wykazały, że sygnał tryboelektryczny ulega niekiedy przesunięciom niezwiązanym ze stężeniem cząstek. Objawia się to jako zmiana poziomu, a niekiedy nawet jako zmiana polaryzacji. Odpowiedź elektrodynamiczną charakteryzuje brak wrażliwości na przesunięcia sygnału DC, co skutkuje większą stabilnością. Wyjaśnienie zjawiska przesunięcia

nięcia sygnału prądowego DC może być powiązane z wzmiankowanym wcześniej zanieczyszczeniem sondy.

Można z zainteresowaniem zauważyć, że w badaniach polowych wykonanych w trakcie procesu akredytacyjnego systemu elektrodynamicznego monitorowania emisji firmy PCME za filtrami workowymi w Niemczech pyłem roboczym był TiO₂, lekki proszek.



Porównanie pomiędzy systemami elektrodynamicznym a tryboelektrycznym

W procesie o nominalnie stałym poziomie zapylenia gazu procesowego wykazano większą stabilność indukowanej odpowiedzi częstotliwościowej w porównaniu z odpowiedzią w postaci sygnału stałoprądowego.

Ograniczenia techniki elektrodynamicznej

Tak jak w przypadku wszystkich innych typów technik monitorowania emisji pyłowych, również dla techniki elektrodynamicznej występują ograniczenia związane z zakresem użytkowania i skutecznością. W praktyce nie ograniczają one jednak możliwości wykorzystywania tej techniki w większości zastosowań przy pomiarach zawartości pyłów.

Ograniczenia użytkowe tej techniki są dwójakiego rodzaju:

1 Kalibracja przyrządu względem stężenia pyłów będzie ulegać przesunięciu w przypadku zmian następujących warunków procesowych:

- zmiana rozkładu wielkości cząstek,
- zmiana typu cząstek,
- zmiana ładunku obecnego na cząstkach,
- obecność wody kropelkowej.

W praktyce prowadzi to do ograniczeń w zastosowaniach na elektrofiltrach w przypadku możliwej

zmienności ładunku na cząstkach, wskutek czego wskazania przyrządów mają wyłącznie charakter orientacyjny. Jest to również źródłem problemów w zastosowaniach w których typ cząstek podlega zmianom, lub występuje woda kropelkowa.

Ostrożność jest wymagana również w zastosowaniach przy procesach spalania, w których zmienność ładunku wynikająca ze zjawisk jonizacyjnych może wpływać na wyniki kalibracji.

2. Prawidłowość technik elektrodynamicznych jest uzależniona spełnienia warunku braku ciągłych dramatycznych zmian procesu w sekundowych odstępach czasu. Taka sytuacja unieważniałaby zależność wynikającą z rozkładu Poissona.

Niemniej jednak, sytuacje tego typu występują w bardzo niewielu zastosowaniach, a zagadnienia zmian związanych z cyklami czyszczenia filtrów workowych są rozwiązywane dzięki odpowiedniemu doborowi szerokości pasma sygnału.

Streszczenie

Głównym sektorem rynku korzystającym z urządzeń działających w technice elektrodynamicznej jest monitorowanie emisji pyłowych w instalacjach odpylania. W tym rosnącym obszarze zastosowań nieodłączne właściwości techniki elektrodynamicznej oferują wartościowe zalety:

- Niezawodny i dokładny pomiar przy niskich poziomach zapylenia (* typowo $\leq 5 \text{ mg/m}^3$ za filtrami workowymi).
- Czujnik wymaga tylko jednego przyłącza, a jego działanie nie jest uzależnione od poziomu wibracji.
- Niski koszt posiadania dzięki niewielkim wymaganiom w zakresie konserwacji i rozsądnej cenie zakupu.

Systemy elektrodynamiczne często oferują rozwiązanie bardziej praktyczne, niezawodne i ekonomiczne od oferowanego przez przyrządy działające na zasadzie pomiaru tryboelektrycznego i pomiaru zaczernienia.

Przyrządy mierzące zaczernienie generują stosunkowo wysokie koszty zakupu i instalacji, wymagają ciągłej obsługi konserwacyjnej, i nawet wtedy są nieodpowiednie dla pomiarów za filtrami workowymi, ze względu na nieodłączny limit rozdzielczości, nie lepszy niż $20 \text{ mg/m}^3/\text{m}$. Typowe obciążenia pyłowe za filtrem workowym wynoszą od 1 mg/m^3 do 10 mg/m^3 , w związku z czym bardziej odpowiednia dla nich jest niekontaktowa technika elektrodynamiczna.

Zalety pomiaru wykonywanego przy użyciu czujników elektrodynamicznych są streszczone poniżej w zestawieniu z systemami tryboelektrycznymi:

Pomiar elektrodynamiczny	Pomiar tryboelektryczny
Zależność od prędkości nie występuje, dzięki indukowanej odpowiedzi częstotliwościowej*	Sygnał tryboelektryczny jest uzależniony od czynnika prędkości, trudnego do zdefiniowania w związku z energią uderzeń
Wyższa wartość ilorazu sygnał/zakłócenia (rozdzielczość)	Sygnał tryboelektryczny wykazuje około 50-krotnie niższą czułość ze względu na obecność wzmacniaczy DC
Brak negatywnego wpływu akumulacji pyłów na sondzie	Akumulacja pyłów zmienia odpowiedź wskutek zmian charakterystyki powierzchni sondy
Stabilny sygnał skorelowany ze stężeniem pyłów	Sygnał tryboelektryczny nie gwarantuje ciągłej stabilności
Izolowana konstrukcja sondy eliminuje fałszywe sygnały dzięki niedopuszczaniu do powstawania „zwarć” rezystancyjnych na izolatorze w zastosowaniach z pyłami mokrymi lub przewodzącymi	Brak możliwości pełnego odizolowania sondy, plus każde wydłużenie materiału izolującego zmniejsza efektywną długość sondy odpowiadającą za generację sygnału

* zob. raport z badania TUV