

Możliwości zamiany elektrycznych przepływomierzy powietrza stosowanych w silnikach spalinowych samochodów

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe typy przepływomierzy powietrza, stosowane w silnikach spalinowych samochodów: z klapą spiętrzającą, HLM, HFM, Vortex i MAP. Przedstawiono wyniki badania tych przepływomierzy na specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym. Przeanalizowano możliwość ich zamiany i zweryfikowano taką możliwość w praktyce.

Abstract. The article presents the basic types of air flow meters used in internal combustion engines of cars: with a damming flap, HLM, HFM, Vortex and MAP. The results of testing these flow meters on a specially prepared measuring stand are presented. The possibility of replacing them has been analyzed and this possibility has been verified in practice. (Possibilities of replacing electric air flow meters used in internal combustion engines of cars).

Słowa kluczowe: pomiar przepływu powietrza, silnik spalinowy, przepływomierz klapowy, HFM.

Keywords: air flow measurement, combustion engine, flap flow meter, HFM.

Wstęp

W zasilanych benzyną silnikach o zapłonie iskrowym przepływomierz powietrza jest jednym z ważniejszych czujników, bezpośrednio wpływając na ilość paliwa dostarczaną do cylindrów [1, 2]. Przepływomierz powietrza jest przyrządem pomiarowym umożliwiającym wyznaczenie strumienia objętości lub masy powietrza poruszającego się przez daną powierzchnię w określonej jednostce czasu [3]. Jego awaria lub zmniejszająca się z czasem dokładność następująca w wyniku zużycia sprawia, że osiągi silnika będą małe, emisja toksyn oraz tlenków do środowiska się zwiększy, w granicznym przypadku sterownik silnika przejdzie w awaryjny tryb pracy oraz wyświetli błąd na desce rozdzielczej pojazdu, sygnalizujący awarię układu sterowania silnikiem. W niektórych krajach z tego powodu pojazd może nie przejść kontroli emisji spalin, w wyniku czego nie będzie dopuszczony do ruchu [4].

W nowoczesnych silnikach wysokoprężnych, sterowanych za pomocą układów wtrysku paliwa, przepływomierz powietrza jest jedynym możliwym sposobem określenia ilości powietrza pobranego przez silnik, realnie wpływając na jego pracę.

Ponadto, biorąc pod uwagę zjawiska zachodzące w kolektorach ssących silników spalinowych, kwadratowy lub o małej średnicy kanał ssący przepływomierza powoduje zaburzenie tych zjawisk. W silnikach wolnossących każdy element tłumiący przepływ powietrza wpływa na moc oraz moment obrotowy generowany przez silnik, jego elastyczność lub możliwość szybkich zmian obrotów pracy silnika. Dlatego uzasadnione jest poszukiwanie rozwiązań korzystniejszych niż seryjnie stosowane w pojazdach, które są często rozwiązaniami pośrednimi pomiędzy opłacalnością, ekologią, trudnością wykonania lub dostępną w danym czasie technologią.

Metody wyznaczenia przepływu powietrza w silnikach spalinowych

Przepływomierz powietrza dokonuje pomiaru strumienia objętości lub masy powietrza poruszającego się przez daną powierzchnię w określonej jednostce czasu. Dla przepływomierzy masowych uzyskany pomiar wyrażany jest najczęściej w kilogramach na godzinę [kg/h] lub w kilogramach na sekundę [kg/s], a dla objętościowych w metrach sześciennych na godzinę [m³/h] lub w decymetrach sześciennych na sekundę [dm³/s].

W silnikach spalinowych zasilanych benzyną pobrane przez silnik powietrze można wyznaczyć dwoma metodami. Pierwsza metoda wymaga pomiaru ciśnienia

bezwzględnego w kolektorze dolotowym (za przepustnicą główną) oraz temperatury zasysanego powietrza. Natężenie przepływu powietrza A_v [dm³/s], docierającego do silnika przy danej prędkości, można obliczyć ze wzoru (1):

$$(1) \quad A_v = \frac{n}{60} \frac{D}{2} \cdot \eta - EGR_v$$

gdzie: n – prędkość obrotowa silnika [obr/min], D – pojemność silnika [dm³], η – sprawność objętościowa silnika, EGR_v – przepływ objętościowy recyrkulacji spalin [dm³/s].

Gęstość powietrza znajdującego się w kolektorze ssącym d_a [kg/m³] jest zależna od jego temperatury oraz panującego ciśnienia. Dla ustalonej objętości:

$$(2) \quad d_a = d_0 \cdot \frac{p_i T_0}{p_0 T_i}$$

gdzie: p_i – ciśnienie bezwzględne w kolektorze ssącym [Pa], T_i – temperatura powietrza wpływającego do kolektora dolotowego [°C],

p_0 , d_0 oraz T_0 są wartościami odniesionymi do ciśnienia, gęstości i temperatury w warunkach normalnych dla obliczeń termodynamicznych.

Masę powietrza m [kg] można obliczyć ze wzoru:

$$(3) \quad m = d_a \cdot V$$

gdzie: V – objętość powietrza [m³].

Natężenie przepływu masowego A_m [kg/s] obliczamy z zależności:

$$(4) \quad A_m = d_a \cdot A_v$$

Ostatecznie korzystając ze wzoru (1):

$$(5) \quad A_m = d_a \left(\frac{n \cdot D \cdot \eta}{120} - EGR_v \right)$$

Podstawowa ilość paliwa q [kg/s] wymagana do dostarczenia do silnika wynika z zależności:

$$(6) \quad q = \frac{A_m}{AFR}$$

gdzie: AFR – pożądany stosunek mieszanki powietrzno-paliwowej [-].

Czas wtrysku t [s] można obliczyć ze wzoru:

$$(7) \quad t = \frac{q}{R_f}$$

gdzie: R_f – wydajność zastosowanych w silniku wtryskiwaczy [cm^3/min].

Rzeczywisty czas wtrysku będzie zależał od wielu dodatkowych czynników, np. temperatury silnika lub położenia przepustnicy. Paliwo może być również wtryskiwane w kilku mniejszych dawkach w odstępach czasu.

Powietrze dostarczane do silnika spalinowego stanowi płyn dwufazowy. Z uwagi na recyrkulację spalin (uwzględnioną we wzorze (1)) płyn taki zawiera zarówno parę wodną jak i cząstki stałe. Wiele przepływomierzy jest bardzo czułych na obecność innych faz w przepływającym gazie [5].

Druga, mniej skomplikowana, a przy tym bardziej niezawodna metoda wyznaczenia przepływu powietrza to zastosowanie odpowiedniego przepływomierza [6].

Lokalizacja przepływomierza w układzie dolotowym silnika spalinowego ma kluczowe znaczenie dla jego poprawnej pracy. Umieszczenie przepływomierza posiadającego małą czułość blisko kolektora dolotowego poskutkowałoby niemożnością wychwycenia przez niego szybkich pulsacji powietrza wywołanych suwami ssania silnika i doprowadziłoby do uzyskania błędnych pomiarów. Ponadto, biorąc pod uwagę niską efektywność silnika spalinowego benzynowego, a przy tym przekształcaną przez niego dużą część energii spalania w ciepło, umiejscowienie przepływomierza blisko kolektora dolotowego silnika mogłoby znacznie skrócić jego żywotność.

Z uwagi na powyższe niedogodności, w klasycznych silnikach wolnossących, ze sprężarką doładowującą napędzaną mechanicznie lub wyposażonych w turbinę promieniową, przepływomierz powietrza umieszcza się w możliwym najdalszym punkcie zapewniającym mu odpowiednie warunki pracy (czystość przepływającego powietrza, strumień powietrza z możliwie małymi pulsacjami, brak wpływu temperatury na przepływomierz), czyli zaraz za filtrem powietrza. Rysunek 1 przedstawia przykładową lokalizację przepływomierza powietrza w takim silniku.

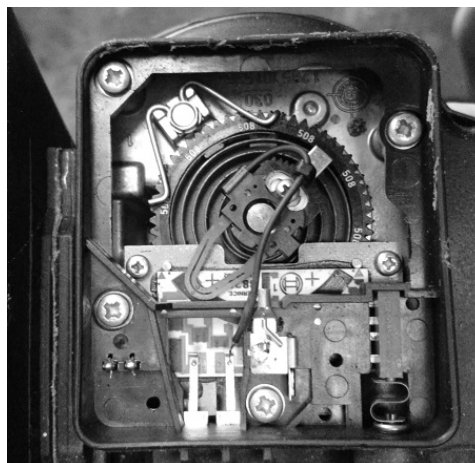


Rys. 1. Lokalizację przepływomierza powietrza w silniku wolnossącym M70 produkcji BMW (fot. autorów)

Rodzaje przepływomierzy powietrza stosowanych w motoryzacji

Przepływomierze oparte o pomiar mechaniczno-elektryczny są określane, jako przepływomierze z klapą spiętrzającą lub klapowe [3, 7]. Spotkane są najczęściej w starszych samochodach, produkowanych do lat 90-tych XX wieku. Przepływomierz posiada przepustnicę zamykającą rurę dolotową, na osi której zamocowany jest potencjometr oraz sprężyna zwrotna napinająca cały zespół w kierunku przeciwnym do przepływu powietrza. Przepływomierz wyposażony jest również w komorę tłumiącą, eliminującą wibracje łopatki pomiarowej, spowodowane nagłymi zmianami objętości powietrza dolotowego.

Przepustnica odchyła się proporcjonalnie do przepływu powietrza w kanale pomiarowym [8]. Obrót przepustnicy powoduje zmianę oporności połączonego z nią mechanicznie potencjometru (rys. 2).



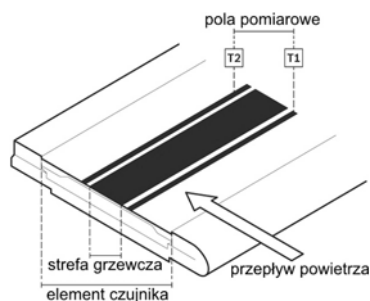
Rys. 2. Budowa układu przepustnica - potencjometr (fot. autorów)

Ponieważ układ przepustnica - potencjometr jest w stanie wyznaczyć jedynie objętościową ilość powietrza przepływającą przez kanał pomiarowy przepływomierza, wymagany jest również pomiar temperatury przepływającego powietrza. Do tego celu stosuje się umieszczone w kanale pomiarowym przepływomierza termistory, najczęściej typu NTC.

Drugą metodą jest pomiar z wykorzystaniem elementu grzejjego. Najprostszym przepływomierzem działającym na tej zasadzie jest przepływomierz z gorącym drutem typu HLM (ang. Hot Line Meter) [3, 7]. Nazywany jest też termoanemometrem [9].

Przepływomierz zawiera dwa elementy oporowe, pierwszy z nich mierzy temperaturę przepływającego powietrza, będąc jednocześnie elementem odniesienia. Drugi element jest rozgrzewany do temperatury około 130°C , będąc schładzany podczas przepływu powietrza. Pomiar natężenia przepływu powietrza odbywa się poprzez pomiar natężenia prądu niezbędnego do utrzymania temperatury drugiego przewodnika oporowego na zadanym, stałym poziomie.

Udoskonaloną konstrukcją przepływomierzy z gorącym drutem są przepływomierze z gorącą warstwą typu HFM (ang. Hot Film Meter) [3, 7]. Stosowane są w nich płytki pomiarowe, tj. wszystkie trzy elementy (element grzewczy i znajdujące się po obu jego stronach rezystory pomiarowe) są zespolone na spieku ceramicznym (rys. 3).



Rys. 3. Przepływomierz typu HFM [10]

Bez przepływu powietrza, ciepło wytwarzane przez element grzewczy jest równomiernie przekazywane do obu rezystorów, które wskazują taką samą temperaturę. Podczas przepływu, powietrze ochładza pierwszy rezystor,

odbiera ciepło od elementu grzewczego i podgrzewa drugi rezystor. Odwrócenie kierunku przepływu powoduje, że pierwszy rezystor jest ogrzewany, a drugi schładzany. W układzie pomiarowym jest to interpretowane, jako przepływ zwrotny w kierunku filtra powietrza i pozwala na wykrywanie usterek w silniku.

W porównaniu z przepływomierzami typu HLM, przepływomierze HFM pozwalają na miniaturyzację układu pomiarowego, są odporniejsze na zanieczyszczenia, umożliwiają usunięcie osadów oraz zanieczyszczeń powstałych na elementach pomiarowych poprzez przemywanie elementu pomiarowego odpowiednim preparatem.

Odmianą przepływomierza typu HLM, jest przepływomierz z gorącą siatką, jako elementem pomiarowym, zamiast gorącego, platynowego drutu. W przepływomierzu takim sygnałem wyjściowym do sterownika silnika, zamiast napięciowego jak w standardowych przepływomierzach typu HFM oraz HLM, jest sygnał częstotliwościowy.

Inną odmianą są przepływomierze z gorącą warstwą HLM typu coldwire. Wyróżnia je budowa podobna do przepływomierzy HFM (kanał pomiarowy) oraz dodatkowy, „zimny” rezystor termiczny, który wykorzystywany jest do pomiaru temperatury otoczenia i stanowi punkt odniesienia dla „gorącego” rezystora termicznego, używanego do pomiaru przepływu powietrza. Ze względu na mały kanał pomiarowy są one szczególnie wrażliwe na stopień czystości mierzonego powietrza. W przypadku uszkodzenia filtra powietrza, przepływomierz taki może być przyczyną zniszczenia silnika.

Kolejną metodą jest pomiar przepływu powietrza wykorzystujący generator fal do tworzenia wirów (przepływomierz Vortex). Zasada działania przepływomierza typu Vortex wykorzystuje teorię ścieżki wirowej von Kármán'a. Przeszkoda taka powoduje powstanie zawirowań, które odrywają się od jej boków z częstotliwością proporcjonalną do średniej prędkości przepływu. Podczas odrywania wirów, po dwóch stronach przegrody powstają naprzemienne chwilowe pola niskiego ciśnienia, które mogą być wykrywane odpowiednim czujnikiem.

Sygnał wyjściowy przepływomierza Vortex jest najczęściej napięciem stałym ze składową przemienną o zmiennej częstotliwości, który odpowiednio interpretuje sterownik silnika. Przepływomierze tego typu stosowane były głównie w samochodach produkowanych przez koncern DSM (Diamond-Star Motors), a także w niektórych modelach pojazdów takich producentów jak Toyota, Lexus lub BMW. Przepływomierze te posiadają wysoką niezależność pomiaru od zmian ciśnienia, temperatury i lepkości, wysoką stabilność długoterminową, brak efektu płynięcia zera, nie posiadają także części ruchomych, a spadek ciśnienia w kanale pomiarowym jest pomijalny. Wadą takiego rozwiązania jest brak możliwości pomiaru małych wartości przepływu (wiry powstają dopiero przy większej wartości prędkości przepływu), wrażliwość na drgania instalacji, na której zamontowany jest przepływomierz (drgania wzbudzając generator fal wraz z przepływającą strugą mogą być zinterpretowane jako przepływ powietrza przez kanał pomiarowy) oraz wymagają dobrze ustabilizowanego strumienia powietrza (należy zapewnić odpowiednio długi odcinek prosty przed i za przepływomierzem).

Ostatnią przedstawioną metodą jest pomiar przepływu na podstawie ciśnienia w kolektorze ssącym. Przepływomierze działające na tej zasadzie to tzw. MAP Sensor (ang. Manifold Absolute Pressure). Wykorzystywane są w elektronicznym wtrysku paliwa typu D do pomiaru ciśnienia bezwzględnego w kolektorze dolotowym.

Badane ciśnienie oddziałuje na jedną stronę membrany, której druga strona znajduje się w hermetycznej komorze, w której panuje podciśnienie odniesienia - próżnia absolutna. Znajdujący się na membranie piezoelektryczny element pomiarowy zmienia swoją rezystancję pod wpływem jej odształcenia, wywołanego zmianą ciśnienia.

Sygnał wyjściowy przepływomierzy tego typu zależny jest od objętości powietrza, natomiast dokładność oraz szybkość pomiaru jest tak duża, że przy odpowiednio małym kolektorze ssącym można wychwycić suwy ssania poszczególnych cylindrów, co pozwala na diagnostykę stanu silnika poprzez wyznaczenie niesprawności poszczególnych cylindrów.

Zadania przepływomierza powietrza w silniku spalinyowym

Przepływomierz jest jednym z głównych elementów sterującym pracą silnika, wszelkie jego modyfikacje, takie jak podmiana na przepływomierz innego typu, zmiana zakresów pracy, zmiana generowanych sygnałów, itp. pociągają za sobą pewne ryzyko.

Jedną z niepożądanych sytuacji jest wystąpienie niewłaściwej mieszanki paliwowo-powietrznej. Można spotkać dwa przypadki: mieszankę ubogą oraz zbyt bogatą. Mieszanka zbyt uboga występuje w przypadku za dużej ilości tlenu w stosunku do dostarczonej przez wtryskiwacze paliwa i sprawia, że temperatura spalania gwałtownie wzrasta, przegrzewając wszystkie elementy silnika znajdujące się w pobliżu komory spalania, takie jak zawory, głowica silnika, tłoki. W skrajnych przypadkach silnik pracujący na takiej mieszance traci ciśnienie sprężania poprzez wypalenie gniazd zaworów wydechowych lub stopienie toków.

Przeciwnością mieszanki ubogiej jest mieszanka zbyt bogata, która charakteryzuje się zbyt dużą ilością paliwa w stosunku do dostarczonego do komory spalania powietrza. Najbardziej charakterystycznym zjawiskiem pracy silnika na takiej mieszance jest znaczne ograniczenie generowanej przez niego mocy. Dzieje się to ze względu na to, iż część dostarczonego do komory spalania paliwa ulega wyrzuceniu przez zawory wydechowe do wydechu, gdzie następnie jest dopalana. Występowanie takiego zjawiska jest znacznie mniej szkodliwe aniżeli wystąpienie mieszanki ubogiej, jednakże może przyczynić się do wypalenia, z racji dopalania spalin w wydechu, gniazd zaworów wydechowych, a także do zaburzenia napełniania cylindrów w kolejnych cyklach pracy poprzez występowanie zjawisk falowych w wydechu, które podczas odpowiednich obrotów silnika wpływają na stopień napełniania się komory w momencie jednoczesnego otwarcia zaworów dolotowych oraz wydechowych. Warto jednakże uściślić, iż praktycznie każdy sterownik silnika jest zabezpieczony przed wystąpieniem zjawiska ubogiej lub bogatej mieszanki podczas pracy silnika. Zabezpieczenie to w najprostszym postaci polega na ciągłym analizowaniu przez sterownik składu spalin wydostających się z komory spalania poprzez wbudowaną w układ wydechowy sondę Lambda (tzw. closed loop operation). Dzięki temu czujnikowi sterownik silnika jest w stanie rozpoznawać odchyłki od poprawnej mieszanki i w przypadku niemożności wystosowania przez niego korekty - włączyć lampkę kontrolną awarii sterowania silnika.

Możliwości i zalety zmiany typu przepływomierza

Dobierając zamienny przepływomierz musi on mieć zastosowanie w silnikach o możliwie najbardziej zbliżonej pojemności skokowej, a także o takiej samej całkowitej liczbie zaworów, zarówno ssących, jak i wydechowych. Najlepsze rezultaty można osiągnąć stosując

przepływomierz, którego kanał pomiarowy wewnętrzny jest nie większy od średnicy kanału wewnętrznego przepustnicy głównej powietrza. W takim przypadku przepływomierz nie ogranicza przepływu powietrza i pozwala silnikowi pobierać maksymalną ilość powietrza, jaką jest on w stanie pobrać. Wadą tej metody jest konieczność zaktualizowania tabeli charakterystyki przepływomierza w sterowniku silnika z uwagi na fakt, iż „nowy” przepływomierz może pracować w innym zakresie, aniżeli stary.

W przypadku, gdyby przepływomierz podawał zbyt niskie wyniki przepływu powietrza należy obniżyć średnicę jego kanału pomiarowego, jednakże nie może być ona węższa aniżeli najwęższe miejsce w układzie dolotowym, gdyż przepływomierz będzie wtedy restrykcyjnie wpływał na przepływ powietrza. Powyższy dobór średnicy przepływomierza zapewni wzrost osiągnięć silnika oraz zmniejszą się straty związane z zasysaniem powietrza przez silnik, co w silnikach wolnossących jest szczególnie ważne z uwagi na brak wymuszonego przepływu powietrza (prócz układów z dynamicznym doładowaniem). Oczywiście jest również, iż każdy typ przepływomierza pracuje najbardziej optymalnie w przypadku przepływu laminarnego powietrza. Przepływ turbulentny sprawia, że przepływomierz zakłamuje wynik.

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań mających na celu zweryfikowanie możliwości zamiennego zastosowania używanych w przemyśle motoryzacyjnym przepływomierzy powietrza pobieranego przez silnik spalinowy benzynowy.

Należy podkreślić, że pomimo możliwości zastosowania zamiennego do oryginalnego układu pomiarowego, należy udać się z pojazdem do wyspecjalizowanego warsztatu zajmującego się strojeniem silników wyposażonych w układy wtryskowe. Pozwoli to na poprawne „dogranie” przepływomierza ze sterownikiem silnika, usunięcie z przepływomierza z kłapą spiętrzącą na przepływomierz HLM/HFM przeliczania przez sterownik przepływu objętościowego na przepływ masowy oraz zweryfikowanie, poprzez zbadanie stosunku zawartości tlenu w spalinach (stosunku AFR) przez wyspecjalizowane urządzenie, temperatury spalin w kolektorze wydechowym lub pomiar na hamowni podwoziowej poprawności pracy silnika z „nowym” przepływomierzem powietrza. Jednocześnie pozwoli to, w wyniku zwiększenia przepływu powietrza, na zmodyfikowanie map paliwowych silnika, korzystnie zwiększając generowaną przez niego moc lub poprawiając kulturę pracy.

Dla przepływomierza MAP podczas całkowicie otwartej przepustnicy przy pracującym na dowolnych obrotach silniku, podciśnienie występujące w kolektorze dolotowym spada praktycznie do zera i w związku z tym faktem napięcie wyjściowe z przepływomierza będzie praktycznie równe napięciu zasilania przepływomierza (5 V), co niektóre sterowniki interpretować będą jako awarię przepływomierza i wyświetlać lampkę kontrolną awarii silnika.

Ponieważ przepływomierze z kłapą spiętrzącą są jednymi z najstarszych rozwiązań stosowanych w pojazdach z wtryskiem benzyny, nieuzasadnione jest przejście z innego typu przepływomierza na ten rodzaj. Przepływomierze te, poprzez swój specyficzny pomiar objętości przepływającego powietrza muszą posiadać wąski kanał pomiarowy, który utrudnia przepływ powietrza do silnika.

W przypadku silników wolnossących, takie restrykcje objawiają się obniżeniem mocy silnika, jego elastyczności lub innych użytecznych parametrów. Jedną z kolejnych korzyści, w przypadku stosowania przepływomierzy w pełni elektronicznych jest ich odporność na zużycie oraz możliwość czyszczenia. Przepływomierze starego typu

posiadały ruchome części, które wraz z upływem lat traciły swoje parametry i się zużywały.

Do tych części można zaliczyć ruchomy potencjometr, który wycierając się powodował, że przepływomierz „gubił” sygnał w niektórych położeniach, najczęściej położeniach odpowiadającym obrotom silnika na biegu jałowym oraz do 3000 obr/min.

Pogorszeniu swojego stanu mogła również ulec sprężyna napinająca cały układ przepustnicy, bezpośrednio wpływając na skład mieszanki w silniku, która najczęściej po rozciągnięciu się wzbogaca mieszankę paliwowo-powietrzną o paliwo (przepływomierz przesyła do komputera zafałszowany sygnał o zwiększonym poborze powietrza przez silnik). Oczywiście, taka usterka nie następowała z dnia na dzień, lecz stopniowo, wpływała na zwiększanie się zużycia przez silnik paliwa oraz pogarszanie toksyczności spalin.

Wprawdzie przepływomierz posiada możliwość regulacji tego defektu za pomocą specjalnego koła zębatego, jednakże zazwyczaj problem po pewnym czasie powraca.

Stosując zamiennie przepływomierze powietrza, np. typu HLM lub HFM problem rozregulowywania oraz zużywania się jakichkolwiek części ruchomych nie istnieje. Jediną niedogodnością, jaka może powstać, to zabrudzenie się elementu pomiarowego przepływomierza, jednakże usterka ta zazwyczaj trwa jedynie do czasu wymiany filtra powietrza, gdy element pomiarowy przepływomierza jest czyszczony specjalnym środkiem. Zaleca się czyszczenie przepływomierzy HLM oraz HFM specjalnie przeznaczonym do tego preparatem, co dwie lub trzy wymiany filtra oczyszczającego powietrze dopływające do silnika (popularnie zwany „filtr powietrza”).

Wpływ na decyzję o zmianie przepływomierza ma też jego cena. Przepływomierze Vortex oraz z kłapą spiętrzącą sprzedawane są jako kompletne, precyzyjne układy, nie dopuszczając do wymiany żadnego z elementów wchodzących w ich skład.

W przypadku przepływomierzy HLM lub HFM, w sytuacji zdiagnozowania usterki przepływomierza, w znacznej liczbie przypadków można wymieniać jedynie tzw. wkład przepływomierza, czyli element pomiarowy zawierający w sobie elektronikę przepływomierza wraz z elementem pomiarowym.

Takie rozwiązanie sprawia, że koszty niezbędne do celu przywrócenia sprawności przepływomierza powietrza są nawet 64% mniejsze, aniżeli w przypadku zakupu przepływomierza starego typu. Sama wymiana przepływomierza jest również łatwiejsza w przypadku przepływomierza HLM / HFM.

Warto również zwrócić uwagę na fakt, iż przepływomierze typu Vortex oraz z kłapą spiętrzącą nie posiadają odporności na tzw. „strzały w kolektor” lub w przypadku pojazdu wyposażonego w zasilanie gazem LPG, wybuchy wsteczne gazu. Wystąpienie takiego zjawiska może doprowadzić do nieodwracalnego uszkodzenia elementu generującego wiry bądź kłapy spiętrzącej ze względu na to, że są one konstrukcyjnie przystosowane tylko do pomiaru strumienia w jednym kierunku. Wymiana starego przepływomierza na przepływomierz typu HLM lub HFM sprawia, że cały układ dolotowy może pracować „w drugą stronę”, ograniczając w ten sposób ryzyko uszkodzenia przepływomierza lub rozerwanie któregoś z elementów układu dolotowego (ciśnienie z wybuchu jest wtedy bezpiecznie odprowadzane poprzez filtr powietrza do atmosfery).

Ponadto, przepływomierz typu HFM takie sytuacje może wykrywać i informować o nich sterownik silnika, głównie w instalacji gazowej, który odpowiednio modyfikując

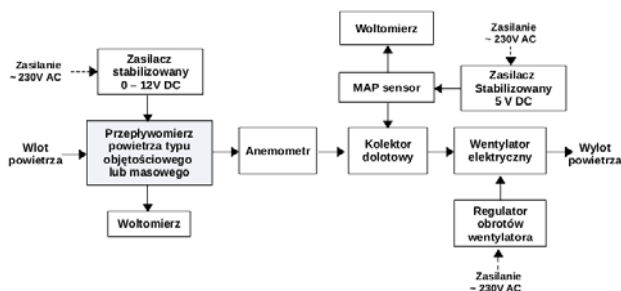
parametry zapłonu ograniczy jego występowanie w przyszłości.

Następną korzyścią, jaką można osiągnąć poprzez zastosowanie zamiennego przepływomierza powietrza jest zwiększenie prędkości odczytu zmieniającego się strumienia powietrza. Parametr ten jest szczególnie ważny, gdyż pomaga w szybszym dostosowywaniu się sterownika silnika do zmieniających się parametrów pracy silnika, co sprawia, iż silnik lepiej reaguje na uchylecia przepustnicy, przez co może spalać mniej paliwa lub zapewnić lepszą jego elastyczność.

Stanowisko do badania przepływomierza powietrza

W celu zapewnienia właściwego testowania przepływomierza powietrza należy wykorzystać stanowisko badawcze wyposażone w odpowiedni sprzęt pomiarowy, a pomiary muszą być wykonywane w zadanych warunkach odpowiadających ich rzeczywistej pracy.

Schemat blokowy stanowiska przeznaczonego do badania przepływomierza powietrza przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Schemat blokowy stanowiska do badania przepływomierza powietrza

W skład stanowiska laboratoryjnego wchodzi: cyfrowy regulator obrotów, silnik elektryczny, kolektor dolotowy i zasilacz. Do pomiarów wykorzystano anemometr i woltomierz.

Jako anemometr wzorcowy wykorzystano miernik Testo 405i do pomiaru prędkości przepływu powietrza, przepływu objętościowego i temperatury. Napięcie mierzone było miernikiem uniwersalnym UNI-T UT33C.

Do wytworzenia przepływu powietrza w kanale pomiarowym wykorzystano wentylator promieniowy niskociśnieniowy CLB-140/600 M marki Havaco z tuleją redukcyjną 151/55 mm zamocowaną na wlocie wentylatora. Do regulacji wydatku wentylatora użyty został transformatorowy regulator prędkości obrotowej do wentylatorów jednofazowych BREVE ARW 5.0.

Stanowisko badawcze dla przepływomierza z klapą sięprzającą, HLM, HFM oraz Vortex jest przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Stanowisko badawcze dla przepływomierza z klapą sięprzającą, HLM, HFM oraz Vortex

Do badania przepływomierza MAP, ze względu na sposób działania oraz wymaganą komorę podciśnieniową symulującą pojemność kolektora ssącego wykorzystano podobne stanowisko badawcze, które przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Stanowisko badawcze dla przepływomierza typu MAP

Przygotowane stanowisko umożliwia przeprowadzenie następujących badań parametrów przepływomierza:

- pomiar napięcia wyjściowego przepływomierza V_{out} bez przepływu powietrza przez przepływomierz, a także podczas jego pracy z przepływem o zadanej wartości,
- pomiar wzorcowy wartości przepływu powietrza odczytywanej z termooanemometru,
- pomiar temperatury powietrza przepływającego przez przepływomierz.

Możliwe jest również przeprowadzenie badania czujników ciśnienia bezwzględnej typu MAP, dzięki komorze podciśnieniowej symulującej pojemność kolektora ssącego.

Na stanowisku tym można weryfikować poprawność działania przepływomierza powietrza, a w przypadku przepływomierza klapowych oraz HLM ze śrubą regulującą, skład mieszanki umożliwiającej również regulację przepływomierza względem wskazań fabrycznych. Jednakże, aby móc przeprowadzić takie badania, niezbędne jest:

- posiadanie karty katalogowej weryfikowanego przepływomierza lub przynajmniej jego charakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji mierzonego przepływu,
- posiadanie aktualnego świadectwa wzorcowania przyrządu pomiarowego, potwierdzającego poprawny pomiar przepływu powietrza,
- kontrolowanie warunków pomiaru.

Sprawdzenie poprawności działania stanowiska pomiarowego, rozpoczęto od pomiarów strumienia przepływającego powietrza przez kanał pomiarowy bez zamontowanego przepływomierza. Wyniki tych badań zestawiono i zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Strumień przepływającego powietrza przez kanał pomiarowy stanowiska badawczego bez przepływomierza sprawdzanego

Numer pomiaru	Strumień przepływającego powietrza odczytana z termooanemometru wzorcowego [m ³ /h] dla kolejnych biegów wentylatora				
	I	II	III	IV	V
1	170	227	258	353	483
2	171	227	260	351	485
3	171	229	259	356	486
4	171	228	259	353	484
5	170	229	258	351	483

Jak wynika z tabeli 1, rozrzut wyników dla kolejnych pomiarów (z jednym wyjątkiem) nie przekracza 1%, co jest wartością wystarczającą w przeprowadzanych pomiarach.

W kolejnym pomiarze zbadano podciśnienie wytworzone w komorze podciśnieniowej przy zamkniętym kanale dolotowym powietrza do kanału pomiarowego stanowiska. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Charakterystyka podciśnienia występującego w komorze podciśnieniowej w funkcji przepływu objętościowego powietrza przez jego kanał pomiarowy pozwala określić możliwości badawcze stanowiska (badanie przepływomierza o maksymalnym, stabilnym natężeniu przepływu powietrza do 480 m³/h) oraz wpływu przepływu powietrza przez kanał pomiarowy wpływającego na zmiany generowanego w nim podciśnienia.

Tabela 2. Podciśnienie wytworzone w komorze podciśnieniowej stanowiska badawczego przy zamkniętym kanale dolotowym powietrza do kanału pomiarowego stanowiska

Numer pomiaru	Podciśnienie wytworzone w komorze podciśnieniowej [$\times 10^2$ Pa] dla kolejnych biegów wentylatora				
	I	II	III	IV	V
1	87	117	145	263	375
2	86	116	145	264	375
3	85	116	144	263	375
4	85	117	144	264	376
5	86	117	144	265	375

Wyniki badań

Przed rozpoczęciem sprawdzania przepływowierza, a także przez każde kolejne 30 minut czasu jego trwania dokonywano pomiarów warunków środowiskowych, które zgodnie z założeniami powinny być na poziomie:

- temperatura otoczenia 20°C,
- wilgotność powietrza 75%,
- ciśnienie atmosferyczne 1001,9 hPa.

Badanie każdego ze sprawdzanych przepływowierzy powietrza wykonano zgodnie z następującymi zasadami:

1. Dokonywano minimum pięć pomiarów.
2. Pomiaru wykonywane były w odstępach czasowych wynoszących od 3 do 5 s.
3. Odstęp czasowy pomiędzy przełączaniem kolejnych biegów pracy wentylatora i wykonaniem pierwszego pomiaru wynosił minimum 30 s. Czas ten jest niezbędny, aby wentylator ustabilizował parametry pracy, umożliwiające zapewnienie laminarnego przepływu powietrza.
4. Podczas badania przepływowierza typu MAP kanał dolotowy stanowiska badawczego zakrywany był płytą PCV o rozmiarze 50 x 50 mm oraz grubości 10 mm.

Jako pierwszy badaniom poddano przepływowierz z kłapą spiętrzącą produkcji Bosch o numerze 0280202082 (BMW 13627547977), stosowany w pojazdach BMW E-30 325i (silnik M20B25). Wyniki przepływu powietrza zmierzone za pomocą termooanemometru wzorcowego o sygnale napięciowym na wyjściu badanego przepływowierza znajdują się w tabeli 3.

Z tabeli 3 wynika, że napięcie wyjściowe przepływowierza zmienia się w przybliżeniu liniowo wraz ze wzrostem przepływu powietrza przez kanał pomiarowy. Porównując wyniki z tabeli 1 można zaobserwować znaczne ograniczenie przepływu wprowadzane przez przepływowierz, sięgające prawie 40 m³/h przy ostatnim biegu wentylatora wymuszającego przepływ powietrza przez kanał pomiarowy stanowiska pomiarowego.

Kolejnym badanym przepływowierzem był przepływowierz typu HLM marki Siemens o numerze produktu 5WK9600 (BMW 13621703275), pochodzący z samochodu marki BMW E39 2.8i (M25B28), o oznaczeniu silnika M52B28. Wyniki znajdują się w tabeli 4. Jak wynika z tabeli 4 przepływowierz posiada bardzo znikome tłumienie przepływu powietrza, natomiast jego charakterystyka znacznie odbiega od charakterystyki przepływowierza z kłapą spiętrzącą.

Następnym badanym przepływowierzem był przepływowierz typu HFM marki Bosch o numerze produktu

Tabela 3. Wyniki badania przepływowierza z kłapą spiętrzącą

Nr pomiaru	bieg wentylatora											
	0		I		II		III		IV		V	
	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]
1	0	0,202	146	1,421	203	1,945	229	2,117	337	3,082	449	4,235
2	0	0,201	143	1,419	205	1,946	228	2,117	336	3,081	450	4,235
3	0	0,202	148	1,421	206	1,946	228	2,116	338	3,082	451	4,234
4	0	0,202	147	1,421	203	1,945	229	2,118	337	3,082	450	4,235
5	0	0,203	144	1,418	202	1,945	228	2,116	338h	3,081	449	4,234

gdzie Q [m³/h] - objętościowy przepływ powietrza zmierzony termooanemometrem wzorcowym, U [V] - napięcie wyjściowe badanego przepływowierza.

0280217110 (BMW 13621736224), pochodzący z samochodu marki BMW Z3 1.9i, o oznaczeniu silnika M44B19. Wyniki znajdują się w tabeli 5.

Z porównania tabeli 1 i tabeli 5 wynika, że przepływowierz stawia praktycznie zerowy opór dla przepływającego powietrza. Nieliniowa charakterystyka jest zbliżona do charakterystyki przepływowierza typu HLM.

Kolejnym badanym przepływowierzem był przepływowierz typu Vortex produkcji Bosch o numerze części 0280212016, stosowany w samochodach Volvo 940 (0280 212 016). Wyniki znajdują się w tabeli 6.

Porównując wyniki przedstawione w tabeli 1 oraz tabeli 6 można zauważyć, że przepływowierz wytwarza dodatkowy opór przepływającemu strumieniowi powietrza wynoszący maksymalnie 15 m³/h. Nie jest to wartość znacząca, jednakże ma wpływ na charakterystykę przepływowierza.

Porównując tabelę 6 z tabelą 4 i 5 można zauważyć, iż przepływowierz typu Vortex posiada niższe napięcie wyjściowe w porównaniu z przepływowierzami HLM oraz HFM, natomiast charakterystyka jest bardziej zbliżona do liniowej charakterystyki przepływowierza z kłapą spiętrzącą (tabela 3). Ostatnim badanym przepływowierzem był MAP Sensor stosowany w motocyklu Suzuki GSXR – 600 RR K1 produkcji Denso o numerze części 15620-35F00. Ze względu na inną zasadę działania w porównaniu z poprzednimi przepływowierzami, zmieniony został sposób pomiaru.

Przepływowierz został podłączony do komory podciśnieniowej, będącej jednym z elementów stanowiska badawczego (rys. 6). Badanie polegało na zakrywaniu wlotu powietrza do kanału pomiarowego stanowiska, skutkując ograniczeniem przepływu przez nie powietrza i odczytaniu napięcia wskazywanego przez przepływowierz. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki badania przepływowierza typu MAP przy zamkniętym kanale dolotowym powietrza do kanału pomiarowego stanowiska (bez przepływu powietrza)

Nr pomiaru	U [V] dla kolejnych biegów wentylatora				
	I	II	III	IV	V
1	3,351	2,533	1,351	1,533	1,022
2	3,350	2,533	1,352	1,533	1,023
3	3,349	2,534	1,351	1,534	1,023
4	3,349	2,533	1,352	1,533	1,024
5	3,350	2,533	1,351	1,533	1,023

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że wskazania przepływowierzy dla tych samych prędkości przepływu powietrza znacznie się różnią. Charakterystyki przepływowierzy typu HLM oraz HFM są zawyżone ze względu na to, że przepływowierz podaje wskazania dla masowego przepływu powietrza, czyli pomnożonego przez wskaźnik gęstości powietrza, zależny od warunków atmosferycznych. Pozostałe przepływowierze podają wynik w postaci objętościowego przepływu, a ich napięcia wyjściowe pozostają na relatywnie podobnym poziomie.

Tabela 4. Wyniki badania przepływomierza typu HLM

Nr pomiaru	bieg wentylatora											
	0		I		II		III		IV		V	
	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]
1	0	0,832	162	2,847	220	3,132	248	3,284	341	3,876	471	4,115
2	0	0,833	161	2,846	220	3,132	249	3,284	342	3,876	471	4,115
3	0	0,832	161	2,847	220	3,132	249	3,284	341	3,876	472	4,115
4	0	0,832	161	2,848	221	3,132	250	3,284	342	3,876	472	4,115
5	0	0,832	162	2,847	221	3,132	249	3,284	342	3,876	471	4,115

Tabela 5. Wyniki badania przepływomierza typu HFM

Nr pomiaru	bieg wentylatora											
	0		I		II		III		IV		V	
	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]
1	0	0,521	169	2,852	230	3,138	255	3,288	348	3,881	481	4,120
2	0	0,521	170	2,853	230	3,139	255	3,288	347	3,881	482	4,121
3	0	0,522	168	2,853	231	3,137	256	3,287	347	3,880	483	4,120
4	0	0,522	168	2,854	231	3,136	256	3,287	346	3,880	481	4,119
5	0	0,521	169	2,854	230	3,137	255	3,288	348	3,881	480	4,119

Tabela 6. Wyniki badania przepływomierza typu Vortex

Nr pomiaru	bieg wentylatora											
	0		I		II		III		IV		V	
	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]	Q [m ³ /h]	U [V]
1	0	0,157	161	1,542	220	2,658	245	2,874	340	3,322	468	4,020
2	0	0,156	162	1,544	220	2,657	244	2,874	340	3,323	468	4,021
3	0	0,156	162	1,545	221	2,657	244	2,873	341	3,322	469	4,021
4	0	0,157	161	1,544	222	2,656	245	2,873	341	3,323	468	4,020
5	0	0,157	160	1,542	222	2,656	244	2,873	341	3,323	470	4,020

Praktyczna weryfikacja możliwości zmiany typu przepływomierza

W celu praktycznej weryfikacji możliwości zmiany typu przepływomierza zostały wykonane trwające ponad pół roku testy, mające na celu sprawdzenie zachowania się pojazdu po zastosowaniu innego rodzaju przepływomierza powietrza. Obserwacje przeprowadzono na dwóch pojazdach, seryjnie wyposażonych w przepływomierze z klapą spiętrzącą:

- BMW E-30 318i (oznaczenie silnika M40B18) ze sterownikiem silnika Bosch Motronic 1.3,
- Opel Frontera A Sport 2.0i (oznaczenie silnika C20NE) ze sterownikiem silnika Bosch Motronic 1.5.

Jako pierwszy, zamienny względem oryginalnego przepływomierza zastosowano przepływomierz typu MAP marki Denso. Przepływomierze zostały dołączone do istniejących instalacji pojazdów za pomocą specjalnie przygotowanych wiązek. Ponieważ sterownik silnika potrzebuje oprócz napięcia wyjściowego z przepływomierza powietrza, napięcia z czujnika temperatury zasysanego powietrza, w obu pojazdach w puszcze filtra powietrza zamocowano termistory NTC o wartości 10 kΩ. Przepływomierz typu MAP w obu pojazdach podpięto pod króciec przepustnicy przeznaczony do odprowadzania par paliwa.

Po uruchomieniu silnika w temperaturze 20°C w obu pojazdach stwierdzono poprawną pracę na wolnych obrotach. Po rozgrzaniu silnika do temperatury roboczej (90°C) oba silniki pracowały nadal poprawnie. Zauważono wzrost czułości silnika na zmianę stopnia położenia przepustnicy powietrza.

Podczas nagłego, całkowitego otwarcia przepustnicy w obu pojazdach wyświetlały się lampki kontrolne awarii silnika. Efekt ten utrzymywał się do czasu całkowitego zamknięcia przepustnicy lub powrotu do zakresu jej pracy wynoszącego poniżej 75% uchylenia. Podczas przyspieszania z liniowym otwieraniem się przepustnicy

silnik przyspieszał poprawnie aż do pełnego zakresu obrotów, a sterownik nie wykazywał wyżej wymienionego problemu.

Podczas dwumiesięcznego okresu użytkowania obu pojazdów z wymienionymi przepływomierzami stwierdzono zwiększone zużycie paliwa. W samochodzie Opel Frontera A Sport zużycie paliwa zwiększyło się o około 10% (podczas jazdy ze stałą prędkością 120 km/h samochód spalał średnio 1 litr benzyny więcej na każde przejechane 100 km). Z kolei w samochodzie marki BMW odnotowano spalanie większe niż w pojedzie ze starym przepływomierzem z klapą spiętrzącą o 20% (podczas jazdy z stałą prędkością 120 km/h samochód spalał średnio 1,5 litra benzyny więcej na każde przejechane 100 km). Przyczyną zwiększonego zużycia benzyny w obu pojazdach był odczuwalny wzrost mocy generowanej przez silnik. Zauważono również, że sterownik silnika lepiej radził sobie ze sterowaniem przy różnych stopniach obciążenia silnika, a jego zmiany były przez sterownik natychmiastowo wykrywane.

Drugą zmianą, względem oryginalnego przepływomierza powietrza było zastosowanie w obu pojazdach przepływomierza marki Bosch, opartego o zasadę działania HFM. Podobnie jak poprzednio, przepływomierz został dołączony do istniejącej instalacji obu pojazdów przy pomocy specjalnie przygotowanej wiązki.

W przypadku tej zmiany niezbędne było zasilanie przepływomierza napięciem w zakresie 11-15 V, załączanym po przełączeniu zapłonu w stacyjce. W obu samochodach jako źródło wykorzystano styk przełączany przekątnika, załączający zasilanie do pompy paliwa pojazdu. Dodatkowo, jak w poprzednim przypadku w puszcze filtra powietrza umieszczono czujnik temperatury powietrza dopływającego do silnika. Przepływomierz HFM wpięto w miejsce starego przepływomierza z klapą spiętrzącą (rys. 7).



Rys. 7. Sposób zamocowania przepływomierza typu HFM w samochodzie marki BMW E-30 (fot. autorów)

Po uruchomieniu silnika w temperaturze otoczenia równej 18°C w przypadku pojazdu Opel Frontera A Sport stwierdzono prawidłową pracę silnika na obrotach biegu jałowego silnika. Poprawna praca utrzymywała się również po osiągnięciu przez silnik temperatury roboczej równej 90°C. Zanotowano prawidłową reakcję silnika na uchylanie przepustnicy w zakresie 0-100%, także podczas nagłego uchylenia przepustnicy silnik zachowywał się poprawie i uzyskiwał pełny zakres obrotów. Nie zauważono również zaświecającej się kontrolki awarii układu sterowania silnikiem. Podczas półrocznego użytkowania pojazdu odnotowano:

- mniejsze spalanie o około 5% (podczas jazdy ze stałą prędkością 120 km/h samochód spalał średnio 0,5 litra benzyny mniej na każde przejechane 100 km);
- silnik odczuwalnie zwiększył generowaną na wysokich obrotach (4500-6500 obr/min) moc i posiadał większą elastyczność, szczególnie w zakresie nisko - średnich obrotów (1500-3500 obr/min);
- badanie składu spalin wykazało zmniejszenie o 3% emisji dwutlenku węgla CO₂ w stosunku do badania z przepływomierzem z klapą spiętrającą.

Z kolei dla pojazdu BMW E-30 po uruchomieniu silnika w temperaturze otoczenia równej 18°C zanotowano niepoprawną pracę silnika na wolnych obrotach, objawiająca się nierówną pracą silnika oraz falowaniem obrotów w zakresie 600-1000 obr/min. Po rozgrzaniu silnika do temperatury roboczej równej 90°C brak poprawnej pracy nadal występował, silnik niechętnie reagował na zmiany położenia przepustnicy w zakresie 0-25% oraz 50-75%. Odnotowano również oznaki wskazujące na pracę silnika na tzw. ubogiej mieszance, w związku z czym, z racji wysokiej szkodliwości dla silnika zaniechano dalszych prób testowania tego typu przepływomierza.

Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach wielkością mierzoną było napięcie, które jest zależne od mierzonego strumienia gazu. Zmiana parametrów gazu takich jak ciśnienie,

wilgotność, temperatura ma różny wpływ na wskazanie przepływomierza. W silnikach spalinowych wartość napięcia na wyjściu z przepływomierza stanowi wielkość technologiczną, która nie jest wprost proporcjonalna do mierzonego strumienia gazu. Strumień gazu, na podstawie którego komputer pokładowy oblicza parametry wtrysku paliwa, jest przeliczany za pomocą algorytmu zapisanego w pamięci komputera. Zatem zmiana przepływomierza w danym modelu silnika powinna wiązać się ze zmianą parametrów możliwych do wpisania z poziomu oprogramowania serwisowego, ale także z gruntowną zmianą oprogramowania.

W wyniku przeprowadzonych badań i praktycznej weryfikacji można stwierdzić, że największą korzyści przynosi zmiana przepływomierza powietrza na działający z wykorzystaniem elementu grzejjego. Jak wykazano, przepływomierz typu HFM wprowadza niewielkie tłumienie przepływu, co w rezultacie wpływa na silnik w ograniczonym zakresie.

Autorzy: mgr inż. Robert Otta, E-mail: otta.robert@gmail.com; dr hab. inż. Dariusz Świsulski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: dariusz.swisulski@pg.edu.pl; dr. inż. Anna Golijanek-Jędrzejczyk, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Erjavec J., Thompson R.: Automotive Technology. A Systems Approach, Delmar Cengage Learning, 2005
- [2] van Basshuysen R., Schäfer F. (Eds.): Internal Combustion Engine - Basics, Components, Systems and Perspectives, SAE International, Warrendale, PA, 2004
- [3] Dziubak T.: Właściwości eksploatacyjne przepływomierzy powietrza wlotowego silników spalinowych pojazdów mechanicznych, Logistyka 3 (2015), 1217-1226
- [4] Waluś K.J., Warguła Ł., Krawiec P. et al.: Legal regulations of restrictions of air pollution made by non-road mobile machinery - the case study for Europe: a review, *Environ Sci Pollut Res* 25 (2018), 3243-3259
- [5] Rząsa M. R., Tomaszewska-Wach B.: Pomiar strumienia mokrego gazu kryzą standardową, *Przegląd Elektrotechniczny* 11 (2019), 86-89
- [6] Boguta A.: Application of the LabVIEW environment in testing automotive thermoanemometric flow meters, *ECONTECHMOD: An International Quarterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes*. vol. 06, no. 1 (2017), 123-131
- [7] Informator techniczny Bosch. Czujniki w pojazdach samochodowych, WKŁ, Warszawa 2002
- [8] Mrowiec A., Heronimczak M., Golijanek-Jędrzejczyk A., Skośna kryza segmentowa do pomiaru przepływającego strumienia płynu. Metrologia naukowa, normatywna i przemysłowa - wybrane zagadnienia. Red. Jerzy Roj. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020, 289-302
- [9] Gajek A., Juda Z.: Mechatronika samochodowa. Czujniki. WKŁ, Warszawa 2009
- [10] Hot-film air-mass meter. Bosch, <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/sensors-for-the-powertrain/hotfilm-airflow-sensor/>, data dostępu 9.10.2020