

Andrzej Ambrozik, Tomasz Ambrozik, Dariusz Kurczyński, Piotr Łagowski

Charakterystyki wydzielania ciepła w silniku MultiJet o zapłonie samoczynnym z jedno-, dwu- i tryfazowym wtryskiem paliwa

Celem artykułu jest analiza i ocena wpływu jedno-, dwu- i trzyetapowego wtrysku paliwa na charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spalania w silniku 1.3 Multijet zasilanym olejem napędowym. Analizie poddano rzeczywiste wykresy indykatorowe sporządzone przy pracy silnika wg zewnętrznej charakterystyki prędkościowej w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego silnika od 1000 do 4600 obr/min. Charakterystyki wydzielania ciepła sporządzono wykorzystując do tego program INDY-2 opracowany w Zakładzie Silników Ciepłych Katedry Mechaniki. Program INDY-2 umożliwia wyznaczenie charakterystyk wydzielania ciepła przy założeniu, że proces spalania zakończył się do otwarcia zaworu wylotowego oraz, że całkowita wartość względnej ilości wydzielonego ciepła podczas całkowitego i zupełnego procesu spalania jest równa $x = x_i + x_{str} = 1$. Obliczenia realizowano od otwarcia zaworu wylotowego w kierunku początku procesu spalania. Obliczenia wykonane wg powyższego programu uwzględniają zmianę ilości produktów spalania w czasie jego trwania, zmianę ciepła właściwych zależnych od składu i temperatury czynnika roboczego oraz straty ciepła powodowane wymianą ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym a ściankami przestrzeni w której zachodzi proces spalania jak też inne jego straty powodowane np. dysocjacją, niezupełnością i niecałkowitością spalania itp.

Słowa kluczowe: tłokowy silnik spalinowy, wieloetapowy wtrysk paliwa, wykres indykatorowy, wydzielanie ciepła

Wstęp

Tłokowe silniki spalinowe są najbardziej rozpowszechnionym i podstawowym źródłem napędu w różnych dziedzinach działalności człowieka. Największe zastosowanie znalazły one do napędu samochodów i ciągników, w tym również rolniczych. Niezależnie od tego, że ich konstrukcje osiągnęły wysoki poziom techniczny nadal posiadają duże możliwości rozwoju co wymaga dalszych badań. Rozwój silników był ściśle związany z wymaganiami jaki im stawiano. W początkowym etapie ich rozwoju szczególny nacisk stawiono na poprawę parametrów użytkowych nie zwracając uwagi na zużycie paliwa czy emisję toksycznych składników spalin. Dopiero kryzys lat siedemdziesiątych spowodował rozwój silnika w kierunku zmniejszenia zużycia paliwa oraz poszukiwania paliw alternatywnych mogących zastąpić paliwa węglowodorowe. Kolejnym etapem ich rozwoju było ograniczenie ich szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne człowieka. Trend ten utrzymuje się nadal przez wprowadzanie coraz bardziej rygorystycznych normy związanych z emisją toksycznych składników ze spalinami tłokowych silników spalinowych.

Współczesne silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym odznaczają się parametrami pracy

porównywalnymi z silnikami o zapłonie wymuszonym, przy mniejszym zużyciu paliwa. Dzięki małym gabarytom, dużym wartościom mocy efektywnej i momentu obrotowego, mniejszej hałaśliwości w porównaniu z silnikami starszych generacji są one obecnie powszechnie stosowane do napędu samochodów osobowych. Tak duży postęp w rozwoju silników o zapłonie samoczynnym był możliwy przede wszystkim dzięki zastosowaniu w nich nowoczesnych, sterowanych elektronicznie układów zasilania z pompowtryskiwaczami lub układami common rail realizującymi wieloetapowy wtrysk paliwa jak również dzięki zastosowaniu wydajnych systemów doładowania [5, 8].

Dalszy rozwój tłokowych silników spalinowych dotyczący zmniejszenia toksyczności spalin i poprawy parametrów ekonomicznych i eksploatacyjnych co związane jest z obniżeniem strat mechanicznych silnika i osiągnięciem sprawności ogólnej silników o zapłonie samoczynnym zbliżonej do 50%. Cele te są ściśle związane z doskonaleniem procesów wewnątrz w nim zachodzącymi, a w szczególności procesu spalania. Przebieg procesu spalania oceniany jest za pomocą charakterystyk wydzielania ciepła. Pod pojęciem charakterystyk wydzielania ciepła rozumie się zależność ilości i szybkość wydzielania ciepła podczas procesu spalania z uwzględnieniem cie-

pła wymienianego ze ściankami komory spalania. Wyznaczanie charakterystyk wydzielania ciepła podczas procesu spalania wymaga znajomości dokładnie zarejestrowanego wykresu zmiany ciśnienia w cylindrze, wartości chwilowych objętości cylindra, znajomości ilości, składu i właściwości czynnika roboczego oraz wiarygodnego modelu wymiany ciepła między czynnikiem roboczym a ściankami ograniczającymi przestrzeń spalania. Postać wykresu indykatorowego zależy przede wszystkim od: przebiegu i jakości rozpylenia paliwa podczas procesu wtrysku, ilości oraz właściwości aerodynamicznych powietrza doprowadzonego do cylindra, itp. Wielkości te decydują o jakości tworzonej i spalanej mieszanki palnej. Od właściwie realizowanego procesu spalania zależy jakość przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną. Od przemiany tej zależy zużycie paliwa oraz emisja szkodliwych składników ze spalinami i hałas silnika.

1. Zakres i metodyka badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne silnika 1.3 MultiJet przeprowadzono na stanowisku hamownianym zbudowanym w Laboratorium Silników Ciepłych Politechniki Świętokrzyskiej. Zakres badań obejmował wyznaczenie zewnętrznej charakterystyki prędkościowej silnika FIAT 1.3 MultiJet przy zasilaniu go olejem napędowym. W ramach badań wyznaczano wskaźniki ekonomiczno-energetyczne i ekologiczne oraz wybrane wielkości szybkozmienne badanego silnika, wyposażonego w układ wtryskowy common rail umożliwiający podział dawki paliwa na 3 części i ich wtrysk do cylindra pod maksymalnym ciśnieniem 160 MPa [6]. Silnik pracował w zakresie prędkości obrotowych od 1000 do 4600 obr/min. Pomiary wykonano przy ustalonych warunkach pracy silnika z krokiem co 200 obr/min wału korbowego. W czasie badań dokonywano pomiarów podstawowych parametrów pracy silnika takich jak: moc efektywna N_e , efektywny moment obrotowy M_o , godzinowe zużycie paliwa G_h , ciśnienie doładowania silnika p_d , ciśnienia paliwa w zasobniku p_w oraz wielkości szybkozmienne takie jak: przebieg ciśnienia w cylindrze, prąd sterujący pracą wtryskiwacza i kąt obrotu wału korbowego silnika. Podstawowe właściwości fizykochemiczne oleju napędowego, jakim zasilany był silnik przedstawiono w tabeli 1.

2. Obiekt badań i stanowisko badawcze

Obiektem badań był silnik FIAT 1.3 MultiJet produkowany przez firmę FIAT-GM PO-WERTRAIN Polska w Bielsku Białej, spełniający normę emisji spalin Euro IV. Silnik ten rozwija maksymalną moc 90 KM (66 kW) przy prędkości obrotowej 4000 obr/min i maksymalny moment obrotowy 200 Nm przy prędkości obrotowej 1750 obr/min.

Tab. 1. Podstawowe właściwości fizykochemiczne oleju napędowego ON

Parametr	Wielkość
Liczba cetanowa	52,4
Indeks cetanowy	53,6
Gęstość w temperaturze 15°C [kg/m ³]	832,4
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C [mm ² /s]	2,644
Temperatura zapłonu [°C]	61,5
Temperatura mętnienia [°C]	-8
Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	-8
Skład frakcyjny:	
– do temperatury 250°C destyluje [% (V/V)]	38,1
– do temperatury 350°C destyluje [% (V/V)]	95,3
– 95% (V/V) destyluje do temperatury	348,8
Zawartość siarki [mg/kg]	8,5
Zawartość wody [mg/kg]	109
Zawartość zanieczyszczeń stałych [mg/kg]	7
Pozostałość po koksowaniu w 10% pozostałości destylacyjnej [% (m/m)]	0,01
Pozostałość po spopieleniu [% (m/m)]	0,001
Zawartość wielopierścieniowych węglodorów aromatycznych [% (m/m)]	3,1
Zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych FAME [% (V/V)]	4,8
Badania działania korodującego na płytkach miedzi [klasa]	1

Silnik ten jest przykładem obecnie dominującego wśród producentów silników spalinowych tzw. „downsizingu”, czyli zmniejszaniem wymiarów jednostek napędowych przy jednoczesnym zwiększaniu ich mocy. Kadłub silnika odlany jest z żeliwa, posiada aluminiową płytę nośną i wtopione żeliwne panewki łożysk głównych. Rozwiązanie takie pozwala uzyskać wymaganą sztywność przy ograniczonych wymiarach, korzystną charakterystykę hałaśliwości, drgań i wytrzymałości przy jednoczesnym zachowaniu prostoty procesu produkcyjnego [6]. W układzie rozrządu zastosowano dwa wałki rozrządu, z których jeden napędzany jest od wału korbowego jednorzędowym łańcuchem, natomiast drugi napędzany jest od pierwszego wałka przekładnią z paskiem zębatym, umieszczoną na drugim końcu wałków. Średnica cylindrów wynosi 69,6 mm, natomiast odległość między nimi wynosi 77 mm, co wraz ze skokiem tłoka 82 mm daje ok. 312 cm³ pojemności skokowej cylindra i stosunek skoku tłoka do średnicy cylindra wynoszący 1,18. Silnik wyposażono w cztery zawory na cylinder. Dwa zawory dolotowe i dwa wylotowe odchylone od pionu o 3°, co pozwoliło na umieszczenie między nimi wtryskiwacza. Zawory napędzane są dwoma wałkami rozrządu usytuowanymi w głowicy. Jeden wałek bezpośrednio napędza pompę wysokiego ciśnienia układu common rail a drugi pompę podciśnieniową. Zastosowanie czterech zaworów na

cyliner podyktowane zostało zoptymalizowaniem procesu spalania, oraz zwiększeniem współczynnika napełniania cylindra przy dużej prędkości obrotowej silnika, tak by utrzymać dużą wartość mocy przy prędkości obrotowej 5000 obr/min. Silnik wyposażono w układ zasilania common rail. Elementy układu pochodzą z firmy Bosch, natomiast system sterowania jest firmy Magneti Marelli. Wtryskiwacze elektromagnetyczne firmy Bosch, które pracują przy ciśnieniu 160 MPa umożliwiają podział dawki paliwa przypadającej na jeden cykl, w zależności od warunków pracy silnika, maksymalnie na trzy części [6].

W celu spełnienia normy emisji spalin Euro 4 dla silnika pracującego przy dużych obciążeniach zastosowano nową funkcję kontroli współczynnika nadmiaru powietrza, którego wartość wyznacza się w oparciu o wskazania czujnika tlenu. W układzie wydechowym badanego silnika zastosowano zintegrowany z kolektorem wydechowym katalizator utleniający. W celu poprawy osiągnięć, w układzie dolotowym powietrza umieszczono małą turbosprężarkę o zmiennej geometrii łopatek kierownicy oraz chłodnicę powietrza doprowadzanego do cylindrów. W celu ograniczenia emisji tlenków azotu silnik wyposażono w system recyrkulacji schłodzonych spalin.

Elektroniczny system sterujący pracą silnika 1.3 MultiJet realizuje sterowanie wartością dawki paliwa i jej podziałem, kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa, ciśnieniem paliwa w szynie paliwowej, ilością schłodzonych recyrkulowanych spalin, prędkością biegu jałowego, maksymalną prędkością obrotową wału korbowego silnika oraz pracą świec żarowych [7]. W elektronicznym sterowniku ECU silnika 1.3 SDE 90 KM zastosowano specjalne funkcje sterowania poprawiające dokładność dawkowania paliwa z uwzględnieniem zużycia wtryskiwacza, co pozwala na zmniejszenie nierównomierności dawkowania paliwa pomiędzy wtryskiwaczami [6]. W ECU zastosowano specjalny algorytm umożliwiający zwiększenie równomierności dawki pilotującej. Sonda lambda umieszczona za turbosprężarką w układzie wydechowym pozwala na wyznaczanie rzeczywistego stosunku paliwa do powietrza. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe dane techniczne badanego silnika.

Hamowniane stanowisko badawcze na którym prowadzono pomiary składa się z następujących elementów:

- silnika o zapłonie samoczynnym FIAT 1.3 MultiJet,
- elektrowrowego hamulca typu EMX-100/10 000 firmy ELEKTROMEX CENTRUM,
- szafy sterującej pracą silnika i hamulca z układem sterowania firmy AUTOMEX,
- systemu pomiarowego ciśnienia czynnika roboczego w cylindrze z czujnikiem GH13G12 firmy AVL,
- dawkomierza paliwa typu 730 Dynamic Fuel Consumption firmy AVL,

Tab. 2. Podstawowe dane techniczne silnika FIAT 1.3 MultiJet

Parametr	Jednostka	Wartość
Układ cylindrów	-	rzędowy
Liczba cylindrów, c	-	4
Rodzaj wtrysku	-	bezpośredni, wieloetapowy (od 3 do 5)
Kolejność pracy cylindrów	-	1 - 3 - 4 - 2
Stopień sprężania, ϵ	-	17,6
Średnica cylindra, D	m	$69,6 \cdot 10^{-3}$
Skok tłoka, S	m	$82 \cdot 10^{-3}$
Pojemność skokowa silnika, V_{ss}	m^3	$1,251 \cdot 10^{-3}$
Moc nominalna silnika, N_e	kW	66
Prędkość obrotowa mocy nominalnej, n_N	obr/min	4000
Maksymalny moment obrotowy silnika, M_e	Nm	200
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu obrotowego, n_M	obr/min	1750
Prędkość obrotowa biegu jałowego, n_{bj}	obr/min	850 ± 20

- termicznego masowego przepływomierza powietrza SENSYFOLW iG firmy ABB,
- komputera PC umożliwiającego sterowanie pracą stanowiska hamownianego za pomocą oprogramowania PARM wersja 1.7 firmy AUTOMEX oraz diagnostykę silnika przy wykorzystaniu modułu KTS 540 i oprogramowania firmy Bosch.

Szafa sterownicza stanowiska składa się z panelu mocy hamulca AMX 202, modułu AMX 211 sterującego zespołem silnik-hamulec, modułu pomiarowego AMX212 PMO umożliwiającego pomiar najważniejszych zmiennych opisujących stan silnika (prędkość obrotową wału i moment obrotowy na wale łączącym silnik z hamulcem) oraz panel pomiaru temperatur i ciśnień. Ponadto w szafie sterowniczej umieszczony jest panel do sterowania dawkomierzem paliwa 730 Dynamic Fuel Consumption AVL oraz panel z regulatorami temperatury LUMEL RE43. Schemat blokowy stanowiska hamownianego z silnikiem przedstawiono na rysunku 1.

System do pomiaru wielkości szybkozmiennych składa się z trzech torów pomiarowych:

- toru pomiarowego ciśnienia w cylindrze silnika,
- toru pomiarowego prądu sterującego pracą wtryskiwacza,
- toru dekodera kąta obrotu wału korbowego.

Schemat blokowy ww. systemu przedstawiono na rysunku 2.

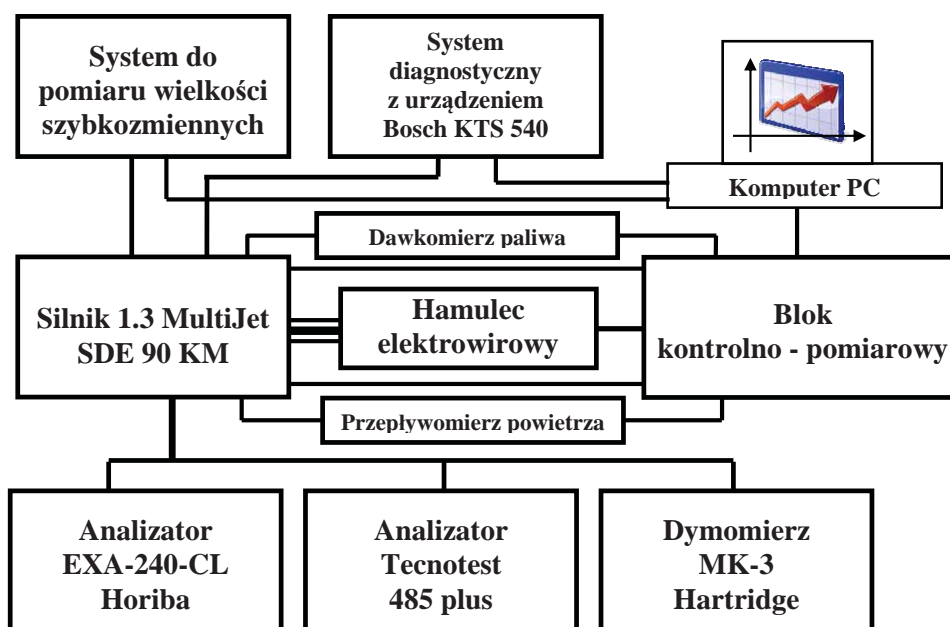
Tor pomiarowy ciśnienia w cylindrze silnika składa się z czujnika piezokwarcowego typu GH13G firmy AVL, przewodów łączących i wzmacniacza ładunku typu CL 111 firmy ZE-PWN Marki. Elementami toru pomiarowego ciśnienia w przewodzie wtryskowym są: przetwornik mierzonego prądu oraz urządzenie diagnostyczne KTS 540, przewody łączące i wzmacniacz ładunku typu CL 111 firmy ZEPWN Marki. Zastosowany pie-

zokwarcowy czujnik ciśnienia przetwarza sygnał ciśnienia na wielkość ładunku elektrycznego. Wielkości mierzone rejestrowano w funkcji kąta obrotu wału korbowego. W systemie pomiarowym zapewnia to tor pomiarowy kąta obrotu wału korbowego, w skład którego wchodzi przetwornik obrotowo-impulsowy oraz układ znakowania i synchronizacji położenia wału korbowego. Wszystkie wielkości mierzone rejestrowano w komputerze. Realizacja obejmowała 50 kolejnych cykli pracy TSS. Na jeden cykl pracy silnika przypadało 2400 punktów pomiarowych. Zapewniało to rozdzielczość pomiarów co 0,30 OWK. Silnik realizu-

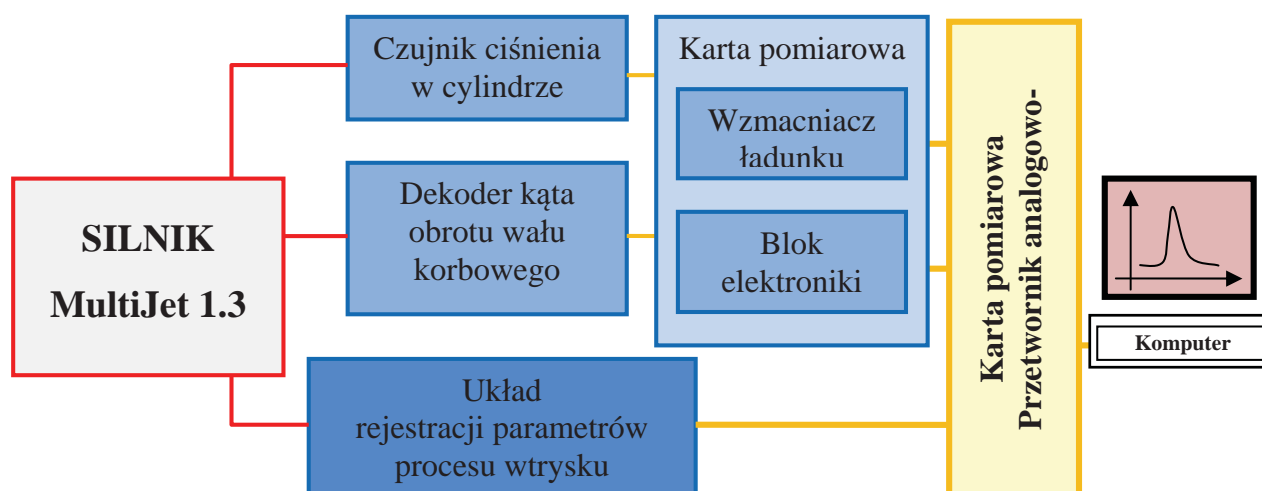
je wieloetapowy wtrysk paliwa, którego realizację przedstawiono na rysunku 3.

3. Charakterystyki wydzielania ciepła

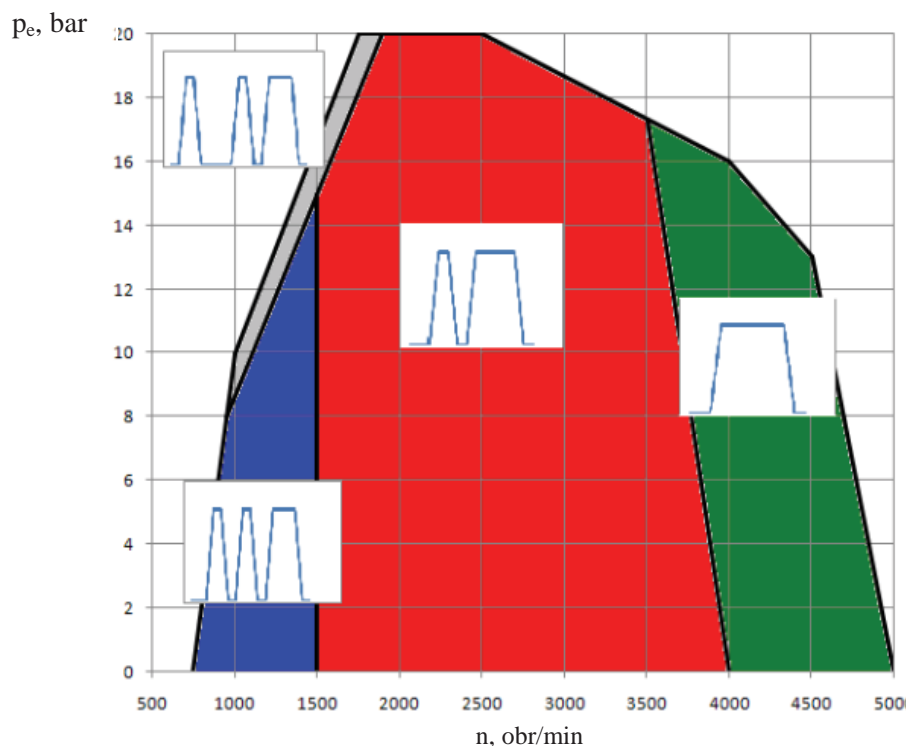
W oparciu o uśrednione wg 50-realizacji rzeczywiste wykresy indykatorowe zdjęte w każdym z 20 punktów zewnętrznej charakterystyki prędkości, sporządzono charakterystyki wydzielającego się ciepła w czasie procesu spalania. Charakterystyki te wyznaczono po wcześniejszym wyznaczeniu wielkości dawki paliwa spalanego w czasie cyklu pracy i ilości czynnika roboczego realizującego ten cykl oraz współczynnika nadmiaru powietrza.



Rys. 1. Schemat blokowy hamownianego stanowiska badawczego



Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego wielkości szybkozmiennych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym



Rys. 3. Sterowanie wieloetapowym wtryskiem paliwa w silniku MultiJet 1.3 o mocy maksymalnej 66 kW [6]

Charakterystyki względnej ilości wydzielającego się ciepła podczas procesu spalania wyznaczano w oparciu o opracowany w Zakładzie Silników Ciepłych Katedry Mechaniki program INDY-2 [1]. Za pomocą programu INDY-2 obliczenia charakterystyk wydzielania ciepła prowadzone są przy założeniu, że proces spalania zakończył się do chwili otwarcia zaworu wylotowego oraz że całkowita wartość względnej ilości wydzielanego ciepła podczas całkowitego i zupełnego procesu spalania jest równa $x = x_i + x_{str} = 1$. Metodyka sporządzania charakterystyk wydzielania ciepła z wykorzystaniem programu INDY-2 została przedstawiona we wcześniejszych publikacjach autorów [2, 3, 4].

4. Wybrane wyniki badań

W artykule przedstawiono wyniki wyznaczania podstawowych wskaźników pracy silnika FIAT 1.3 MULTIJET pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej takich jak: moc efektywna N_e , efektywny moment obrotowy M_o , dawka paliwa przypadająca na cykl pracy silnika g_c , ciśnienia paliwa w zasobniku paliwa p_w oraz podstawowe parametry charakterystyk względnej ilości wydzielającego się ciepła takie jak: początek spalania pierwszej dawki paliwa α_{ps1} i dawki zasadniczej α_{ps2} , końca spalania α_{ks} oraz okresu jego trwania α_{spl} , maksymalna temperatura T_{max} i faza jej wystąpienia α_{Tmax} , maksymalna wartości indykowanego wydzielania ciepła x_{imax} i jej faza wystąpienia α_{ximax} oraz maksymalne szybkości wydzielania ciepła występujące przy spalaniu za-

chodzącym według kinetycznego \dot{x}_{1max} i dyfuzyjnego mechanizmu spalania \dot{x}_{2max} , a także kąt obrotu wału korbowego, przy którym one występują. Ponadto w zależności od prędkościowo-obciążeniowych warunków pracy silnika różne są realizacje wtrysku paliwa do cylindra. Dla niskich prędkości obrotowych – do ok. 1500 obr/min realizowany jest trzyetapowy wtrysk paliwa. Dla prędkości od 1500 obr/min do ok. 3000 obr/min realizowany jest dwuetapowy wtrysk paliwa. Powyżej prędkości 3000 obr/min wtryskiwana jest tylko dawka zasadnicza, czyli realizowany jest jednoetapowy wtrysk paliwa do cylindra. W tabeli 3 przedstawiono wartości wyżej wymienionych wielkości przy zasilaniu silnika handlowym zimowym olejem napędowymi i jego pracy według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej.

Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono przykładowe przebiegi charakterystyk względnej ilości i prędkości wydzielania się ciepła podczas procesu spalania przy prędkościach obrotowych wału korbowego $n = 1200, 1700$ i 4400 obr/min.

Wnioski

Analiza wyznaczonych charakterystyk wydzielania ciepła w silniku z wieloetapowym wtryskiem paliwa pozwoliła sformułować następujące wnioski:

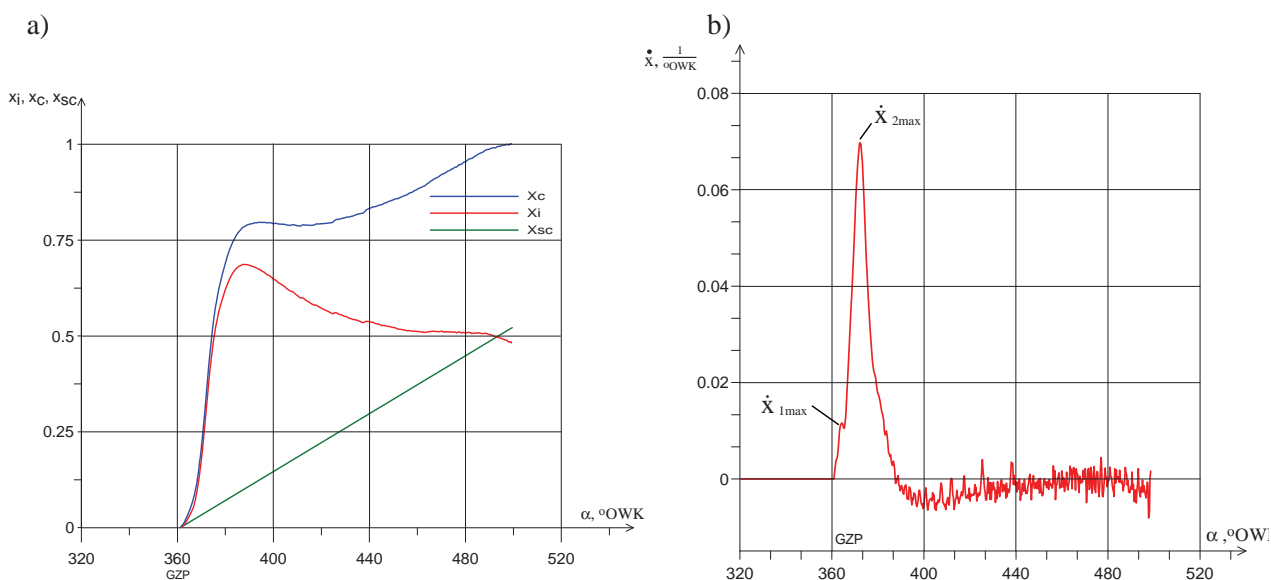
- trzyetapowy wtrysk paliwa realizowany w zakresie warunków pracy silnika przedstawionych na rysunku 3 i zaznaczonych kolorem niebieskim pokazuje, że na wykresie szybkości wydzielania

ciepła występują dwie fazy różnych intensywności wydzielania ciepła podczas procesu spalania. Pierwsza faza wydzielania ciepła odznacza się niewielką maksymalną szybkością wydzielania ciepła i spowodowana jest spalaniem dwóch dawek przedwtrysku zaś maksymalna szybkość wydzielania ciepła przy spalaniu zasadniczej dawki paliwa $\dot{x}_{2max} = 0.072(^{\circ}\text{OWK})^{-1}$ występuje przy $\alpha_{\dot{x}_{2max}} = 372,6^{\circ}\text{OWK}$.

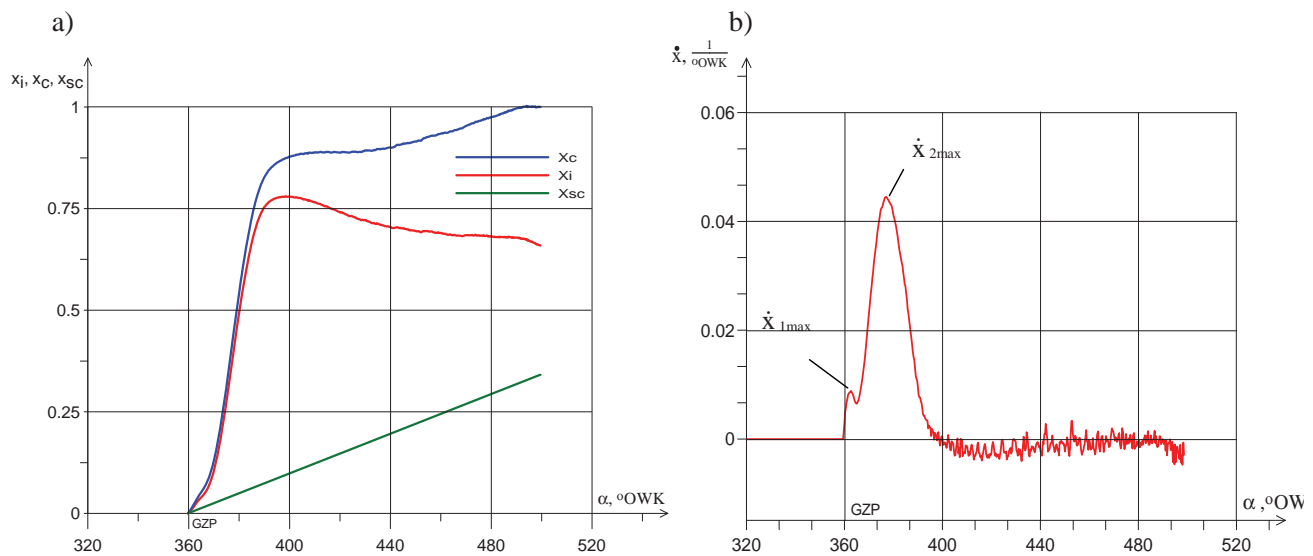
– przy realizacji dwuetapowego wtrysku paliwa realizowanego w obszarze pracy silnika oznaczonym na rysunku 3 kolorem czerwonym, wyraźnie występują dwie fazy zmiany szybkości wydzielania ciepła. Pierwsza maksymalna szybkość wydzielania ciepła spowodowana jest przed wtryskiem zaś druga wtryskiem zasadniczej dawki paliwa. Wartość tej prędkości $\dot{x}_{2max} = 0.045(^{\circ}\text{OWK})^{-1}$ występuje przy $\alpha_{\dot{x}_{2max}} = 377,1^{\circ}\text{OWK}$.

Tab.3. Wyniki pomiarów i obliczeń podstawowych wielkości i parametrów pracy oraz charakterystyczne wielkości procesu wydzielania ciepła w silniku Fiat 1.3 MULTIJET pracującym według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej

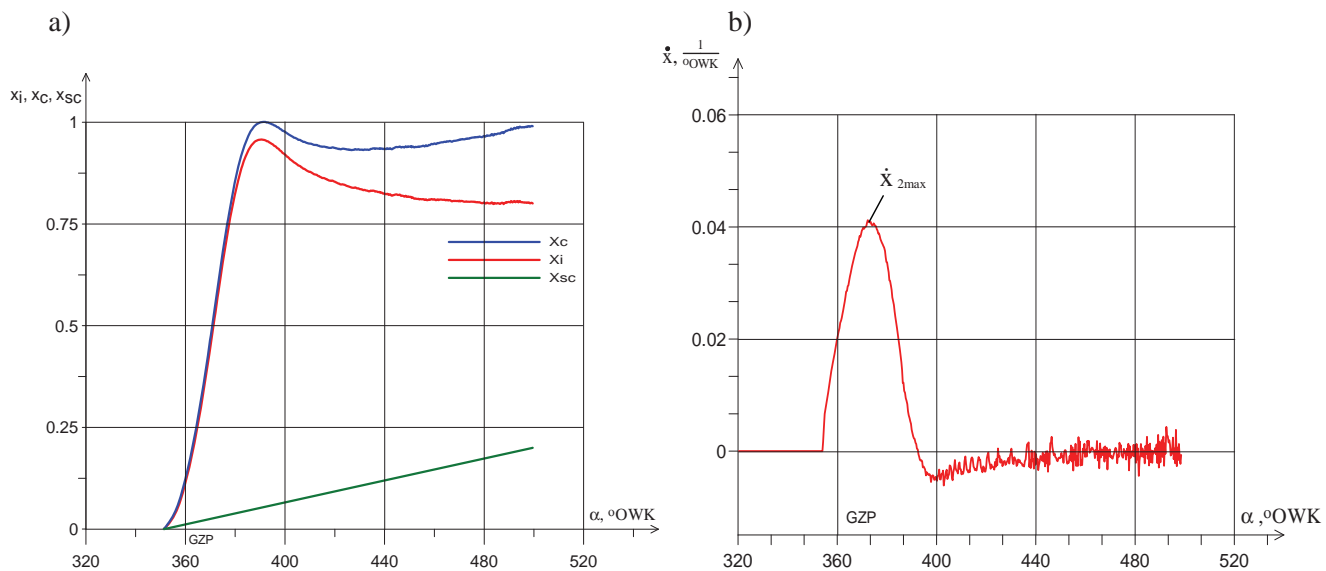
n, obr/min	N _e , kW	M _o , Nm	g _c , mg/cykl	p _w , MPa	α _{ps1} , °OWK	α _{ps2} , °OWK	α _{ks} , °OWK	α _{spl} , °OWK	T _{max} , K	α _{Tmax} , °OWK	X _{imax} , °OWK	α _{ximax} , °OWK	\dot{X}_{1max} , (°OWK) ⁻¹	α \dot{X}_{1max} , °OWK	\dot{X}_{2max} , (°OWK) ⁻¹	α \dot{X}_{2max} , °OWK
1000	8,69	84	18,67	37,8	361,5	364,8	391,2	29,7	1775	383,1	0,60	387,0	0,012	363,9	0,063	372,0
1200	11,90	96	19,44	53,6	361,5	365,1	387,9	26,4	1970	384,3	0,69	387,9	0,012	364,8	0,072	372,6
1400	17,30	119	23,39	72,3	361,8	365,7	389,1	27,3	2062	385,8	0,75	390,0	0,014	364,5	0,067	374,7
1700	36,40	204	37,99	88,3	360,0	365,7	396,0	36,0	1995	391,2	0,78	398,7	0,009	362,7	0,045	377,1
1800	39,31	211	36,85	94,1	359,7	365,4	395,7	36,0	1966	390,9	0,76	398,7	0,009	362,4	0,044	378,3
2000	43,64	211	37,04	100,3	358,2	366,0	398,4	40,2	2118	391,2	0,71	404,7	0,009	361,5	0,036	378,6
2200	48,03	211	37,16	103,9	356,7	365,1	397,2	40,5	2221	391,5	0,75	401,4	0,010	360,6	0,036	376,5
2400	52,69	212	37,29	108,7	354,6	363,6	397,8	43,2	2224	392,1	0,78	403,8	0,010	359,4	0,034	376,8
2600	57,08	212	37,60	112,7	351,9	363,9	398,1	46,2	2281	392,1	0,82	401,4	0,011	357,0	0,034	376,8
2800	61,18	211	38,39	116,5	349,8	360,3	397,2	47,4	2303	390,6	0,85	398,7	0,010	356,7	0,035	374,7
3000	62,13	200	35,86	121,1	350,1	360,9	396,6	46,5	2299	390,3	0,90	397,2	0,037	374,7	-----	-----
3200	63,58	192	34,64	127,3	358,2	-----	396,6	38,4	2324	390,6	0,87	398,4	0,038	374,7	-----	-----
3400	65,82	187	34,04	134,3	357,0	-----	394,5	37,5	2357	390,3	0,89	396,0	0,038	373,5	-----	-----
3600	66,67	179	32,94	141,7	357,0	-----	394,2	37,2	2450	390,3	0,93	396,0	0,039	374,7	-----	-----
3800	66,50	169	31,75	150,7	355,8	-----	394,5	38,7	2487	389,7	0,95	394,2	0,041	375,3	-----	-----
4000	65,41	158	29,79	158,3	355,2	-----	393,3	38,1	2524	389,7	0,97	394,2	0,041	373,8	-----	-----
4200	62,59	144	29,25	159,1	354,6	-----	395,1	40,5	2471	388,2	0,96	392,7	0,042	373,8	-----	-----
4400	58,30	128	27,35	158,7	351,6	-----	389,4	37,8	2394	386,4	0,96	390,6	0,043	373,2	-----	-----
4600	55,76	117	25,85	159,1	351,0	-----	390,3	39,3	2572	385,8	0,98	390,3	0,042	371,7	-----	-----



Rys. 4. Charakterystyki: a) względnej ilości wydzielonego ciepła podczas procesu spalania $x_i(\alpha)$, $x_c(\alpha)$, $x_{sc}(\alpha)$, b) szybkości wydzielania się względnej ilości indykowanego ciepła podczas procesu spalania $\dot{x}(\alpha)$ w silniku 1.3 MultiJet pracującym według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej przy: $n = 1200 \text{ obr/min}$ i $p_e = 0,872 \text{ MPa}$



Rys. 5. Charakterystyki: a) względnej ilości wydzielonego ciepła podczas procesu spalania $x_i(\alpha)$, $x_c(\alpha)$, $x_{sc}(\alpha)$, b) szybkości wydzielania się względnej ilości indykowanego ciepła podczas procesu spalania $\dot{x}(\alpha)$ w silniku 1.3 MultiJet pracującym według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej przy: $n = 1700$ obr/min i $p_e = 1,964$ MPa



Rys. 6. Charakterystyki: a) względnej ilości wydzielonego ciepła podczas procesu spalania $x_i(\alpha)$, $x_c(\alpha)$, $x_{sc}(\alpha)$, b) szybkości wydzielania się względnej ilości indykowanego ciepła podczas procesu spalania $\dot{x}(\alpha)$ w silniku 1.3 MultiJet pracującym według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej przy: $n = 4400$ obr/min i $p_e = 1,235$ MPa

– w zakresie pracy silnika w warunkach oznaczonych na rysunku 3 kolorem zielonym, które odpowiadają jednoetapowemu wtryskowi paliwa tzn. wtryskiwana jest tylko dawka zasadnicza, występuje tylko jedna maksymalna szybkość wydzielania ciepła $\dot{x}_{2max} = 0.043(\text{oOWK})^{-1}$ i występuje ona przy $\alpha_{\dot{x}_{2max}} = 373,2^\circ\text{OWK}$.

Przedstawione powyżej wnioski wskazują na możliwości kształtowania przebiegu charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spala-

nia przez odpowiedni dobór wielkości i faz wieloetapowego wtrysku paliwa.

Bibliografia

1. Ambrozik A., *Cykle pracy czterosurowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2010.
2. Ambrozik A., Ambrozik T., Łagowski P., *Wpływ obciążenia silnika AD3.152 UR na charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spalania*. Susiec 2008.

3. Ambrozik A., Kurczyński D., Łagowski P., *The heat emission factor during the process of combustion in an AD3.152 engine supplied with various fuels*. First International Congress on Combustion Engines, PTNSS KONGRES – 2005, The Development of Combustion Engines, Bielsko-Biała/Szczyrk 2005.
4. Ambrozik A., Kurczyński D., Łagowski P., *Heat release characteristics in AD3.152 engine fuelled with hydrocarbon and biogenous fuels*. First International Congress on Combustion Engines, PTNSS KONGRES – 2005, The Development of Combustion Engines, Bielsko-Biała/Szczyrk 2005.
5. Balawender K., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A., *The effect of multi-phase injection on selected parameters of the common rail fuel system*. Combustion engines, No. 4/2008
6. Imarisio R., Giardina-Papa P., Siracusa M., *The new 1.3 L 90 PS diesel engine*. Silniki spali-no-we Nr 3/2005 (122), s. 22÷31.
7. Pietras, D., Świętek, P., *Dobór kalibracji sterowania silnika 1,3 Multijet w aspekcie jego osiągow i składu spalin*. Silniki Spalinowe, Nr 2/2008 (133)
8. Rokosch U., *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.

Heat release analysis in MULTIET self-ignition engine with single-phase, two-phase and three-phase injection

The paper aims at analysing and assessing the impact of multistage fuel injection on heat release analysis of the combustion process in the 1.3 Multijet engine fuelled with diesel oil. The analysis was performed on real indicator diagrams taken for the engine working at the external speed characteristics at the crankshaft rotational speed ranging from 1000 to 4600 rpm.

Heat release analysis was carried out with the INDY-2 software designed at the Division of Heat Engines of the Mechanics Department. The software performs heat release analysis for the following conditions: the combustion process has been completed by the time the exhaust valve opens, and also the total value of the relative amount of the heat released during the full and complete combustion process is equal to $x = x_i + x_{str} = 1$. Computations are performed until the opening of the exhaust valve, in the direction towards the start of combustion. The computations made by the INDY2 software take into account changes in the amount of combustion products during the process, changes in specific heats which are dependent on the composition and temperature of the working medium, and also heat losses caused by heat transfer from the working medium to the walls of the process-encompassing area, and others caused by, e.g., dissociation, incomplete combustion, etc.

Key words: piston internal combustion engine, multi-stage fuel injection, indicator diagram, heat release

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Andrzej Ambrozik** – Politechnika Świętokrzyska

dr inż. **Tomasz Ambrozik** – Politechnika Świętokrzyska

dr inż. **Dariusz Kurczyński** – Politechnika Świętokrzyska

dr inż. **Piotr Łagowski** – Politechnika Świętokrzyska