

THE REQUISITE VALUE OF THE DIESEL ENGINE STARTING ROTATIONAL SPEED

Józef Pszczółkowski

Wojskowa Akademia Techniczna
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu
00-908 Warszawa 49, ul. S. Kaliskiego 2
tel. (022) 683-71-46, fax. (022) 683-97-96
e-mail: jpszczola@wme.wat.edu.pl

Abstract

The results of research and analysis of a diesel engine injection pump fuel dosing characteristics are presented. The analysis concerns especially the range of low starting rotational speed of pump shaft (engine crankshaft). Low value of rotational speed and because of it a long time of fuel injection causes considerable decrease of injected fuel dose as a result of its part flowing through the leaks of pump pressing section. The requisite condition of an engine starting is to feed its cylinders with fuel. There exists such rotational speed value by which fuel injection by pump does not take place and then obtaining the independent operation of the engine is impossible. Therefore from the diesel engine starting process point of view the requisite crankshaft rotational speed value at its driving by starter conditions is such, by which it is possible to meet the requisite condition of the engine operation – its feeding with fuel. But to ensure the engine start-up possibilities its crankshaft should be driven with the rotational speed higher than its bordering speed value.

WARTOŚĆ KONIECZNA ROZRUCHOWEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań i analizę charakterystyk dawkowania paliwa pompy wtryskowej silnika o zapłonie samoczynnym. Analiza dotyczy w szczególności zakresu niskich rozruchowych prędkości obrotowych wałka pompy (wałka korbowego silnika). Niska wartość prędkości obrotowej, a stąd długi czas trwania wtryskiwania paliwa powoduje znaczne zmniejszenie wtryskiwanej dawki paliwa wskutek przepływu jej części przez nieuszczelnienie sekcji tłoczącej pompy. Warunkiem koniecznym podjęcia pracy przez silnik jest dostarczenie paliwa do cylindrów. Istnieje taka wartość prędkości obrotowej, przy której wtryskiwanie paliwa przez pompę do cylindrów nie występuje i uzyskanie stanu samodzielnej pracy silnika nie jest możliwe. Zatem z punktu widzenia procesów rozruchowych wartość konieczna prędkości obrotowej wałka korbowego w warunkach jego napędzania przez układ rozruchowy jest taką, przy której możliwe jest spełnienie warunku koniecznego pracy silnika – jego zasilania paliwem. Jednak dla zapewnienia możliwości rozruchu wałka korbowego silnika powinien być napędzany z prędkością większą od granicznej.

1. Wprowadzenie

Tłokowe silniki spalinowe stanowią źródło energii mechanicznej dzięki spalaniu paliw ciekłych lub gazowych. Warunkiem funkcjonowania silnika tłokowego jest dostarczenie do jego cylindrów powietrza i paliwa oraz wytworzenie mieszaniny gazowej o parametrach zapewniających możliwość spowodowania jej zapłonu i spalania. Stan mieszaniny jest określony poprzez jej skład oraz parametry termodynamiczne: temperaturę i ciśnienie. Zapewnienie odpowiedniego stanu mieszaniny paliwowo-powietrznej jest szczególnie trudne w warunkach rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym w niskiej temperaturze.

Dostarczanie do cylindrów silnika paliwa i powietrza jest wymuszane poprzez przemieszczenia elementów mechanizmów silnika, które uzyskują napęd wskutek połączeń kinematycznych z jego wałem korbowym. Oleje napędowe są nielotne w temperaturze otoczenia, zapalają się w temperaturach niższych od temperatury parowania. Dlatego ich doprowadzenie do cylindrów silnika o zapłonie samoczynnym musi być wymuszone przez wytworzenie wysokiego ciśnienia w celu dokładnego rozpylenia i przyspieszenia procesów mieszania z powietrzem. Czynnikiem powodującym rozpad wtryskiwanego strumienia paliwa na krople są turbulenty ruchy cieczy wywołane przepływem przez otwór rozpylacza z dużą prędkością oraz opór ośrodka [3]. Jakość rozpylenia jest określana za pomocą dwu parametrów: dokładności, determinowanej przez średnią średnicę kropeł wytworzonego aerozolu oraz jednorodności rozumianej jako funkcja gęstości rozkładu średnic kropeł.

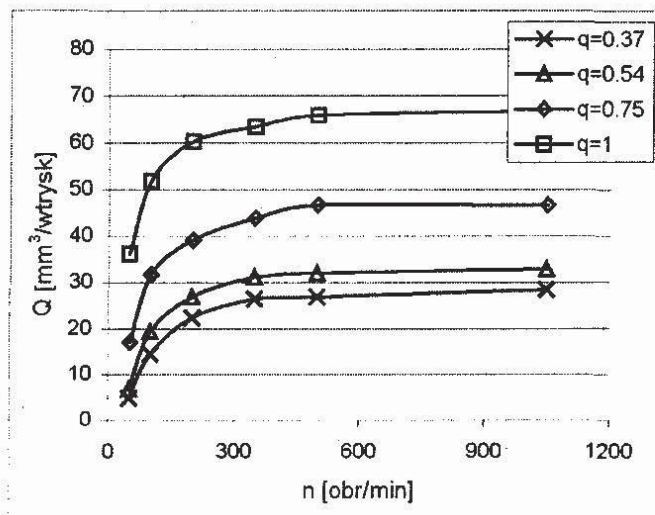
Od parametrów konstrukcyjnych pompy wtryskowej i jej parametrów regulacyjnych zależna jest wartość dawki wtryskiwanego paliwa, czasowy przebieg wtryskiwania i kąt wyprzedzenia wtryskiwania paliwa. Charakterystyki pracy silników zależą w dużym stopniu od charakterystyk dawkowania paliwa, wpływają one również na ich rozruch w niskiej temperaturze otoczenia [1]. Dla celów badania właściwości rozruchowych silnika o zapłonie samoczynnym typu AD4.236 w niskiej temperaturze otoczenia wykonano charakterystyki dawkowania jego pompy wtryskowej przy użyciu aparatu Hartridge – seria 1100 MK2. Badania charakterystyk dawkowania paliwa przeprowadzono w dodatniej temperaturze otoczenia. Do badań użyto płyn Castrol Lucas Calibration Fluid o temperaturze +40 °C (podczas pomiarów dawki paliwa). Wymieniony silnik AD4.236, będący między innymi jednostką napędową ciągników URSUS 4512 i zespołów prądotwórczych, wyposażony jest w rozdzielaczową pompę wtryskową DPA. Ponieważ dysponowano głowicami pompy o różnej średnicy tłoczków, zmiana wartości dawki paliwa była możliwa zarówno poprzez zmianę jej wartości, jak też zmianę czynnego skoku tłoczków. Trzecią podstawową zmienną w badaniach dawkowania paliwa była prędkość obrotowa wałka pompy.

2. Charakterystyki dawkowania paliwa przez pompę DPA

Uzyskano charakterystyki dawkowania paliwa pompy w funkcji prędkości obrotowej przy zmiennych wartościach skoku elementu tłoczącego, dla różnych średnic tłoczków pompy. Nominalna dawka paliwa pompy $Q=56,4 \text{ mm}^3/\text{wtrysk}$ dla głowicy wyposażonej w tłoczek o średnicy 8,5 mm jest ustalana dla badanego silnika przy prędkości obrotowej wałka równej 1050 obr/min. Wartości skoku tłoczków głowic regulowano za pomocą zmiany położenia płytki regulacyjnej pompy wtryskowej. Ustalono cztery stałe położenia płytki regulacyjnej, które określono w odniesieniu do wartości dawki paliwa zmierzonej dla głowicy pompy o średnicy tłoczków 8,5 mm (głowica stosowana dla pompy „fabrycznej” tego silnika) przy prędkości obrotowej wałka pompy 100 obr/min. Zatem kolejne położenia płytki regulacyjnej odpowiadały tłoczonej w warunkach badania dawce paliwa q równej 1 (dawka maksymalna pompy), 0,75, 0,54 (dawka standardowa silnika) i 0,37. Dysponowano czterema głowicami pompy wtryskowej o następujących wartościach średnicy tłoczków: 6; 7; 8,5 (nominalna średnica tłoczków pompy badanego silnika) i 9 mm.

Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki dawkowania pompy z tłoczkami o średnicy 7 mm w funkcji prędkości obrotowej wałka, przy ustalonych położeniach płytki regulacyjnej dawki paliwa. Szczególnie istotna jest tu zależność wartości wtryskiwanych dawek paliwa Q od prędkości obrotowej w zakresie niskich jej wartości, przy różnych położeniach płytki regulacyjnej q . Dla tej średnicy tłoczka wartości dawki paliwa wzrastają w całym zakresie zmian prędkości obrotowej wałka pompy, przy czym wartość dawki stabilizuje się przy prędkości obrotowej około 400 obr/min. Bardzo duże zmiany wartości dawki występują w zakresie prędkości obrotowych wałka od 50 do 200 obr/min. Stopień zmiany dawki jest

zależny od ustalonej wartości skoku tłoczka pompy i dla regulacji dawki maksymalnej wynosi on około 65 %, zaś dla ustalonej wartości dawki minimalnej ponad 350 %.



Rys. 1. Charakterystyki dawkowania paliwa pompy DPA – średnica tłoczków głowicy 7 mm
Fig. 1. The DPA type pump fuel dosing characteristics – the piston diameter of 7 mm

Obniżenie wartości dawki przy niskich prędkościach obrotowych jest wynikiem przepływu paliwa przez nieszczelności par precyzyjnych. Jeżeli objętość ustalonej według wymiarów geometrycznych elementu tłoczącego pompy dawki paliwa jest równa Q , to w fazie tłoczenia jest ona rozdzielana na dwie objętości Q_1 i Q_2 , które są tłoczone odpowiednio przez wtryskiwacz do cylindra silnika oraz przez nieszczelności elementu tłoczącego do przestrzeni zasilania. Objętość Q_2 jest tłoczona w pełnym okresie t trwania wtrysku i jest ona, zgodnie z regułami hydrodynamiki równa:

$$Q_2 = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \cdot t \quad (1)$$

gdzie: μ – współczynnik natężenia przepływu przez nieszczelności, f – pole przekroju nieszczelności, ρ – gęstość paliwa, Δp – różnica ciśnienia wymuszającego przepływ.

Ponieważ czas trwania wtryskiwania paliwa jest związany z prędkością obrotową wałka pompy n (obr/min) zależnością (α jest kątem wtryskiwania paliwa wyrażonym w stopniach):

$$t = \frac{\alpha}{6n} \quad (2)$$

to wynika stąd, że wielkość strat dawki paliwa jest funkcją hiperboliczną prędkości obrotowej wałka pompy, zaś objętość tłoczonej dawki paliwa jest uzupełnieniem tej funkcji do wartości geometrycznie ustalonej dawki Q .

Z chwilą, gdy tłoczenie paliwa przez rozpylacz wtryskiwacza ma charakter ciągły, wartości przetłaczanych objętości paliwa Q_1 i Q_2 można wyrazić:

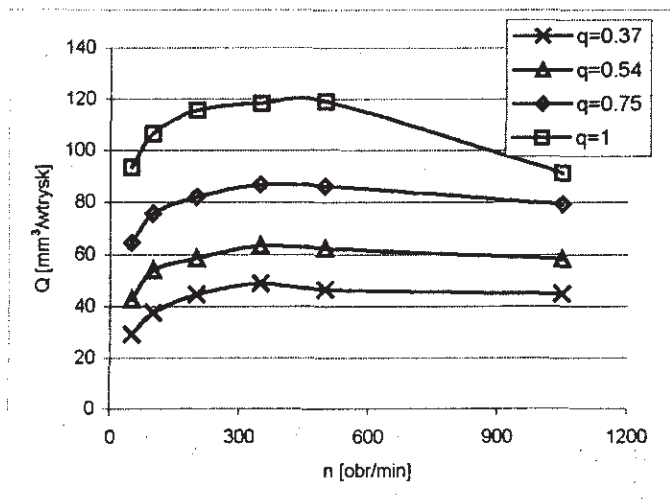
$$Q_1 = \mu_1 f_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \cdot t; \quad Q_2 = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \cdot t \quad (3)$$

gdzie symbol „ $\sqrt{\quad}$ ” odnosi się do procesu wtryskiwania paliwa przez rozpylacz. Porównując powyższe zależności można otrzymać:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \mu_1 f_1 \\ Q_2 &= \mu_2 f_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Stąd wynika, że objętość tłoczona w tym zakresie prędkości obrotowej wałka pompy dawki paliwa jest stała, co potwierdzają uzyskane charakterystyki dla zakresu prędkości obrotowych większych od 350 obr/min.

Na rys. 2. przedstawiono podobne charakterystyki dawkowania dla pompy wyposażonej w głowicę o średnicy tłoczków równej 9 mm. Bezpośrednie porównanie krzywych wskazuje na podobieństwa zależności, ale również istotne różnice, nie tylko ilościowe, ale też i jakościowe przy zmianie średnicy tłoczków z 7 do 9 mm.



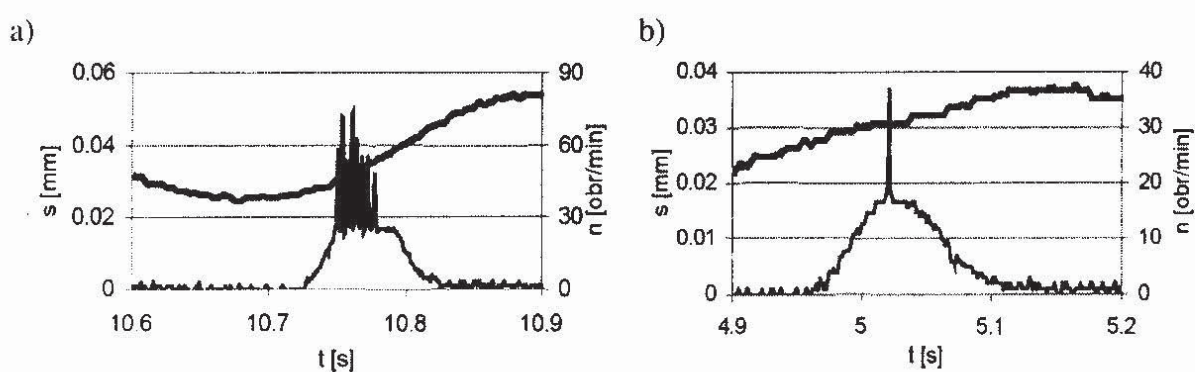
Rys. 2. Charakterystyki dawkowania paliwa pompy DPA – średnica tłoczków głowicy 9 mm
 Fig. 2. The DPA type pump fuel dosing characteristics – the piston diameter of 9 mm

Podobnie jak w przypadku średnicy tłoczków 7 mm obserwuje się wzrost wartości dawki wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, dla zakresu niskich rozruchowych jej wartości. Przy tym jednak stopień zmiany wartości dawki nie jest już tak znaczny i największa jego wartość dla ustalonej dawki minimalnej wynosi około 53 %. Wynika to stąd, że dla tłoczków pompy o większych średnicach stosunek pola przekroju nieszczelności do pola przekroju tłoczka jest mniejszy (jest on proporcjonalny do $1/r$), a przez to i ubytek dawki tłoczonego paliwa jest mniejszy przy obniżeniu prędkości obrotowej wałka. Jakościowa zmiana zależności dawki paliwa od prędkości obrotowej występuje przy średnicy tłoczków 9 mm w zakresie wysokich (powyżej 500 obr/min) wartości prędkości. Obserwuje się tu zmniejszanie dawki paliwa wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, zwłaszcza dla najwyższej ustalonej dawki paliwa.

W celu wyjaśnienia obserwowanej zależności należy rozważyć mechanizmy napełniania „cylindrów” pomp wtryskowych paliwa i założyć, że przyczyną zmniejszenia dawki paliwa jest w tym przypadku zmniejszenie stopnia napełnienia sekcji tłoczącej (cylinderka) pompy wraz ze wzrostem prędkości wałka pompy. W przypadku rozdzielaczowej pompy wtryskowej, jaką jest pompa DPA, proces napełniania rozdzielacza następuje pod ciśnieniem wytworzonym przez pompę przetłaczającą o wartości maksymalnej ustalonej przez zawór regulacyjny. W zakresie ciśnienia niższym od ustalonego zaworem regulacyjnym, ciśnienie podawanego paliwa jest zależne od prędkości obrotowej wałka pompy. W okresie połączenia kanału doprowadzającego paliwo z otworem w wirniku rozdzielacza paliwo jest tłoczone pomiędzy tłoczki pompy i rozpycha je. Zatem napełnianie rozdzielacza następuje tutaj przy stałej różnicy ciśnienia. Więc w przypadku, gdy czas napełniania jest zbyt krótki, słuszne są zależności (1) i (2). Zależność wartości dawki od prędkości obrotowej powinna mieć tu również charakter funkcji hiperbolicznej.

3. Badanie charakterystyk wtryskiwania i zapłonu paliwa

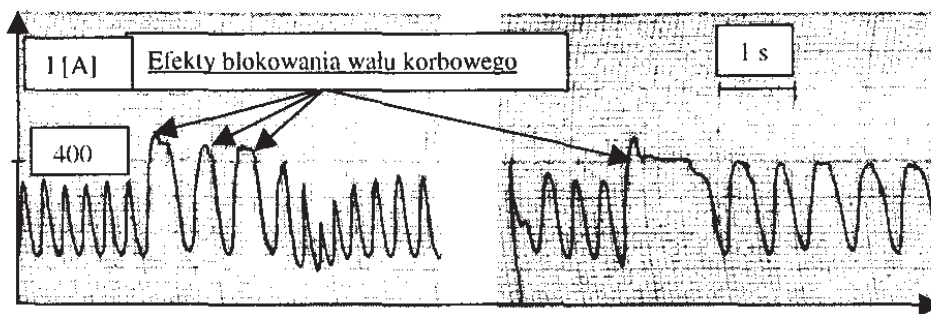
Podstawowym celem realizowanych badań charakterystyk wtryskiwania paliwa podczas napędzania wału korbowego silnika AD4.236 było wykazanie, że istnieją realne możliwości napędzania jego wału korbowego przez układ rozruchowy z prędkością obrotową, przy której nie występuje wtryskiwanie paliwa przez pompę lub nie jest możliwe uruchomienie silnika. Konieczne zatem było stacjonarne napędzanie wału korbowego z bardzo niskimi wartościami prędkości obrotowej. Aby taki proces napędzania zrealizować za pomocą rozrusznika elektrycznego wymontowano wtryskiwacze cylindrów z ich gniazd, użyto akumulator o dużej pojemności (120 Ah) i w obwód zasilania rozrusznika włączono dodatkowy opór. Jego zadaniem było obniżenie napięcia zasilania rozrusznika. Na rys. 3 pokazano niektóre z uzyskanych rezultatów badań wzniosu iglicy wtryskiwacza oraz prędkości wału korbowego w okresie wtryskiwania paliwa dla średnicy tłoczka pompy wtryskowej 8,5 mm.



Rys. 3. Przemieszczenie iglicy wtryskiwacza s przy różnych wartościach prędkości wału korbowego n
Fig. 3. Relocating of the injector needle "s" at different crankshaft rotational speed "n"

Widoczne jest, że przy prędkości obrotowej wału korbowego około 45 obr/min (rys. 3a) wtryskiwanie paliwa zachodziło przy wielokrotnym wzniosie iglicy, a już przy prędkości 30 obr/min zarejestrowano jedynie pojedynczy niewielki wznios iglicy wtryskiwacza. Zatem wtryskiwanie paliwa przy tej prędkości obrotowej praktycznie zanikło i wskazuje, że możliwe jest osiągnięcie takiego stanu napędzania wału korbowego, przy którym z powodu braku zasilania paliwem rozruch silnika jest niemożliwy. Łatwo można wykazać, że wartość koniecznej rozruchowej prędkości obrotowej silnika zależy przede wszystkim od średnicy tłoczków pompy oraz ciśnienia otwarcia wtryskiwacza. Przy zastosowaniu dla silnika AD4.236 tłoczków o średnicy 6 mm oraz ciśnienia otwarcia wtryskiwacza 33 MPa nie było możliwe nawet jego uruchomienie w eksploatacyjnym stanie cieplnym.

W pracy [2] zdefiniowano dla przypadku rozruchu wspomaganego silnika pojęcie granicznej rozruchowej prędkości obrotowej. Wymieniona wartość prędkości obrotowej stanowi pewnego rodzaju granicę podczas uruchamiania silnika. Przy prędkości wału korbowego niższej od granicznej rozruch silnika nie jest możliwy bez względu na rodzaj użytych środków ułatwiających rozruch, ponieważ skutek powstania zapłonu nie następuje wzrost prędkości obrotowej wału korbowego, lecz jego chwilowe zablokowanie. Na rys. 4 przedstawiono fragment przebiegów natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik podczas wspomaganego rozruchu silnika AD4.236 ilustrujący zjawisko blokowania wału korbowego.



Rys. 4. Efekt blokowania wału korbowego podczas wspomaganego rozruchu silnika AD4.236
 Fig. 4. The effect of AD4.236 engine crankshaft blocking during its aided start-up

Przyczyną tego jest spalanie wtryskiwanej dawki przed przejściem tłoka za GMP. Korzystne warunki zapłonu paliwa stwarza działanie świecy płomieniowej, co przy niskiej wartości prędkości obrotowej wału korbowego powoduje powstanie wysokiego ciśnienia gazów hamującego ruch wału korbowego. Dlatego powstanie zapłonu nie powoduje przyspieszenia wału korbowego i rozruch silnika nie może wystąpić. Zwiększa się przy tym znacznie obciążenie układu rozruchowego – znaczny wzrost średniego natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik. Zjawisko to występuje dla wielu silników przy średnich prędkościach obrotowych wału korbowego przed zapłonem nie wyższych od $70 \div 80$ obr/min (na rys. 4. wartość prędkości jest równa około 75 obr/min), i jest więc charakterystyczne dla rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym z użyciem środków wspomagających.

Napędzanie wału korbowego z prędkością większą lub równą granicznej rozruchowej prędkości obrotowej stanowi więc również warunek konieczny rozruchu silników o zapłonie samoczynnym. Spośród parametrów regulacyjnych układów silnika podstawowym parametrem decydującym o istnieniu i wartości granicznej rozruchowej prędkości obrotowej jest kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa. Zjawisk związanych z blokowaniem wału korbowego podczas rozruchu można uniknąć, jeżeli wartości kąta wyprzedzenia wtrysku są nie większe niż około 10° OWK przed GMP. Dla podjęcia przez silnik samodzielnej pracy wystarcza wówczas spowodowanie samozapłonu wytworzonej mieszaniny paliwowo-powietrznej, co jest warunkiem wystarczającym rozruchu (przy spełnionym warunku koniecznym).

5. Podsumowanie

Omówione rozruchowe prędkości obrotowe wału korbowego dotyczą zakresu najniższych ich wartości, przy których zostają spełnione warunki konieczne udanego rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym. Napędzanie wału korbowego silnika z prędkością obrotową większą od jej wartości koniecznej zapewnia zasilanie silnika paliwem (i powietrzem) warunkujące możliwość realizacji jego procesów roboczych. Spełnienie warunku napędzania wału korbowego z prędkością wyższą od granicznej zapewnia, że wskutek zainicjowania podczas rozruchu spalania paliwa prędkość obrotowa wału korbowego wzrośnie i silnik będzie mógł rozpocząć samodzielną pracę – nie nastąpi zablokowanie wału korbowego wskutek powstania zapłonu paliwa.

Literatura

- [1] Mysłowski J.: *Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym*. WNT, Warszawa, 1996
- [2] Pszczółkowski J.: *Graniczna prędkość obrotowa rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym*. Biuletyn WAT, nr 9, 1997r, str.: 81 – 92
- [3] Zabłocki M.: *Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych*, WKŁ, Warszawa 1976