

**dr inż. Tomasz Knefel**

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów  
Akademia Techniczno-Humanistyczna  
ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała  
tel. 33 / 82 79 332, fax. 33 / 82 79 351  
e-mail: knefel@ath.bielsko.pl

## **Ocena techniczna wtryskiwaczy Common Rail na podstawie doświadczalnych badań przelewów**

**Słowa kluczowe:** silnik o zapłonie samoczynnym, układ wtryskowy Common Rail, elektromagnetyczny wtryskiwacz, diagnostyka ocena techniczna wtryskiwaczy

**Streszczenie:** Większość aktualnie produkowanych silników o zapłonie samoczynnym do napędu samochodów osobowych jest wyposażona w układy zasilania typu Common Rail. W dużej liczbie stosowane są wtryskiwacze z elektromagnetycznym zaworem. W artykule przedstawiono ocenę różnic w dawkowaniu realizowanym przez wtryskiwacze różnych generacji oraz oszacowano ilości paliwa niezbędne do uruchomienia wtryskiwaczy. Określono udział przelewu w dawce wtryskiwanego paliwa. Wprowadzono pojęcie wskaźnika sprawności, jako wielkości umożliwiającej ocenę ilości rozprężanego paliwa. Przedstawiono jednostkowe przelewy i różnice w jednostkowych przelewach zarówno dla sprawnych wtryskiwaczy, jak i niesprawnego. Wyznaczono przecieki dla elementów I generacji. Zaproponowano metodykę postępowania przy ocenie stanu technicznego wtryskiwaczy po pewnym okresie eksploatacji.

### **1. Wstęp**

Współczesne silniki o zapłonie samoczynnym samochodów osobowych, w większości są wyposażone w zasobnikowe układy zasilania w paliwo. Jest to spowodowane ich niewątpliwymi zaletami, z których najważniejszą wydaje się być możliwość kształtowania przebiegu wtrysku, a tym samym ciśnienia w komorze spalania silnika. Ten proces można stosunkowo łatwo realizować za pomocą wtryskiwaczy układów Common Rail, przez zmianę natężenia wypływu paliwa z wtryskiwaczy. Również we wtryskiwaczach zasobnikowych systemów zasilania odbywa się proces odmierzania podawanej do cylindra silnika dawki paliwa, która następnie rozdrobniona za pomocą rozpylacza i wymieszana z powietrzem, stanowi mieszaninę paliwowo-powietrzną wstępnie przygotowaną do zapłonu. Tak więc wtryskiwacze, jako elementy wykonawcze układu wtryskowego, odgrywają bardzo istotną rolę w uzyskaniu założonych parametrów pracy silnika spalinowego [1]. Jednak z uwagi na warunki pracy, podczas eksploatacji pozostają najbardziej wrażliwym na uszkodzenia elementami układu [3]. W celu wykrycia uszkodzenia w zasobnikowym układzie wtryskowym stosuje się różne metody diagnostyki, w tym również oparte o modele systemu [2]. Warto jednak rozważyć opracowanie stosunkowo prostych, znormalizowanych zasad oceny używanych wtryskiwaczy, a w ten sposób, po ich wprowadzeniu zapewnić eksploatację prawidłowo działających elementów.

Obecnie w silnikach samochodów osobowych stosowane są dwa rodzaje wtryskiwaczy: pierwsze, wcześniej wprowadzone do eksploatacji, uruchamiane za pomocą zaworu z elektromagnetyczną cewką oraz drugie, których działanie następuje dzięki wykorzystaniu stosu płytek kwarcowych i zjawiska piezoelektrycznego [7, 10]. Jednak w przeważającej liczbie układów zasilania typu Common Rail aktualnie stosowane są jeszcze

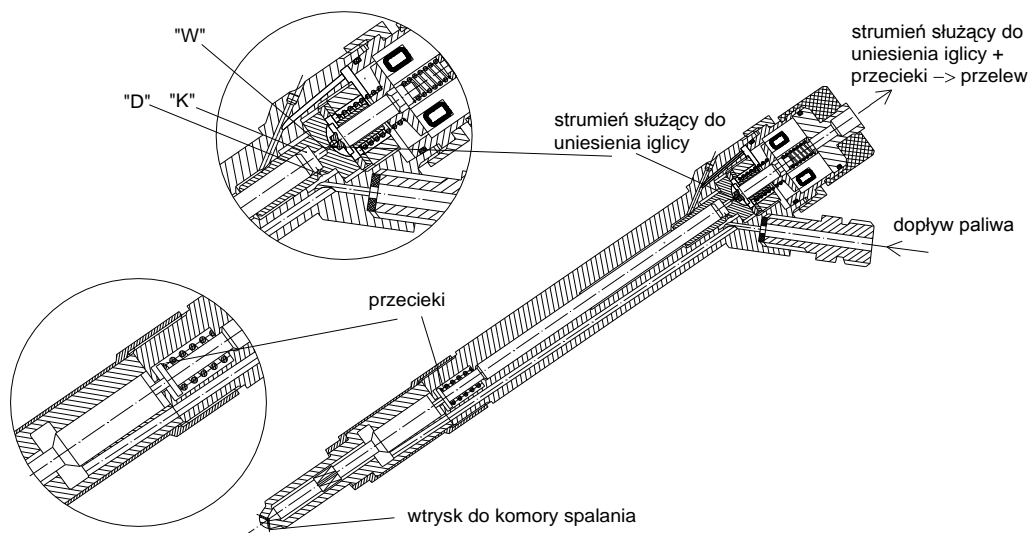
wtryskiwacze uruchamiane za pomocą elektromagnetycznego zaworu. Od początku swego zastosowania w pojazdach w 1997 roku, przez cały czas były rozwijane i doskonalone głównie po to, aby umożliwić wtrysk paliwa pod wysokim ciśnieniem, uzyskać możliwie krótki czas reakcji na zadane elektrycznie wymuszenie oraz zmianę natężenia wypływu paliwa z rozpylacza [5, 6, 8, 11].

## 2. Cel badań

Proces sterowania uniesieniem iglicy we wtryskiwaczach z cewką elektromagnetyczną odbywa się za pomocą szybkoprzełączalnego zaworu, zabudowanego w górnej części wtryskiwacza (rys. 1). Paliwo, dopływające pod wysokim ciśnieniem, dzieli się na dwa strumienie, z których pierwszy wpływając przez otwór „D” do komory sterującej „K” umieszczonej pod trzpieniem zaworu, po jego otwarciu, powoduje uniesienie iglicy. Oznacza to, że ta część paliwa zostaje rozprężona i przez otwór „W” razem z przeciekami powstałymi na powierzchniach współpracujących par precyzyjnych jest kierowana, przez przewody przelewowe, z powrotem do zbiornika paliwa. Na potrzeby artykułu nazwano ją skróconym terminem „przelew”.

Drugi strumień paliwa to dawka, która zostaje przez rozpylacz wtrysnięta do komory spalania silnika.

Do poniższych analiz wprowadzono również pojęcia „wtryskiwacze I i II generacji”. Wtryskiwaczami I generacji nazwano te, które były stosowane w pierwszych, po wprowadzeniu zasobnikowych układów zasilania, seriach produkcyjnych silników. Wraz z rozwojem układów zasilania, rozpoczęto montaż nowszych wtryskiwaczy, które umożliwiają realizację mniejszych czasów przerwy między częściami dawki. Te nazwano II generacją. Zagadnienie możliwości podziału na części nie jest przedmiotem niniejszych rozważań, dla których założono dwa cele. Pierwszym, poznawczym, była ocena różnic w dawkowaniu układu zasilania Common Rail, pracującego w pierw z wtryskiwaczami I, a następnie II generacji oraz oszacowanie ilości paliwa niezbędnej do uruchomienia wtryskiwaczy.



Rys. 1. Schemat wtryskiwacza z cewką elektromagnetyczną

Określono różnice wartości przelewu między prawidłowo działającymi wtryskiwaczami w różnych zakresach pracy systemu zasilania. Uwzględniono również konsekwencje realizacji sygnału sterującego przez niesprawny wtryskiwacz. Jednocześnie

podjęto próbę wyznaczenia wielkości przecieków paliwa w stosunku do wtryskiwanej dawki. Drugim celem, utylitarnym, było opracowanie propozycji kryterium diagnostycznego wtryskiwaczy uruchamianych za pomocą cewki elektromagnetycznej.

### 3. Obiekty badań i stanowisko badawcze

Obiektami badań były zarówno wtryskiwacze I jak i II generacji. Pierwsze z nich zasilają turbodoładowany silnik klasy 1700 cm<sup>3</sup> i posiadają 6 otworków o średnicy 0,15 mm. Z kolei wtryskiwacze II generacji służą do zasilania turbodoładowanego silnika klasy 1300 cm<sup>3</sup>. Posiadają 5 otworków o średnicy 0,13 mm [4].

Wszystkie wtryskiwacze były sterowane za pomocą tego samego, laboratoryjnego sterownika układu Common Rail KSSiP-2, zaprojektowanego i wykonanego w Akademii Techniczno-Humanistycznej. Parametry pracy były zadawane z poziomu komputera klasy PC. Ponadto, w skład badawczego stanowiska wchodziły:

- kompleksowo zmodernizowane na potrzeby badań zasobnikowych układów zasilania stanowisko probiercze Star-8, wyposażone m.in. w silnik elektryczny z falownikiem oraz zbiornik paliwa z układami: podgrzewania, chłodzenia i regulacji temperatury,
- pompa wysokiego ciśnienia o trzech tłokach, z dławieniową regulacją ciśnienia,
- zasobnik paliwa o objętości 20 cm<sup>3</sup>, stosowany w silniku o pojemności skokowej 1700 cm<sup>3</sup>,
- tor pomiarowy ciśnienia firmy AVL (tensometryczny przetwornik SDL-31, wzmacniacz A09) połączony z komputerem i oscyloskopem, umożliwiający pomiar ciśnienia w zasobniku.

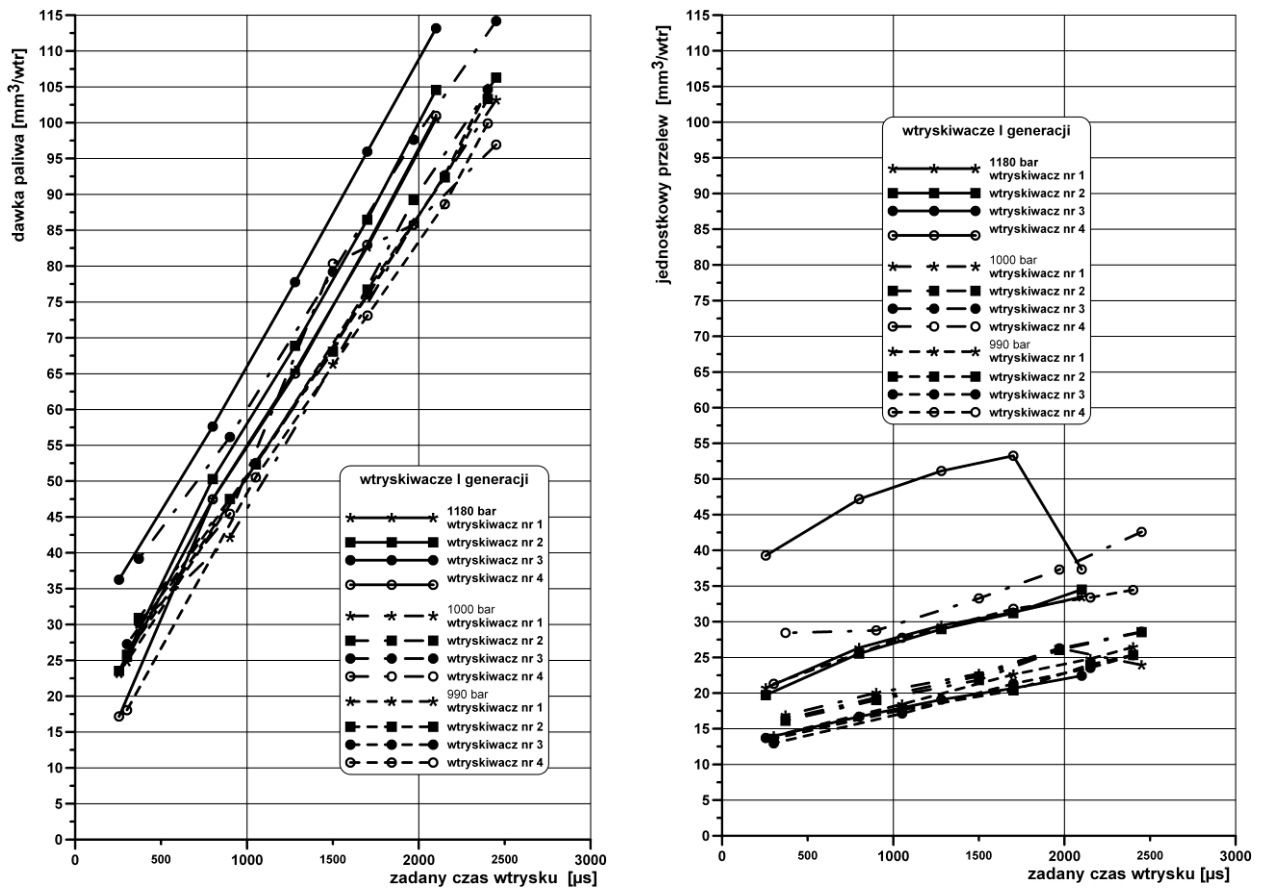
Podczas wykonywania stanowiskowych badań, układ wtryskowy pracował bez systemów stabilizacji ciśnienia i korekcji dawkowania.

W czasie pomiarów mierzono zarówno masy paliwa podawane przez poszczególne wtryskiwacze, jak i masy wypływające przez ich przewody przelewowe. Menzurki pomiarowe ważono na wadze elektronicznej typu WPE, wyprodukowanej przez Zakład Mechaniki Precyzyjnej RAD-WAG w Radomiu. Zarówno jednostkową dawkę wtrysniętego paliwa, jak i jednostkowe masy przelewu, obliczano jako wartość średnią z 250 cykli pracy wtryskiwaczy. Utrzymywano stałą temperaturę paliwa 40±2°C.

### 4. Charakterystyki dawkowania i przelewów wtryskiwaczy

W pierwszej kolejności, dla każdego z wtryskiwaczy I generacji, zmierzono dawki paliwa oraz (do osobnych menzurek) przelewy wypływające z przewodów nadmiarowych. Uruchomienie pomiaru oraz jego zakończenie każdorazowo następowało automatycznie, po odmierzeniu zadanej liczby cykli roboczych. Podawano jednoczęściowe dawki wtrysku. Wyniki pomiarów dawek, jak i przelewów, w zależności od zadanego czasu wtrysku i w odniesieniu do jednego cyklu, przedstawiono na rys. 2. Analizując przedstawione przebiegi można zauważyć, że jednostkowa dawka paliwa jest praktycznie liniowo zależna od czasu otwarcia zaworu sterującego wtryskiwaczem i rośnie wraz z jego zwiększaniem. Takie przebiegi charakterystyk sprawiają, że badane wtryskiwacze znakomicie nadają się do pracy w elektronicznie sterowanych jednostkach napędowych, gdzie sterowanie dawką wtrysku odbywa się przez zmianę czasu otwarcia zaworu sterującego wtryskiwaczami i ciśnienia wtrysku. Zastosowane wartości czasów dla wtryskiwaczy I generacji spowodowały, że przedstawione fragmenty charakterystyk wynikają z pracy iglic w niebalistycznym zakresie skoku, a więc po osiągnięciu maksymalnego wzniosu [1].

Inne przebiegi uzyskano dla niesprawnego wtryskiwacza nr 4. O ile przy ciśnieniu 990 bar otrzymuje się charakterystykę liniową, to przy niewielkim wzroście ciśnienia w zasobniku (do 1000 bar) uzyskuje się charakterystykę nieliniową, z istotnymi zmianami wartości.



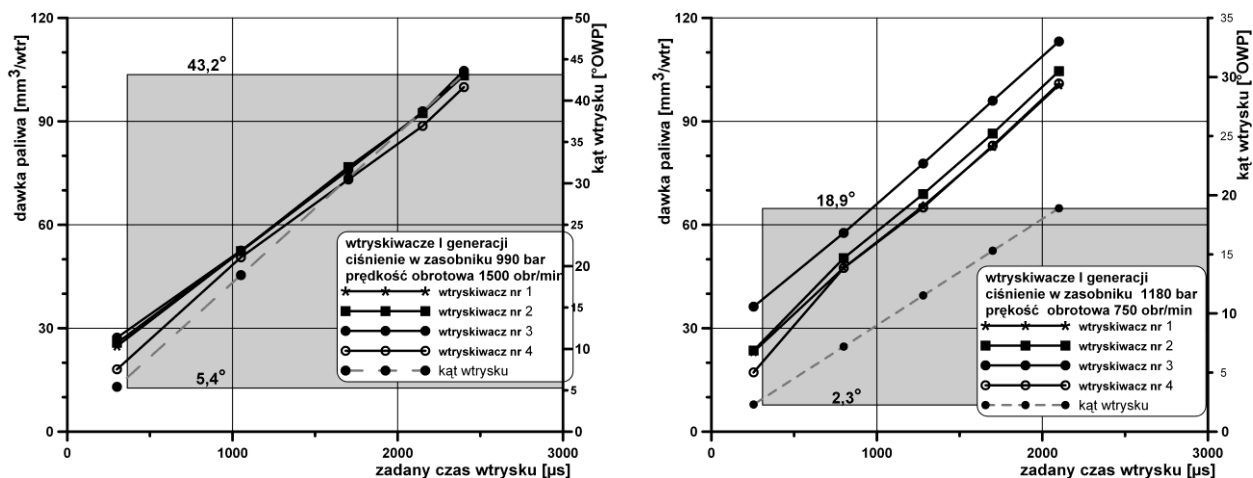
Rys. 2. Wartości dawek i przelewów wtryskiwaczy I generacji w zależności od zadanego czasu wtrysku

Rosną również wartości jednostkowych przelewów, tak że wzrostem czasu otwarcia, jak i ciśnienia w zasobniku, jednak osiągnęte przyrosty wartości są mniejsze niż w przypadku dawek. W większości przypadków zmiany następują nieliniowo.

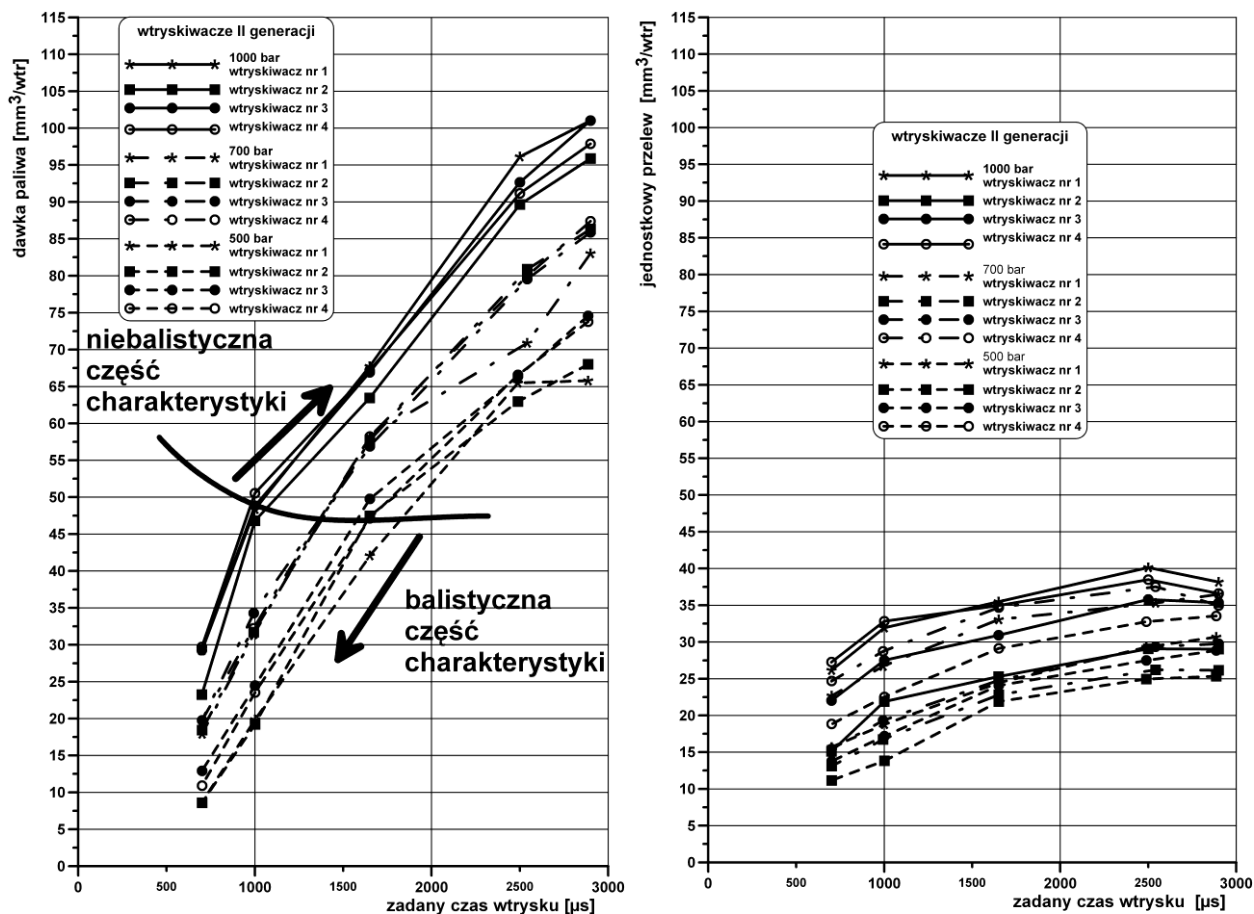
Zmierzone wartości przelewów wtryskiwacza nr 4 (dla rozważanych poziomów ciśnienia) są wyraźnie większe niż dla pozostałych. Istotne zmiany następują nawet przy niewielkich zmianach ciśnienia. Jest to widoczne zwłaszcza dla najwyższego ciśnienia, gdzie różnice osiągają prawie 100 %.

Jak już wspomniano, jedną z zalet zasobnikowego układu wtryskowego jest możliwość kształtowania parametrów pracy silnika przez zmianę parametrów wtrysku. Przykłady charakterystyk wtryskiwaczy pierwszej generacji, wykonane dla różnych ciśnień paliwa w zasobniku (990 i 1180 bar) oraz dwóch prędkości obrotowych pompy wysokiego ciśnienia (1500 i 750 obr/min) przedstawiono na rys. 3. Na wykresach dodatkowo naniesiono przerywanymi liniami oraz prostokątami szarego koloru zakresy zmienności kąta wtrysku. Kąty zostały przeliczone na stopnie obrotu wału korbowego hipotetycznego silnika. Pomiary wykonano w taki sposób, aby przy różnych parametrach pracy układu uzyskać zbliżone wielkości dawek paliwa. Widać, że jest możliwe podawanie tej samej wielkości dawki przy stosowaniu różnych parametrów wtrysku. Można, przy stosunkowo małym kącie wtrysku ( $2,3 \div 18,9^\circ$ ; rys. 3 prawa część), zadawać wyższe ciśnienie wtrysku w celu uzyskania lepszego rozpylenia, czyli dostarczać do cylindra większą ilość energii w krótkim czasie. Można też

stosować niższe ciśnienia wtrysku, lecz osiągane wtedy kąty są większe ( $5,4 \div 43,2^\circ$ ; rys. 3 lewa część), a dostarczanie paliwa jest w tym przypadku rozłożone na większą liczbę stopni obrotu wału korbowego. To, czy duże wartości kąta wtrysku zostaną wykorzystane przez projektanta silnika, pozostaje otwartą kwestią.



Rys. 3. Wartości dawek i kątów wtrysku dla wtryskiwaczy I generacji w zależności od zadanego czasu wtrysku



Rys. 4. Wartości dawek i przelewów wtryskiwaczy II generacji w zależności od zadanego czasu wtrysku

Przeprowadzono również pomiary dawkowania wtryskiwaczy II generacji. Podobnie jak wcześniej, wykonano je dla jednoczęściowych dawek wtrysku, a przedstawiono na rys. 4.

Można zauważyć, że zmiana ilości podawanego paliwa w zależności od czasu następuje z różną intensywnością. Obszar charakterystyki można podzielić na trzy części. Pierwsza, to najczęściej używany przy obciążeniach częściowych silnika, balistyczny zakres pracy wtryskiwaczy, aż do osiągnięcia przez iglicę maksymalnego wzniosu. Obejmuje przedział od 1000 do ok. 1700  $\mu\text{s}$ . Druga część, obszar niebalistyczny, gdy iglica już opiera się o zderzak, charakteryzuje się czasami do 2500  $\mu\text{s}$  i może być wykorzystany do zasilania silników przy dużych obciążeniach lub podczas rozruchu. Trzecia część to obszar, gdzie czasy otwarcia są większe od 2500  $\mu\text{s}$ . Mimo dużych wartości zadawanych czasów, nie zaobserwowano nadmiernego wzrostu temperatury wtryskiwaczy, pracowały one prawidłowo, jednak jak wynika z analizy serwisowych danych technicznych, w praktyce nie stosuje się czasów z tego obszaru.

Granice obszarów charakterystyki zależą w sposób istotny od ciśnienia paliwa. Przejście z balistycznego do niebalistycznego obszaru pracy następuje wcześniej przy wzroście ciśnienia. W przedstawionym przykładzie, przy ciśnieniu 1000 bar iglica osiąga zderzak już dla 1000  $\mu\text{s}$ , a przy mniejszym ciśnieniu (500 bar) - dla 1650  $\mu\text{s}$ . Dla precyzyjnego wyznaczenia granic obszarów należy wykonać pomiary dawkowania dla większej liczby punktów.

Omawianą grupę wtryskiwaczy cechuje mniejsza prędkość wzrostu wartości dawek w funkcji czasu otwarcia, niż w przypadku wtryskiwaczy I generacji. Dla tych samych wartości ciśnienia uzyskuje się ich mniejsze wartości. Wynika to z mniejszych czynnych powierzchni przekrojów wypływu stosowanych rozpylaczy.

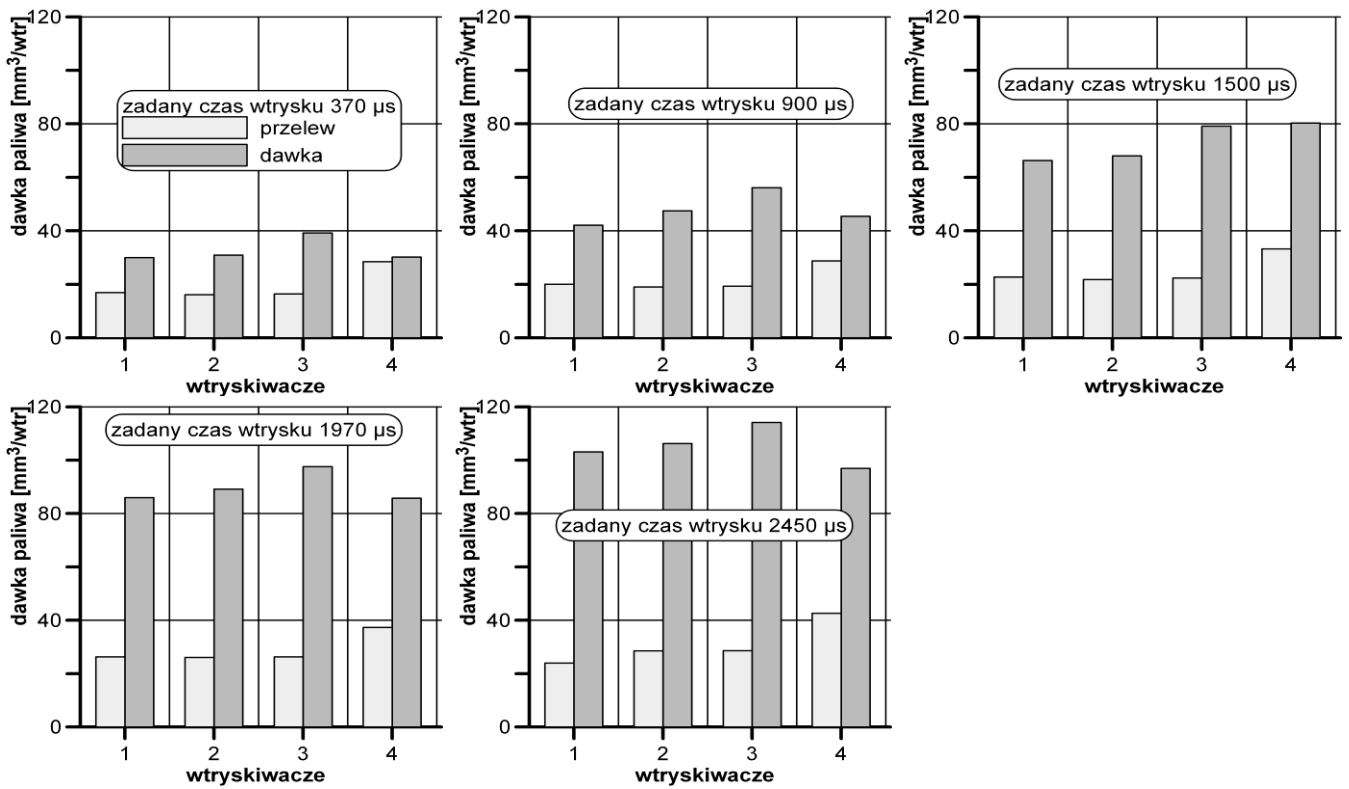
Podobnie jak w przypadku pierwszej grupy wtryskiwaczy, wartości jednostkowych przelewów rosną zarówno ze wzrostem czasu otwarcia, jak i ciśnienia w zasobniku. Prędkości wzrostu wartości są mniejsze niż w przypadku dawek i porównywalne do przelewów wtryskiwaczy I generacji. Daje się zauważyć podział charakterystyk na części, z podobnymi jak dla dawek wartościami granic przedziałów. Zmierzone wartości przelewów są większe od wartości uzyskanych dla I generacji.

## 5. Porównanie dawek i przelewów

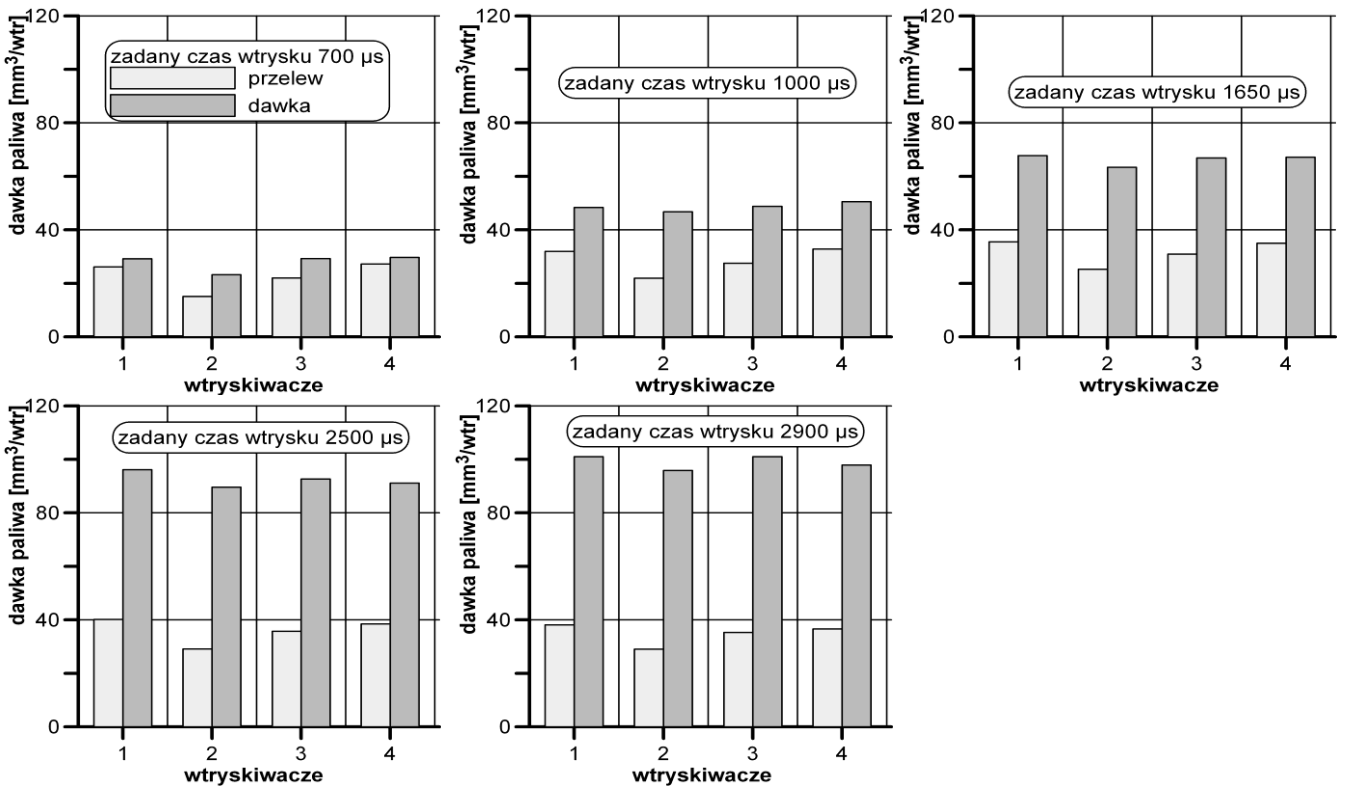
W celu bezpośredniego porównania i ilościowej oceny dawek paliwa i przelewów (wyrażonych w  $\text{mm}^3/\text{wtrysk}$ ) obu grup wtryskiwaczy, na rys. 5 i 6 przedstawiono te wielkości. Wybrano jedynie te punkty pracy, w których wtryskiwacze pracowały przy ciśnieniu w zasobniku 1000 barów. Zadawano różne wielkości czasów wtrysku.

Wartości przelewów wtryskiwaczy I generacji (dla nr 1, 2, 3) rosną wraz ze wzrostem wtryskiwanej dawki i zawierają się w przedziale od 16,1  $\text{mm}^3/\text{wtrysk}$  dla najkrótszego z czasów, do 28,6  $\text{mm}^3/\text{wtrysk}$  dla najdłuższego. W rozważanym zakresie pracy wtryskiwaczy przelewy zwiększają się o ok. 77 %. Zwraca uwagę bardzo dobra zgodność wartości dla trzech wtryskiwaczy – ich przebiegi praktycznie pokrywają się. Jednak dla niesprawnego wtryskiwacza nr 4 utrzymują się na większym poziomie (28,4÷42,6  $\text{mm}^3/\text{wtrysk}$ , przyrost o 50 %).

Przelewy wtryskiwaczy II generacji osiągają wartości od 11,1÷40,4  $\text{mm}^3/\text{wtrysk}$  (przyrost o 260%). Występują dość duże rozbieżności wartości, sięgające nawet 30 %. Przy zbliżonym poziomie dawkowania wtryskiwacze II generacji charakteryzują się większymi wartościami przelewów.



Rys. 5. Porównanie wartości dawek i przelewów dla wtryskiwaczy I generacji



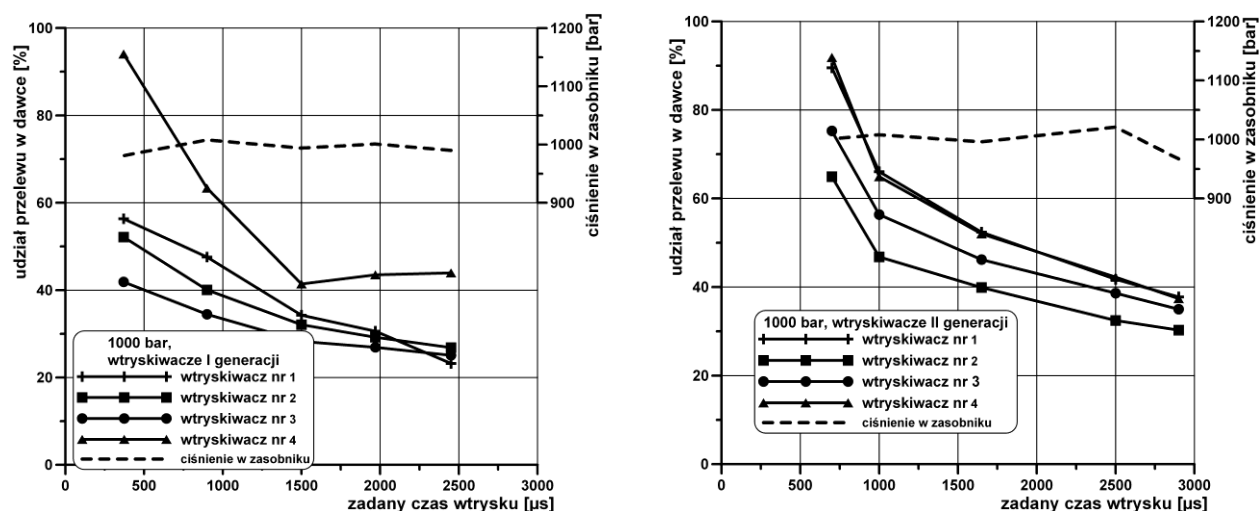
Rys. 6. Porównanie wartości dawek i przelewów dla wtryskiwaczy II generacji

Ta krótka analiza pozwala na stwierdzenie, że dla krótkich czasów otwarcia, zwłaszcza dla wtryskiwaczy II generacji, wielkości przelewów są porównywalne z wielkościami podawanych dawek. Świadczy to o stosunkowo dużej ilości energii, jakiej w tych przypadkach trzeba użyć, by zrealizować wtrysk paliwa. Przyrost wartości przelewów

następuje wolniej niż dawek, zatem udział energii koniecznej do zapewnienia pracy wtryskiwaczy maleje wraz ze wzrostem czasu wtrysku.

Powyższe rozważania spowodowały, że dla obu grup wtryskiwaczy, w oparciu o te same punkty pomiarowe, przeprowadzono analizę procentowego udziału przelewu w dawce. Określono go w każdym punkcie jako iloraz przelewu i dawki podawanego paliwa. Wyniki, w zależności od czasu otwarcia, przedstawiono na rys. 7. Dodatkowo, na wykresach przedstawiono wartości ciśnienia paliwa w zasobniku panujące podczas wtrysku.

Dla pierwszych trzech wtryskiwaczy I generacji udział przecieku w dawce maleje wraz ze wzrostem ich czasu otwarcia, natomiast dla czwartego udział ten początkowo maleje z 94% przy 370  $\mu$ s do 42% przy 1500  $\mu$ s, a następnie rośnie do 44% przy 2450  $\mu$ s. Z pozostałych trzech wtryskiwaczy największy spadek następuje kolejno: dla pierwszego (o 33%) z 56% do 23%, dla drugiego (o 25%) z 52% przy 370  $\mu$ s do 27% przy 2450  $\mu$ s oraz najmniejszy dla trzeciego wtryskiwacza, wynoszący 16% (z 41% przy 370  $\mu$ s do 25% przy 2450  $\mu$ s). Uznano, że wpływ zmian ciśnienia w zasobniku nie wpływał w istotny sposób na wyniki analizy.



Rys. 7. Porównanie udziału przelewu w dawce dla wtryskiwaczy I i II generacji

Z kolei dla wtryskiwaczy II generacji, dwie krzywe przedstawiające wartości udziału przelewu wtryskiwaczy nr 1 i 4, niewiele różnią się od siebie. Początkowo (dla 700  $\mu$ s) ich wartości to: 90% dla wtryskiwacza nr 1 oraz 92% dla wtryskiwacza nr 4, a dla największych czasów otwarcia (2900  $\mu$ s) wartość udziału dla obu wtryskiwaczy wynosi 37%. Zmiana udziału przelewu w dawce w całym rozpatrywanym zakresie zmian czasów otwarcia wynosi dla tych wtryskiwaczy odpowiednio 51% i 53%. Pozostałe dwie krzywe różnią się od siebie wartościami w każdym punkcie czasu otwarcia, od 10% przy 700  $\mu$ s do 6% przy 2900  $\mu$ s, a zmiany udziału przelewu w dawce następują od 75% do 36% dla trzeciego wtryskiwacza oraz od 65% do 30% dla wtryskiwacza nr 2. Wpływ zmian ciśnienia wydaje się nie być istotny.

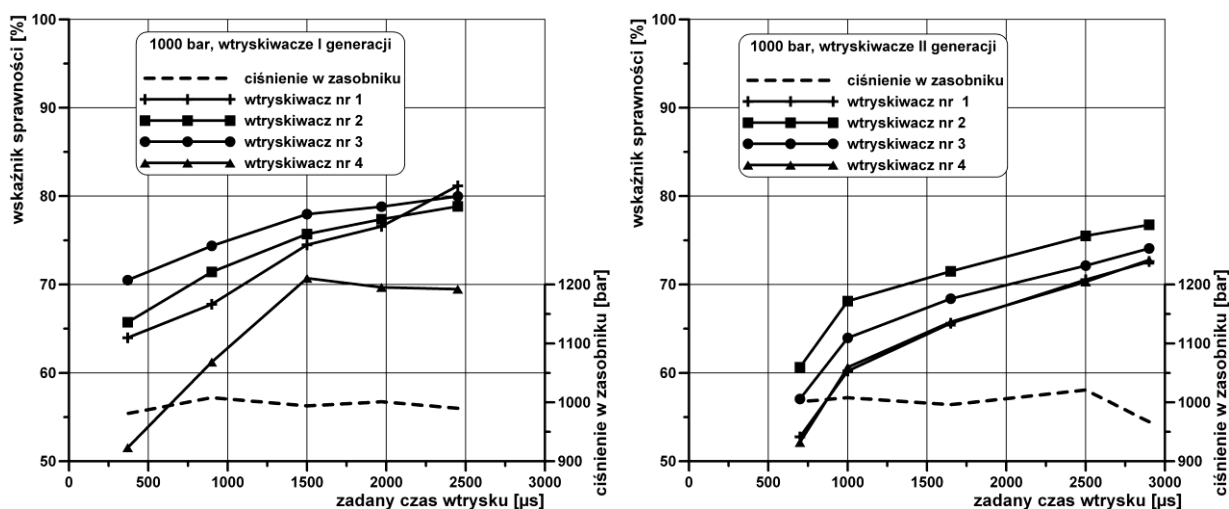
W całym analizowanym zakresie czasów otwarcia, udział przelewu w dawkach wtryskiwaczy II generacji jest większy niż dla wtryskiwaczy I generacji, oczywiście z wyłączeniem niesprawnego wtryskiwacza nr 4. Dla małych dawek sięga nawet 90 %. Znacząca jest intensywność zmian dla II generacji, zwłaszcza dla wtryskiwaczy 1 i 4 (od 90 % do 36 %). Przedstawione wartości mogą świadczyć o dążeniu konstruktorów do uzyskania krótkich czasów uruchamiania wtryskiwaczy II generacji, przez wytworzenie w nich większego (niż we wtryskiwaczach I generacji) strumienia paliwa, powodującego unoszenie iglicy. Przy tym samym ciśnieniu, ilość paliwa potrzebna do uniesienia iglicy jest w przybliżeniu stała, stąd silnie zmniejszający się udział przelewu przy zwiększaniu dawki.



Interesujące jest porównanie przebiegu udziałów przelewu wtryskiwaczy II generacji z przebiegiem wykreślonym dla niesprawnego, czwartego wtryskiwacza I generacji. Wartości i intensywność zmian są zbliżone. Stąd zastrzeżenie, że należy dochować staranności przy ewentualnym wykorzystaniu wspomnianych przebiegów do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy. Aby dokonać oceny, należy znać przebiegi odniesienia wykonane dla danego typu i prawidłowo działających wtryskiwaczy.

## 6. Wskaźnik sprawności wtryskiwaczy i różnice jednostkowych przelewów

Znaczny udział przelewów w dawce był powodem, dla którego autor wprowadził umowne pojęcie wskaźnika sprawności wtryskiwacza. Chodzi tutaj o ocenę, jaka część dostarczonego do wtryskiwacza paliwa jest podawana do cylindra silnika, a jaka zostaje rozprężona i jest kierowana z powrotem do zbiornika. Wskaźnik zdefiniowano jako iloraz jednostkowej dawki paliwa oraz sumy jednostkowego przelewu i dawki. Wyniki zestawiono na rys. 8. Dla obu grup wtryskiwaczy wartości wskaźnika rosną wraz ze wzrostem czasu otwarcia, czyli – z uwagi na stałe ciśnienie – ze wzrostem dawki. Trzy sprawne wtryskiwacze I generacji, w odniesieniu do II generacji, w całym rozpatrywanym zakresie pracy osiągają większe wartości wskaźnika. Najwyższe zanotowano dla wtryskiwacza nr 3, dla którego wskaźnik zmieniał się od 70 do 80 %. Czwarty, niesprawny wtryskiwacz, osiąga wartości od 52 % dla krótkich, do 72 % dla dłuższych czasów otwarcia. Są to wartości porównywalne lub nawet nieco większe od osiąganych przez wtryskiwacze II generacji, dla których, zwłaszcza przy krótkich czasach otwarcia, uzyskuje się jedynie od 52 do 60 %.



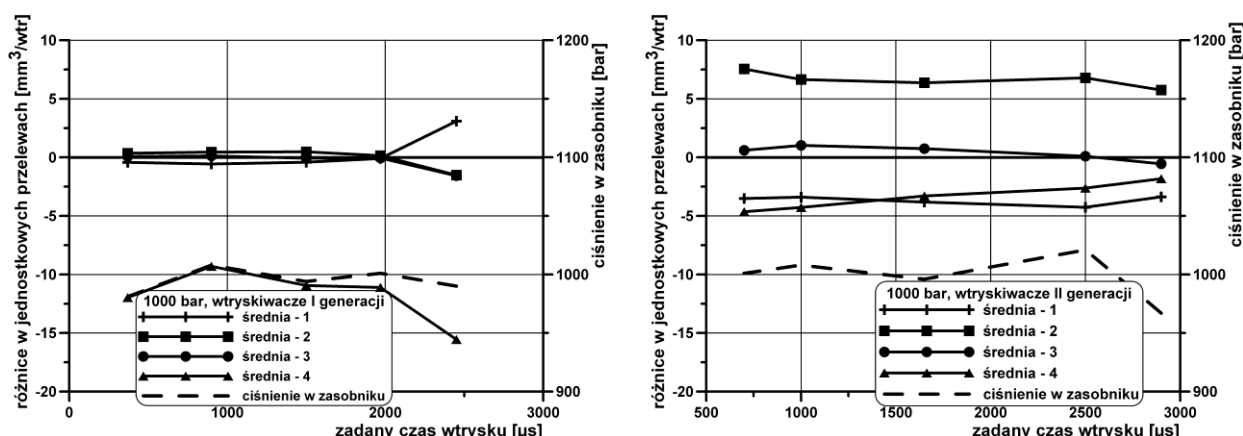
Rys. 8. Porównanie wskaźnika sprawności wtryskiwaczy I i II generacji

Przedstawione przebiegi potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia, o większych strumieniach paliwa używanych do uruchomienia wtryskiwaczy II generacji. Widać, że przy krótkich czasach otwarcia, w niektórych przypadkach nawet połowa paliwa dostarczonego do wtryskiwaczy pod wysokim ciśnieniem jest zawracana do zbiornika. Tak więc część energii, którą dostarczono do paliwa w celu zwiększenia ciśnienia jest tracona, co oczywiście zmniejsza sprawność układu wtryskowego.

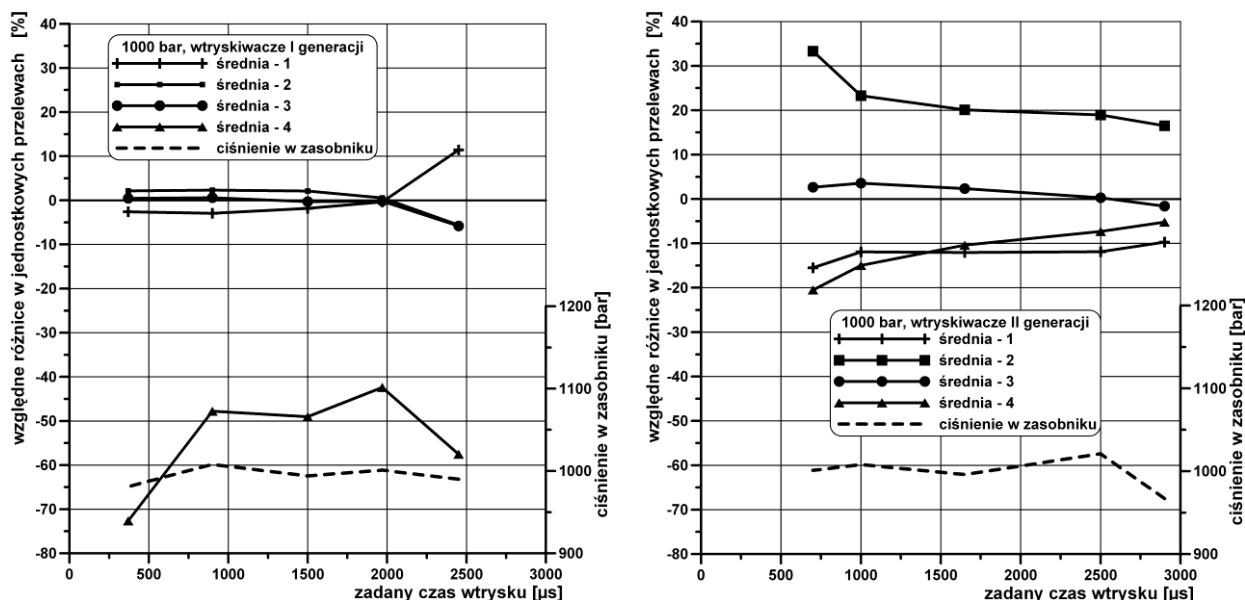
W toku dalszej analizy, dla obu generacji, w zależności od czasu otwarcia wtryskiwaczy, wyznaczono bezwzględne różnice (rys. 9) oraz procentowe różnice (rys. 10) w jednostkowych przelewach. Jako wartości odniesienia, osobno dla każdej grupy, przyjęto średnie wartości przelewów obliczone dla każdego z czasów otwarcia wtryskiwacza. Brano pod uwagę tylko prawidłowo działające wtryskiwacze. Zatem poszczególne ciągłe linie

przedstawiają (dla danego czasu) różnice między średnią wartością przelewu i danego wtryskiwacza (rys. 9) oraz (w procentach) ilorazy wspomnianych różnic i wartości średniej (rys. 10). Na rysunkach opisano je jako „średni – 1”, „średni – 2”, itp. Przerwanymi liniami wykreślono przebiegi ciśnienia w zasobniku.

Analizując wyniki uzyskane dla I generacji można zauważyć (rys. 9), że przebiegi dla trzech prawidłowo działających wtryskiwaczy są podobne, oscylują wokół zerowej wartości, a wręcz pokrywają się. Świadczy to o bardzo zbliżonych parametrach ich strumieni sterujących. Bezwzględne różnice nie przekraczają  $1 \text{ mm}^3/\text{wtrysk}$ , z wyjątkiem punktów pomiarowych o największej wartości zadanych czasów otwarcia wtryskiwaczy, gdzie osiągają  $3 \text{ mm}^3/\text{wtrysk}$ . Procentowe różnice (rys. 10) nie przekraczają 3 %, jedynie dla największych czasów przyjmują wartości z przedziału  $5,6 \div 11,4 \%$ .



Rys. 9. Porównanie różnic w jednostkowych przelewach dla wtryskiwaczy I i II generacji

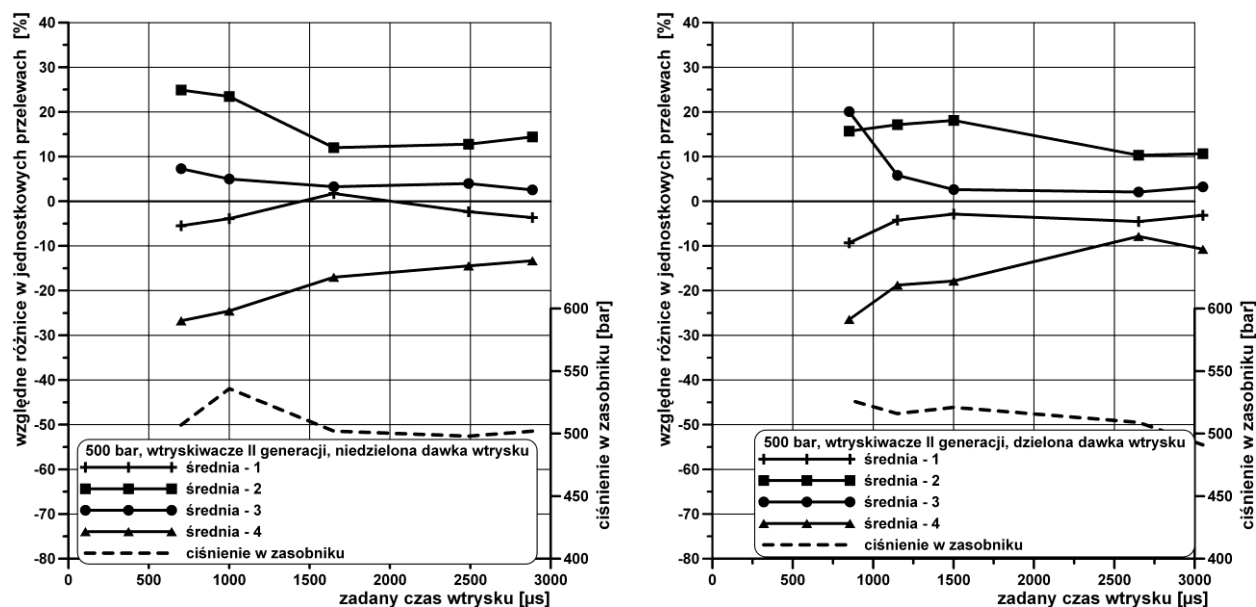


Rys. 10. Porównanie względnych różnic w jednostkowych przelewach dla wtryskiwaczy I i II generacji

Wyniki dla wtryskiwaczy II generacji są nieco odmienne. Od razu daje się zauważyć większy rozrzut przebiegów, choć wszystkie są praktycznie liniowe. Dla dwóch wtryskiwaczy różnice są większe, a dla dwóch mniejsze od średniej. Wtryskiwacz nr 2 najbardziej różni się od pozostałych. Jego przelewy są najmniejsze, dlatego też mają miejsce największe odstępstwa od średniej wynoszące około  $6 \text{ mm}^3/\text{wtrysk}$ . Względne procentowe różnice

przyjmują większe wartości: wtryskiwacze 2 i 3, o mniejszych wartościach przelewów, różnią się od średniej od 1,5 do 33 %, a pozostałe dwa, o większych przelewach od 2 do 15 %.

W oparciu o przedstawione analizy można stwierdzić, że bardziej właściwa jest ocena i porównywanie przelewów wtryskiwaczy w oparciu o względne procentowe różnice. Samo ujęcie ilościowe, jak również oparte o proste różnice względem obranego wzorca, nie wystarcza. Najlepiej widać to na przykładzie wtryskiwaczy II generacji, gdzie wyznaczenie względnych różnic ujawniło stosunkowo duże rozbieżności analizowanych wielkości.



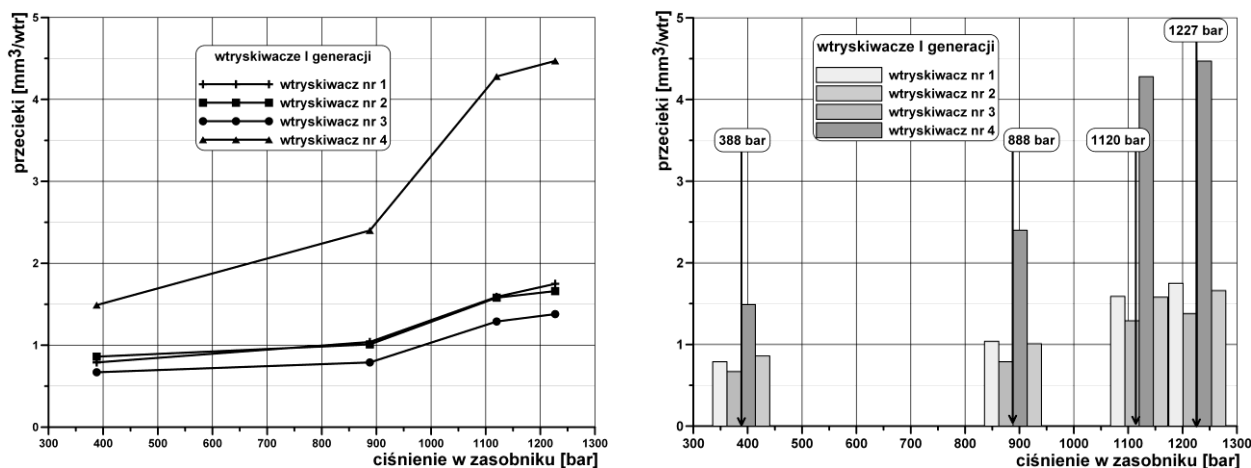
Rys. 11. Porównanie procentowych różnic w jednostkowych przelewach wtryskiwaczy II generacji dla niedzielonej i dzielonej dawki

Za pomocą przebiegów przedstawionych na rys. 11 starano się ocenić wpływ sposobu podania paliwa na wielkość różnic jednostkowych przelewów. W tym celu w pierwszej kolejności wykonano pomiary dla niedzielonej dawki, a ich wyniki przedstawiono po lewej części rys. 11. Następnie, zadawane uprzednio czasy wtrysku podzielono na dwie równe części, oddzielone przerwą 150  $\mu$ s. Wyniki tych pomiarów zestawiono po prawej części rys. 11. Stosowano wtryskiwacze II generacji. Obserwowane na obu wykresach wartości niewiele zmieniają się względem siebie. Niewielkie różnice mogą wynikać z przyjęcia stosunkowo małej wartości czasu przerwy, która spowodowała, że iglica przez cały czas pozostawała uniesiona. Tym samym nie była możliwa istotna zmiana wielkości przelewu. Zmiany ciśnienia nie wydają się mieć wpływu na przebiegi różnic.

W obu grupach pomiarów można zauważyć większe wartości różnic dla mniejszych wartości czasów, a mniejsze dla większych czasów. Prawdopodobnie wynika to z bardziej stabilnego, przy długich otwarciach wtryskiwacza, zachowania się iglicy podczas wtrysku.

Wobec stwierdzonych istotnych różnic w wartościach przelewu wtryskiwacza nr 4 w stosunku do innych wtryskiwaczy I generacji, postanowiono podjąć próbę określenia przyczyn ich występowania. Na przelewy, oprócz paliwa używanego do uruchamiania wtryskiwaczy, składają się również przecieki i dlatego należało je wyznaczyć dla rozważanej grupy wtryskiwaczy. Dla konwencjonalnych wtryskiwaczy, ocenę przecieków między powierzchniami prowadzącymi, wykonuje się najczęściej metodą spadku ciśnienia w czasie. W przypadku wtryskiwaczy układu Common Rail, dokładniejszy i wygodniejszy wydaje się być zastosowany w tej pracy bezpośredni pomiar, z wykorzystaniem całego, zabudowanego na stanowisku probierczym, układu wtryskowego. Przed rozpoczęciem pomiaru przecieków odłączono elektryczne przewody podające sygnały sterujące do cewki wtryskiwaczy. Dzięki

temu zawór sterujący pozostawał zamknięty i niemożliwy był przepływ paliwa przez komorę sterującą, a paliwo, wypływające nadmiarowymi przewodami, pochodziło tylko z przecieków. Zbierano je do menzurek pomiarowych. Równocześnie mierzono liczbę potencjalnych cykli pracy układu wtryskowego. Wielkość zmierzonych przecieków przedstawiono, podobnie jak dawkę i przelewy, w odniesieniu do jednego cyklu pracy.

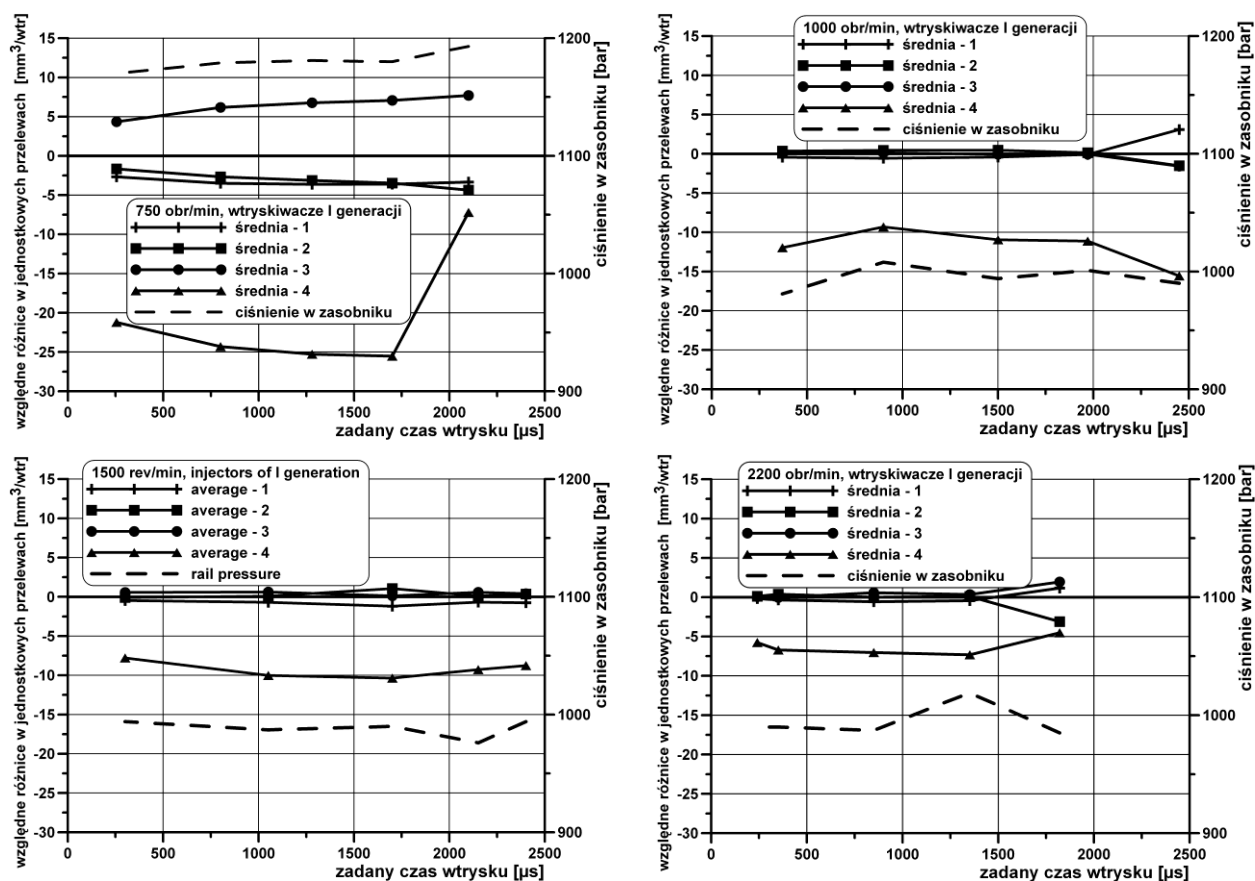


Rys. 12. Przecieki wtryskiwaczy I generacji w zależności od ciśnienia w zasobniku

W zasobniku utrzymywano wartości ciśnienia możliwie najbardziej zbliżone do stosowanych we wcześniej wybranych punktach pomiarowych. Stwarzało to pewne problemy, gdyż ciśnienie w zasobniku po odłączeniu wtryskiwaczy było bardzo niestabilne, a jego ustalenie i utrzymanie w czasie pomiarów na założonym poziomie wymagało wielu prób. Różne wartości ciśnienia uzyskiwano przez zmianę prędkości obrotowej i wydatku pompy wysokiego ciśnienia.

Na rys. 12, w zależności od ciśnienia w zasobniku, przedstawiono przecieki badanych wtryskiwaczy I generacji. Na wykresie liniowym widać, że wartości dla wtryskiwaczy nr 1 i 2 są bardzo zbliżone i zmieniają się od 0,8 mm<sup>3</sup>/wtrysk do 1,8 mm<sup>3</sup>/wtrysk. Wtryskiwacz nr 3 w całym zakresie zmian ciśnienia cechuje się najmniejszymi przeciekami, które wynoszą od 0,7 mm<sup>3</sup>/wtrysk dla 388 barów do 1,4 mm<sup>3</sup>/wtrysk dla 1227 barów. Natomiast dla wtryskiwacza nr 4 wartości przelewu zmieniają się od 1,5 mm<sup>3</sup> do niespełna 4,5 mm<sup>3</sup>, a więc zarówno przyrosty, jak i osiągnięte wartości są dużo większe niż dla pozostałych wtryskiwaczy. W celu wizualizacji różnic przecieków, te same wartości przedstawiono na wykresie słupkowym. W miarę wzrostu ciśnienia można zauważyć zwiększanie się ilości przeciekającego paliwa wtryskiwacza nr 1 względem wtryskiwacza nr 2, jednak różnica między nimi nadal pozostaje stosunkowo niewielka. Wartości przecieków czwartego wtryskiwacza są trzykrotnie większe od przecieków trzeciego wtryskiwacza.

Mogłoby się wydawać, że zwiększone przecieki czwartego wtryskiwacza wyjaśniają przyczynę istotnych rozbieżności w przedstawionych wcześniej przebiegach dotyczących wtryskiwaczy I generacji. Z pewnością wzrost przecieków powodował zmniejszenie podawanej dawki, choć trudno dokładnie określić w jakim stopniu. Jednak różnice między sprawnymi, a niesprawnym wtryskiwaczem są zbyt duże, aby je tłumaczyć tylko przeciekami. Źródłem odstępstw mogła być również niewłaściwa praca zaworu sterującego czwartego wtryskiwacza, spowodowana na przykład nieprawidłowym montażem lub mniejsza czynna powierzchnia przepływu rozpylacza.



Rys. 13. Porównanie różnic przelewów wtryskiwaczy I generacji w zależności od prędkości obrotowej

Jak wspomniano na wstępie, jednym z celów tej pracy było opracowanie propozycji kryterium diagnostycznego wtryskiwaczy zasobnikowych układów wtryskowych. Choć wcześniej oszacowano przelewy wtryskiwaczy, należało jeszcze ocenić jaki jest wpływ prędkości obrotowej pompy wysokiego ciśnienia na tę wielkość. Chodzi o odpowiedź na pytanie, czy testy wtryskiwaczy można wykonywać przy dowolnej prędkości obrotowej, czy też nie. Oczywiście w tych rozważaniach są istotne przecieki we wtryskiwaczach, a nie w pompie wysokiego ciśnienia.

Odpowiednie pomiary jednostkowych przelewów wykonano dla wtryskiwaczy I generacji. Na rys. 13 zestawiono ich wyniki, będące różnicą między wartością średnią dla trzech prawidłowo pracujących wtryskiwaczy, a wartością przelewu dla danego wtryskiwacza. Ponieważ podejrzewano, że prędkość obrotowa może wpływać na przecieki wtryskiwaczy, szczególną uwagę zwrócono na wyniki uzyskane dla wtryskiwacza nr 4. Wcześniej wykazano, że właśnie tym przypadkiem najwięcej paliwa przepływało przez luzy między powierzchniami prowadzącymi.

W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary w warunkach sprzyjających powstawaniu dużych wartości przecieków, czyli wysokiego ciśnienia paliwa i niskiej prędkości obrotowej pompy. Przyjęto 750 obr/min i dla niej zadawano ciśnienie większe niż dla pozostałych prędkości, bo wynoszące 1180 barów (przerywana linia). Uzyskano w ten sposób wyniki, stanowiące pewnego rodzaju wartości odniesienia dla przecieków, które można uzyskać w badanym układzie wtryskowym. Nie one były jednak przedmiotem szczegółowych rozważań. Dalsze pomiary prowadzono już dla jednakowych wartości ciśnienia w zasobniku 1000 barów (przerywane linie) i coraz większych prędkości obrotowych, wynoszących 1000, 1500 i 2200 obr/min.

Zwiększenie prędkości spowodowało zmniejszenie różnic jednostkowych przelewów. O ile zmiany dla prawidłowo działających wtryskiwaczy są niewielkie i można przyjąć, że mieszczą się w granicach błędów pomiaru, o tyle dla wtryskiwacza nr 4 są wyraźne. Dla niego przecieki między powierzchniami prowadzącymi par precyzyjnych maleją wraz ze wzrostem

prędkości obrotowej, nawet o 50 %. Ponieważ pomiary analizowanych przypadków zostały wykonane przy praktycznie stałych i jednakowych ciśnieniach paliwa, przyczyn tego zjawiska należy upatrywać w zwiększonej, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, częstości pracy wtryskiwaczy. Ona powoduje, że większy jest udział czasu, w którym występuje ruch iglicy i kiedy możliwe jest dynamiczne doszczelnienie tej pary precyzyjnej. Z powyższego wynika, że nie jest obojętne, przy jakiej prędkości obrotowej będą wykonywane testy sprawdzające. Przyjęcie zbyt wysokich prędkości może dać niewłaściwy obraz stanu wtryskiwacza.

## 7. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza wtryskiwaczy dwóch różnych generacji umożliwiła ich ocenę z punktu widzenia możliwości zastosowania w silniku o zapłonie samoczynnym. W tabeli 1, dla obu grup wtryskiwaczy, zestawiono maksymalne i minimalne wartości analizowanych wielkości. Wartości graniczne w nawiasach, umieszczone w polach szarego koloru, dotyczą uszkodzonego wtryskiwacza I generacji.

W oparciu o dokonaną analizę porównawczą oraz zestawienie wartości poszczególnych wielkości sformułowano uwagi końcowe.

Granice obszarów charakterystyk wtryskiwaczy zależą od ciśnienia paliwa. Przejście z balistycznego do niebalistycznego obszaru pracy następuje wcześniej, gdy w zasobniku panuje wyższe ciśnienie.

Biorąc pod uwagę analizowany zakres pracy wtryskiwaczy I generacji widać, że dla tej grupy zależność dawki wtrysku od zadanego czasu otwarcia pozostaje liniowa, praktycznie w całym rozpatrywanym zakresie. To umożliwia precyzyjne odmierzenie dawek paliwa, co jest istotne przy stosowaniu wielopunktowego wtrysku. Można również stosować algorytmy kompensacji małych dawek, konieczne z uwagi na zużywanie się układu podczas eksploatacji [5].

Tab. 1. Zestawienie porównywanych wielkości obu grup wtryskiwaczy

ilościowe zestawienie porównywanych wielkości	wtryskiwacze I generacji		wtryskiwacze II generacji	
	minimalna wartość	maksymalna wartość	minimalna wartość	maksymalna wartość
wielkość przelewu [mm <sup>3</sup> /wtrysk]	16,1	28,6 (42,6)	11,1	40,4
udział przelewu w dawce [%]	23,2	56,3 (94)	30,3	91,9
wskaźnik sprawności wtryskiwaczy [%]	64	81,2 (70,7)	52,1	76,8
bezwzględne różnice w jednostkowych przelewach [mm <sup>3</sup> /wtrysk]	-1,6	3,1 (-9,3)	-4,6	7,5
względne różnice w jednostkowych przelewach [%]	-5,6 (-72,6)	11,4	-20,5	33,3

Przebiegi analizowanych charakterystyk wtryskiwaczy II generacji są fragmentami liniowe, co może świadczyć o niepełnym otwarciu iglicy w początkowych fragmentach charakterystyk.

Wartości jednostkowych przelewów rosną zarówno ze wzrostem czasu otwarcia, jak i ciśnienia w zasobniku. Intensywność wzrostu jest mniejsza niż w przypadku dawek.

Zmierzone wartości przelewów są różne dla obu generacji. Większe uzyskano dla wtryskiwaczy II generacji. Dla tej też grupy szybciej rosną wraz ze wzrostem czasu otwarcia wtryskiwacza.

Ze wzrostem dawki maleje udział przecieków w dawce. Udział przelewu w dawkach wtryskiwaczy II generacji jest większy niż dla wtryskiwaczy I generacji. Dla małych dawek sięga nawet 90 %. Znaczna jest także prędkość zmian udziałów dla II generacji. Większe wartości przelewów mogą świadczyć o dążeniu do uzyskania krótkich czasów unoszenia iglicy wtryskiwaczy II generacji.

Przy tym samym ciśnieniu, ilość paliwa potrzebna do uniesienia iglicy jest w przybliżeniu stała, stąd silnie zmniejszający się udział przelewu przy zwiększaniu dawki. W oparciu o wspomniane przebiegi można dokonywać oceny stanu technicznego wtryskiwaczy, przy czym bardzo ważne jest, aby znać przebiegi odniesienia, wykonane przynajmniej dla kilkunastu danego typu prawidłowo działających wtryskiwaczy. Może się bowiem zdarzyć, że wyniki pomiarów dla sprawnych i niesprawnych elementów będą podobne, jak miało to miejsce dla wtryskiwaczy II generacji i wtryskiwacza nr 4 I generacji.

Dla obu grup, dla stałych wartości ciśnienia, wskaźnik sprawności rośnie wraz ze wzrostem czasu otwarcia. W całym rozpatrywanym zakresie wtryskiwacze I generacji osiągają większe wartości wskaźnika sprawności niż wtryskiwacze drugiej grupy. Wynika to z mniejszych ilości paliwa używanego do uruchomienia wtryskiwaczy.

Przy krótkich czasach otwarcia, blisko połowa paliwa dostarczonego do wtryskiwaczy pod wysokim ciśnieniem jest używana do ich uruchomienia. Maksymalna wartość wskaźnika sprawności sięgała 80 %.

Różnice między jednostkowymi przelewami odniesionymi do średniej wartości mogą wynikać z tolerancji wykonawczych cewek sterujących wtryskiwaczami, a więc różnych czasów reakcji cewek na impuls sterujący,

Dla wtryskiwaczy I generacji, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej pompy wysokiego ciśnienia, zmniejszają się różnice w wielkościach przelewów, zwłaszcza dla uszkodzonego wtryskiwacza. Spowodowane jest to zmniejszającym się udziałem przecieku w przelewie, którego wielkość jest zbliżona dla wszystkich wtryskiwaczy, Nie stwierdzono istotnego wpływu podziału dawki wtrysku na różnice w jednostkowych przelewach, odniesionych do średniej wartości. Może to wynikać z zastosowanego krótkiego czasu przerwy.

Przecieki paliwa, zmierzone dla prawidłowo pracujących wtryskiwaczy I generacji, zmieniają się od 0,67 mm<sup>3</sup>/wtrysk przy ciśnieniu 388 barów do 1,75 mm<sup>3</sup>/wtrysk przy 1227 barach. Dla niesprawnego czwartego wtryskiwacza, przyjmowały one wartości odpowiednio: od 1,49 do 4,47 mm<sup>3</sup>/wtrysk, a więc są od 120 do 150 % większe. Ich wartości są zależne od ciśnienia paliwa w zasobniku i prędkości obrotowej pompy wysokiego ciśnienia. Wzrost prędkości powoduje wzrost częstości pracy wtryskiwaczy, co zwiększa udział czasu, w którym jest możliwe dynamiczne doszczelnienie tej pary precyzyjnej.

Niskie wartości przecieków (jak np. we wtryskiwaczu nr 3) powodują zmniejszenie wielkości przelewów, a tym samym zwiększają wskaźnik sprawności. Dlatego, przy jakichkolwiek wątpliwościach dotyczących stanu technicznego wtryskiwaczy układu Common Rail, należy przeprowadzać zarówno pomiary przelewów, jak i przecieków.

Na podstawie wyników badań, w oparciu o przeprowadzone analizy, proponuje się przyjęcie następującej metodyki postępowania przy wyznaczaniu wartości kryterialnych i ocenie nowych wtryskiwaczy układów Common Rail, uruchamianych cewką elektromagnetyczną:

1. Wykonywanie pomiarów dla jednoczęściowej dawki wtrysku.
2. Wyznaczenie dwóch punktów pomiarowych przelewu i przecieków – jednego odpowiadającego parametrom pracy silnika na biegu luzem [3], drugiego odpowiadającego najniższej prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego.

3. Określenie kryterialnych wartości przecieków i przelewów dla danego typu wtryskiwaczy, w oparciu o wyniki pomiarów reprezentatywnej grupy co najmniej 20 wtryskiwaczy.

W praktyce, w oparciu o wyznaczone wartości kryterialne, w celu przeprowadzenia oceny eksploatowanych wtryskiwaczy, proponuje się następującą kolejność prac:

1. Wykonywanie pomiarów dla jednoczęściowej dawki wtrysku.
2. Pomiary przelewu w punktach pomiarowych; otrzymane wartości odniesione do kryterialnych wartości nie powinny różnić się o więcej niż 10%.
3. W przypadku uzyskania niejednoznacznych wyników, pomiar przecieków w wyznaczonych punktach pracy.

## Literatura

1. Bosch Robert GmbH. Diesel-Engine Management. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
2. Clever S, Isermann R. Signal- and Process Model-Based Fault Detection and Diagnosis of a Common Rail Injection System. FISITA 2008 World Automotive Congress, VDI/FVT, München, 2008-06-143.
3. Günther H. Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej: budowa, sprawdzanie, diagnostyka. Warszawa: WKiŁ, 2010.
4. Imarisio R, Giardina Papa P, Siracusa M. The New 1.3 L 90 PS Diesel Engine. Combustion Engines 2005; 3: 22-31.
5. Jorach R, Bercher I, Meissonnier G, Milovanovic N. Common-Rail-System von Delphi mit magnetventilen und Einkolben-Hochdruckpumpe. MTZ 2011; 3: 186-191.
6. Leonard R, Parche M, Alvares-Avila C, Krauß J, Rosenau B. Druckübersetztes Common-Rail-System für Nutzfahrzeuge. MTZ 2009; 5: 368-375.
7. Leonhard R, Warga J: Common-Rail-System von Bosch mit 2000 bar Einspritzdruck für Pkw. MTZ 2008; 10: 834-840.
8. Leonhard R, Warga J, Pauer T, Rückle M, Schnell M. Magnetventil-Common-Rail-Injektor mit 1800 bar. MTZ 2010; 2: 86-91.
9. Maier R, Projahn U, Krieger K. Anforderungen an Einspritzsysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Teil 1 MTZ 2002; 9: 658-673, Teil 2 MTZ 2002; 10: 856-860.
10. Schöppe D, Zülch S, Hardy M, Geurts D, Jorach R. W, Baker N. Common-Rail-Einspritzung mit Direct-Acting-Injektor von Delhi. MTZ 2008; 10: 842-851.
11. Wang X, Kikutani T, Takeuchi K, Nakane N. Development Toward "Diesel Revolution" Using Ultra High Pressure CRS with Closed-Loop Control System for Heavy Duty Engine. FISITA 2010 World Automotive Congress, GTE, Budapest, F2010-A-164.