

Tadeusz DZIUBAK¹
Grzegorz TRAWIŃSKI²

ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY PARAMETRÓW EFEKTYWNYCH SILNIKA BOJOWEGO WOZU PIECHOTY BWP-1

Przedstawiono propozycję modernizacji układu zasilania powietrzem silnika UTD-20, polegającą na zastąpieniu multicyklonu zespołem dwustopniowym, składającym się z odpylacza promieniowego i filtru przegrodowego (papierowego). Zaprezentowano opracowaną konstrukcję systemu filtracji oraz wybrane wyniki jego badań na stanowisku przepływowym. Omówiono wyniki porównawczych badań eksperymentalnych silnika z filtrem standardowym oraz silnika z drugim stopniem filtracji powietrza wlotowego (filtrem przegrodowym).

THE ANALYSIS OF EFFECTIVE PARAMETERS OF THE INFANTRY COMBAT VEHICLE BWP-1 ENGINE IMPROVEMENT POSSIBILITIES

A proposal of UTD-20 engine air supplying system modernization is presented. It consists in replacing the multicyclone by two-stage unit, consisting of a radial deduster and porous filter (paper filter). The elaborated construction of the filtration system and chosen results of its researches on a flow stand are presented. There are discussed the results of comparative experimental tests of the engine with a standard filter and the engine with the inlet air filtration second stage (porous filter).

1. WPROWADZENIE

Na wyposażeniu Wojska Polskiego znajdują się między innymi bojowe wozy piechoty BWP-1. Są to pojazdy odbiegające swoimi parametrami od współczesnych, nowoczesnych wozów bojowych. Zachowanie pożądanych obecnie walorów bojowych wymaga wyposażenia bojowego wozu piechoty BWP-1 w nowe systemy i urządzenia spełniające wymagania taktyczno-techniczne. Ewentualne modernizacje skutkować będą zwiększeniem masy bojowej tego pojazdu, co w celu zachowania współczynnika mocy jednostkowej na dotychczasowym poziomie (16,9 kW/t) wymaga zastosowania jednostki napędowej o mocy maksymalnej około 270 kW (wobec dotychczasowej o mocy 240 kW).

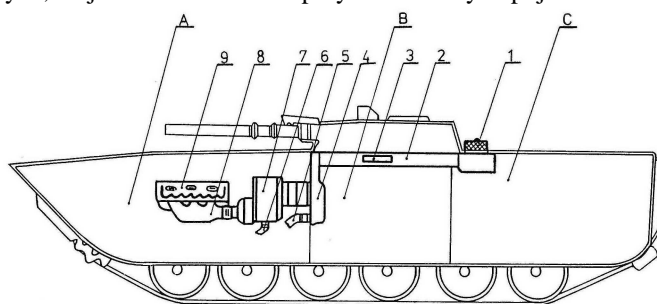
¹Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel./fax. (+48) 22-6837121, tdziubak@wat.edu.pl

²Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, 00-908 Warszawa, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, tel. (+48) 22-6837046, gtrawinski@wat.edu.pl

Analiza konstrukcji silnika UTD-20 BWP-1 wskazała na możliwość podwyższenia mocy silnika bez istotnych zmian w konstrukcji głównych węzłów (układu tłokowo-korbowego) poprzez zwiększenie współczynnika jego napełnienia w połączeniu z odpowiednim zwiększeniem dawki paliwa. Wstępne prace w tym kierunku podjęto w Wojskowej Akademii Technicznej w ramach projektu badawczego N504-O/0010/32.

2. UKŁAD ZASILANIA POWIETRZEM SILNIKA UTD-20

Układ zasilania powietrzem silnika UTD-20 BWP-1 (rys. 1) charakteryzuje się skomplikowaną budową i znaczną długością oraz złożonością kształtów poszczególnych jego części składowych, co jest bardzo rzadko spotykane w innych pojazdach.



Rys.1. Schemat rozmieszczenia elementów układu dolotowego silnika UTD-20:

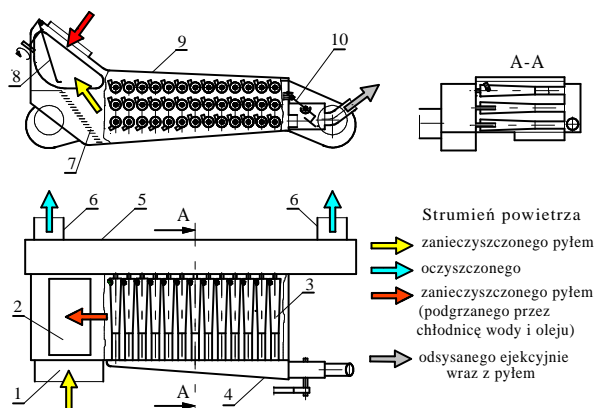
A - przedział napędowy; B - przedział bojowy; C - przedział desantowy; 1 - czerpnia powietrza; 2 - magistrala podwieżowa; 3 - wlot do urządzenia filtrowentylacji, 4 - nisza magistrali podwieżowej; 5 - króciec układu chłodzenia sprężarki; 6 - króciec układu chłodzenia prądnic; 7 - filtr powietrza; 8 - kolektor dolotowy; 9 - głowica silnika

Pobór powietrza do silnika odbywa się czerpnię usytuowaną za wieżyczką z uzbrojeniem, co wynika z potrzeby zapewnienia bezpiecznego zasilania silnika powietrzem podczas pływania (czerpnia powietrza unoszona jest do góry) przy zachowaniu zdolności wozu do prowadzenia ognia (do przodu wozu). Przepływ strumienia powietrza z czerpni do filtru powietrza następuje magistralą podwieżową.

Układ zasilania powietrzem silnika UTD-20 BWP-1 jest wyposażony w filtr (rys. 2), gdzie elementem oczyszczającym powietrze jest tylko multicyklon zbudowany z 39 sztuk cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym, które usytuowane są poziomo w trzech rzędach - po 13 cyklonów w każdym. Wloty cyklonów usytuowane są tak, aby zasysanie powietrza realizowane było z możliwie największej (wolnej) objętości. Odseparowany przez cyklony pył przemieszcza się do osadnika pyłu, skąd usuwany jest efekcyjnie (do układu wylotu spalin) w sposób ciągły. Kadłub cyklonu ma kształt ściętego stożka, do którego w górnej (w szerszej) części stycznie dołączony jest króciec dolotowy z zaokrąglonymi symetrycznie krawędziami wlotowymi. Oś króćca wlotowego pochylona jest pod kątem $\gamma \cong 25^\circ$.

Zastosowany w układzie zasilania powietrzem silnika UTD-20 BWP-1 odpylacz bezwładnościowy cechuje się tym, że prędkość gazu w cyklonie reprezentowana przez średnią prędkość w króćcu wlotowym u_0 przyjmuje bardzo duże wartości.

Maksymalna prędkość wlotowa v_{0max} cyklonu silnika UTD-20 osiąga wartość około 58 m/s, dwukrotnie przewyższając maksymalną prędkość wlotową cyklonów silników czołgowych i trzykrotnie wartość prędkości wlotowej zalecanej dla nowoczesnych konstrukcji cyklonów. Wynikało to niewątpliwie z bardzo ograniczonej objętości przedziału silnikowego w BWP.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny filtra powietrza silnika UTD-20 BWP-1: 1 – króciec wlotowy powietrza do filtra; 2 – otwór wlotu ciepłego powietrza; 3 – cyklon; 4 – osadnik pyłu; 5 – kolektor zbiorczy powietrza wylotowego; 6 – króćce wylotowe powietrza oczyszczonego; 7 – krata filtracyjna; 8 - przysłona wlotu ciepłego powietrza; 9 – multicyklon; 10 – urządzenie odcinające osadnik pyłu od ejektora.

Tak duże prędkości wlotowe v_{0max} powietrza do cyklonu oraz znaczna długość i skomplikowane kształty układu zasilania powietrzem powodują duże opory przepływu filtra powietrza silnika UTD-20, które w eksploatacyjnym zakresie pracy przyjmują wartości (5÷13 kPa) [2].

Dopuszczalne wartości oporów przepływu Δp_{fdop} filtrów powietrza, przy których należy wymienić wkład filtracyjny lub przeprowadzić jego regenerację podawane przez producentów filtrów są bardzo zróżnicowane i wynoszą od 3,5÷7 kPa w zależności od rodzaju silnika: niższe wartości dla silników o zapłonie iskrowym i niedoładowanych silników o zapłonie samoczynnym, wyższe dla silników o ZS z turbodoładowaniem [3, 4]. Dla porównania dopuszczalny opór przepływu silnika MAN DO826 (o podobnej mocy) samochodu STAR 1466, po osiągnięciu którego należy wymienić wkład filtracyjny, ma wartość 5 kPa.

Podane wartości dopuszczalnych oporów przepływu filtrów powietrza są o połowę mniejsze niż wartość oporu filtra powietrza bojowego wozu piechoty BWP-1, co nie pozostaje bez wpływu na moc silnika i dynamikę ruchu pojazdu [4]. Powszechnie przyjmuje się, że wzrost oporu przepływu filtra powietrza Δp_f o wartość 1 kPa powoduje średnio spadek mocy silnika o ZS 0,4÷0,6% i wzrost jednostkowego zużycia paliwa o około 0,3÷0,5% [5]. Wskazuje to na pełną zasadność prowadzenia prac mających na celu

poprawę efektywności działania filtra powietrza silnika UTD-20, a głównie obniżenie jego oporów przepływu.

Analiza standardowego filtra powietrza silnika UTD-20 wykazała także, że nie spełnia on podstawowego wymagania stawianego współczesnym filtrom powietrza trakcyjnych silników spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza, jakim jest skuteczność filtracji 99...99,9 % oraz dokładność zatrzymywania cząstek zanieczyszczeń powyżej 1 μm w całym zakresie prędkości obrotowych silnika.

Wymagania te spełniają dwustopniowe systemy filtracji powietrza wlotowego pracujące w systemie „odpylacz bezwładnościowy – wkład papierowy”. Tego rodzaju system filtracji zaproponowano do zastosowania w silniku UTD-20.

3. PROPOZYCJA MODERNIZACJI UKŁADU ZASILANIA POWIETRZEM SILNIKA UTD-20

Zaproponowany dla silnika UTD-20 dwustopniowy system filtracji powietrza wlotowego obejmuje:

- a) pierwszy stopień filtracji powietrza - bezwładnościowy odpylacz osiowy z bocznym doprowadzeniem powietrza, umieszczony za wieżą, w miejscu, gdzie dotychczas znajduje się czerpnia powietrza; odpylacz spełniał będzie jednocześnie rolę czerpni powietrza,
- b) drugi stopień filtracji - filtr przegrodowy z papierowymi wkładami filtracyjnymi w miejsce dotychczas stosowanego odpylacza multicyklonowego.

Zaproponowany zakres zmian wynika między innymi z konieczności usytuowania zmodernizowanego zespołu filtracyjnego w ograniczonej przestrzeni przedziału silnikowego. W niniejszym opracowaniu przedstawiono projekt przegrodowego filtra powietrza, badania laboratoryjne filtra oraz badania hamowniane silnika z filtrem standardowym i nowo-opracowanym.

Zaprojektowany przegrodowy filtr powietrza do silnika bojowego wozu piechoty zbudowany jest z trzech podstawowych elementów (rys. 3):

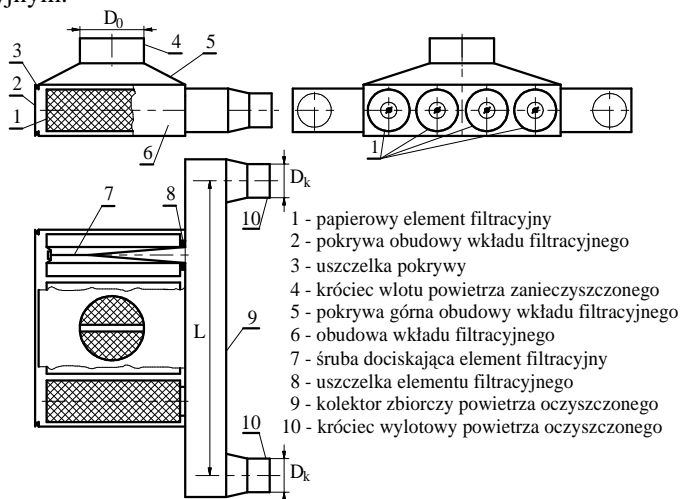
- a) wkładu filtracyjnego 1;
- b) obudowy wkładu filtracyjnego 6 wraz z wlotem powietrza;
- c) kolektora zbiorczego powietrza oczyszczonego 9.

W filtrze zastosowano zespół czterech ułożonych względem siebie równolegle cylindrycznych elementów filtracyjnych o symbolu AM 406/1 wykonanych z plisowanego papieru filtracyjnego. Zastosowane wkłady filtracyjne są typowymi, powszechnie dostępnymi materiałami eksploatacyjnymi, stosowanymi także w pojazdach wojskowych (Iveco). Wlot powietrza do obudowy filtra następuje króćcem o średnicy $D_0 = 150$ mm. Oczyszczone w filtrze powietrze napływa do kolektora zbiorczego zakończony dwoma króćcami powietrza wylotowego 10, umożliwiającymi podłączenie filtra do kolektorów dolotowych silnika.

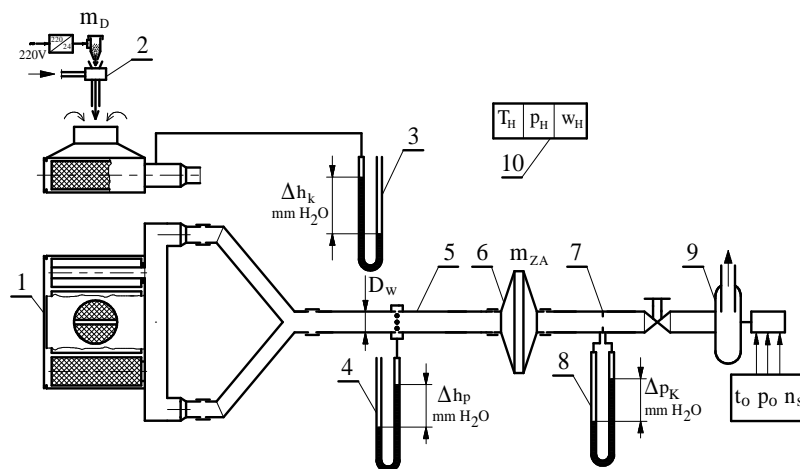
Wykonany według opracowanego projektu filtr powietrza poddano badaniom na stanowisku laboratoryjnym (rys. 4). Badania obejmowały wyznaczenie podstawowych charakterystyk filtra przegrodowego:

- charakterystyki aerodynamicznej (dla filtra z czystym wkładem filtracyjnym i po badaniach skuteczności) $\Delta p_f = f(Q_{GF})$;
- skuteczności filtracji $\varphi_f = f(m_p)$;

- oporu przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$, gdzie m_p – masa pyłu zatrzymana na wkładzie filtracyjnym.

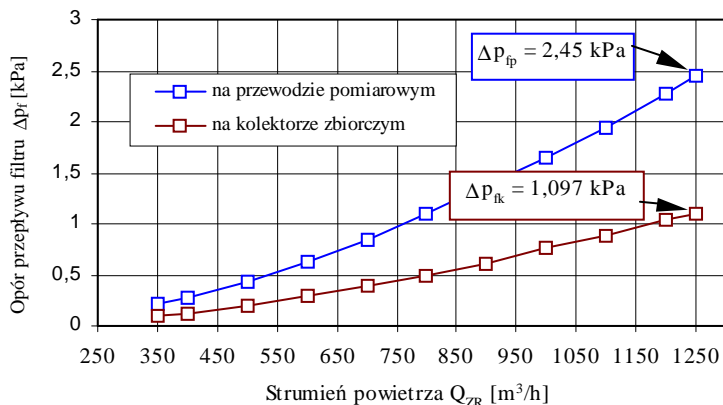


Rys. 3. Schemat wykonanego przegrodowego filtra powietrza bojowego wozu piechoty



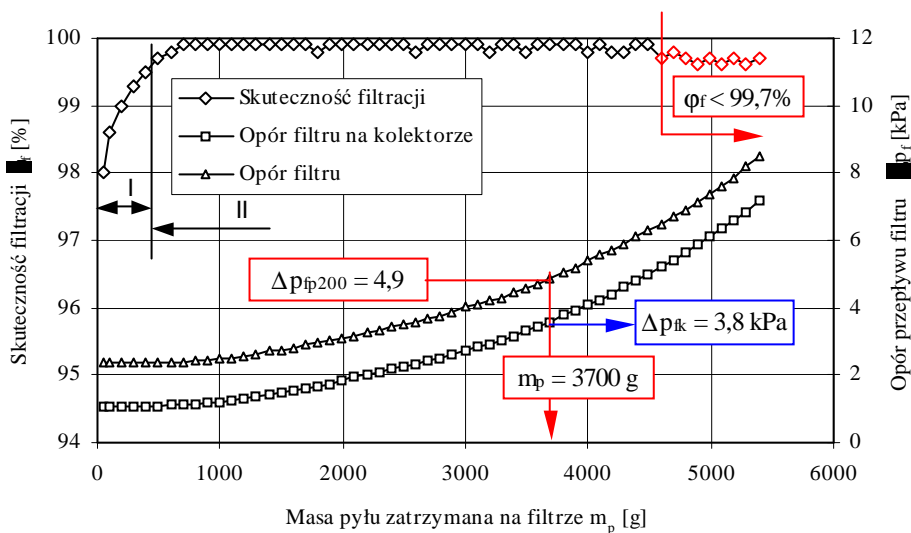
Rys. 4. Schemat stanowiska do badań filtra powietrza silnika UTD-20 BWP-1:
 1 – filtr powietrza; 2 – dozownik pyłu; 3, 4, 8 – manometry cieczowe typu U-rurka;
 5 – przewód pomiarowy oporu przepływu filtra powietrza; 6 – filtr mierniczy pyłu (absolutny); 7 – kryza pomiarowa; 9 – wentylator wytwarzający strumień powietrza Q ; 10 – zestaw do pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza otoczenia

Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną i szczegółowo opisaną w [5]. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Charakterystyki aerodynamiczne badanego filtru powietrza silnika UTD-20 BWP-1 z wkładami czystymi

Wraz ze wzrostem strumienia powietrza Q_{GF} następuje ciągły wzrost oporów przepływu filtru powietrza i przy $Q_{GF} = 1250 \text{ m}^3/\text{h}$ opór filtru powietrza Δp_{fp} mierzony na przewodzie zbiorczym osiąga wartość $\Delta p_{fp} = 2,45 \text{ kPa}$, a na kolektorze zbiorczym powietrza oczyszczonego $\Delta p_{fk} = 1,097 \text{ kPa}$ – rys. 5. Opór przepływu filtru powietrza Δp_{fp} mierzony na przewodzie zbiorczym osiąga wartość ponad dwukrotnie większą niż opór filtru Δp_{fk} mierzony na kolektorze zbiorczym, co wynika z znacznej długości przewodów łączących ich kolana na odcinku od kolektora do miejsca pomiaru oporu filtru.



Rys. 6. Charakterystyki skuteczności filtracji $\phi_f = f(m_p)$ i oporów przepływu $\Delta p_f = f(m_p)$ standardowego filtru powietrza silnika UTD-20 BWP-1

Ze względu na osiągane wartości skuteczności filtracji, czas pracy badanego filtru można podzielić umownie na dwa okresy – rys 6. Pierwszy (*I*), charakteryzujący się małymi wartościami skuteczności filtracji, które systematycznie i gwałtownie wzrastają wraz z masą pyłu zatrzymanego przez papier filtracyjny. Okres ten (filtracji nieustalonej) trwa od chwili rozpoczęcia procesu filtracji do osiągnięcia przez papier maksymalnej ustalonej wartości skuteczności filtracji. Następujący po nim drugi okres (*II*) filtracji, nazywany okresem filtracji ustalonej, charakteryzuje się znacznie większymi i utrzymującymi się na stałym poziomie wartościami skuteczności filtracji. W przypadku badanego filtru przyjęto strefę rozdziału obu okresów z chwilą uzyskania przez papier skuteczności filtracji $\varphi_f = 99,5\%$.

Wraz ze wzrostem masy pyłu m_p zatrzymanego przez papier filtracyjny wkładu, opór przepływu Δp_f badanego filtru cały czas systematycznie rośnie, odpowiednio od wartości $\Delta p_{fp} = 2,365$ kPa do wartości ponad 8,5 kPa, jaki zanotowano po ostatnim cyklu pomiarowym. Opór przepływu filtru zanotowany na kolektorze zbiorczym przyjmuje odpowiednio wartości $\Delta p_{fk} = 1,085$ kPa i 7,166 kPa.

Po zatrzymaniu przez filtr masy pyłu $m_{pl} = 4591,2$ g zauważa się nieznaczny systematyczny spadek skuteczności filtracji do $\varphi = 99,6\%$, co może być sygnałem „przebicia” papieru filtracyjnego, a tym samym początkiem utraty właściwości separacyjnych filtru.

Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowany filtr przegrodowy charakteryzuje się 2,5 krotnie mniejszymi oporami przepływu niż oryginalny filtr multicyklonowy. Zastosowany papierowy wkład filtracyjny spełnia warunek minimalnej wartości skuteczności filtracji ($\varphi = 96\%$) wymagany normą [6] dla tego typów filtrów powietrza.

Obliczona chłonność filtru, wymagana normą [6], wynosi 2917 g (dla współczynnika zależnego od rodzaju filtru $k = 140$ g min/m³ oraz strumienia powietrza $Q = 1250$ m³/h = 20,83 m³/min). Masa pyłu zatrzymana przez wkład filtracyjny do chwili osiągnięcia przez filtr przy nominalnym strumieniu powietrza oporów równych $\Delta p_{fp200} = 4,9$ kPa (rys. 6) ma wartość $m_{p200} = 3700$ g.

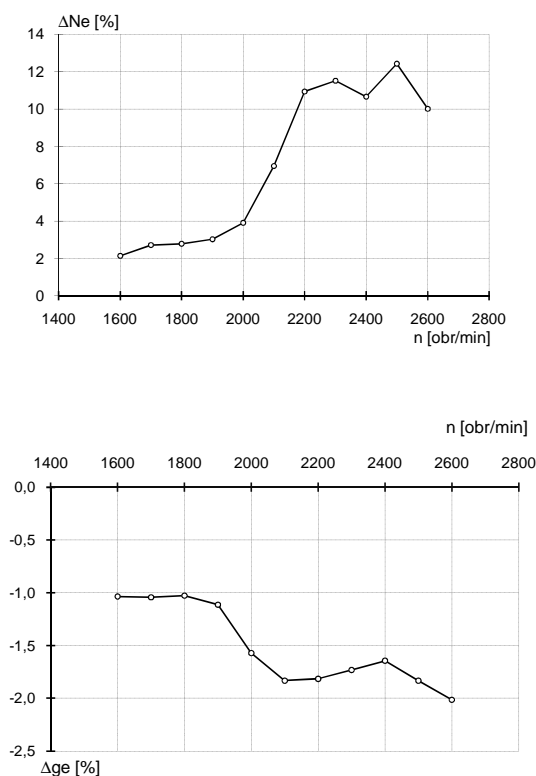
4. BADANIA HAMOWNIANE SILNIKA UTD-20 ZE STANDARDOWYM I ZAPROJEKTOWANYM FILTREM POWIETRZA

Badania na stanowisku hamownianym wyposażonym w hamulec wodny obejmowały określenie podstawowych parametrów efektywnych (momentu obrotowego M_o , mocy efektywnej N_e oraz jednostkowego zużycia paliwa g_e) oraz innych parametrów pracy (np. temperatury spalin) silnika UTD-20 ze standardowym (multicyklonowym) i opracowanym filtrem z wkładem papierowym. Sposób i metodyka wykonania pomiarów była wzorowana na zaleceniach dotyczących badań silników spalinowych podanych w [7]. Badania wykonano dla eksploatacyjnego zakresu prędkości obrotowej silnika UTD-20 obejmującego przedział 1600÷2600 obr/min (z krokiem co 100 obr/min). Pomiarów wykonano dwukrotnie: przy wzroście i przy spadku prędkości obrotowej, dla maksymalnego obciążenia silnika. Wyniki pomiarów zredukowano do warunków normalnych ($p_{atm} = 99$ kPa, $T_{pow} = 25^\circ\text{C}$).

Przeprowadzone badania wykazały, że silnik UTD-20 z zaprojektowanym filtrem powietrza i z pompą standardową posiada nieznacznie większe wartości parametrów

efektywnych w prawie całym zakresie prędkości obrotowych. Największy (ponad 1 %) przyrost mocy (momentu) silnika zaobserwowano dla prędkości obrotowych 1600...1800 obr/min, najmniejszy (0,4 % - praktycznie w granicach błędu pomiaru) dla zakresu prędkości 2300...2600 obr/min. W całym badanym zakresie prędkości obrotowych moment obrotowy i moc efektywna silnika przyjmuje wartości średnio o 0,6% większe przy mniejszym (średnio o 1,5%) godzinowym zużyciu paliwa w porównaniu do tych samych parametrów dla silnika ze standardowym filtrem powietrza. Można się spodziewać, że przy tym samym dawkowaniu paliwa, nastąpi dalszy przyrost parametrów efektywnych silnika UTD-20 o około 1,5 %. Jednostkowe zużycie paliwa dla silnika z opracowanym filtrem powietrza było średnio o 2 % mniejsze od jednostkowego zużycia paliwa dla silnika z filtrem standardowym.

W drugim etapie badań hamownianych wykonano analogiczne pomiary dla silnika z zaprojektowanym filtrem powietrza i zwiększoną średnio o ponad 7% dawką paliwa. Uzyskane dla tego wariantu kompletacji silnika względne przyrosty mocy efektywnej ΔN_e oraz spadku jednostkowego zużycia paliwa (g_e) pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Względna zmiana mocy efektywnej (wykres górny) oraz jednostkowego zużycia paliwa (wykres dolny) silnika UTD-20 z opracowanym filtrem powietrza w porównaniu do silnika filtrem powietrza z wkładami papierowymi

Przeprowadzone badania wykazały, że po zwiększeniu dawki paliwa (średnio o ponad 7%) silnik z zaprojektowanym filtrem powietrza posiada moc efektywną (moment obrotowy) większy średnio o 7 procent oraz mniejsze średnio o 1,5 % jednostkowe zużycie paliwa. Przy czym im większa prędkość obrotowa, tym (generalnie) większy przyrost parametrów efektywnych. Wynosi on nieco ponad 2% dla prędkości obrotowej 1600 obr/min oraz ponad 10% dla zakresu prędkości obrotowych 2200...2600 obr/min.

Dla silnika ze zwiększoną dawką paliwa i z zaprojektowanym filtrem powietrza uzyskano zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa, które oprócz prędkości maksymalnej (2600 obr/min) nie jest większe niż 2% w porównaniu do jednostkowego zużycia paliwa dla silnika z filtrem standardowym i z nominalną dawką paliwa. Przyrost ten jest znacznie mniejszy niż przyrost parametrów efektywnych (N_e , M_o) silnika, który średnio dla całego zakresu prędkości obrotowych (1600...2600 obr/min) wynosi 7%. Świadczy to o efektywniejszym wykorzystaniu doprowadzonej zwiększonej ilości paliwa, której towarzyszy zwiększenie masy doprowadzanego powietrza (z przyczyn technicznych nie można było wyznaczyć wartości tego strumienia podczas badań).

Uzyskana zmiana parametrów silnika UTD-20 jest zróżnicowana i największa dla zakresu prędkości obrotowej 2200...2600 obr/min, a najmniejsza dla zakresu prędkości 1600...1700 obr/min. Wynika to prawdopodobnie z nieoptymalnego dopasowania wymiarów (długości) kolektorów dolotowych i zaprojektowanego filtra, na co wskazuje duża zmienność ciśnienia mierzonego podczas badań hamownianych za filtrem powietrza. Obliczenia optymalizacyjne filtra zostały wykonane dla prędkości maksymalnej mocy (2600 obr/min).

5. WNIOSKI

1. Zaprojektowany i wykonany prototyp przegrodowego filtra powietrza do silnika UTD-20 bojowego wozu piechoty BWP-1 jest prostej i trwałej konstrukcji, a papierowe elementy filtracyjne są typowymi, powszechnie dostępnymi materiałami eksploatacyjnymi. Charakteryzuje się on 2,5 krotnie mniejszymi oporami przepływu niż oryginalny filtr multicyklonowy.
2. Należy wykonać badania eksploatacyjne, mające na celu ustalenie przebiegu pojazdu limitowanego osiągnięciem przez filtr z papierowymi elementami filtracyjnymi oporu dopuszczalnego $\Delta p_f = \Delta p_{fdop} = 4,9$ kPa.
3. Opracowany filtr powietrza umożliwia (przy zwiększeniu dawki paliwa) wzrost mocy efektywnej silnika (momentu obrotowego) średnio o 7%. Przyrost ten jest zróżnicowany w zależności od prędkości obrotowej silnika - największy (ponad 10%) dla zakresu prędkości obrotowych 2200...2600 obr/min.
4. Celowym wydaje się wykonanie dalszych badań, mających na celu optymalizację parametrów zmodernizowanego filtra powietrza w zakresie prędkości obrotowej maksymalnego momentu (1600...1800 obr/min) w celu poprawy parametrów silnika UTD-20 w tym zakresie prędkości.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy N504-O/0010/32

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baczewski K., Hebda M.: *Filtracja płynów eksploatacyjnych*. MCNEMT, Radom 1991/92.
- [2] Dziubak T.: Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym. *Biuletyn WAT, LV, 2 (642)*, 2006. str. 279-301.
- [3] Dziubak T.: *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 4 (124)*, 2000.
- [4] Dziubak T., Trawiński G.: Badania eksperymentalne wpływu oporu przepływu filtru powietrza na parametry pracy silnika T359E. *Biuletyn WAT L, 4 (584)*, 2001.
- [5] Dziubak T., Trawiński G.: *Badania możliwości poprawy efektywności filtracji powietrza wlotowego silnika wojskowego pojazdu gąsienicowego*. III Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych, Opole 22-24.06.2009. *Silniki Spalinowe Nr 2009-SC1*, str. 124÷132.
- [6] PN-S-34040: *Filtry powietrza. Wymagania i badania*. PKN, 1996.
- [7] PN-S-02005: *Silniki spalinowe. Badania stanowiskowe. Wyznaczanie podstawowych parametrów prac*. PKN, 1988.