

Mateusz Bor, Marek Idzior, Wojciech Karpiuk, Rafał Smolec

Możliwości rozwoju silników spalinowych z uwzględnieniem strategii downsizingu i rightsizingu

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.143

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

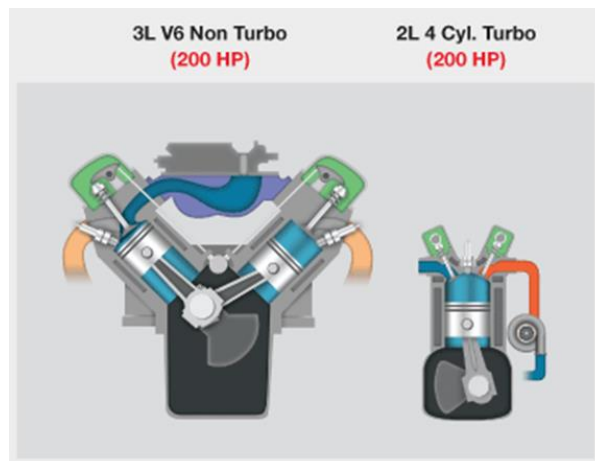
W artykule omówione zostały kierunki rozwoju ówczesnych silników spalinowych, wykorzystywanych w pojazdach samochodowych. Obowiązujące przepisy dotyczące dopuszczalnej emisji związków szkodliwych i toksycznych wymuszają na producentach pojazdów systematyczne zmniejszanie ich masy oraz polepszanie parametrów ekologiczno-ekonomicznych silników, w celu spełnienia rygorystycznych wymagań. Korzystne parametry użytkowe uzyskuje się poprzez wykorzystanie w konstruowaniu silników strategii downsizingu oraz rightsizingu. W ramach artykułu przedstawione zostały obie koncepcje konstruowania. Określono najważniejsze cechy silników downsizingowych i rightsizingowych, ich zalety oraz wady. Opisany został również kierunek dalszego rozwoju silników spalinowych, który cechuje wykorzystanie obu strategii projektowania.

Słowa kluczowe: downsizing, rightsizing, silnik spalinowy.

Wstęp

Układy napędowe w dobie obecnie obowiązujących norm emisji spalin, stale muszą przechodzić liczne zmiany konstrukcyjne, by móc te wymogi spełnić. Rozwijając je, producenci sprawdzają także wiele różnych alternatywnych rozwiązań. Wielu z nich zaczyna odwracać się od konwencjonalnych silników spalinowych, bądź łączy je z napędami elektrycznymi tworząc hybrydowe pojazdy. Toyota, która od wielu lat przoduje we wdrażaniu alternatywnych napędów do swoich pojazdów, zaprezentowała niedawno model Mirai napędzany ogniwami wodorowymi, co w przyszłości może być tak samo spopularyzowane, jak pojazdy hybrydowe. Nadal jednak większość producentów zostaje przy znanych i dopracowanych już niemal do perfekcji konstrukcjach spalinowych, gdyż jest to wciąż najpopularniejszy segment, jeśli chodzi o napędy pojazdów.

Konieczność uzyskania możliwie jak najbardziej korzystnych parametrów użytkowych, przy zachowaniu bardzo małego poziomu emisji niemal całkowicie wyparła z rynku silniki bez układów doładowania (rys.1). Zastosowanie turbosprężarki umożliwia odzyskanie części traconej energii cieplnej zawartej w spalinach, jednocześnie przenosząc zakres pracy w kierunku niższych prędkości obrotowych. Ponadto, ze względu na zwiększenie gęstości ładunku, możliwe stało się wykorzystanie silników o mniejszej pojemności skokowej, uzyskujących parametry zbliżone do silników o większej pojemności. Systematyczny rozwój układów doładowania umożliwił uzyskanie coraz większego sprężu, umożliwiając, przy poprawie konstrukcji silników – dalsze zwiększanie mocy uzyskanej z litra pojemności, lub też zmniejszanie pojemności skokowej przy zachowaniu parametrów użytkowych. Dlatego też obecnie w konstrukcji silników pojazdów dominują dwa trendy – downsizing oraz rightsizing, przy czym należy zaznaczyć, że pojęcie downsizingu pojawiło się nieco wcześniej, a rightsizing jest niejako odpowiedzią na bardzo drastyczne zmniejszanie ilości cylindrów silników oraz ich pojemności skokowej w ramach downsizingu [5].



Rys. 1. Zmiana koncepcji projektowania silników spalinowych [1].

1. Downsizing i rightsizing w silnikach pojazdów samochodowych

1.1. Downsizing

Literatura definiuje downsizing jako obniżenie pojemności skokowej silnika, nie zmniejszając przy tym wartości mocy oraz momentu obrotowego. Zakłada także przemieszczenie punktu pracy silnika w stronę niższych prędkości obrotowych (Rys.2). Mylnie twierdzi się, że silniki jedynie o niewielkich pojemnościach są efektem tej strategii budowania i projektowania silników. Oczywiście wyżej wspomniana niewielka pojemność jest subiektywną oceną, aczkolwiek jednostką objętą downsizingiem można nazwać np. 3-litrowy silnik, o ile zastąpił on dotychczasowy silnik o większej pojemności. Strategia ta jest już znana od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, lecz upowszechnienie w pojazdach takich rozwiązań jak turbodoładowanie, wtrysk bezpośredni w silnikach o zapłonie iskrowym, wtrysk Common Rail w jednostkach o zapłonie samoczynnym przyczyniło się do rozwoju silników budowanych w technologii „downsizingu” na przestrzeni ostatnich lat. Technologie te pozwalają na dużo lepsze wykorzystanie potencjału silnika, pomimo ograniczenia pojemności skokowej. Tym samym, dużą jednostkę można zastąpić mniejszą, równie dynamiczną, jednak cechującą się lepszymi parametrami ekologiczno-ekonomicznymi [5].

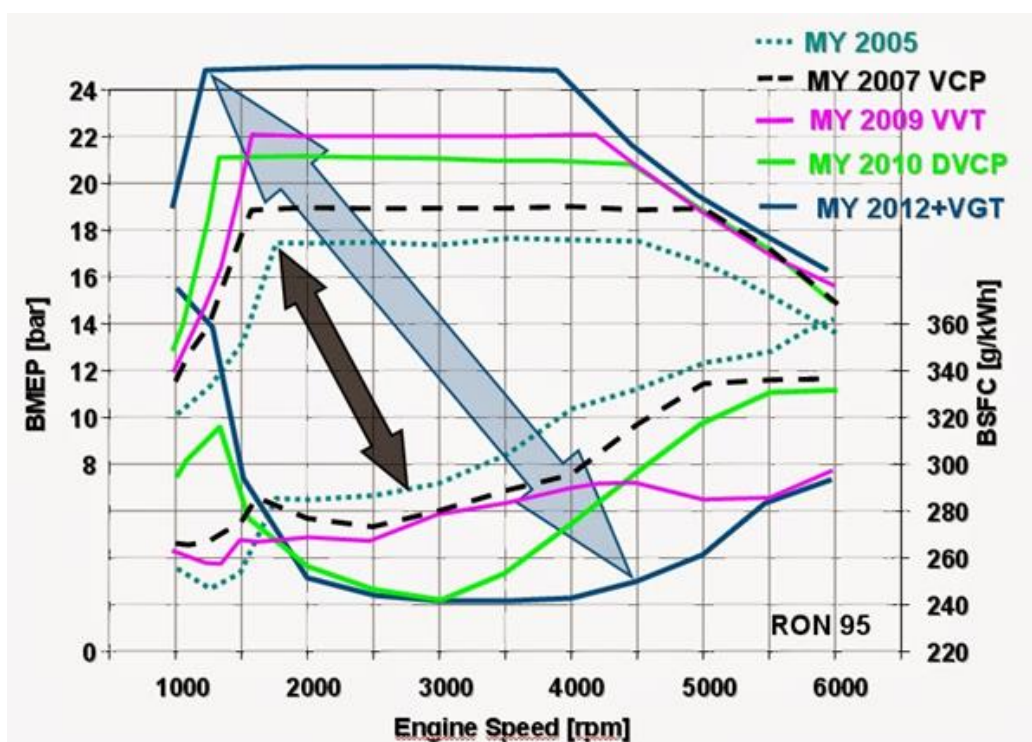
Downsizing podzielony jest na dwa zasadnicze rodzaje. Pierwszym z nich jest downsizing dynamiczny. Nazywa się przez to proces wyłączenia cylindrów w zależności od aktualnych warunków jazdy. Pozwala na chwilowe obniżenie objętości skokowej jednostki i ograniczenie zużycia paliwa. Poprzez „wyłączenie” cylindrów możliwe jest zmniejszenie zużycia paliwa do 5%. Po raz pierwszy dynamiczny downsizing zastosowano dla silników dużych pojemności, który miał za zadanie zredukowanie liczby cylindrów z dwunastu do sześciu oraz ośmiu do czterech. W miarę postępu technologicznego, rozwiązanie to zostało przeniesione również do niedużych, 4-cylindrowych jednostek. Chwilowe wyłączenie części cylindrów jest związane ze zmianami w sterowaniu pracy silnika. Ulega wtedy zmianie położenie przepustnicy, moment wtrysku mieszanki pali-

wowej i ką jej zapłonu. Wyłączenie danego cylindra zamyka zawór dolotowy i wylotowy. Drugim rozwiązaniem, związanym z fazą konstruowania i wytwarzania silnika, jest downsizing statyczny. Polega on na zmniejszeniu wymiarów fizycznych silnika [6]. Redukując ilość cylindrów lub ich wielkość, można uzyskać mniejszą pojemność skokową jednostki. Efektem takich zabiegów są m.in. mniejsze straty ciepłne, mniejsze tarcie oraz zmniejszone zużycie paliwa, nawet do 20%. Silniki, które mają mniejszą liczbę cylindrów, bądź mniejsze wymiary komory spalania, wyposażane są bardzo często w układy doładowania. Sprawia to, że mimo innych parametrów konstrukcyjnych, wskaźniki pracy jednostki są takie same lub lepsze, niż przed dokonaniem zmian. Istotne w strategii downsizingu są również względy ekonomiczne na etapie konstruowania silników [2]. Prowadzone od wielu lat badania wykazują, że koszt produkcji jednostki spalinowej o określonej wydajności można z powodzeniem zmniejszyć, minimalizując liczbę cylindrów, a następnie odpowiednio korygując rozmiary pozostałych cylindrów. Można to osiągnąć przez zastąpienie sześciocylindrowego silnika czterocylindrowym silnikiem o 1,5-krotnym powiększeniu pojedynczego cylindra. Oprócz zmniejszonego kosztu, wymagana przestrzeń montażowa i ciężar mogą być mniejsze, przy jednoczesnym osiągnięciu wyższej wydajności. Większe wydzielanie się hałasu oraz wibracji jednostki ze względu na większy interwał zapłonu i wartość siły bezwładności swobodnej drugiego rzędu można niemal w pełni zrównoważyć za pomocą dwumasowego koła zamachowego i wałków równoważących masy wirujące. Na czterocylindrowe silniki o pojemności skokowej nieprzekraczającej dwóch litrów, otwierają się bardziej niż potencjalne oszczędności wynikające z redukcji liczby cylindrów. Większy zakres mocy można pokryć wspólną średnicą cylindra, pozwalającą na modułowość i stosowanie wspólnych elementów, co prowadzi do unifikacji w całej gamie silników.

Przykładem silnika zbudowanego w technologii downsizingu może być konstrukcja ford EcoBoost 1.0 (rys.3). Ford 1.0 EcoBoost to niewielki, rzędowy silnik benzynowy z turbodoładowaniem i bezpośrednim wtryskiem paliwa o pojemności 1.0 litra. Jest to najmniejszy silnik Forda z rodziny EcoBoost. Został on po raz pierwszy

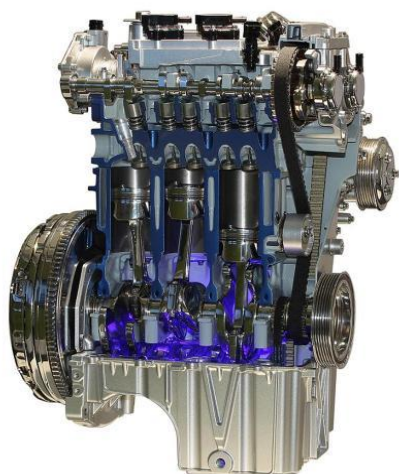
zaimplementowany w 2012 roku w Fordzie Focus i C-Max. Obecnie ta jednostka napędowa ma szeroki zakres zastosowań w większości pojazdów marki ford. Silnik dobrze pasuje do wielu typów pojazdów - od miejskiego Forda Fiesta w wersji hatchback do samochodu średniej wielkości, takiego jak Ford Mondeo (reprezentującego segment D). Ford wprowadził także wersję wolnossącą tej jednostki - silnik Fox 1l z bezpośrednim lub wielopunktowym wtryskiem paliwa. Silnik 1.0 EcoBoost ma blok cylindrów o konstrukcji otwartej, wykonany z żeliwa szarego. Blok żeliwny jest cięższy niż aluminium, ale redukuje ilość energii potrzebnej do rozgrzania nawet do 50%. Wał korbowy wykonany został również z żeliwa, posiada 6 przeciwcieżarów i 4 łożyska główne. Unikalne, niewyważone koło zamachowe i przednie koło pasowe pozwoliło zrezygnować z użycia wałka wyrównowazającego - bez niego silnik działa równie płynnie. Wewnątrz bloku silnika umieszczono odlewane aluminiowe tłoki o niskim współczynniku tarcia, a także kute korbowody. Inżynierowie Forda ulepszyli również układ smarowania, aby zwiększyć sprawność silnika. EcoBoost 1.0l jest wyposażony w elektronicznie sterowaną pompę olejową o zmiennym wydatku, która umożliwia obniżenie strat mechanicznych w zakresie niewielkich obciążeń.

Na szczycie bloku znajduje się 12-zaworowa głowica cylindra ze stopu aluminium. Kolektor wydechowy jest zintegrowany z głowicą cylindra, co obniża temperaturę gazów wydechowych i powoduje szybsze nagrzewanie silnika przy zimnym rozruchu. Dostępne są 4 zawory na cylinder - dwa po stronie wylotu i dwa po stronie dolotu. Mechanizm zaworu bezpośredniego działania mechanicznego (DAMB) wykorzystuje polerowane popychacze. Silnik ma napędzane paskiem wały rozrządu i wydechu (DOHC). Napęd pasków zębatych o niskim współczynniku tarcia z dynamicznym napinaczem zapewnia cichszą i bardziej wydajną o około 20% pracę dzięki niezawodności łańcucha. Producent gwarantuje bezawaryjną pracę paska rozrządu przez 10 lat lub 200 000 km. Silnik jest wyposażony w system zmiennych faz rozrządu Ti-VCT (Twin Independent Variable Camshaft Timing) oraz wysokociśnieniowy układ bezpośredniego wtrysku paliwa marki Bosch. Każdy cylinder ma 6-otworowy wtryskiwacz elektromagnetyczny, który wtryskuje paliwo bezpo-



Rys. 2. Ewolucja silników spalinowych w ramach downsizingu – obniżenie jednostkowego zużycia paliwa i przeniesienie punktów pracy w zakres niższych obciążeń [3].

średnio do komory spalania zasilanej przez wysokociśnieniową pompę paliwową. Maksymalne ciśnienie paliwa wynosi 150 barów. Jedną z rzeczy, która sprawia, że silnik EcoBoost jest bardzo wydajny, jest turbosprężarka. Wersja 1.0 ma chłodzoną cieczą turbosprężarkę firmy Continental. Powietrze dolotowe przechodzi do złożonego kolektora dolotowego poprzez chłodnicę powietrza doładowującego powietrze z dodatkowym wentylatorem elektrycznym. Sam silnik jest chłodzony przez podzielony układ chłodzenia z dwoma termostatami i dwoma obwodami. System ten obejmuje także elektryczną pompę wody, która służy do chłodzenia turbosprężarki, nawet gdy silnik jest wyłączony.



Rys. 3. Silnik Ford 1.0 Ecoboost [8].

Praca silnika jest zarządzana przez sterownik Bosch MED17 z magistralą CAN i indywidualnym kontrolowanym spalaniem stukowym dla każdego cylindra. W celu redukcji emisji spalin z silnika, umieszczono w nim układ katalityczny z reaktorem trójfunkcyjnym, o ściśle sprzężonym działaniu z podgrzewanym uniwersalnym czujnikiem tlenu i czujnikiem reaktora. Silnik spełnia normy emisji spalin Euro5, a w późniejszym czasie również Euro6. Silnik o pojemności 999 cm³ to najmniejszy i najbardziej zaawansowany silnik Ford

EcoBoost, otrzymał kilkakrotnie nagrodę International Engine of Year Award jako najlepszy silnik poniżej 1,0 litra. Łączy w sobie bardzo niską masę, wysoką wydajność i trwałość konstrukcji, która zapewnia odpowiednią moc, a jego wydajność pozwoliła rywalizować z tradycyjnym 1,6-litrowym silnikiem benzynowym.

1.2. Rightsizing

W przeciwieństwie do downsizingu, strategia ta dotyczy dostosowywania pojemności skokowej silnika do danego pojazdu. Efektem tego, samochód ma się odznaczać oszczędnością, a przy tym zachować odpowiednio wysoką dynamikę. Rightsizing rezygnuje z idei pomniejszania pojemności skokowej oraz liczby cylindrów za wszelką cenę w celu zmniejszenia zużycia paliwa. Silnik za to powinien być dopasowany swoją wielkością do gabarytów oraz klasy samochodu, co pozwoli mu utrzymać niskie zużycie paliwa, a co za tym idzie niską emisję związków toksycznych spalin. Tak samo, jak wspomniany downsizing, nowy trend również opiera się o pewne założenia, które składają się w spójną całość, powodując wymierne korzyści w postaci zmniejszonego zużycia paliwa oraz niższej emisji spalin. Pierwszym z nich jest stosowanie wysokiego stopnia sprężania. Ma on bardzo znaczący wpływ na moc jednostki napędowej i możliwość występowania zjawiska samozapłonu. Im wyższy stopień sprężania, tym większa wydajność energetyczna silnika. Występuje jednak pewna zależność, która mówi, że większy stopień oznacza zapotrzebowanie na paliwo o wyższej liczbie oktanowej. Przykładem silników rightsizingowych o wysokim stopniu sprężania może być seria silników Mazdy „Skyactive”. Silniki te cechuje stopień sprężania 14:1, który wymaga stosowania paliwa wyłącznie o wysokiej liczbie oktanowej. Zastosowanie tak dużego stopnia sprężania wymagało zastosowania istotnych zmian w obszarze komory spalania silnika (rys. 4).

Drugim z rozwiązań powszechnym w idei rightsizingu jest zastosowanie bezpośredniego wtrysku paliwa. Wtryskiwacz jest osadzony w cylindrze i podaje paliwo bezpośrednio do komory spalania. Jest to korzystne ze względu na możliwość szybkiej wymiany ładunku paliwowo-powietrznego nad powierzchnią tłoka. W dodatku paliwo bezpośrednio wtrzyknięte do komory spalania działa chłodząco na denko tłoka oraz ścianki cylindra, co pozwala na zwiększenie wartości stopnia sprężania w celu podniesienia sprawności silnika bez ryzyka wystąpienia spalania stukowego. Silniki z wtryskiem



Rys. 4. Porównanie konwencjonalnego tłoka silnika o ZI z tłokiem silnika o wysokim stopniu sprężania [8].

bezpośrednim pozwalają ponadto na spalanie bardzo ubogich mieszanek przy niewielkich obciążeniach po to, by osiągnąć możliwie jak najniższe zużycie paliwa. Niestety, wiąże się to również z koniecznością montażu odpowiednich układów oczyszczania spalin, gdyż spalanie takich mieszanek powoduje wzmożoną emisję tlenków azotu. Wtrysk taki przyczynia się również do powstawania depozytów w kanałach wlotowych przy cylindrach oraz na trzonkach ssawców.

Prekursorzy, tacy jak Mazda i Audi, w swoich konstrukcjach odchodzą od tradycyjnego cyklu Otto na rzecz cyklu Millera. Mazda już od wielu lat udoskonala ten obieg, stosując go po raz pierwszy w benzynowym sześciocylindrowym silniku 2.3 litra, modelu Xedos. Często cykl Millera nazywany jest piątym suwem pracy w silniku czterosuwowym. To, co charakteryzuje ten obieg, to otwarty przez pewien czas zawór ssący po pokonaniu przez tłok dolnego martwego położenia (DMP). Sprawia to, że część zassanego powietrza powraca do kolektora dolotowego, a proces sprężania nie wymaga aż tak dużego wydatku energii. Tym samym, suw pracy ulega zredukowaniu. Oznacza to, że tłok powoduje sprężanie ładunku tak, jak w silniku mniejszej pojemności skokowej, a suw rozprężania pracuje tak, jak w silniku charakteryzującym się większą pojemnością skokową. Energia potrzebna do wykonania suwu sprężania w tym cyklu jest znacznie niższa niż w cyklu Otta. Korzyści energetyczne przekładają się na osiągi, jak i na ekonomikę pracy – Xedos charakteryzował się osiąganiami porównywalnymi do 3-litrowych odpowiedników, spalając przy tym ilości paliwa odpowiadające zużyciu jednostek 2-litrowych [4].

Jednym z pierwszych silników zbudowanych w duchu rightsizingu jest seria Skyactive i silnik o pojemności 2.0, który został wprowadzony po raz pierwszy w 2011 roku (rys. 5). Silnik zawiera nietypowe dla tradycyjnych silników rozwiązania techniczne, które są od paru lat standardem w inżynierii Mazdy. Skyactiv-G bazuje na poprzedniku MZR 2.0 ze stopniem sprężania równym 10. Współczynnik dla tego silnika zwiększono do niestandardowych dla specyfiki silników benzynowych - 14. Zwiększenie stopnia kompresji zwiększa temperaturę i ciśnienie w cylindrze na końcu suwu sprężania i zapewnia wysoką sprawność i moc, ale także powoduje dużą skłonność do detonacji- wybuchowe spalanie mieszaniny powietrzno-paliwowej, co może spowodować przegrzanie i zniszczenie pierścieni tłokowych i tłoków. Aby chronić silnik przed tą awarią, silnik ma wbudowane w cewki zapłonowe czujniki jonowe. Są one bardziej czułe i umożliwiają lepszą kontrolę momentu pojawienia się detonacji w każdym cylindrze.

Silnik 2.0 SkyActiv-G ma blok stopu aluminium i aluminiowo-silikonową głowicę cylindrów. Posiada cieńszy wał korbowy, który jest o 690 gramów lżejszy od poprzednika. Silnik ma zoptymalizowany kształt i lżejsze tłoki i korbowody (127 gramów na cylinder). Na szczycie głowicy umieszczono podwójne górne wałki rozrządu, które napędzane są łańcuchem. Jest on automatycznie napinany za pomocą napinacza uruchamianego za pomocą ciśnienia oleju i sprężyny. Silnik ma cztery zawory na cylinder, uruchamiane przez wahacze z igłą w celu zmniejszenia tarcia, zamiast popychaczy kubelkowych w poprzedniku. Zaimplementowany został także w tym silniku system Dual S-VT (Dual Sequential Valve Timing), który zapewnia zmienną synchronizację zaworu dolotowego i wydechowego. Paliwo jest wtryskiwane bezpośrednio do komory spalania silnika.

2.0 SkyActiv-G. Oznacza to, że silnik Mazdy ma układ bezpośredniego wtrysku benzyny i pompę paliwa o wysokiej wydajności. Pompa paliwowa jest napędzana bezpośrednio przez wałek rozrządu wydechu. Układ ten zapewnia ciśnienie do 200 barów ze względu na wysoki stopień sprężania. Standardowe silniki benzynowe mają wartość ciśnienia około 115 barów. Silnik 2.0 SkyActiv-G

został wyposażony w układ wydechowy w konfiguracji kolektora wydechowego 4-2-1, co wpływa na zmniejszenie oporu, gdy gazy spalinowe opuszczają cylindry. Gazy wydechowe przechodzą dalej i tworzą falę rozrzedzającą, która ułatwia wylot z następnego cylindra. Oprócz zwiększenia mocy, zmniejsza to temperaturę w komorze spalania i prawdopodobieństwo wybuchu gazów.



Rys. 5. Silnik Mazda 2.0 Skyactive [8].

1.3. Wady i zalety down- oraz rightsizingu

Rightsizing, w przeciwieństwie do downsizingu, ma na celu odpowiednie dopasowanie wielkości jednostki napędowej do pojazdu, w której ma być umieszczony. Pozwalają na to pewne rozwiązania, które producenci zastosowali w swoich ówczesnych silnikach, by podnieść objętość skokową i zwiększyć sprawność. Te zamierzone działania spowodowały, że specyfika pracy takich jednostek różni się od tych, znanych już od dawna i wpisujących się w strategię downsizingu. Niosą one zarówno korzyści, które można odczuć w eksploatacji tych silników, jak również pewne wady, których nie da się obecnie uniknąć przy obecnym zaawansowaniu technicznym maszyn oraz doświadczeniu inżynierów. Istotną zaletą technologii rightsizingu jest możliwość uzyskania bardzo korzystnej charakterystyki zewnętrznej silnika, co jest cechą niemal wszystkich silników o większej pojemności skokowej. Ponadto, osiągnięta wysoka sprawność poprzez wysoki stopień sprężania oraz zastosowanie cyklu Millera sprawia, że silniki te cechuje stosunkowo niskie jednostkowe zużycie paliwa [4]. Możliwość stworzenia silnika spełniającego obecnie obowiązujące normy emisji spalin bez układu doładowania, jest również niewątpliwie korzyścią zarówno ekonomiczną na etapie procesu produkcji, jak i wpływającą na dalszy okres eksploatacji silnika. Z punktu widzenia eksploatacji silnika, na tle jednostek downsizingowych istotne jest również uzyskanie niskiego zużycia paliwa w zakresie dużych obciążeń jednostki. Małe silniki wyposażone w układ doładowania w zakresie dużych prędkości obrotowych i dużych obciążeń wymagają zmniejszenia współczynnika lambda, w celu zmniejszenia temperatury wewnętrznej komory spalania. Silnik wolnossący cechują niższe temperatury w komorze spalania przy porównywalnych parametrach, wobec czego możliwe jest uzyskanie niższego zużycia paliwa. Oczywiście jednostki te nie są wolne od wad. Poza zwiększoną masą silnika najbardziej istotnym problemem jest wysoka emisja tlenków azotu, wynikająca ze zwiększonego stopnia sprężania. Wobec tego konieczne jest stosowanie dodatkowych układów oczyszczania spalin, które powodują wzrost kosztów produkcji silnika oraz wzrost masy całego pojazdu.

Należy pamiętać, że silniki downsizingowe, pomimo wad związanych choćby ze skomplikowaniem konstrukcji, które pociąga za sobą większe koszty eksploatacji mają również szereg zalet, dlatego nadal chętnie są wykorzystywane przez producentów. Ich niska

masa oraz kompaktowe rozmiary umożliwiają zwiększenie przestrzeni pasażerskiej pojazdu lub też zastosowanie mocniejszej jednostki napędowej w małych pojazdach, poprzez zwiększenie mocy przypadającej na litr pojemności. Wydaje się zatem, że przyszłe konstrukcje silników będą niejako synergią dwóch powstałych trendów – downsizingu i rightsizingu. Doskonałym przykładem na potwierdzenie powyższej tezy może być najnowszy silnik doładowany grupy VAG – 1.5 TSi wykorzystujący cykl Millera (rys. 6). Jednostka ta w gamie zastępuje mniejszy silnik o pojemności 1.4 litra a także bardziej wysilone odmiany silnika 1.2. Stopień sprężania został zwiększony do 12,5, przy zachowaniu układu doładowania z chłodnicą wodną powietrza doładowanego. Po raz pierwszy w silniku o zapłonie iskrowym zastosowano turbosprężarkę o zmiennej geometrii łopatek, co było możliwe dzięki obniżeniu temperatury gazów wylotowych oraz wykorzystaniu innowacyjnych materiałów do produkcji łopatek zmiennej geometrii turbosprężarki. Zastosowanie zmiennej geometrii umożliwiło osiągnięcie jeszcze bardziej korzystnej charakterystyki zewnętrznej, poprzez przeniesienie punktu pracy w zakres niskich prędkości obrotowych. Dodatkowo, dalszą redukcję strat mechanicznych uzyskano poprzez zmianę technologii wykonywania gładzi cylindrycznej. Jej nowa struktura korzystnie wpływa na formowanie filmu olejowego, dając możliwość wykorzystania olejów o niskim indeksie lepkościowym, co przekłada się na zmniejszenie strat tarcia. Tak jak w poprzednich generacjach silników wykorzystany został system ACT umożliwiający odłączenie dwóch skrajnych cylindrów w zakresie niskich prędkości obrotowych i niewielkich obciążen silnika. Ciśnienie wtrysku zostało natomiast zwiększone do 330 bar, umożliwiając tym samym lepsze rozpylenie paliwa, co przekłada się bezpośrednio na jakość procesu spalania i jego produkty w spalinach. Kadłub oraz głowica zostały wykonane ze stopu aluminium, co pozwoliło na osiągnięcie niskiej masy całego silnika. Konstrukcja silnika ma zapewnić bardzo dobre parametry użytkowo-ekologiczne, a zużycie paliwa ma być zbliżone do silników o zapłonie samoczynnym. Wydaje się, że synergia powyższych rozwiązań jest obiecująca i pozwoli na osiągnięcie zamierzonych

parametrów silnika.

Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione dwa, nieco odmienne, nowoczesne podejścia do konstruowania silników. Jedno z nich ma na celu osiągnięcie jak największych wskaźników objętościowych, drugie optymalizację silnika przy zachowaniu danej pojemności skokowej lub jej nieznacznym zmniejszeniu. Każda z technologii ma swoje wady i zalety, zarówno na poziomie produkcyjnym jak i eksploatacyjnym. Jak wskazano, na obecnym etapie rozwoju szuka się rozwiązań kombinowanych, dających korzyści charakterystyczne dla jednej i drugiej technologii. Doskonałym przykładem jest tutaj silnik 1.5 TSi grupy VAG, który jak wykazano – korzysta z licznych rozwiązań down- oraz rightsizingowych. Wysoki stopień sprężania, zmiana cyklu pracy, zwiększenie pojemności skokowej w stosunku do poprzednika, nowoczesny układ doładowania z wykorzystaniem zmiennej geometrii łopatek to znak, że oba trendy w konstrukcji zaczęły się przenikać, a wykorzystanie zalet jednego i drugiego pozwoli na konstruowanie silników jeszcze bardziej przyjaznych dla środowiska, a zarazem cechujących się dobrymi parametrami użytkowymi.

Należy również pamiętać, że silniki spalinowe znajdują się obecnie w trudnym okresie rozwoju, ponieważ coraz większą konkurencję dla nich stanowią napędy alternatywne, szeroko rozpowszechnione pojazdy elektryczne czy też będące na etapie wdrażania pojazdy z napędem wodorowym. Dlatego też należy oczekiwać kolejnych ewolucji, prowadzących do dalszego ograniczania emisji oraz zużycia paliwa tak, aby silniki spalinowe nadal zachowały swoją konkurencyjność rynkową. Bardzo obiecująca wydaje się być wizja połączenia cykli pracy charakterystycznych dla silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym w ramach jednej jednostki napędowej. Firma Renault postuluje również powrót do cyklu dwusuwowego pracy silnika, co z kolei ma znacząco ograniczyć straty ciepłone, ze względu na zwiększenie ilości cykli pracy przypadających na obrót wału korbowego. Cechą łączącą najnowsze konstrukcje silni-



Rys. 6. Nowoczesny silnik grupy VAG 1.5 TSi wtkorzystujący rozwiązania downsizingowe oraz rightsizingowe [8].

ków będzie również duża unifikacja dla jednostek o zapłonie iskrowym i samoczynnym, szczególnie w obszarze bloku silnika, prowadząca do zmniejszenia kosztów produkcji i zwiększenia nakładu finansowego w obszarze badawczo-rozwojowym nowych silników.

Bibliografia:

1. Chinmay P., Sanjyot V., Swapnil W., A Review of Engine Downsizing and its Effects, International Journal of Current Engineering and Technology, Pune 2017.
2. Brzeżański M., Śliwiński K., Downsizing – nowy kierunek rozwoju silników samochodowych, Combustion Engines, Poznań 2014.
3. Bielaczyc P., Woodburn J., Current directions in LD powertrain technology in response to stringent exhaust emissions and fuel efficiency requirements, Combustion Engines, Poznań 2016.
4. Fraidl G., Kapus p., Melde H., Lösch S., Schöffmann W., Sogger, H., Weißbäck J., Variable Compression Ratio – in a Technology Competition, 37th International Vienna Motor Symposium 2016.
5. Kurczyński D., Łagowski P., Warianek M., Dąbrowski T., Wpływ współczesnych rozwiązań konstrukcyjnych silników o zapłonie samoczynnym na bezpieczeństwo ekologiczne ich stosowania, Bezpieczeństwo i Ekologia, Autobusy, Radom 2016.
6. Pielecha I., Cieślik W., Borowski P., Czajka J., Bueschke W., Reduction of the number of cylinders in internal combustion engines – contemporary trends in downsizing, Combustion Engines, Poznań 2014.
7. Rosenow J.: Downsizing silników – Nie za duży, nie za mały. Auto Expert Technika – Warsztat – Handel, Warszawa 2016.
8. www.autokult.pl – dostęp 15.02.19

Possibilities of development of internal combustion engines, including downsizing and rightsizing strategy

The article discusses the development directions of the then internal combustion engines used in automotive vehicles. The regulations in force regarding permissible emission of harmful and toxic compounds force the vehicle manufacturers to systematically reduce their mass and improve the ecological and economic parameters of engines in order to meet stringent requirements. Favorable application parameters are obtained through the use of downsizing strategies and rightsizers in the construction of motors. The article presents both conceptual concepts. The most important features of downsizing and rightsizing engines, their advantages and disadvantages were determined. There is also described the direction of further development of internal combustion engines, which is characterized by the use of both design strategies.

Keywords: downsizing, rightsizing, combustion engine.

Autorzy:

mgr inż. **Mateusz Bor** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Zakład Silników Spalinowych,
prof. dr hab. inż. **Marek Idzior** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Zakład Silników Spalinowych,
dr inż. **Wojciech Karpiuk** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Zakład Silników Spalinowych,
mgr inż. **Rafał Smolec** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Zakład Silników Spalinowych,