

## NOWOCZESNE ROZWIĄZANIA STOSOWANE W SILNIKACH MOTOCYKLOWYCH

*W artykule omówione zostały tendencje rozwojowe oraz stosowane obecnie rozwiązania w nowoczesnych silnikach motocykli. Mniej rygorystyczne normy emisji spalin, oraz inne przeznaczenie silników są przyczyną znacznych rozbieżności konstrukcyjnych pomiędzy silnikami motocykli a pojazdami samochodowych. Wzrost zamożności społeczeństwa przyczynia się do zwiększenia popularności pojazdów jednośladowych, co jednocześnie niesie za sobą konieczność optymalizacji ich konstrukcji, w celu spełnienia wysokich wymagań odbiorcy.*

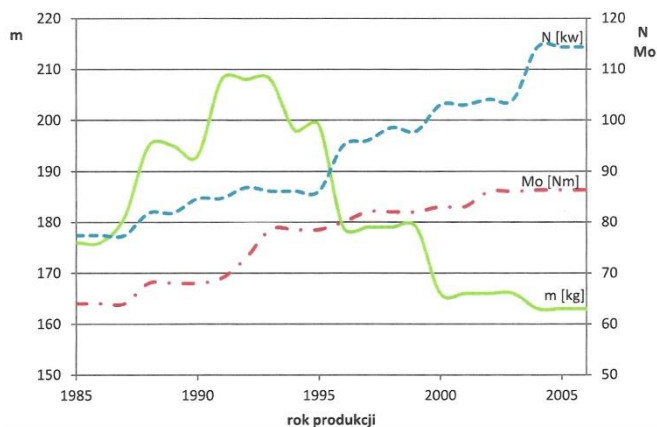
### WSTĘP

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat można zaobserwować znaczną zmianę charakteru użytkowania pojazdów motocyklowych. Jednoślady te, szczególnie w okresie międzywojennym i powojennym stanowiły podstawowy środek transportu, niezbędny w codziennym życiu. Przyczyną takiego stanu rzeczy była znacznie większa dostępność motocykli, ze względu na niższą cenę w odniesieniu do samochodów osobowych. Dziś motocykl w dużej mierze pełni rolę rekreacyjną, co wpływa na znaczne obniżenie przeciętnych przebiegów, zatem parametr trwałości i ekonomiki nie jest najważniejszy. Ze względu na stosunkowo nieduży udział motocykli w ogólnej emisji związków szkodliwych i toksycznych, jak i trudności z zastosowaniem rozbudowanych układów oczyszczania spalin, w przypadku badań homologacyjnych motocykli obowiązują znacznie mniej rygorystyczne normy emisji spalin. Obecna norma Euro 4 zostanie zastąpiona normą Euro 5 w 2020 roku [2].

Silniki spalinowe stosowane do napędu współczesnych motocykli, mimo licznych podobieństw, w znacznym stopniu odbiegają od konstrukcji stosowanych w samochodach. Podstawowe przyczyny takiego stanu rzeczy są efektem fizycznych uwarunkowań związanych z konstrukcją i charakterem ruchu pojazdu. Gabaryty motocykli są niewielkie, co wymusza stosowanie silników o niewielkich wymiarach i masie. Przeciętny zespół napędowy o masie około 60 kg stanowi średni 1/3 masy całego pojazdu. Sam ruch motocykla determinuje natomiast małe wymiary konstrukcji. Jazda motocyklem po łuku wymaga pochylecia go w zakręcie, a zatem zbliżenia elementów jego konstrukcji do nawierzchni. Taka specyfika ruchu wymaga stosowania silników o niedużej szerokości. Najważniejsze cechy obecnie stosowanych silników do napędu motocykli to :

- zablokowanie silnika ze skrzynią biegów i sprzęgłem we wspólnej, kompaktowej obudowie. Często w tej samej obudowie pracuje również osprzęt silnika – np. alternator,
- zakres użytecznych prędkości obrotowych silników od prędkości obrotowej biegu jałowego (ok. 1200 obr/min), do nawet 18000 obr/min; co w połączeniu z tendencją do redukcji masy pojazdów przyczynia się do zwiększenia ich mocy oraz momentu obrotowego (rys. 1),
- niemal całkowita dominacja silników ZI w produkcji seryjnej. Autorem znane są dwa przypadki seryjnej produkcji motocykli z silnikami ZS: Produkowany w Indiach Royal Enfield Diesel, oraz JP8 Diesel - produkowany dla armii Stanów Zjednoczonych na

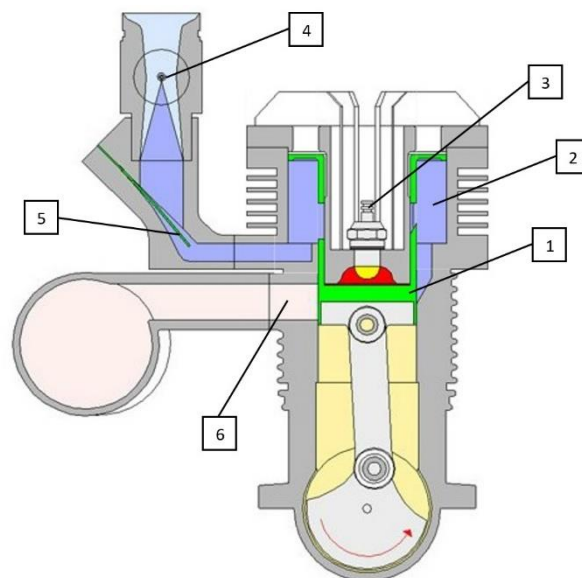
- bazie Kawasaki KLR650 motocykl firmy HDT. Są to jednak wyjątki potwierdzające regułę,
  - niezależne zasilanie każdego cylindra. W przypadku zasilania gaźnikowego – silniki zasilane były baterią kilku gaźników, wymagających uciążliwej synchronizacji. W układach zasilanych wtryskowo każdy cylinder posiada własny zestaw przepustnic, również wymagających okresowej regulacji, w celu utrzymania jednakowych wartości podciśnień w kanałach ssących. Wspólne zasilanie wielu cylindrów w praktyce współcześnie nie występuje, historycznie zasilane w ten sposób były przede wszystkim motocykle w układzie przeciwsobnym (tzw. „boksery”) produkowane głównie przez BMW, oraz ich radzieckie kopie,
  - niemal całkowitą dominację silników wolnossących. Historycznie, na przełomie lat 70 i 80tych XX wieku produkowanych było kilka modeli wyposażonych w doładowanie, takich jak Honda CX650 Turbo, Kawasaki GPZ750 Turbo czy Yamaha XJ650 Turbo, nie spotkały się one jednak z uznaniem nabywców, głównie ze względu na niekorzystną charakterystykę doładowanych silników, wysoką cenę i pogorszoną niezawodność. Ze względu na niewielką popularność w latach wytwarzania stanowią one obecnie obiekt poszukiwań kolekcjonerów,
  - niemożność rozpatrywania silnika w oderwaniu od podwozia. W większości obecnych jednośladów blok silnika jest elementem nośnym podwozia, w którym łożyskowane są wahacze koła tylnego (w przypadku min. BMW również elementy zawieszenia koła przedniego), i do którego mocowane są ramy pomocnicze – np. wspornik siodła kierowcy – i inne urządzenia. W przeciwieństwie do samochodów, w których w obrębie jednego modelu możliwa jest zabudowa całej gamy jednostek napędowych, w motocyklach nie jest to – poza pojedynczymi wyjątkami - możliwe.
- Typową jednostką motocyklową jest zatem czterosuwowy, wolnossący silnik o zapłonie iskrowym, zabudowany we wspólnej obudowie ze skrzynią biegów i sprzęgłem, chłodzony cieczą. Dodatkowo jest to silnik wielocylindrowy, o liczbie cylindrów od 2 do 4, najczęściej w układzie rzędownym lub widlastym, o objętości skokowej od 0,5 do 1 dm<sup>3</sup> i nadkwadratowym stosunkiem średnicy cylindra do skoku tłoka. Zdecydowanie dominują czterocylindrowe jednostki w układzie rzędownym, zabudowane w poprzek osi wzdłużnej motocykla.



**Rys. 1.** Wykres zmian masy, mocy i momentu obrotowego dla kolejnych generacji motocykla Suzuki GSX-R 750

Warto wspomnieć, iż rozwój silników motocyklowych niemal całkowicie wyparł z rynku jednostki dwusuwowe. Przez wiele dziesięcioleci stanowiły one podstawowe źródło napędu motocykli lekkich. Niekorzystny wpływ na środowisko naturalne, związany ze spalaniem oleju smarującego, oraz stosunkowo wysokie zużycie paliwa, w odniesieniu do jednostek czterosuwowych spowodowały wyparcie silnika dwusuwowego z rynku. Obecnie jednostki te spotyka się w nielicznych konstrukcjach o pojemności skokowej nie większej niż 50 cm<sup>3</sup>. W ostatnich latach pojawiło się wiele koncepcji nowoczesnego silnika dwusuwowego, dających potencjał ponownego wykorzystania go nie tylko do motocykli, ale i do pojazdów samochodowych. Dąży się do stworzenia silnika, w którym układ smarowania będzie bazował na koncepcji znanej z silników czterosuwowych, a cykl spalania będzie realizowany co każdy obrót wału korbowego. Bilans energetyczny takiego silnika jest bardziej korzystny niż klasycznej jednostki czterosuwowej. Przykładem nowoczesnej koncepcji silnika dwusuwowego może być silnik „JJ2S”, którego schemat przedstawiono na rysunku 2.

W odróżnieniu od klasycznego silnika dwusuwowego w koncepcji JJ2S wstępną komorę, w której następuje sprężanie mieszanki umieszczono w cylindrze. Jej funkcję stanowiła dotychczas skrzynia korbową. W trakcie suwu pracy górna część tłoka (1) wytwarza podciśnienie, które otwiera zawór membranowy (5) umożliwiając zassanie mieszanki do komory sprężania wstępnego (2). Ruch tłoka w dół, wywołany spalaniem mieszanki jest przyczyną powstania nadciśnienia w komorze, co powoduje zamknięcie zaworu membranowego, a następnie sprężanie czynnika. Jednoczesne otwarcie kanału wydechowego (6) i okien płuczących powoduje wypchnięcie z przestrzeni nadtłokowej gazów spalinowych poprzez wpływającą mieszankę. Podczas ruchu tłoka następuje sprężanie jej w komorze spalania, połączone z zasysaniem świeżego ładunku do komory sprężania wstępnego. W przypadku takiego silnika wykonanie tłoka jest znacznie bardziej skomplikowane, gdyż zarówno jego geometria, jak i konieczność zachowania dobrej szczelności wymagają fachowej obróbki i wykorzystania odpowiednich materiałów. Korzystną cechą takiego rozwiązania jest możliwość zwiększenia stopnia doładowania silnika za pomocą zmiany objętości (średnicy) komory sprężania wstępnego. Wspomniana konstrukcja jest działającym prototypem silnika, niemniej jak już wspomniano udział silników dwusuwowych jest obecnie ograniczony i dlatego też w ramach artykułu zostaną poruszone rozwiązania stosowane w napędach czterosuwowych. Ze względu na mniejszy rozwój, ograniczający się zasadniczo do zmian materiałów oraz wykorzystania dodatkowych elementów wyważających, w artykule nie opisano szerzej rozwoju w zakresie układów korbowo-tłokowych.



**Rys. 2.** Schemat budowy nowoczesnego silnika dwusuwowego „JJ2S”: 1 – tłok, 2 – komora sprężania wstępnego, 3 – świeca zapłonowa, 4 – wtryskiwacz, 5 – zawór membranowy, 6 – kolektor wydechowy

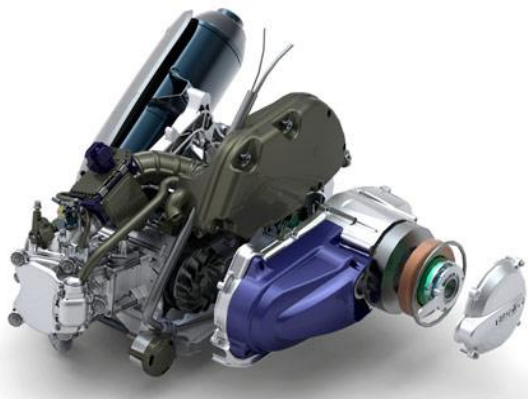
## 1. TENDENCJE ROZWOJOWE

### 1.1. Ogólna koncepcja optymalizacji silnika

Kryterium oceny konstrukcji, zwłaszcza w przypadku motocykli sportowych, jest często czas pokonania określonego odcinka drogi – zwykle czas okrążenia toru wyścigowego. Poza oczywistym polepszeniem stosunku mocy silnika do masy, popularną i zasadną metodą poprawy tego wskaźnika jest optymalizacja konstrukcji silnika i całego pojazdu. Silniki motocyklowe obowiązują w praktyce te same kierunki rozwoju co wszystkie inne zastosowania silników spalinywych, zatem głównym celem optymalizacyjnych działań konstruktorów jest podnoszenie ich sprawności przy jednoczesnym spełnieniu sukcesywnie zaostżanych norm emisji szkodliwych składników spalin. Trend ten jest – co do zasady - zbieżny dla wszystkich silników spalinywych, dlatego nie będzie dalej omawiany, zamiast tego przedstawione zostaną techniki specyficzne dla konstrukcji motocyklowych. Oczywiście, w kontekście budowy motocykla, specyfiki eksploatacji oraz mniej rygorystycznych norm emisji niektóre z trendów samochodowych nie mają przełożenia na rynek motocyklowy. Przykładem może być tutaj downsizing, który generuje potrzebę zastosowania turbosprężarki. Ze względu na odmienną, pożądaną charakterystykę silnika, oraz specyfikę konstrukcji motocykla zastosowanie układu doładowania wydaje się być bardzo problematyczne. Niekorzystnie wpływa bowiem na ogólną masę pojazdu, co w kontekście dynamiki poprzecznej jest szczególnie niepożądane. Istotną przeszkodą stanowi również ograniczona ilość miejsca, co skutecznie utrudnia zabudowę turbosprężarki oraz jej układów zasilania i regulacji. Zbliżona problematyka dotyczy możliwości zastosowania układów hybrydowych do pojazdów motocyklowych. W tym przypadku bardziej prawdopodobne jest wprowadzenie hybryd do pojazdów miejskich (skuterów), w których istnieje większy potencjał wykorzystania jego zalet, oraz korzystniejsze warunki zabudowy (rys. 3). Dotychczas zaprezentowane zostały prototypy motocykli hybrydowych, stanowiące kombinację hybrydy szeregowej i równoległej [6]. Zastosowany układ napędowy umożliwiał poruszanie się z wykorzystaniem wyłącznie silnika elektrycznego, kombinacji dwóch napędów lub z silnikiem spalinowym pełniącym funkcję generatora. Rozważając alter-

natywy dla klasycznych rozwiązań, nie można pominąć tematu alternatywnych paliw. Zasilanie silnika alkoholem (etanol, metanol) czy tzw. „biopaliwami” nie wymaga w zasadzie żadnych istotnych zmian, dlatego nie będzie szczegółowo omawiane. Zasilanie gazem LPG i CNG wymaga zainstalowania w pojeździe dużego (w stosunku do objętości), ciężkiego (spełniającego surowe normy bezpieczeństwa) zbiornika gazu. Wobec wielokrotnie przywoływanego ograniczenia dostępnej przestrzeni – instalacja takiego napędu sprawia dużo trudności i z tego powodu w praktyce nie jest stosowana. Bodaj jedynym wyjątkiem od tej reguły jest Magnus Aquila - chińska kopia skutera Yamaha Cygnus 125, wyposażona w nieduży, kilkulitrowy zbiornik gazu zabudowany w kufrze bagażowym za miejscem pasażera, o zasilanym gaźnikowo, chłodzonym cieczą silniku czterosuwowym. Podstawowym celem zastosowania zasilania gazem LPG jest w tym przypadku chęć obniżenia – i tak już niewielkich – kosztów eksploatacji pojazdu, walory proekologiczne takiej zmiany mają znaczenie drugorzędne.

Podsumowując, można założyć, że względu na wspomniane ograniczenia i trudności, należy oczekiwać, że alternatywne napędy motocykli będą się rozwijać przede wszystkim w kierunku napędów całkowicie niezależnych od silników spalinowych, głównie elektrycznych, jednak w najbliższych dziesięcioleciach silnik spalinowy w dalszym ciągu będzie dominującym źródłem napędu, w szczególności w pojazdach wyższych klas.



**Rys. 3.** Hybrydowy układ napędowy skutera Piaggio MP3

## 1.2. Inżynieria materiałowa

Ze względu na dążenie do uzyskania jak najwyższej mocy silnika przy jak najniższej jego masie, naturalnym staje się tendencja do zastępowania „klasycznych” materiałów konstrukcyjnych, takich jak stal i żeliwo, materiałami o niższej gęstości, takich jak stopy tytanu, aluminium i magnezu, materiały kompozytowe i polimery.

Z uwagi na ograniczenie gabarytów silnika, podstawową drogą zwiększania mocy jest podnoszenie prędkości obrotowej. Powoduje to szereg problemów, w szczególności wynikających z mechanicznej wytrzymałości poszczególnych części, oraz ich bezwładności. Wykonanie danego elementu (np. zaworu) ze stopu tytanu zamiast ze stali – przy zachowaniu geometrii części – powoduje zmniejszenie jego masy o około 43% , przy jednoczesnej poprawie jego właściwości wytrzymałościowych. W praktyce, po wyposażeniu szesnastozaworowej głowicy silnika w wykonane ze stopów tytanu zawory, obserwuje się zwiększenie maksymalnej prędkości obrotowej o nawet 1000 obr/min [1].

Na drugim biegunie są działania minimalizujące straty mechaniczne silnika, w szczególności wywołane tarciami. W tym celu do minimum redukuje się płaszcz tłoka, a pozostałą jego część poddaje obróbkom zmniejszającym współczynnik tarcia – np. nasyca się warstwę wierzchnią związkami molibdeny. Podobne działania mają miejsce w odniesieniu do tulei cylindrowych i pierścieni tłokowych. Że-

liwne tuleje cylindrowe niemal całkowicie ustąpiły miejsca tulejom wykonywanym bezpośrednio w odlewie bloku cylindrowego, pokrytym warstwą ceramiczną (np. typu Nikasil, SCEM etc). Pierścienie tłokowe, w procesie nanoszenia próżniowego, pokrywa się powłokami chromowo-azotowymi.

Innym przejawem inżynierii materiałowej w konstrukcji silników motocyklowych jest coraz powszechniejsze wykonywanie mniej obciążonych elementów silnika (takich jak pokrywy) z materiałów o gorszych właściwościach mechanicznych, ale o dużo niższej gęstości. Powszechnie stosowane są zwłaszcza stopy magnezu, służące do wykonywania pokryw silnika (pokrywy sprzęgła, alternatora, pomp wody i oleju, pokrywy zaworowej etc.). Wykonanie miski olejowej ze stopów magnezu zamiast ze stopów tytanu lub kompozytów na bazie włókna węglowego zamiast ze stopów tytanu lub kompozytów na bazie włókna węglowego elementy układów wydechowych. Polimery stosowane są również do wytwarzania nieobciążonych mechanicznie pokryw silnika, elementów układu dolotowego, niekiedy także kół zębatach napędów mechanizmów pomocniczych np. pomp.

## 2. WYBRANE OBSZARY ROZWOJU KONSTRUKCJI SILNIKÓW

### 2.1. Układy dolotowe

#### Wtrysk paliwa

Typowym dla silników motocyklowych rozwiązaniem układu dolotowego jest niezależne zasilanie każdego cylindra; każdy z cylindrów wyposażony jest w niezależny, funkcjonalnie kompletny zestaw elementów sterujących, takich jak przepustnice i wtryskiwacze (lub, w starszych konstrukcjach, gaźniki). Kanały ssące (często o zróżnicowanych długościach) łączą się we wspólnej obudowie filtra powietrza, tzw. airbox'ie. Inne rozwiązania w praktyce nie są spotykane, i mają jedynie znaczenie historyczne.

Najbardziej obecnie rozpowszechnioną konfiguracją jest układ wielopunktowego, pośredniego wtrysku paliwa, z odrębnymi dla każdego cylindra kanałami dolotowymi i przepustnicami, zabudowany we wspólnej obudowie. Sterowanie przepustnicami realizowane jest zwykle za pomocą tradycyjnych cięgien Bowdena, przy czym bezpośrednie połączenie z ciągnem ma jedna, zwykle skrajna, przepustnica, pozostałe zaś połączone są z nią mechanicznie za pomocą systemu regulowanych połączeń, umożliwiającego niezależną regulację położenia każdej przepustnicy w ramach procedury tzw. synchronizacji. W nowszych konstrukcjach (np. Yamaha YZF-R6 od roku 2005) przepustnice sterowane są całkowicie elektronicznie tzw. układzie Drive by Wire. Informacja o pożądanym kącie uchylenia przepustnic pochodzi z potencjometru, mierzącego kąt obrotu pokrętki przyspieszenia, zabudowanego na prawym końcu kierownicy. Wadą tego rozwiązania jest wysoka złożoność układu, eliminująca wprawdzie mechaniczne sprzężenie pokrętki na kierownicy z osią przepustnic, wymagająca jednak stosowania dodatkowych czujników i silników, rozbudowanego okablowania oraz wyższej mocy obliczeniowej jednostki sterującej. Warto także wspomnieć o oporze użytkowników, pozbawionych możliwości „siłowego” wymuszenia pełnego otwarcia przepustnic, jest to jednak kwestia bardzo subiektywna. Niewątpliwą zaletą jest natomiast możliwość precyzyjnego sterowania zasilaniem silnika – zwłaszcza w połączeniu z układem kontroli trakcji; kombinacja taka została zastosowana seryjnie w motocyklu Yamaha XTZ 1200 Super Tenere, z roku 2010.

Jak dotąd nie są znane żadne czterosuwowe konstrukcje wyposażone w bezpośredni wtrysk benzyny; wynika to przede wszystkim z trudności, jakie wiążą się z zabudową kolejnego elementu w niewielkich głowicach. Z tego względu w najbliższych latach nie należy

spodziewać się wprowadzenia układów wtrysku bezpośredniego w silnikach czterosuwowych; na rynku dostępne są natomiast motocyklowe i skutery firmy Aprilia, wyposażone w dwusuwowe silniki z bezpośrednim wtryskiem benzyny, pod nazwą Ditech (Direct Injection Technology). Jest to jednak rozwiązanie endemiczne, stosowane wyłącznie przez tę firmę w ograniczonej gamie pojazdów, które z punktu widzenia eksploatacyjnego okazało się być zawodne. Niemożność zastosowania układu wtrysku bezpośredniego jest podyktowana również osiąganą wysoką prędkością obrotową, co znacznie skraca czas, w którym paliwo powinno zostać wtrysnięte i rozpylone. Najnowsze konstrukcje silników stosowane w pojazdach osobowych i wyposażone we wtrysk bezpośredni osiągają prędkość obrotową wału do 7000 obr/min. W przypadku motocykli prędkość ta potrafi być niemal dwa razy większa, wobec tego nie ma możliwości uzyskania korzystnych parametrów rozpylenia, co wpływałoby istotnie na pogorszenie parametrów ekologicznych [1].

## Przewody dolotowe

W czterosuwowym, wolnossącym silniku ZI, a takim jest typowy silnik motocyklowy, współczynnik napełnienia, oznaczający stosunek rzeczywistej masy powietrza dostarczonego do cylindra, do masy, która teoretycznie zmieści się w objętości skokowej cylindra w warunkach normalnych, wynosi, średnio, 0,7. Zgodnie z teorią doładowania dynamicznego, przy odpowiedniej konfiguracji długości kanałów ssących, dzięki wykorzystaniu zjawisk falowych i energii ruchu zasysanego cyklicznie powietrza, możliwe jest zwiększenie współczynnika napełnienia  $\eta_v$  nawet o 30-40%. Skuteczność zjawiska jest ściśle uzależniona od prędkości przepływu, ograniczonej prędkością dźwięku, i od czasu potrzebnego falom ciśnienia na pokonanie określonej długości kanału ssącego. Dlatego też doładowanie dynamiczne – przy danej długości kanału ssącego – jest skuteczne tylko dla określonych prędkości obrotowych. Powszechną praktyką w zastosowaniach samochodowych, jest sterowanie długością kanałów ssących tak, aby zjawisko doładowania dynamicznego można było wykorzystywać w możliwie wielu punktach pracy silnika. Ze względu na niewielką ilość dostępnej przestrzeni, sterowanie długością kanałów ssących w układach zasilania silników motocyklowych jest na dzień dzisiejszy ograniczone do dwóch pozycji, i realizowane przez rozsunięcie plastikowych elementów kanałów ssących po przekroczeniu określonej prędkości obrotowej. Pierwszym motocyklem serijnie wyposażonym w taki układ była Yamaha YZF-R1 z roku 2007. Podczas pracy przy niskich i średnich prędkościach obrotowych widoczne na rys. 4 elementy są połączone, wydłużając w ten sposób kanały ssące; po przekroczeniu określonej prędkości obrotowej są automatycznie rozłączane [4].



Rys. 4. Układ kolektorów dolotowych o zmiennej długości motocykla Yamaha YZF-R1 z widocznymi wtryskiwaczami paliwa

Innym sposobem zwiększenia współczynnika napełnienia cylindra, jest wykorzystanie energii powietrza opływającego poruszający się motocykl. Po raz pierwszy rozwiązanie to, pod nazwą RAM-AIR zostało zastosowane w Kawasaki ZX-10 z roku 1987, w chwili obecnej stosowane jest powszechnie, pod różnymi nazwami. Opływające motocykl powietrze, poprzez specjalny otwór w przedniej części nadwozia, jest wtłaczane do obudowy filtra pod pewnym nadciśnieniem, co pozwala na spalenie większej ilości paliwa, wymaga jednak zastosowania wzbogacenia mieszanki. Dostarczenie dodatkowej ilości paliwa w układach zasilanych wtryskiem paliwa nie stanowi problemu, w układach gaźnikowych stosowano dodatkowe przewody doprowadzające część wtłaczanego powietrza do komór pływakowych, celem wytworzenia nadciśnienia nad lustrem paliwa, zwiększając tym samym ciśnienie, pod którym paliwo wypływało z dyszy rozpylacza. Taka forma doładowania jest jednak stosunkowo mało skuteczna, co można udowodnić korzystając z równania Bernoulliego. Zakładając, że prędkość powietrza w układzie dolotowym jest niewielka w stosunku do prędkości, z jaką porusza się motocykl możemy uprościć to równanie do postaci:

$$p = \rho \frac{v^2}{2} .$$

Zakładając gęstość powietrza równą  $1,2 \text{ kg/m}^3$  i prędkość pojazdu = 83 m/s (300 km/h) otrzymujemy nadciśnienie doładowania rzędu 4000 Pa, czyli 0,04 bar. Zdolny do osiągnięcia takiej prędkości Kawasaki ZZ-R 1400 (model 2011) osiąga moc 142 kW przy 9500 obr/min, zaś po wykorzystaniu omawianego efektu doładowania – 149,5 kW przy 9500 obr/min – przyrost wynosi zatem około 5%. Należy zauważyć, że rozwiązanie to nie wymaga stosowania żadnych dodatkowych mechanizmów (sprężarek, turbosprężarek, etc.) a jedynie odpowiedniego ukształtowania układu dolotowego. Z drugiej strony ze względu na wartość prędkości, niezbędnej do uzyskania mierzalnego efektu – wydaje się on być osiągalny jedynie teoretycznie, lub w warunkach doświadczalnych.

## 2.2. Układy wydechowe

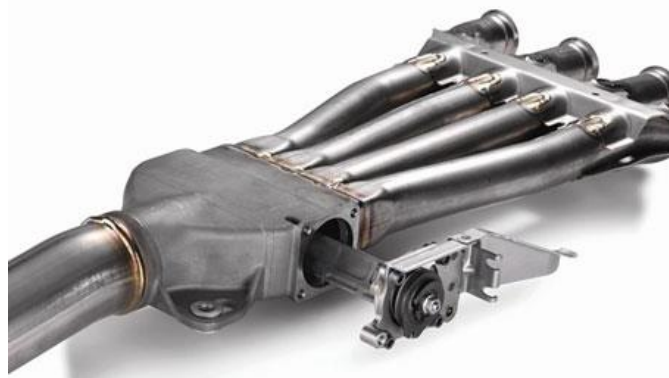
Konfiguracja układu wydechowego silnika spalinowego ma pierwszorzędne znaczenie dla parametrów silnika. Dotyczy to w szczególności silników dwusuwowych, gdzie nawet niewielka zmiana długości rury wydechowej może drastycznie pogorszyć osiągi silnika, niemniej również w konstrukcjach czterosuwowych wpływ ten jest bardzo istotny. Motocyklowy układ wydechowy musi spełnić więcej wymagań, niż analogiczny układ w typowym samochodzie osobowym. Przede wszystkim musi umożliwiać osiągnięcie dużej mocy silnika, po drugie rozmieszczenie i ukształtowanie jego elementów ma zasadniczy wpływ na położenie środka ciężkości całego motocykla oraz jego zdolność do uzyskiwania dużych pochyleń, po trzecie w większości przypadków jest ważnym elementem stylistycznym, wpływającym na estetykę pojazdu; nie bez znaczenia jest też „brzmienie” silnika. Jednocześnie musi mieć jak najmniejszą masę, zapewniać skuteczne oczyszczanie gazów spalinowych i tłumienie hałasu, a koszt jego wytworzenia musi być jak najniższy. Pogodzenie tych częściowo sprzecznych wymagań jest bardzo trudne, w szczególności w produkcji wielkoseryjnej.

### Optymalizacja parametrów silnika

Zakres działań w tym obszarze obejmuje zarówno korygowanie geometrii rur wydechowych, w szczególności ich średnicy i długości odcinka rury między głowicą a punktem połączenia rur, jak i instalację dodatkowych urządzeń. Powszechnie stosowane są sterowane elektromechanicznie przepustnice, zmieniające efektywny przekrój układu w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia. Podczas

pracy w zakresie niskich i średnich prędkości obrotowych zawór ogranicza przepustowość układu z korzyścią dla uzyskiwanej w tym zakresie wartości momentu obrotowego, przy pełnym obciążeniu i wysokiej prędkości obrotowej zawór jest w pełni uchylony, umożliwiając przepływ spalin całym przekrojem kanału i uzyskanie pełnej mocy silnika. Układ jest sterowany automatycznie przez ECU, za pomocą serwomechanizmu, poprzez układ cięgien Bowdena. Po raz pierwszy rozwiązanie takie, pod nazwą EXUP (rys. 5), zastosowała Yamaha w modelu FZR1000 w roku 1989, od tego czasu, pod różnymi nazwami (np. SET – Suzuki Exhaust Tuning, H-VIX – Honda Variable Intake/Exhaust), jest powszechnie stosowane [5].

Niestety, ze względu na trudne warunki pracy, układy typu EXUP wymagają regularnej, wymagającej obsługi. Wysoka temperatura spalin i ich skład powodują przyspieszoną degradację podzespołów układu. Powoduje to stopniową utratę właściwych parametrów pracy i konieczność ich skorygowania, w przeciwnym wypadku możliwe są zakłócenia w pracy silnika i obniżenie jego osiągnięć. Pogodzenie tych częściowo sprzecznych wymagań jest bardzo trudne, w szczególności w produkcji wielkoseryjnej.



**Rys. 5.** Kolektor wydechowy typu 4-1 z widocznym zaworem typu EXUP

### **Optymalizacja konstrukcji pojazdu**

Geometria, masa i konfiguracja układu wydechowego ma bardzo istotne znaczenie dla konstrukcji całego pojazdu i jej osiągnięć. Wadą tradycyjnej konfiguracji układu, tj. połączonych pod silnikiem rur wydechowych, z tłumikiem zabudowanym z prawej strony tylnego koła jest przede wszystkim umieszczenie dużej masy w dużej odległości od środka ciężkości pojazdu, nie można także pominąć faktu, że taka konfiguracja ogranicza możliwość uzyskania dużych pochyłeń, zaś połączenie rur wydechowych pod silnikiem zmniejsza prześwit pojazdu. Stosowanych jest wiele alternatywnych rozwiązań, żadne jednak nie jest idealne. Pierwszym z nich jest umieszczenie tłumika wydechu pod siedziskiem kierowcy, w szczególności w motocyklach sportowych. Rozwiązanie takie powszechnie stosuje firma Ducati, ma ono także zastosowanie w motocyklach producentów japońskich, takich jak Yamaha, Honda czy Kawasaki, oraz w brytyjskim Triumphie. Taka konfiguracja całkowicie likwiduje problem ograniczonych pochyłeń, kosztem niekorzystnego wpływu na położenie środka ciężkości pojazdu oraz ograniczenia jego funkcjonalności. Należy wszelako zauważyć, że po pierwsze: układy wydechowe współczesnych motocykli sportowych w znakomitej większości wykonane są ze stopów tytanu i kompozytów na bazie włókna węglowego, a zatem charakteryzują się niewielką masą, po drugie: w motocyklach sportowych masa pojazdu wraz z kierowcą, ze względu na pochylenie pozycji kierującego, w naturalny sposób w większym stopniu obciąża koło przednie. Dzięki temu negatywny wpływ na położenie środka ciężkości pojazdu jest w dużym stopniu niwelowany.

### **2.3. Układ rozrządu**

Podstawowymi źródłami problemów związanych z konstrukcją układów rozrządu silników motocyklowych są wysokie prędkości obrotowe silników, oraz, naturalnie, bardzo ograniczona ilość dostępnej przestrzeni. Jak wspomniano wcześniej, wysokie prędkości obrotowe rodzą problemy związane przede wszystkim z szeroko pojętą wytrzymałością materiałów i bezwładnością ruchomych elementów. Zwiększenie właściwości wytrzymałościowych poprzez zwiększenie przekrojów części nie wchodzi w rachubę, po pierwsze ze względu na konieczność zapewnienia szybkobieżności, po drugie ze względu na ograniczenia wymiarowe. Dla zobrazowania skali elementów: średnice grzybków zaworowych silnika sportowego motocykla klasy 600 cm<sup>3</sup>, na przykładzie Kawasaki ZX-6R z 2002 roku, wynoszą 26 mm dla zaworów ssących i 22 dla wydechowych, zaś średnice trzonków około 4 mm. Stopień sprężania wynosi 12,8 : 1, a maksymalna prędkość obrotowa 14500 obr/min. Z powyższych względów konieczne stało się zastosowanie alternatywnych dla stali materiałów na zawory i inne elementy układu rozrządu, dzięki czemu możliwe jest zmniejszenie masy ruchomych elementów przy zachowaniu ich geometrii, lub zmniejszenie ich wymiarów przy zachowaniu (lub wręcz poprawie) właściwości wytrzymałościowych. Najczęściej stosowanym materiałem alternatywnym jest tytan i jego stopy.

Ciekawym rozwiązaniem jest stosowany wyłącznie przez włoską firmę Ducati układ dwukrzywkowy, tzw. desmodromiczny, pozbawiony sprężyn zaworowych, w którym zarówno otwarcie jak i zamknięcie zaworu wymuszane jest za pomocą krzywki. Jest to rozwiązanie o wysokim koszcie wytwarzania i skomplikowanej obsłudze, posiada jednak szereg zalet, z których najważniejszą jest eliminacja sprężyny śrubowej. Przy bardzo wysokich – i ciągle rosnących – prędkościach obrotowych, rzędu 15 tysięcy obr/min, zawór musi zostać zamknięty w bardzo krótkim czasie. Wymaga to stosowania sprężyn zaworowych o coraz większej sztywności – a zatem o coraz większej masie i średnicy, co stoi w sprzeczności z trendem do miniaturyzacji silników, ponadto część masy sprężyny jest zaliczana do mas ruchomych układu rozrządu. Układ dwukrzywkowy całkowicie eliminuje te problemy.

Rozwój silników, ukierunkowany na spełnienie sukcesywnie zastrzanych norm emisji przy zachowaniu – lub poprawie – osiągnięć, obejmuje znane z silników samochodowych sterowanie fazami rozrządu. Pierwszą seryjną aplikacją był stosunkowo prosty, dwustopniowy system V-TEC, zastosowany przez Hondę w modelu VFR 800 w roku 2002. System ten był stosowany również w samochodach tego producenta; istota systemu polega na odłączaniu napędu dwóch z czterech zaworów każdego cylindra poniżej pewnej prędkości obrotowej, i załączaniu ich po jej przekroczeniu. Sterowanie systemu powierzono prostemu układowi hydraulicznemu, opartemu na zmianie ciśnienia oleju silnikowego w funkcji prędkości obrotowej. Dzięki jego zastosowaniu w niskich zakresach prędkości obrotowych silnik pracuje jako dwuzaworowy, a zatem korzystnie z punktu widzenia przebiegu charakterystyki momentu obrotowego, zaś powyżej pewnej granicy w trybie czterozaworowym, ukierunkowanym na uzyskanie mocy maksymalnej. Z doświadczenia autora wynika, że moment przełączenia jest odczuwalny jako wyraźne szarpnięcie, ponadto system jest bardzo wrażliwy na jakość i stan oleju silnikowego. Możliwości takiego systemu są bardzo ograniczone, nie przyjął się na szerszą skalę, i VFR 800 pozostała jedynym modelem weń wyposażonym. Kolejnym – i ostatnim jak dotąd – etapem było zaprezentowane w 2007 roku Kawasaki GTR 1400, wyposażone w bezstopniową regulację czasów otwarcia zaworów ssących. System jest analogiczny do znanego z silników samochodowych i bazuje na zmianie położenia wałka rozrządu w stosunku do napędzającego go koła łańcuchowego za pomocą ciśnienia oleju. Rozwiązanie samo w sobie jest stosunkowo nieskomplikowane, ma jednak dość duże gabaryty, dlatego też

zostało zastosowane w dużym, jak na warunki motocyklowe silniku, napędzającym bardzo duży, turystyczny motocykl, w którym wartość mocy maksymalnej ma mniejsze znaczenie niż charakterystyka momentu obrotowego przy niskich i średnich prędkościach obrotowych. Wydaje się, że, podobnie jak w samochodach, rozwój systemów będzie podążał w kierunku sterowania nie tylko czasem uchylecia zaworów, ale regulacji ich wzniosu, zaś w dalszej perspektywie należy oczekiwać wdrożenia systemu typu Multi-Air. Ze względu na wspomniane już wielokrotnie ograniczenia, takie jak ukierunkowanie na jak najwyższą moc i niewielkie gabaryty silnika – nie należy oczekiwać w najbliższych latach żadnych rewolucyjnych zmian, w szczególności w segmencie najbardziej wysiłonych motocykli sportowych.

## 2.4. Kadłub silnika

Ze względu na dążenie do minimalizacji masy własnej pojazdu, a także duży udział masy silnika w całkowitej masie motocykla – stosowanie na szeroką skalę stopów lekkich rozpoczęło w zastosowaniach motocyklowych znacznie wcześniej, niż w przypadku samochodów. Począwszy od wczesnych lat powojennych, praktycznie wszystkie bloki silników motocyklowych, niezależnie od liczby suwów, liczby i układu cylindrów – wykonywane są w formie odlewu ze stopów lekkich, najczęściej stopów aluminium. Wraz z rozwojem technik odlewniczych zakres zastosowań tych materiałów był stopniowo rozszerzany, aż objął wszystkie elementy obudowy silnika a także bloki cylindrów i głowice.

Blok silnika współczesnego, wielocylindrowego silnika motocyklowego ma najczęściej postać ciśnieniowego odlewu ze stopów aluminium. Wewnątrz bloku wykonane są gniazda łożysk, kanały olejowe, obudowy pomp oleju i cieczy chłodzącej. Oczywiście, blok wyposażony jest także w komplet nadlewów i otworów montażowych, służących zamocowaniu silnika w podwoziu oraz montażowi osprzętu. Coraz częściej stosowanym rozwiązaniem jest także blok silnika wykonany jako jeden element z blokiem cylindrów. Umożliwia to zmniejszenie masy i gabarytów silnika przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej sztywności konstrukcji, mającej krytyczne znaczenie w kontekście powszechnego wykorzystywania silnika jako elementu nośnego, do którego mocowane są elementy podwozia motocykla.

Żeliwne tuleje cylindrowe ustąpiły miejsca tulejom wykonywanym bezpośrednio w bloku silnika, pokrytych warstewką typu Nikasil. Powoduje to zmniejszenie szerokości silnika, redukcję jego masy, zmniejsza straty związane z tarcieniem w zespole tłok-cylinder, a także korzystnie wpływa na trwałość gładzi cylindrowej. Niestety, uzyskanie tych korzyści jest okupione skomplikowaniem technologii wytwarzania i wyższym kosztem produkcji, znacząco utrudnia (a nierzadko uniemożliwia) to także ewentualne naprawy; uszkodzenie gładzi cylindrowej, zamiast prostej wymiany żeliwnych tulei, może wymagać wymiany całego bloku silnika, co radykalnie podnosi koszt naprawy.

Konstruktorzy wciąż jednak poszukują nowych rozwiązań. Jedną z propozycji jest jednocylinndrowy, czterosuwowy silnik firmy Husaberg (rys. 6), którego układ dalece odbiega od typowych konstrukcji. Oś cylindra pochylona jest pod kątem 70°, zaś skrzynia biegów jest umieszczona pod wałem korbowym. Dzięki takiej konfiguracji wał korbowy (a zatem znacząca część mas wirujących) mógł zostać przesunięty o około 100mm wyżej i 160mm w tył w stosunku do typowego rozwiązania – w pobliże środka ciężkości całego pojazdu. Oprócz znaczącego wpływu na prowadzenie motocykla, w sposób niebagatelny powiększyło to jego prześwit, zwiększając możliwości terenowe.

Abstrahując od sporadycznie prezentowanych nowoczesnych, innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, rozwój bloków silników motocyklowych ma charakter ewolucyjny, będący wypadkową roz-

woju technologii wytwarzania i inżynierii materiałowej. Naturalną tendencją będzie dążenie do miniaturyzacji gabarytów silnika przy zachowaniu jego pojemności skokowej i osiągow, osiągalne między innymi dzięki optymalizacji konstrukcji bloku silnika [3].

## PODSUMOWANIE

Podobnie jak w przypadku silników samochodowych, tak w przypadku motocykli jednym z głównych motorów postępu są i z pewnością będą coraz bardziej rygorystyczne normy emisji. Wprowadzanie kolejnych, coraz bardziej surowych wymogów doprowadziło do zmiany systemów chłodzenia silników, wprowadzenia układów wtrysku paliwa oraz reaktorów katalitycznych. Wraz ze wzrostem wymagań norm emisji należy spodziewać się tak jak dotychczas wzrostu sprawności przy jednoczesnej poprawie osiągow.

Na rynku obserwuje się silną tendencję do transferowania technologii użytej w pojazdach osobowych. Sprawdzone rozwiązania są optymalizowane ze względu na specyfikę aplikacji i montowane na szeroką skalę w silnikach motocyklowych. Do takich rozwiązań należą np. układ zmiennych faz rozrządu czy też regulacja długości kanału dolotowego. Można więc stwierdzić, że w pewnym stopniu rozwój konstrukcji silników motocyklowych jest stymulowany poprzez osiągnięcia w dziedzinie pojazdów samochodowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Mohd Taufiq M., Hazlina S., Ahmad Jais A., Noorfaizah M., Mohd Faisal H., *A review on retrofit fuel injection technology for small carburetted motorcycle engines towards lower fuel consumption and cleaner exhaust emission*, Elsevier, 7/2014.
2. Paolo I., Adolfo S., *New research assessing the effect of engine operating conditions on regulated emissions of a 4-stroke motorcycle by test bench measurements*, Elsevier, 11/2016.
3. Haba S., Oancea G., *Digital manufacturing of air-cooled single-cylinder engine block*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 9/2015.
4. Qi H., Gang G., *Research on improving performance of the motorcycle engine at low and medium speed*, Journal of Advanced Manufacturing Systems, 12/2008.
5. Figlus T., Wilk A., Liscak S., Kalafarski M., *The influence of muffler type of the exhaust system in the sports motorcycle on the level of the emitted noise*, Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering, 10-12/2013.
6. Morandin M., Ferrari M., Bolognani S., *Power-Train Design and Performance of a Hybrid Motorcycle Prototype*. IEEE Transactions on Industry Applications, 5/2015.

### Modern solutions used in motorcycle engines

*The article discusses the development trends and the solutions currently used in modern engines of motorcycles. Less stringent exhaust emission standards, as well as other purpose engines are the cause of significant discrepancies between the design engines of motorcycles and cars. The increase in wealth of society contributes to the popularity of two-wheeled vehicles, which also entails the need to optimize their construction in order to meet the high customer requirements.*

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Marek Idzior** – Politechnika Poznańska  
dr inż. **Wojciech Karpiuk** – Politechnika Poznańska  
mgr inż. **Mateusz Bor** – Politechnika Poznańska  
mgr inż. **Rafał Smolec** – Politechnika Poznańska