

Jerzy LARISCH

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA, BIELSKO-BIAŁA

Wstępne badania monitorujące poziom drgań silnika zasilanego systemem common-rail

Dr inż. Jerzy LARISCH

Autor jest adiunktem w ATH i pracuje w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów, gdzie zajmuje się problematyką zasilania i sterowania silników spalinowych.



e-mail: jlarisch@ath.bielsko.pl

Streszczenie

W publikacji przedstawiono badania wstępne silnika o zapłonie samoczynnym wyposażonego w układ wtryskowy Common Rail, który również jest, coraz szerzej stosowany w dużych stacjonarnych silnikach. System wtrysku sterowanego elektronicznie, typu Common Rail, z uwagi na możliwości wieloparametrowej regulacji w zakresie stosowanych procedur strategicznych i operacyjnych, silnie wpływa na przebieg spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym, a tym samym wpływa na zmiany poziomów drgań i hałasu emitowanego przez te silniki. Badania wykonano, w celu oceny przydatności monitorowania poziomów drgań silnika wyposażonego w elektronicznie sterowany system wtryskowy. Przeprowadzone badania, o charakterze diagnostycznym i regulacyjnym, były badaniami rozpoznawczymi, w trakcie, których stwierdzono znaczący wpływ wybranych parametrów regulacyjnych systemu wtryskowego, na charakter zmian sygnału wibroakustycznego, wynikającego z procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Parametrami regulacyjnymi były: ciśnienie wtrysku, zmiany charakteru dawki wtrysku, kąt wyprzedzenia wtrysku, oraz recyrkulacja spalin. Wyniki badań wstępnych dają podstawę do opracowania koncepcji systemu diagnostycznego, dla silników stacjonarnych.

Słowa kluczowe: Silnik ZS, wtrysk Common Rail, hałas procesu spalania.

Vibration level monitoring of a common rail diesel engine

Abstract

Pre-examinations of a diesel engine with the common rail injection system are presented in the paper. The common rail system is more and more extensively used in big stationary engines. It influences strongly the combustion process in diesel engines and, thus, changes of the vibration and noise level caused by these engines due to possibilities of multi-parameter control within the strategic and operating procedures applied. Investigations aimed at estimation of usefulness of the common rail diesel engine vibration level monitoring. The carried out experiments of diagnostic and operation aspect showed the significant influence of selected operational parameters of the injection system, namely: the injection pressure, change of character of the injection dose, the injection timing and EGR, on the character of changes of the accelerometer signal of combustion process in the compression ignition engine. The pre-examination results can be a basis for elaboration of an idea of the diagnostic system for stationary engines.

Keywords: diesel engine, common rail, combustion noise.

1. Wstęp

Silnik tłokowy, pracujący w stałych warunkach wewnętrznych i zewnętrznych jest źródłem hałasu o stałych parametrach. Jednakże każda zmiana stanu technicznego poszczególnych elementów silnika, podobnie, jak i jego warunków pracy, związana jest z odpowiednią zmianą charakteru emitowanego hałasu. Prawdopodobnie ta jest powszechnie wykorzystywana, przykładowo w diagnostyce mechanicznych uszkodzeń części jednostki napędowej.

Wysoki poziom techniki pozwala na wyeliminowanie wielu wad silników z wtryskiem bezpośrednim, poprzez wykorzystanie nowych technologii zasilania, a zwłaszcza systemu Common Rail, rozwijanego, również w silnikach stacyjnych. Dzięki zastosowaniu elektronicznego sterowania możliwe stało się uzyskanie znacznie lepszej kontroli nad pracą jednostki napędowej, co sprowadza się do precyzyjnego dawkowania ilości wtryskiwanego paliwa, doboru odpowiedniego profilu wtrysku, momentu wtrysku, oraz czasu jego trwania., co wpływa na zmianę charakteru procesu spalania. Wszystko to, oprócz znacznego obniżenia hałasu i drgań, podnosi wyrażnie ekonomiczność pracy silnika i wpływa na obniżenie toksyczności spalin. Pojawiają się jednocześnie problemy związane z doбором parametrów regulacyjnych, z reguły wymagających rozwiązań zagadnień optymalizacyjnych i wynikających, również z ograniczenia hałaśliwości silnika. Metody badań wibroakustycznych są obecnie coraz powszechniej stosowane do pomiarowej analizy dynamicznej, diagnostyki i monitorowania stanu drgającego silników dużych mocy. Urządzenia monitorujące stany dynamiczne są wykorzystywane w torze sprzężenia zwrotnego układów regulacji, gdzie informują o zużyciu lub uszkodzeniu części, oraz zmianie parametrów regulacyjnych silnika.

2. Cel pracy

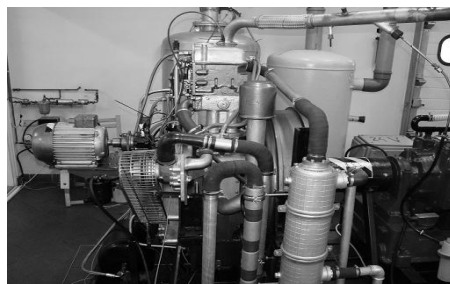
Celem niniejszej pracy było sprawdzenie użyteczności monitorowania drgań w różnych warunkach pracy silnika spalinowego, w czasie doboru parametrów regulacyjnych, silnika wyposażonego w układ Common Rail. Przeprowadzone badania mają charakter badań wstępnych, w trakcie, których sprawdzono, czy oprócz naturalnego wpływu obciążenia i prędkości obrotowej na hałas emitowany przez silnik, wpływ mają inne parametry związane z kontrolą procesu spalania, w tym następujące parametry pracy układu wtryskowego: ciśnienie wtrysku, kąt wyprzedzenia wtrysku, podział dawki wtrysku, ciśnienie wtrysku przy określonym profilu dawki, oraz recyrkulacja spalin.

3. Stanowisko badawcze

Badania zmian sygnału wibroakustycznego w zależności od ustawień parametrów regulacyjnych silnika zostały przeprowadzone na dwupaliwowym silniku badawczym o zapłonie samoczynnym SB 3.1. o następujących parametrach technicznych:

- wolność, czterosuwowy
- liczba cylindrów 1
- pojemność skokowa 1848,5 cm³
- moc znamionowa 22,8 kW
- maksymalna prędkość obrotowa 2200 obr/min

Silnik badawczy wyposażono w system wtrysku bezpośredniego typu Common Rail. Na rysunku nr 1 przedstawiono widok silnika badawczego.



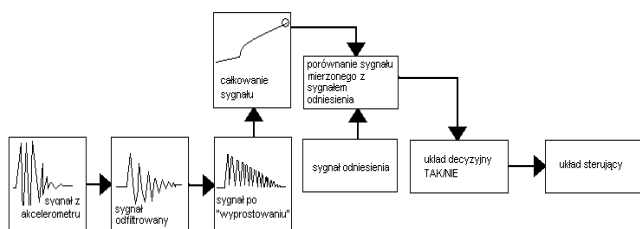
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego silnika SB3.1

Fig. 1. View of the test bench for SB3.1 engine

3.1. Tor pomiarowy

Pomiary przeprowadzono wykorzystując przetwornik do pomiaru przyspieszeń, którym był akcelerator piezokwarcowy D 35 firmy MMF o czułości napięciowej 5 mV/ms^2 i częstotliwości rezonansowej 20 kHz . Do wizualizacji i zapisu przebiegów użyto oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS 3012. Przebiegi drgań uśredniano z 64 przebiegów. Dzięki możliwości zapisu zarejestrowanego przyspieszenia w postaci dyskretnej, przez oscyloskop, dane poddawano obróbce na komputerze klasy PC. Użycie fizycznego integratora nie było, więc konieczne. Poniżej przedstawiono przykład postępowania przy wyznaczaniu wykresu prędkości drgań, w zależności od czasu. Na rysunku nr 2 przedstawiono schemat postępowania w trakcie analizy sygnałów.

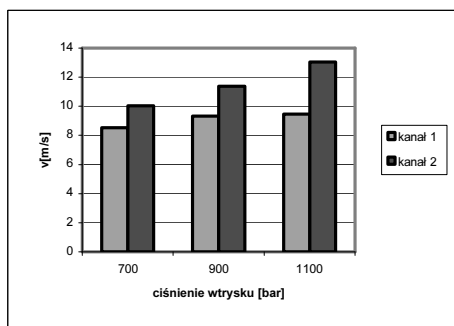
Jako parametr służący do analizy poziomów drgań silnika wykorzystano całkę z bezwzględnej wartości zarejestrowanych przez czujnik przyspieszeń.



Rys. 2. Schemat monitorowania sygnału drgań
Fig. 2. Schematic diagram of monitoring the vibration signal

4. Wykonane pomiary i ich analiza

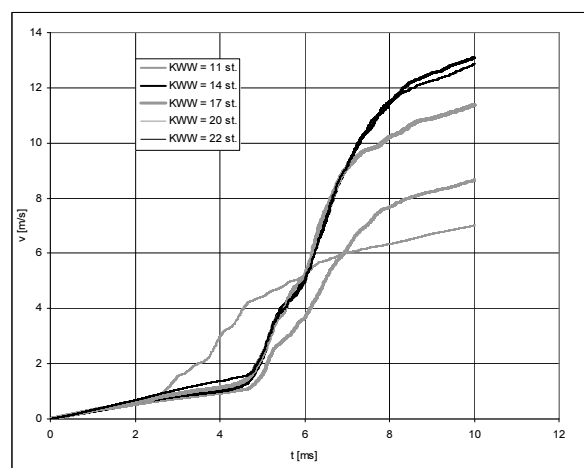
Wykonane badania miały charakter prostych testów. Przeprowadzono pomiary sygnału wibroakustycznego przy zmianie następujących parametrów silnika: ciśnienie wtrysku; kąt wyprzedzenia wtrysku; podział dawki wtrysku; ciśnienie wtrysku przy określonym profilu dawki, oraz recyrkulacja spalin. Na podstawie wykonywanych pomiarów stwierdzono, że miejsce mocowania czujników ma wpływ na ich wyniki. Różnice poziomów drgań, dla silnika SB-3.1, mierzone w kierunku wzdłużnym do osi wału korbowego, w większości przypadków są większe, niż dla prędkości mierzonych w kierunku poprzecznym. Ma to istotne znaczenia, dla analizy symptomów diagnostycznych. Wpływ miejsca mocowania czujników - wzdłużnie (kanał 2) i poprzecznie (kanał 1) do wału korbowego przedstawiono na wykresie porównawczym, na rys. nr 9. Pomiary drgań wykonano, dla różnych ciśnień wtrysku paliwa. W przypadku badanego silnika przedstawiono wyniki pomiarów z akceleratorem zamocowanym w kierunku osi wału korbowego.



Rys. 3. Porównanie prędkości drgań w kanale 1 i 2 toru pomiarowego, dla zmiennego ciśnienia wtrysku
Fig. 3. Vibration speed in channel 1 and 2 of the measuring path for variable injection pressure

4.1. Wpływ kąta wyprzedzenia wtrysku na charakter wibroakustycznego sygnału procesu spalania

W czasie wykonywania testu wpływu kąta wyprzedzenia wtrysku na sygnał generowany przez akcelerator, silnik pracował przy pojedynczej dawce wtrysku wtryskiwanej, przy stałym ciśnieniu wtrysku i przy stałym obciążeniu i stałej prędkości obrotowej. Zmiennym parametrem regulacyjnym był kąt wyprzedzenia wtrysku zmieniający się w zakresie od 11° do 22° OWK przed GMP, oraz ilość wtryskiwanego paliwa. Parametry pracy silnika, w czasie realizacji tego testu przedstawiono w tabelicy 1, a rezultaty pomiarów na rysunku nr 4.



Rys. 4. Prędkości drgań dla różnych kątów wyprzedzenia wtrysku
Fig. 4. Vibration speed for various injection angles

Tab. 1. Testu wpływu kąta wyprzedzenia wtrysku
Tab. 1. Test of the impact of the injection angle

Parametr:	Kąt wyprzedzenia wtrysku KWW [°]				
	11	14	17	20	22
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500	1500	1500	1500	1500
Moment obciążenia [N·m]	65	65	65	65	65
Czas dawki wtrysku t_d [μs]	1440	1408	1520	1520	1500
Ciśnienie wtrysku p [bar]	700	700	700	700	700

Uzyskane wyniki są zróżnicowane, ale nie są jednoznaczne. Pomijając „nieprawidłowe” przebiegi można stwierdzić, że wraz ze wzrostem kąta wyprzedzenia wtrysku zwiększają się również drgania silnika – jego praca staje się „twarda”. Prawdopodobną przyczyną uzyskania takich wyników pomiarów był brak odpowiedniej filtracji sygnału. Analiza tego sygnału wymaga przeprowadzenia II etapu badań.

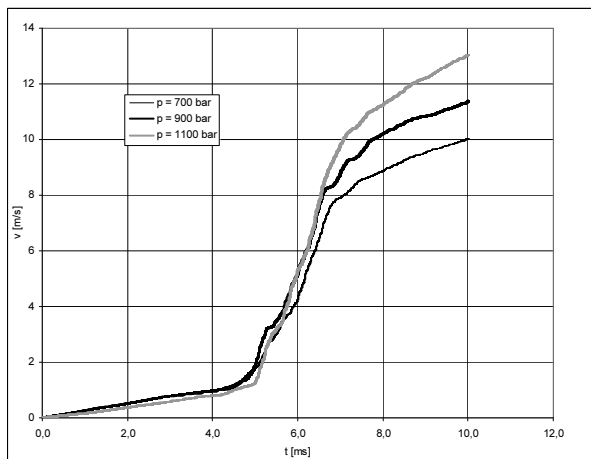
4.2. Wpływ zmian ciśnienia wtrysku

Test był wykonywany przy stałej prędkości obrotowej 1500 obr/min , parametrami zmiennymi były ciśnienie wtrysku i ilość wtryskiwanego paliwa. Warunki przy których przeprowadzono pomiary przedstawiono w tabelicy 2.

Tab. 2. Parametry pomiarów dla ciśnienia wtrysku 700, 900 i 1100 bar
Tab. 2. Test of the impact of injection pressure 700, 900 and 1100 bar

Parametr:	Ciśnienie wtrysku p [bar]		
	700	900	1100
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500	1500	1500
Moment obciążenia [N·m]	54	54	54
Czas dawki wtrysku t_d [μs]	1280	1088	930

Wyniki testu w postaci zależności prędkości drgań od czasu, dla różnych ciśnień wtrysku przedstawiono na rysunku nr 5.

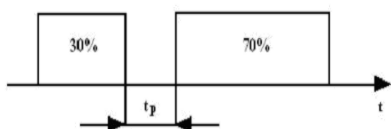


Rys. 5. Prędkości drgań dla różnych ciśnień wtrysku paliwa
Fig. 5. Vibration speed for various injection pressure

Przebieg krzywych wskazuje że, wraz ze wzrostem ciśnienia wtrysku wzrasta poziom drgań, a więc i hałasu. Praca silnika subiektywnie oceniając staje się wyraźnie „twardsza”. Wyraźniejsze są również różnice pomiędzy poziomami drgań, dla kolejnych wartości ciśnień wtrysku.

4.3. Wpływ podziału dawki wtrysku

Korzystając z możliwości sterownika dawki wtrysku KSSiP-1, wykonano pomiary drgań silnika pracującego z dzieloną dawką wtrysku. Na rysunku 6 zilustrowano zastosowany podział dawki wtrysku. Dawkę wtrysku podzielono na dwie części, w tym 30% dawki wstępnej i 70% dawki głównej. Określono profile dawki w których zmieniano czas przerwy między dawkami, t_p , od 400 do 800 [μ s] Wyniki pomiarów dla dawki dzielonej i nie dzielonej przedstawiono na rysunku 7. Parametry silnika zastosowane dla tego testu przedstawiono w tabelicy 3.

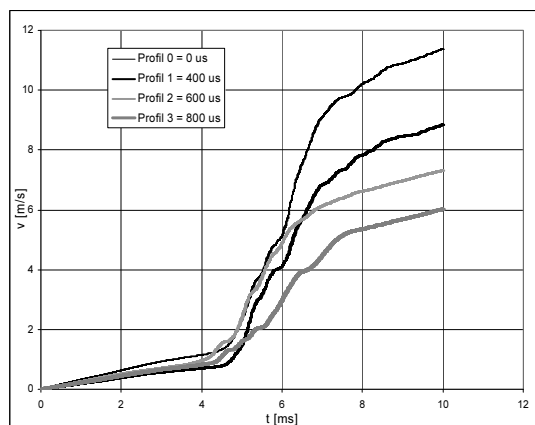


Rys. 6. Schemat podziału dawki wtrysku
Fig. 6. Division of the injection dose

Tab. 3. Parametry pomiarów przy różnych profilach dawki wtrysku (profil 0 – dawka pojedyncza; pozostałe – dawka dzielona)
Tab. 3. Parameters of measurements at various profiles of the injection dose (profile 0 - single dose; remaining - divided dose)

Parametr:	Profil dawki wtrysku t_p [μ s]			
	Profil 0 0	Profil 1 400	Profil 2 600	Profil 3 800
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500	1500	1500	1500
Moment obrotowy [Nm]	65	65	65	65
Czas dawki wtrysku t_d [μ s]	1520	1228	700	1320
Ciśnienie wtrysku p [bar]	700	700	700	700

Z wykresów przedstawionych na rysunku 7, wynika wyraźna przewaga dawki dzielonej nad pojedynczą, z punktu widzenia poziomu drgań. Zastosowanie dawki dzielonej skutkuje zmniejszeniem hałaśliwości pracy silnika. Podział dawki wtrysku, z odpowiednio dużym czasem przerwy (800 μ s) powoduje zmniejszenie poziomu drgań niemal o połowę, w stosunku do dawki pojedynczej.



Rys. 7. Prędkości drgań od czasu dla różnych profili dawki wtrysku paliwa
Fig. 7. Vibration speed for various injection dose profiles

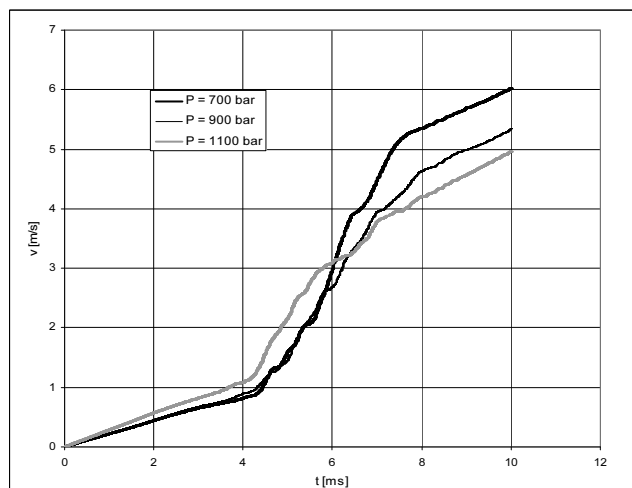
4.4. Wpływ zmian ciśnienia wtrysku silnika pracującego z dzieloną dawką wtrysku

Test wykonano dla dzielonej dawki wtrysku o czasie przerwy między dawkami $t_p = 800 \mu$ s (Profil 3 z poprzedniego testu). W tabelicy 7 zestawiono parametry pracy silnika zastosowane dla tego testu, a na rysunku 8 przedstawiono wyniki pomiarów.

Tab. 4. Parametry pomiarów przy Profilu 3 dawki wtrysku dla zmiennego ciśnienia wtrysku
Tab. 4. Parameters of measurements for profiles 3 of the injection dose for various injection pressure

Parametr:	Ciśnienie wtrysku p [bar]		
	700	900	1100
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500	1500	1500
Moment obciążenia [N·m]	65	65	65
Czas dawki wtrysku t_d [μ s]	1320	1228	700
Profil 3 dawki wtrysku t_p [μ s]	800	800	800
Kąt wyprzedzenia wtrysku KWW [°]	17	17	17

W przypadku dawki dzielonej zwiększanie ciśnienia wtrysku skutkowało na poziom drgań silnika odwrotnie do przypadku dawki pojedynczej. W tym przypadku wzrost ciśnienia wtrysku powodował zmniejszenie prędkości drgań.



Rys. 8. Przebiegi zależności prędkości drgań od czasu dla różnych ciśnień wtrysku przy zastosowaniu dzielonej dawki paliwa
Fig. 8. Vibration speed for various injection dose profile

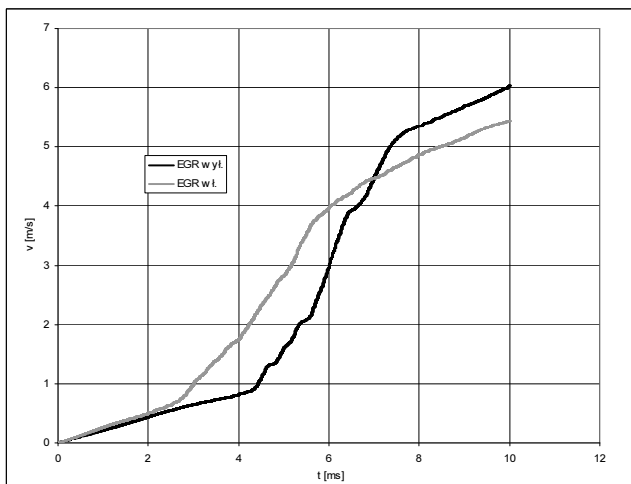
4.5. Wpływ zastosowania recyrkulacji spalin

Test wykonano stosując w czasie pracy silnika 10% recyrkulację spalin. Parametry pracy silnika zestawiono w tablicy nr 5, a wyniki pomiarów na rysunku 9.

Tab. 5. Parametry pomiarów przy Profilu 3 dawki wtrysku dla włączonej i wyłączonej recyrkulacji spalin (EGR)

Tab. 5. Parameters of measurements for profile 3 of the injection dose for different state of EGR

Parametr	Wartość
Prędkość obrotowa [obr/min]	1500
Moment obciążenia [N·m]	65
Czas dawki wtrysku t_d [μ s]	1024
Profil 3 dawki wtrysku t_p [μ s]	800
Kąt wyprzedzenia wtrysku KWW [°]	17



Rys. 9. Przebieg zależności prędkości drgań od czasu podczas pracy silnika z recyrkulacją spalin

Fig. 9. Vibration speed for different state of EGR

Jak przedstawiono na rysunku 9, włączenie 10 % recyrkulacji spalin powoduje zmianę charakteru drgań, w stosunku do wyłączonego systemu EGR. Zmiany są niewielkie, ale z punktu widzenia diagnostyki silnika rejestrowane.

5. Podsumowanie

Pomiary drgań silników wykorzystujących system wtryskowy Common Rail, mają znaczny potencjał diagnostyczny. Wibroakustyka może, więc być wykorzystywana na szerszą skalę, nie tylko w silnikach stacjonarnych, ale również w silnikach samochodowych. Przy odpowiednim poziomie wiedzy i doświadczeniu pozwala to, na w miarę precyzyjne i szybkie zlokalizowanie mechanicznej usterki silnika i może być przydatne, jako uzupełnienie diagnostyki układów Common Rail. Badania wykazały, że duży wpływ na poziom hałasu i drgań silnika ma podział dawki wtrysku. Ciśnienie wtrysku i kąt wyprzedzenia wtrysku, również odgrywają znaczącą rolę. Wprowadzany, ze względów ekologicznych, system recyrkulacji spalin przyczynia się, też do ograniczenia hałaśliwości procesu spalania. Z przeprowadzonych pomiarów wynika duże znaczenie miejsca zabudowy akcelerometru, co sprowadza się poszukiwania najkorzystniejszego stosunku sygnał/szum. Zastosowanie metod wibroakustycznych podczas badań związanych z doбором parametrów regulacyjnych silnika, wprowadza dodatkowe kryterium optymalizacyjne i metody te powinny być dalej rozwijane. Wyniki badań wstępnych dają podstawę do opracowania koncepcji systemu diagnostycznego, dla silników stacjonarnych. Przeprowadzona analiza danych pomiarowych za pomocą komputera klasy PC, może być wykorzystana do uzasadnienia zakupu specjalistycznej, ale i kosztownej aparatury do pomiarów hałaśliwości pracy silnika spalinowego.

6. Literatura

- [1] Kowalewicz A.: Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. Warszawa, WKiŁ 1990.
- [2] Łąszkowski R.: Wibroakustyka maszyn i urządzeń. Warszawa, WNT 1983.
- [3] Wojciechowski T.: Hałas motoryzacyjny i sposoby jego ograniczenia.
- [4] Biuletyn Informacyjny – Szkoleniowy P.Z.M., nr 6, Warszawa, PZM 1988.
- [5] Podśędkowski A., Sobieszkański M.: Zastosowanie metod akustycznych do badań procesu spalania w silnikach wysokoprężnych, Silniki Spalinowe nr6.

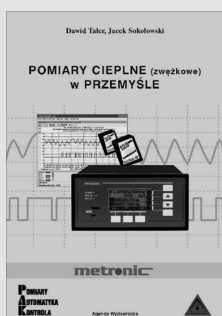
otrzymano / received: 29.12.2009

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książka Wydawnictwa PAK



Książka „Pomiary ciepłone (zwężkowe) w przemyśle” przedstawia problematykę pomiarów strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwężek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami ciepłno-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwężkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl