

Jerzy MERKISZ
Ireneusz PIELECHA
Jarosław MARKOWSKI

PTNSS-2007-SS4-220

Wskaźniki pracy silników pojazdów wyczynowych

W artykule przedstawiono ocenę parametrów eksploatacyjnych tłokowych silników spalinowych przeznaczonych do napędu pojazdów sportowych. Ocenę przeprowadzono dla parametrów silników wybranych typów pojazdów sportowych: Formuły 1, Le Mans oraz WRC w odniesieniu do pojazdów konwencjonalnych. Pojazdy konwencjonalne zaszeregowano według dwóch rodzajów: pojazdy o charakterze sportowym i ogólnego przeznaczenia. Przeprowadzono analizę podstawowych wielkości charakteryzujących silniki i uzyskano wartości parametrów pozwalających na porównanie silników.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, silniki wyczynowe, wskaźniki pracy

Operating parameters of high performance vehicle engines

The paper presents the assessment of operating parameters for piston combustion engines used in sports vehicles. The assessment was made for parameters of selected performance vehicles: Formula 1, Le Mans and WRC in relation to conventional vehicles. The conventional vehicles were classified within two categories: sports vehicles and general use road vehicles. Basic engine characteristics were analyzed and the parameter values obtained allowed a comparison of the engines.

Key words: combustion engines, high performance engines, operating indexes

1. Wstęp

Od czasu, gdy Gottlieb Daimler w 1884 r. skonstruował szybkobieżny silnik spalinowy o budowie podobnej do dzisiejszego silnika, rozpoczęła się rywalizacja między konstruktorami i producentami silników, która trwa do dziś. Silnik spalinowy od jego powstania był przeznaczony do napędu pojazdów; potrzeby rynku wzmagaly ambicje konstruktorów i producentów, ich rywalizacja przyczynila się do powstania pierwszych wyścigów, podczas których możliwe było porównanie wyprodukowanych pojazdów. Pierwszy wyścig samochodowy odbył się w 1894 r.: był to wyścig Paryż–Rouen, natomiast pierwsze wyścigi o zasięgu światowym Le Mans odbyły się w 1923 r., a Daytona 500 w 1959 r.; obecnie bardzo popularne są wyścigi Formuły 1 [6].

Rywalizacja producentów samochodów na torach wyścigowych spowodowała szybki rozwój prawie wszystkich dziedzin fizyki związanych z motoryzacją, między innymi: termodynamiki, mechaniki, aerodynamiki, mechaniki płynów, materiałoznawstwa, elektrotechniki, elektroniki itp. Ciągła rywalizacja dotyczy również konstrukcji silników spalinowych, które stanowią jeden z najważniejszych elementów samochodu. Szybki rozwój motoryzacji i sportu przyczyniły się do zmiany przeznaczenia silników. Silniki budowano na potrzeby napędu pojazdów wykorzystywanych w celach użytkowych; tylko czasami konkurowały one ze sobą w wyścigach. Na potrzeby rywalizacji sportowej okazało się to niewystarczające i rozwój silników pojazdów wyścigowych ukierunkowany został na konstrukcje mocno obciążone.

Przy konstruowaniu pojazdów konwencjonalnych duże znaczenie mają oczekiwania przyszłych użytkowników. Wydaje się oczywiste, że kierowcy oczekują pojazdów dy-

1. Introduction

Ever since Gottlieb Daimler built his high-speed combustion engine in 1884, its structure resembling that of the present engine, continuous competition among the engineers and manufacturers of engines began. The function of a combustion engine has always been to provide a power source for vehicles; a demanding market enhanced the engineers' and manufacturers' ambitions, their competition contributed to the rise of first car racing, which enabled a comparison to the regular vehicles manufactured. The first car racing took place in 1894: it was Paris–Rouen, while Le Mans, the first car racing of global reach was held in 1923, Daytona 500 in 1959; Formula 1 is very popular nowadays [6].

The competition of automobile manufacturers caused the development of almost all automotive related sections of physics, including: thermodynamics, mechanics, aerodynamics, liquid mechanics, material technology, electrical engineering, electronics, etc. The continuous competition also includes the structure of combustion engines that represent one of the most crucial elements of the vehicle. Rapid development of automotive industry and automobile sports contributed to a varied designation of engines which was not the case in the beginning. Engines used to be constructed to drive utility vehicles; only occasionally competing in automobile races. This appeared to be insufficient for sports competition purposes and the development of high performance racing engines has been oriented on much more powerful designs.

The future user expectations are of great importance in construction of conventional vehicles. It seems obvious that drivers expect dynamic, ecological, safe, long-lasting, unfailing and economical vehicles. Unfortunately, the factors

namicznych, ekologicznych, bezpiecznych, o dużej trwałości i niezawodności oraz ekonomicznych. Niestety, czynniki te nie mogą być jednocześnie zapewnione w największym stopniu, gdyż są one od siebie zależne: poprawa jednego czynnika wiąże się z pogorszeniem drugiego. Przykładem jest tu relacja między czynnikiem ekonomicznym i wysokimi parametrami eksploatacyjnymi silnika. Nie jest możliwe skonstruowanie silnika o dużej wartości mocy i momentu obrotowego, który zużywałby małe ilości paliwa. Wyższe parametry eksploatacyjne silnika generują większe nakłady finansowe podczas jego użytkowania.

Różnice między silnikami pojazdów konwencjonalnych a silnikami pojazdów wyczynowych wynikają z różnych wymagań kierowców już na etapie konstruowania silników. Przykładowo, rozpatrując trwałość silnika można stwierdzić, że dobrej konstrukcji silnikiem w pojeździe konwencjonalnym jest taki, który jest eksploatowany bezawaryjnie przez długie lata. Natomiast dobrym silnikiem wyczynowym według Ferdynanda Porsche jest taki, który po przejechaniu dystansu wymaganego przepisami wyścigu „rozpada się na kawałki” [6]. Takie dwie odmienne oceny silników spalinywych na początku powstawania nowej konstrukcji powodują wytworzenie zupełnie odmiennych jednostek.

Różnice w konstruowaniu silników zależą od ich przeznaczenia, a stopień ich zróżnicowania można przedstawić, analizując wskaźniki ich pracy. Działania nad nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi w silnikach wyczynowych objęte są ścisłą tajemnicą i informacje na ten temat nie są rozpowszechniane.

2. Nowoczesne silniki spalinyowe pojazdów sportowych

Na świecie istnieje kilkanaście dyscyplin sportowych z zakresu sportów motorowych. Wszystkie charakteryzują się tym, że używa się w nich różnego rodzaju środków transportu napędzanych silnikami spalinyowymi, np. do napędu samolotów, pojazdów i łodzi.

Rywalizacja w sportach motorowych związana jest szczególnie z rozwojem szeroko rozumianej techniki. Obecnie podejmowane zagadnienia związane z udoskonalaniem pojazdów sportowych dotyczą najdrobniejszych szczegółów, które są ze sobą wzajemnie powiązane. Przykładem tego może być stopień doładowania silnika. Wzrost ciśnienia powietrza doprowadzanego do cylindra (wraz ze zwiększeniem dawki paliwa) pozwala na uzyskanie lepszych parametrów eksploatacyjnych silnika, ale powoduje również wzrost maksymalnej temperatury spalania w cylindrze oraz wzrost temperatury spalin. Sytuacja ta wymusza zmiany konstrukcyjne, np. wprowadzenie w górnej części tulei cylindrowej wkładek o podwyższonej odporności temperaturowej, stosowanie zaworów z materiałów o wyższej odporności temperaturowej, zmianę układu chłodzenia, stosowanie dodatkowych układów chłodzenia oleju oraz doładowania, stosowanie bardziej odpornych materiałów na wirniki turbosprężarek, dodatkowe układy doprowadzające wodę do cylindra w celu obniżenia maksymalnej temperatury spalania.

cannot be provided to the highest extent at the same time, because they depend on one another; improvement of one factor means deterioration of another. An example can be the correlation between the economic factor and high operating parameters of the engine. It is impossible to construct a high power and high torque engine that would use low amounts of fuel. Higher operating parameters of the engine generate higher expenses on its use.

The differences between conventional vehicle engines and high performance vehicle engines result from various requirements of the drivers, already at the engine construction stage. For example, considering the durability of the engine one may state that a good engine structure in a conventional vehicle is one operated without failure for years. According to Ferdinand Porsche, however, a good high performance engine is one that „falls into pieces” after driving the distance required by a race regulations. The two totally different valuations of combustion engines at the beginning of creating a new structure bring about the production of totally different items.

The differences in constructing engines depend on their designation and the extent of differentiation may be presented analyzing their operating indexes. The work on new structural solutions in high performance engines is strictly confidential and no information thereon is disseminated.

2. Modern combustion engines of sports vehicles

There are more than a dozen of motor sport disciplines in the world. Characteristic to all of them is the fact that combustion engines are fitted in various means of transport in these disciplines, e.g. airplanes, vehicles and boats.

The competition in motor sports is particularly related to the development of technology in its wide meaning. The issues dealt with at present concerning improvement of sports vehicles go into the utmost mutually related details. The engine supercharge level can be an example. The increased pressure of air charged into the cylinder (along with increased dose of fuel) enables to achieve better operating parameters of the engine, but also causes the growth of maximum combustion temperature in the cylinder and growth of the exhaust temperature. The situation calls for structural changes, such as introduction of materials with enhanced temperature resistance in the upper part of the cylinder sleeve, the use of valves made from materials of increased temperature resistance, change in the cooling system, the use of additional oil cooling systems, the use of materials more resistant to the turbocharger rotors, additional systems charging water into the cylinder, in order to reduce the maximum combustion temperature.

3. Formula 1 vehicle engines

3.1. F1 vehicle engine characteristics

A Formula 1 engine is a structure subject to maximum loads. Such operating conditions demand an appropriate structure of the engine individual elements. The structure of these elements, however, is not subject to manufacturers' discretion – it is provided in the regulations of International

3. Silniki pojazdów Formuły 1

3.1. Charakterystyka silników pojazdów F1

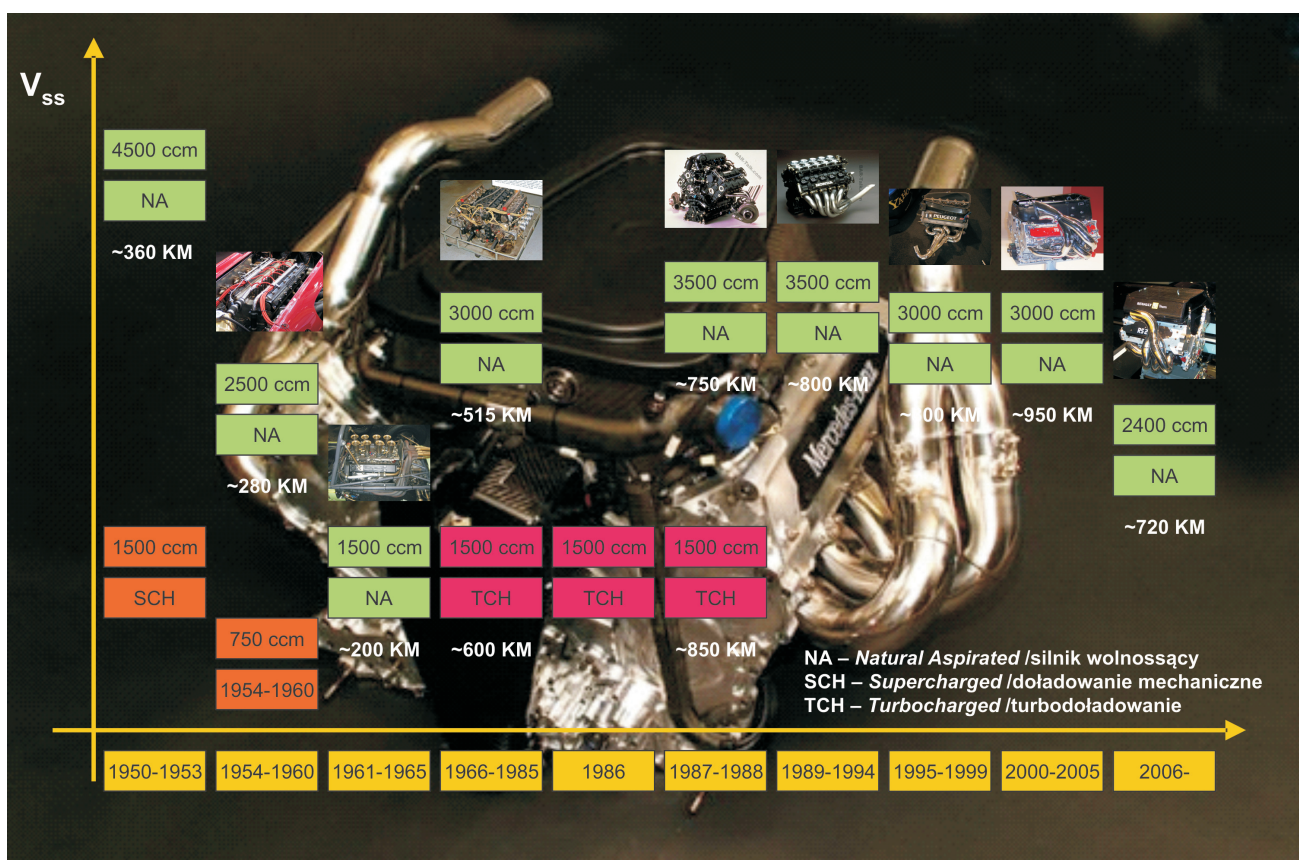
Silnik Formuły 1 jest konstrukcją, która podczas wyścigów w pojeździe F1 podlega maksymalnym przeciążeniom. Takie warunki eksploatacyjne silnika wymuszają odpowiednią konstrukcję poszczególnych jego elementów. Jednak konstrukcja elementów nie jest dowolna – jest określona regulaminem Międzynarodowej Federacji Samochodowej (FIA – *Fédération Internationale de l'Automobile*). Obecny regulamin obowiązuje od 2006 r. Zmiany dopuszczalnych pojemności skokowych silników Formuły 1 oraz sposoby zasilania powietrzem na przestrzeni lat 1950-2006 przedstawiono na rys. 1.

Częste zmiany w regulaminach FIA wymuszały zmiany konstrukcyjne silników Formuły 1. W przeszłości domi-

Federation of Automobiles (FIA – *Fédération Internationale de l'Automobile*). The current rules have been applicable since 2006. The changes in maximum displacements and air supply methods of F1 engines throughout the years 1950-2006 are presented in Fig. 1.

The frequent changes of FIA rules forced the structural changes of F1 engines. The unsupercharged V10 engines used to dominate in the past, their powers reaching the maximum values around 950 KM (Fig. 2). Now the F1 engines need to be 8-cylinder units in a V-type cylinder arrangement, 90° cylinder bifurcation angle.

Displacement is restricted to 2400 cm³; in the 2006 V10 with 3000 cm³ displacement were temporarily admitted, additionally fitted with crankshaft speed limiter to 16 700 rpm and a 77 mm diameter reducer in the inlet manifold, fitted to restrict the engine power. The power achieved by the V8



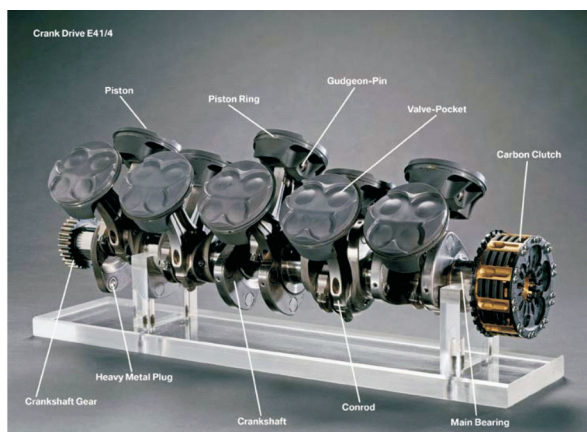
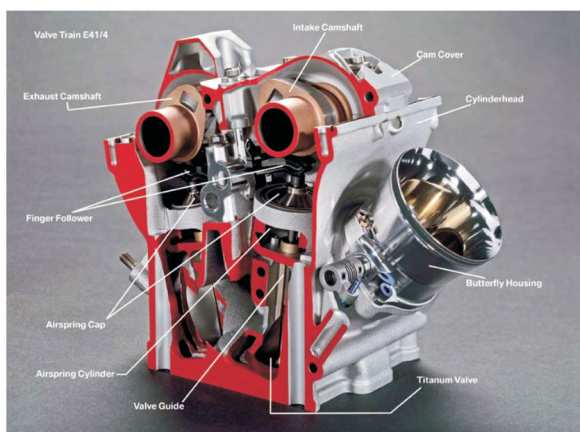
Rys. 1. Wymagania dotyczące pojemności skokowej i sposobów zasilania powietrzem silników Formuły 1

Fig. 1. Requirements concerning displacement and air supply methods of F1 engines

nowały wolnossące silniki V10, których moce osiągały maksymalne wartości około 950 KM (rys. 2). Obecnie silniki Formuły 1 muszą być jednostkami 8-cylindrowymi w układzie cylindrów typu V, o kącie rozwidlenia cylindrów wynoszącym 90°.

Pojemność skokowa silnika jest ograniczona do 2400 cm³; w sezonie wyścigowym 2006 były przejściowo dopuszczone jednostki V10 o pojemności 3000 cm³, wyposażone dodatkowo w ogranicznik prędkości obrotowej wału korbowego do 16 700 obr/min i zwężkę o średnicy 77 mm w układzie dolotowym, których zadaniem było ogra-

is presently estimated at ca. 700–750 HP. According to the FIA rules, each cylinder may have two inlet and two exhaust valves. The engines cannot be supercharged, the cylinder diameter cannot exceed 98 mm, the cylinder axes should be 106.5 mm, and the engine weight – 95 kg. The piston stroke does not exceed 40 mm, while the loads the parts are exposed to often reach the values that are 9000 times as much as the acceleration gravity. No air cooling devices are permitted before the cylinder inlet, the application of variable geometry of the inlet and exhaust system is prohibited as well. Only

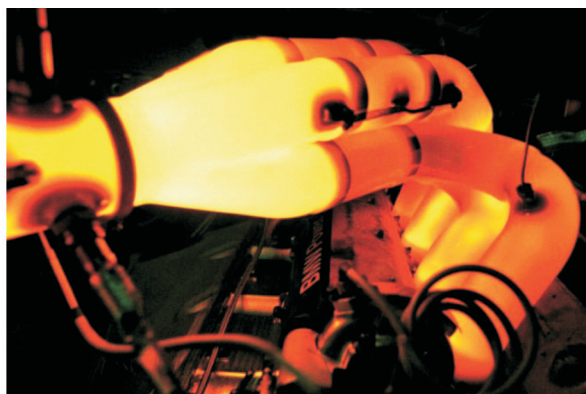
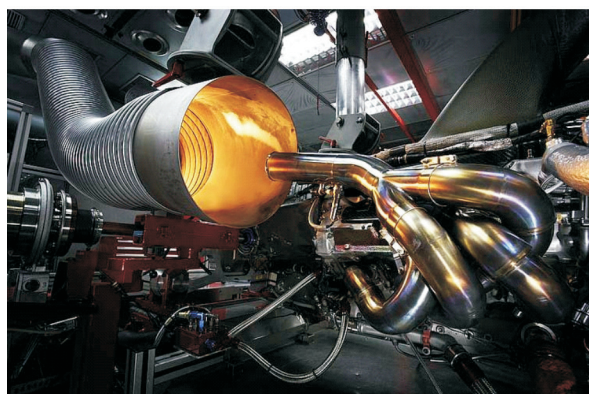


Rys. 2. Elementy silnika Formuły 1 (silnik BMW E41/03 z sezonu 2000: $V_{ss} = 2998 \text{ cm}^3$, $\alpha = 72^\circ$, V10): a) układ rozrządu, b) układ korbowo-łokowy
 Fig. 2. F1 engine elements (BMW E41/03 of the 2000 season: $V_{ss} = 2998 \text{ cm}^3$, $\alpha = 72^\circ$, V10): a) timing gear system, b) crankshaft system

niczenie mocy silnika. Moc rozwijana przez jednostki V8 jest szacowana obecnie na około 700–750 KM. Zgodnie z regulaminem FIA każdy cylinder może mieć dwa zawory dolotowe i dwa wylotowe. Silnik nie może być doładowany, średnica cylindrów nie może być większa niż 98 mm, rozstaw osi cylindrów ma wynosić 106,5 mm, a masa silnika – co najmniej 95 kg. Skok tłoka nie przekracza 40 mm, natomiast przeciążenia jakim są poddawane części osiągają wartości około 9000 razy większe niż przyspieszenie ziemskie. Nie są dozwolone żadne urządzenia schładzające powietrze przed wlotem do cylindra, a także zabronione jest stosowanie systemu zmiennej geometrii układu dolotowego i wylotowego. Na każdy cylinder może być stosowany tylko jeden wtryskiwacz paliwa, a zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze ma być wywołany za pomocą jednej świecy zapłonowej. Maksymalna prędkość obrotowa

one fuel injector may be used per cylinder and the fuel-air mixture ignition in the cylinder is to be induced by means of one ignition plug. The maximum speed of the crankshaft is limited to 19 000 rpm. Additional requirements for the engine endurance were introduced and the results suggest that a Formula 1 engine must obtain the durability of two GP races (training included) and cannot be replaced between them. The engine endurance is of great importance and is now one of the major tasks given to structural engineers (Fig. 3). The materials that the particular engine subassemblies are made from are also controlled by FIA who permit the use of iron, aluminum and titanium alloys only.

Two examples of F1 engines were presented in Fig. 4–5. These are Mercedes-Benz FO110Q engines of the 2004 season and a Renault RS 27 of the 2007 season. The basic comparative data of the engines are presented in Table 1.



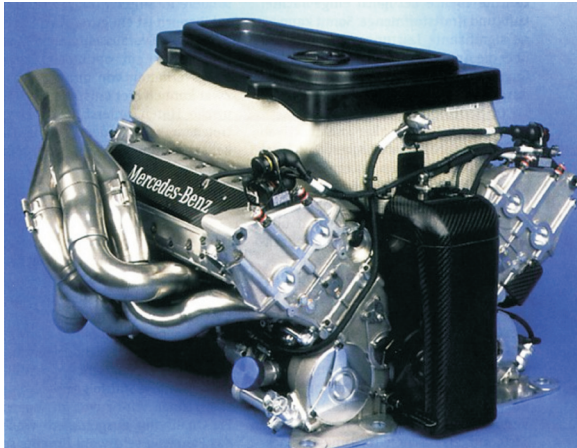
Rys. 3. Badanie silnika Formuły 1 na hamowni silnikowej
 Fig. 3. Testing a Formula 1 engine on engine test bed

wał korbowego jest ograniczona i wynosi 19 000 obr/min. Wprowadzono dodatkowe wymagania związane z wytrzymałością silnika, z których wynika, że silnik Formuły 1 musi osiągać trwałość dwóch zawodów GP (w tym treningów) i nie może być wymieniony między nimi. Wytrzymałość silnika ma duże znaczenie i jest obecnie jednym z głównych zadań stawianych konstruktorom (rys. 3). Materiały, z któ-

The torque of F1 engines is not excessively high. It is mainly due to the low piston stroke. The engines obtain 320–370 N·m (the V10 engines) and 264–300 N·m (the V8 engines). The engine speed range with high torque values available is almost half of the engine speed range available. The maximum torque values fall, at 17 000 rpm crankshaft speed for the V10 engine and at 18 000 rpm for the V8

rych wykonane są poszczególne podzespoły silnika również są kontrolowane przez FIA, która dopuszcza stosowanie wyłącznie stopów żelaza, aluminium i tytanu.

Przykładowe dwa rodzaje silników F1 przedstawiono na rys. 4–5. Są to silniki Mercedes-Benz FO110Q z sezonu 2004 oraz silnik Renault RS 27 z sezonu 2007. Podstawowe dane porównawcze tych silników zaprezentowano w tab. 1.



Rys. 4. Silnik Mercedes-Benz FO110Q z sezonu 2004 [13]

Fig. 4. A Mercedes-Benz FO110Q of the 2004 season [13]

engine, i.e. close to the speed limits of the crankshaft. The maximum power values indicate low elasticity of the engines (Fig. 6).



Rys. 5. Silnik RS 27 – Renault F1 z sezonu 2007 [9]

Fig. 5. An RS 27 – Renault F1 engine of the 2007 season [9]

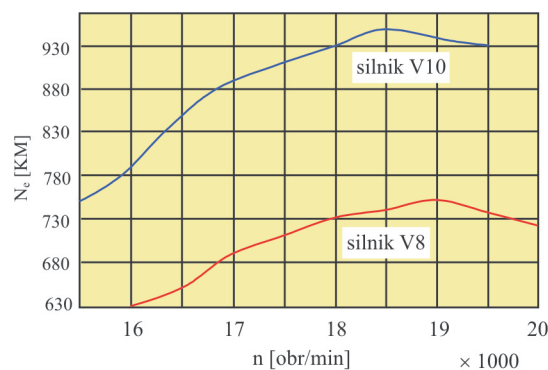
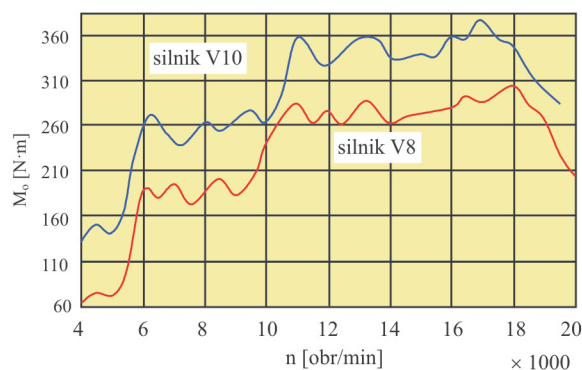
Tabela 1. Dane techniczne i wskaźniki pracy wybranych silników Formuły 1 z sezonu 2004 (Mercedes-Benz) oraz z sezonu 2007 (Renault) [1, 13, 9]
Table 1. Technical data and operating indexes of selected Formula 1 of the 2004 season (Mercedes-Benz) and of the 2007 season (Renault) [1, 13, 9]

Oznaczenie silnika/Engine marking	FO110Q (Mercedes-Benz)	RS 27 (Renault)
Objętość skokowa/Displacement V_{ss} [cm ³]	3000	2400
Kąt rozchylenia osi cylindrów/Cylinder bifurcation angle α [°]	72	90
Maksymalna prędkość obrotowa wału korbowego/Maximum crankshaft speed n_{max} [rpm]	19 000	20 000 ograniczona przepisami do 19 000
Średnica cylindra/Engine's diameter D [mm]	98	98
Masa silnika/Engine's mass m [kg]	95	95
Moc maksymalna/Maximum power $N_{e max}$ [kW]/n [obr/min]	670/18 500	565/19 000
Maks. moment obrotowy/Maximum torque $M_{o max}$ [N·m]	370/17 000	300/18 000
Średnie ciśnienie użyteczne/Average operating pressure p_e [MPa]	1,55	1,57
Wskaźnik elastyczności momentu obrotowego/Torque elasticity index e_m [–]	1,07	1,14
Wskaźnik elastyczności prędkości obrotowej/Engine speed elasticity index e_n [–]	1,09	1,06
Wskaźnik elastyczności silnika/Engine elasticity index E [–]	1,16	1,20
Moment obrotowy przy $N_{e max}$ /Torque at $N_{e max}$ $M_{o N}$ [N·m]	346	264
Moc użyteczna przy $M_{o max}$ /Operating power $M_{o max}$ $N_{e M}$ [kW]	658	565
Jednostkowa masa/Unit mass g_s [kg/kW]	0,14	0,18
Objętościowy wskaźnik mocy/Volumetric power index N_v [kW/dm ³]	223	219
Objętościowy wskaźnik momentu obrotowego/Volumetric torque index M_v [N·m/dm ³]	123	125

Moment obrotowy silników F1 nie jest zbyt duży. Wpływa na to głównie niewielki skok tłoka. Silniki te osiągają 320–370 N·m (silniki V10) oraz 264–300 N·m (silniki V8). Zakres prędkości obrotowej silnika, w którym są osiągane

Comparing the values of the particular indexes one may find that the restriction of the engine displacement caused a growth of their average power/displacement ratio which is shown by the growth of the effective pressure by 1.3%.

duże wartości momentu obrotowego stanowi połowę dostępnego zakresu prędkości obrotowej silnika. Maksymalne wartości momentu obrotowego przypadają przy prędkości obrotowej wału korbowego 17 000 obr/min dla silnika V10 oraz 18 000 obr/min dla silnika V8, tj. blisko granicznych prędkości obrotowych wału korbowego. Wartości mocy maksymalnych wskazują na niewielką elastyczność tych silników (rys. 6).



Rys. 6. Przebiegi momentu obrotowego i mocy jako funkcje prędkości obrotowej wału korbowego silników V10 i V8 [4]

Fig. 6. The torque and power runs as functions of the V10 and V8 engine crankshaft speed [4]

Porównując wartości poszczególnych wskaźników, można stwierdzić, że wymagane przepisami ograniczenie objętości skokowej silników spowodowało wzrost ich wysilenia, o czym świadczy wzrost średniego ciśnienia użytecznego o 1,3%. Nastąpiło pogorszenie wskaźników elastyczności: momentu obrotowego o 1,0% oraz prędkości obrotowej silnika o 2,8%. W wyniku tego wskaźnik elastyczności całkowitej silnika zmalał o 3,5%. Wartość objętościowego wskaźnika mocy silnika zmniejszyła się o 1,8%, ale wartość objętościowego wskaźnika momentu obrotowego wzrosła o 1,6%. Zużycie paliwa dla silników V10 (3 dm³) szacuje się na poziomie 75 dm³ na 100 km, a powietrza na około 650 dm³ na sekundę.

3.2. Przyszłościowe wymagania dotyczące silników pojazdów Formuły 1

Zdaniem prezydenta FIA Maxa Mosley'a, przyszłość silników Formuły 1, jest związana głównie z ograniczeniem zużycia paliwa. Obecne przepisy (od 2008 r.) dotyczące rozwoju silników Formuły 1 zostały „zamrożone”. Zmiany przepisów są możliwe dopiero w 2013 r. (czyli po pięciu latach) po uzyskaniu zgody wszystkich ekip, z dwuletnim wyprzedzeniem ich wprowadzenia. Przewiduje się ograniczenie zużycia energii z paliwa na poziomie 30% [3]. Spowoduje to około 20-procentową redukcję mocy silników (z obecnych 560 kW do około 450 kW), przy założeniu 10-procentowego wzrostu sprawności tych napędów. Głównym źródłem napędu miałyby być silnik V6 o pojemności skokowej 2,2 dm³ i 4 zaworach na cylinder (proponuje te nie zostały obecnie zaakceptowane przez zespoły Formuły 1). Dowolny układ wtryskowy miałyby być ograniczony jedynie ciśnieniem wtrysku paliwa do 50 MPa. Planowane jest wprowadzenie napędów hybrydowych. Ograniczenie mocy silnika spalinyowego pozwala na stosowanie układów dodatkowych (układy

3.2. Future requirements concerning Formula 1 vehicle engines

According to Max Mosley, the President of FIA, the future of Formula 1 engines is tightly knit with the reduction of fuel consumption. The current regulations (from 2008) concerning the Formula 1 engines have been „frozen”. Any changes of the regulations will only be possible in 2013 (i.e. in a 5 years' time) upon consent of all the teams given 2 years prior to their implementation. The restriction of the power consumption from fuel is anticipated to be 30% [3]. This will cause a ca. 20% reduction of the engines power (from the present 560 kW to ca. 450 kW), assuming a 10% growth of the engine efficiency. The main power source would be a V6 engine with 2.2 dm³ displacement and 4 valves per cylinder (such suggestions have not been accepted by the Formula 1 teams now). A free injection arrangement would be restricted by fuel injection pressure to 50 MPa. The implementation of hybrid drives is planned. The restriction of combustion engine power allows the use of additional systems (ones recuperating the kinetic or thermal energy). The consequence of using such systems will be the achievement of engine power on the current level. The turbocompound¹⁾ system enabling the achievement of ca. 50 kW additional power is thought to be the first one. Further 60 kW will be obtained thanks to the possibility of vehicle kinetic energy recuperation or exhaust thermal energy recuperation. In this case it was agreed that the technological capacities of energy restoration would not be restricted, just the energy (power) flow amount to and from the accumulation system. FIA suggests the restriction of energy accumulated to ca. 2.5

¹⁾ A type of turbo-aid enabling the recuperation of some of the exhaust energy, after it leaves the turbo-charger system that is transmitted directly onto the crankshaft.

odzyskujące energię kinetyczną lub ciepłą). Konsekwencją wykorzystania tych układów będzie osiąganie mocy silników na obecnym poziomie. Przypuszcza się, że pierwszym układem będzie turbocompound¹⁾, pozwalający na uzyskiwanie około 50 kW mocy dodatkowej. Kolejne 60 kW uzyska się dzięki możliwości odzysku energii kinetycznej pojazdu lub ciepłej spalin. W tym przypadku osiągnięto porozumienie, że nie będą ograniczone technologiczne możliwości odzysku energii, a jedynie wielkość przepływu energii (mocy) do i z układu magazynującego. FIA proponuje ograniczenie wartości magazynowanej energii do około 2,5 MJ przy założeniu 200 kW mocy wejściowej i wyjściowej (po 100 kW na oś przednią i tylną).

Współczesne i przyszłościowe strategie sterowania przepływem energii w silnikach Formuły 1 przedstawiono na rys. 7 i 8. Obecnie nie wykorzystuje się energii kinetycznej pojazdu i spalin, na co zwraca się uwagę w przyszłych

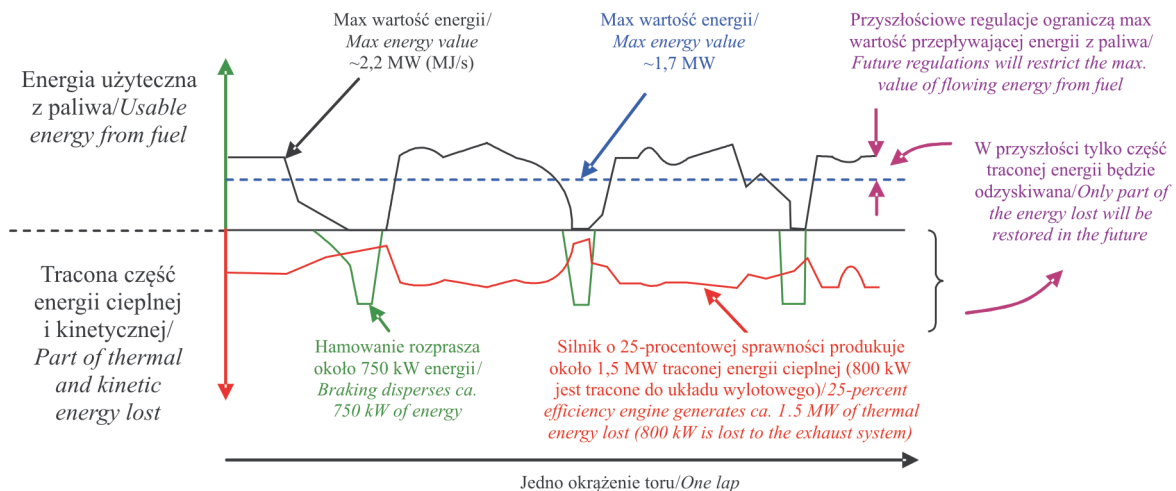
¹⁾Rodzaj turbowspomagania pozwalającego na odzyskiwanie części energii spalin po opuszczeniu układu turbosprężarki, która jest przekazywana bezpośrednio na wał korbowy.

MJ with assumed 200 kW input and output power (100 kW on each front and rear axle).

The contemporary and future strategies of energy flow control in Formula 1 engines are presented in Fig. 7 and 8. Neither the kinetic energy of the vehicle nor that of the exhaust are utilized, which is pointed out in the future regulations concerning the restriction of primary energy – gasoline fuels. An attempt to change the detrimental phenomenon is the use of systems restoring the kinetic and thermal energy, which will enable the growth of power by ca. 100 kW.

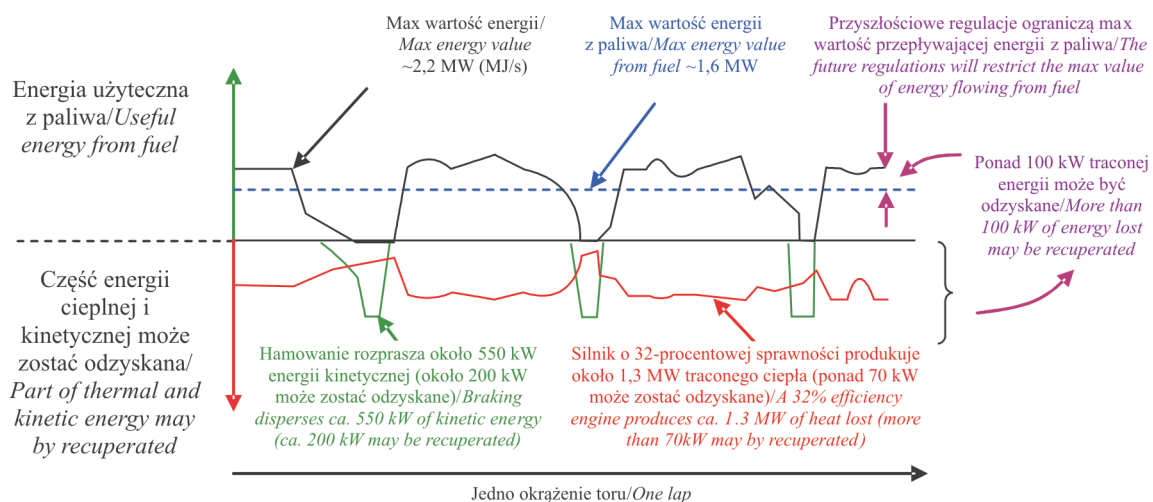
At present ca. 70% of an average race duration the engine operates at full throttle. These are the best conditions to use turbocompound for increasing the engine power through the mechanical gear or electric generator. Scania presently uses this type of aid for heavy-duty engines, achieving a ca. 10% growth of the engine power. In case of Formula 1 engines, the expected growth of power is ca. 50 kW (forecast by Ricardo working with FIA).

The average Formula 1 lap time is ca. 90 s. It consists of ca. 65 s full power engine operation, short time with throttle



Rys. 7. Obecne przepływy energii podczas jednego przykładowego okrążenia toru [3]

Fig. 7. Present energy flows during one exemplary lap [3]



Rys. 8. Przyszłościowe regulacje prawne pozwalające na odzyskiwanie energii hamowania i energii cieplnej pojazdu Formuły 1 [3]

Fig. 8. Future legal regulations enabling the recuperation of braking and thermal energy of a Formula 1 vehicle [3]

przepisach dotyczących ograniczania zużycia energii pierwotnej – paliw benzynowych. Próba zmian tego niekorzystnego zjawiska jest stosowanie układów odzyskujących energię kinetyczną i ciepłą, które umożliwią wzrost mocy na kołach pojazdu o około 100 kW.

Obecnie około 70% czasu trwania przeciętnego wyścigu silnik pracuje z maksymalnie otwartą przepustnicą. Są to najlepsze warunki do wykorzystania *turbocompound* w celu wzrostu mocy silnika przez przekładnię mechaniczną lub generator elektryczny. Firma Scania obecnie wykorzystuje ten rodzaj wspomagania pracy silników typu heavy-duty, osiągając około 10-procentowy wzrost mocy silnika. W przypadku silników Formuły 1 jest spodziewany wzrost mocy o około 50 kW (według prognoz firmy Ricardo współpracującej z FIA).

Średni czas okrążenia toru Formuły 1 wynosi około 90 s. Składa się na to około 65 s czasu pracy silnika z pełną mocą, krótki czas pracy z częściowo uchyloną przepustnicą oraz około 15 s hamowania pojazdu. Jeśli jest możliwe wykorzystanie tylko 200 kW (ograniczone przepisami), to w czasie około 15 s otrzymuje się wartość 3 MJ energii. Tak więc wspomniane zapisy dotyczące magazynowania energii o wartości 2,5 MJ są niewystarczające, co powoduje brak wspólnych ustaleń Komisji.

Możliwe jest rozpatrzenie dwóch skrajnych przypadków, dotyczących torów o różnej charakterystyce jazdy pojazdów, pozwalających na odzyskiwanie różnych wartości energii. Na przykład tor w Shanghaju „pozwala” na wykonywanie manewrów hamowania w łącznym czasie około 10 s podczas okrążenia trwającego 95 s. Czas ten jest wystarczający na zgromadzenie energii o wartości około 2 MJ, możliwej do ponownego wykorzystania. Jednak w ekstremalnym przypadku, np. toru w Monaco, łączny czas hamowania to 25 s, podczas gdy okrążenie toru trwa 75 s. Pozwalałoby to na zgromadzenie energii o wartości około 5 MJ. W myśl przepisów ultrakondensatory ze zgromadzoną energią musiałyby zostać całkowicie rozładowane (na każdym okrążeniu), dostarczając około 60 kW mocy.

Powyższe regulacje wymagają nowych układów i systemów wyposażenia pojazdów F1. Wzrost masy spowodowany układami gromadzenia energii (ultrakondensatory, akumulatory, generatory/silniki elektryczne) nie rekompensuje zmniejszenia masy tankowanego paliwa oraz zmian w masie silnika spowodowanych ograniczeniami liczby cylindrów i mocy (tab. 2).

Obecnie akumulator o masie 24 kg jest w stanie dostarczyć 60 kW mocy. Jednakże wymagane jest dodatkowe 20 kg masy kondensatorów (o mocy właściwej 10 kW/kg) w celu zapewnienia 100 kW mocy przenoszonej na każdą oś kół. W rezultacie akumulator oraz kondensatory zwiększają masę pojazdu o 45 kg.

partly open and ca. 15 s of vehicle braking. If the use of 200 kW (restricted by regulation) is possible, then 3 MJ of energy is obtained within ca. 15 s thus, the said provisions on 2.5 MJ energy accumulation are insufficient, which causes the lack of Commission mutual agreements.

It is possible to consider two extreme cases related to race circuits with different vehicle run characteristics, allowing the recuperation of various energy values. The circuit in Shanghai, for example "permits" braking within the total time ca. 10 s during lap time of 95 s. Such duration is sufficient to accumulate ca. 2 MJ energy, possible to be reused. However, in an extreme case, e.g. on the Monaco circuit the total braking time is 25 s, while the lap time is 75 s. This would allow the accumulation of ca. 5 MJ energy. According to the regulations, the supercapacitors with accumulated energy would have to be totally discharged (in each lap) supplying ca. 60 kW power.

The above regulations require new F1 vehicle systems and equipment. The growth of weight caused by energy accumulation systems (supercapacitors, batteries, generators/electric motors) does not compensate the mass of the fuel refilled or the changes in the engine mass caused by the restriction of the number of cylinders and power (Table 2).

At present a battery weighing 24 kg is capable of supplying 60 kW power. However, additional 20 kg of capacitor weight is required (of 10 kW/kg specific weight), in order to provide 100 kW of power transmitted on each wheel axle. As a result, the battery and capacitors add 45 kg to the vehicle weight.

Tabela 2. Zmiany mas podsystemów pojazdu Formuły 1 [3]

Table 2. Subsystem mass changes in a Formula 1 vehicle [3]

Podsystem/Subsystem	Minimalna zmiana masy [kg] (+ wzrost masy, – redukcja masy)/Minimum change of mass [kg] (+ growth, – reduction)
Akumulatory i ultrakondensatory/ <i>Batteries and supercapacitors</i>	+45
Przedni generator/silnik 100 kW/ <i>Front generator/motor 100 kW</i>	+12,5
Tylny generator/silnik 100 kW/ <i>Rear generator/motor 100 kW</i>	+12,5
Jednostka kontrolna mocy/ <i>Power control unit</i>	+15
Ciepłny odzysk energii/ <i>Thermal energy recuperated</i>	+15
Całkowity wzrost masy układów dodatkowych/ <i>Total increase of additional systems weight</i>	+100
Zmniejszenie balastu + lżejsze podwozie/ <i>Reduction of ballast + lighter chassis</i>	–60
Zmniejszona masa silnika spalinowego/ <i>Reduced weight of combustion engine</i>	–5
Mniejsza o 30% masa paliwa/ <i>Fuel weight reduced by 30%</i>	–30
Całkowity wzrost masy/<i>Total growth of weight</i>	+5 kg

4. Pojazdy World Rally Championship (WRC)

4.1. Wymagania ogólne

Zgodnie z regulaminem FIA dotyczącym specyfikacji pojazdów WRC (*World Rally Championship*), w zależności od rodzaju samochodu i pojemności skokowej silników ustalono dwie grupy pojazdów: grupa N pojazdów seryjnych i grupa A pojazdów turystycznych. Grupy te dzielą się na następujące podgrupy zależne od objętości skokowej silnika:

grupa N:

- N1 – do 1400 cm³,
- N2 – 1400 do 1600 cm³,
- N3 – 1600 do 2000 cm³,
- N4 – powyżej 2000 cm³;

grupa A:

- A5 – do 1400 cm³,
- A6 – 1400 do 1600 cm³,
- A7 – 1600 do 2000 cm³,
- ATD – powyżej 2000 cm³ (także doładowane silniki o zapłonie samoczynnym).

Grupy dzielą się również na podgrupy ze względu na parametry pojazdu, np.: oś napędowa przednia lub tylna, napęd na wszystkie cztery koła itp.

W przepisach uwzględniono również, że silniki są jednostkami czterocylindrowymi, mogą być doładowane turbosprężarką, liczba zaworów przypadająca na jeden cylinder nie jest określona. Natomiast dla każdej z grup określona jest przepisami dopuszczalna wartość mocy silnika. Należy zwrócić uwagę, że jednostki napędowe pojazdów WRC nie są obwarowane tak szczegółowymi wymaganiami, jak silniki Formuły 1. Dlatego w pojazdach WRC można zaobserwować większą różnorodność typów jednostek napędowych.

4.2. Charakterystyka silników WRC

W zależności od grupy zaszeregowania pojazdów można wyróżnić kilka jednostek napędowych. Są to silniki o pojemności skokowej silnika 1400, 1600 i 2000 cm³. Poniżej zamieszczono przykłady silników z grupy pojazdów A7 (tab. 3).

4. World Rally Championship (WRC) vehicles

4.1. General requirements

According to the FIA rules related to the specification of the WRC (World Rally Championship) vehicles, depending on the type of car and engine displacement, two groups of vehicles were differentiated: group N of serial production vehicles and group A of touring vehicles. The groups are divided into the following sub-groups, depending on the engine displacement:

group N:

- N1 – up to 1400 cm³,
- N2 – 1400 to 1600 cm³,
- N3 – 1600 to 2000 cm³,
- N4 – above 2000 cm³;

group A:

- A5 – up to 1400 cm³,
- A6 – 1400 to 1600 cm³,
- A7 – 1600 to 2000 cm³,
- ATD – above 2000 cm³ (supercharged, internal combustion engines).

The groups are also divided into sub-groups by the vehicle parameters, e.g.: front or rear driving axle, four-wheel drive, etc.

The regulations also consider the fact that the engines are four-cylinder units, may be supercharged, the number of valves per cylinder is not specified. However, the engine power value permitted by the regulations is determined.






It should be noted that the driving units of WRC vehicles are not subject to requirements as detailed as F1 engines. Therefore, a variety of drive unit types is observed within the WRC vehicles.

4.2. The WRC engine characteristics

Depending on the vehicle classification group, several drive units can be differentiated. These are engines with 1400, 1600 i 2000 cm³ engine displacement. Examples of A7 vehicle group engines are presented below (Table 3).

Tabela 3. Specyfikacja silników pojazdów WRC grupy A7 [5, 10, 18]

Table 3. Group A7 WRC vehicle engine specification [5, 10, 18]

Pojazd/Vehicle					
Silnik/Engine	boxer, 4-cyl., 16-zaw.	rzędowy/inline 4-cyl., 16-zaw.	rzędowy/inline 4-cyl., 16-zaw.	rzędowy/inline 4-cyl., 20-zaw.	rzędowy/inline 4-cyl., 16-zaw.
V _{ss} [cm ³]	1994	1997	1995	1999	1999
N _{e max} [kW]/n [obr/min]	210/5500	210/5250	210/5300	207/6250	210/6000
D × S [mm × mm]	92 × 75	85 × 88	83 × 92,2	82,5 × 93,5	85 × 88
M _{o max} [N·m]/n [obr/min]	480/4000	535/3500	540/3500	501/3250	550/4000
Turbosprężarka/turbocharger	IHI + intercooler	Garrett-Alliet Signal	Garrett TR 30 R	Garrett	Garrett 34
ε [–]	9,0	b.d.	8,6	8,7	b.d.
p _e [MPa]	3,03	3,37	3,40	3,15	3,46
N _v [kW/dm ³]	105	105	105	104	105
M _v [N·m/dm ³]	241	268	271	251	275

Większość jednostek napędowych to czterocylindrowe silniki o rzędowym układzie cylindrów, rozrządzie typu DOHC z czterema zaworami na cylinder, doładowane turbosprężarką (rys. 9).



Rys. 9. Silnik pojazdu Ford Focus WRC [5]

Fig. 9. Ford Focus WRC engine [5]

5. Pojazdy wyścigów Le Mans

5.1. Główne wymagania dotyczące silnika

Wyścigi Le Mans po raz pierwszy odbyły się w 1923 r. Ideą powołania tego wyścigu było wyzwanie stawiane pojazdom, które polega na pokonaniu możliwie najdłuższej trasy przejazdu pojazdem samochodowym w czasie 24 h. Trasę przejazdu stanowi tor o długości około 13 km. Dopuszczalne są modyfikacje w zakresie elementów podwozia i nadwozia pojazdów biorących udział w tych wyścigach w stosunku do pojazdów seryjnych, natomiast modyfikacje dotyczące jednostek napędowych są znikome. Obecne przepisy dopuszczają 10-procentowe różnice między wybranymi elementami silników w stosunku do elementów silników seryjnych. Przykładem tego jest dopuszczenie wału korbowego o masie mniejszej o 10% od wału wykorzystywanego w silniku seryjnym [14].

Pojazdy startujące w wyścigu Le Mans zaregrowane są grupowo zgodnie z regulaminem FIA z 12.12.2006 r. Poszczególne grupy i dopuszczalne pojemności skokowe silników przedstawiono w tab. 4.

Z przedstawionych ograniczeń zawartych w przepisach FIA wynika, że pojazdy biorące udział w wyścigu Le Mans są napędzane silnikami o zapłonie iskrowym w wersjach wolnossącej lub doładowanej turbosprężarką. Natomiast silnik o zapłonie samoczynnym, doładowany turbosprężarką dopuszczony jest w grupie startowej pojazdów prototypowych LM P1. We wszystkich grupach istnieje dowolność w wyborze typu konstrukcji silnika z wyjątkiem grupy pojazdów prototypowych LM P2. Dla tych pojazdów w przepisach dodatkowo zapisano, że dla silników o zapłonie iskrowym, wolnossących, dopuszczalna liczba cylindrów silnika wynosi 8 i mogą być ułożone w układzie widlastym. Dla silników doładowanych z tej grupy nie określono sposobu ułożenia cylindrów, ale ograniczono ich liczbę do 6. Dla grup LM P1 i P2 obecnie dopuszczono do zastosowania silniki zasilane biopaliwami (benzyna wraz z 10-procentowym dodatkiem etanolu lub biopaliwa).

Most of the drive units are four-cylinder engines with in-line cylinder arrangement, DOHC, four valves per cylinder, turbocharged (Fig. 9).

5. Le Mans vehicles

5.1. Major requirements for the engine

The first Le Mans racing took place in 1923. The concept of establishing this race was the challenge to the vehicles, namely to drive the possibly longest distance within 24 h. The route is ca. 13 km circuit. Some modifications of the chassis and body elements in the participating vehicles in relation to the serial production is permitted, while the modifications of the drive units are scarce. The present regulations permit 10% differences between selected engine elements, compared to serial engine elements. An example is the admission of crankshaft weighing 10% less than the one used in a serial engine [14].

The vehicles participating in Le Mans are classified in groups, according to the FIA rules of 12.12.2006. The particular groups and permitted engine displacements are presented in Table 4.

The FIA restrictions presented suggest that the vehicles participating in Le Mans are powered by spark ignition engines in unsupercharged or supercharged version, while the supercharged diesel engine is admitted within the prototype LM P1 competitor group. The free selection of an engine

Tabela 4. Dopuszczalne maksymalne pojemności skokowe silników [cm³] dla pojazdów uczestniczących w wyścigach Le Mans [14]

Table 4. Permitted maximum engine displacements [cm³] for vehicles participating in Le Mans [14]

Grupa/Group	Le Mans Prototype 1 LM P1	Le Mans Prototype 2 LM P2	Le Mans Grand Touring 1 LM GT1	Le Mans Grand Touring 2 LM GT2
Typ silnika/Engine type				
Wolnossący ZI/ Unsupercharged SI	6000	3400, max 8 cyl, układ V	8000	8000
Doładowany ZI/ Supercharged SI	4000	2000 (max 6 cyl.)	4000	4000
Doładowany ZS/ Supercharged CI	5500	–	–	–
Uwagi/Remarks	Minimalna masa 950 kg/Minimum weight 950 kg	Minimalna masa 852 kg/Minimum weight 852 kg	–	–

design exists in all the groups except the LM P2 prototype vehicle group. Additionally, it was provided in the regulations for the vehicles that for spark-ignition, unsupercharged engines, the permitted number of engine cylinders is 8 in a V-arrangement. For this group of supercharged engines the method of cylinder arrangement was not determined, but their number was restricted to 6. For LM P1 and P2 groups the biofuelled (petrol with 10% ethanol or biofuel addition) engines have recently been admitted.

5.2. Le Mans vehicle engines

The automotive progress taking place since 1923 can be observed based on the results achieved in Le Mans [12] (Fig. 10). During the first race, a vehicle with a 4-cylinder

5.2. Silniki pojazdów Le Mans

Postęp w motoryzacji, jaki się dokonał od 1923 r. można zaobserwować na podstawie wyników uzyskiwanych podczas wyścigu Le Mans [12] (rys. 10). W pierwszym wyścigu w czasie 24 h pojazd z czterocylindrowym silnikiem o pojemności skokowej 2978 cm³ pokonał trasę o długości 2209,5 km, a w 2005 r. była to już trasa 5050,5 km pokonana pojazdem napędzanym silnikiem ZS V8 o pojemności 3595 cm³.

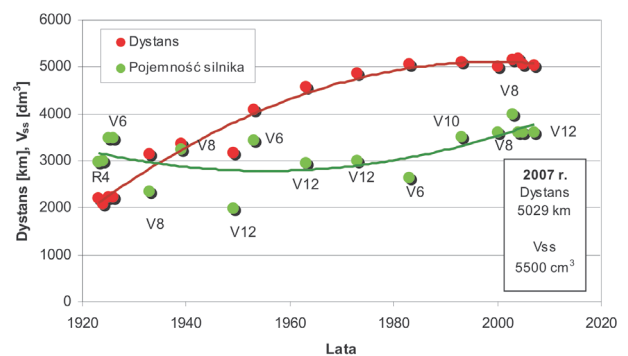
Zestawiając najlepsze wyniki z kilku wyścigów, można stwierdzić, że początkowo rozwój silników spalinowych pozwalał na pokonywanie coraz dłuższych tras przez pojazdy w kolejnych wyścigach Le Mans. Z upływem czasu silnik spalinowy był już na tyle dopracowany, że od lat 80. ubiegłego wieku długość trasy pokonywanej przez pojazdy w czasie 24 godzin prawie nie ulega zmianie. Analizując przedstawione na wykresie dane, można wysunąć tezę, że rozwój dzisiejszych silników spalinowych osiągnął pewien kres i przy zachowaniu obowiązujących przepisów dotyczących silników spalinowych napędzających pojazdy biorące udział w wyścigach Le Mans nie należy spodziewać się pokonania większych dystansów w ciągu 24 godzin niż 5100 km.

W niniejszym artykule przedstawiono kilka wybranych pojazdów biorących udział w wyścigach Le Mans i wielkości charakteryzujące ich jednostki napędowe (tab. 5). Coraz częściej w tym wyścigu udział biorą pojazdy wyposażone w silniki o zapłonie samoczynnym. Pierwszym pojazdem tego typu było Audi R10 TDI. Startując po raz pierwszy w Le Mans w 2006 r. zostało „zwycięzcą wyścigu”. Obecnie inne koncerny samochodowe również wystawiają w wyścigu swoje pojazdy napędzane silnikami ZS. W Le Mans 2007 wystartowały Audi R10 TDI oraz Peugeot 908 HDi FAP (rys. 11), jednak zwycięstwo odniosło ponownie Audi R10 TDI.

Silnik Audi R10 TDI zaprezentowano w 2005 r. [2]. Na rysunku 12 przedstawiono symulacje ciśnienia w cylindrze i momentu obrotowego jako funkcje prędkości obrotowej silnika. Dodatkowo zamieszczono temperaturę spalin dopro-

engine with 2978 cm³ displacement drove 2209.5 km length within 24 h, while in 2005 this was 5050.5 km length driven by a vehicle powered by a CI V8 engine with 3595 cm³ displacement.

Comparing the best results of several races, one may find that at first the combustion engine development allowed covering longer and longer distances by the vehicles in subsequent Le Mans events. As the time passed, the engine was so well developed that the distance covered within 24 hours by the vehicles remains almost the same since the 1980's. Analyzing the data presented in the graph one may stipulate that the development of contemporary combustion engines had reached a certain peak and, maintaining the applicable regulations concerning combustion engines powering the vehicles participating in Le Mans, covering a distance exceeding 5100 km within 24 hours should not be expected.











Rys. 10. Charakter zmian pokonywanego dystansu przez pojazdy w wyścigu Le Mans (dodatkowo naniesiono objętości skokowe silników tych pojazdów)

Fig. 10. The nature of changes of the distance covered by the vehicles in Le Mans (engine displacements of the vehicles included additionally)

This paper presents several selected vehicles participating in Le Mans and the figures characterizing their drive units

Tabela 5. Specyfikacja silników pojazdów startujących w wyścigu Le Mans [3, 8, 15, 20]

Table 5. Specification of Le Mans vehicle engines [3, 8, 15, 20]

Pojazd/Vehicle	 Audi R10 TDI	 Porsche 911 GT3 RSR	 Ferrari F 430 GT	 Peugeot 908 HDi FAP
Silnik/Engine	 V12, ZS/CI	 boxer, ZI, 6 cyl./SI	 V8, ZI, 5 zaw./cyl./SI	 V12-100°, ZS/CI
V_{ss} [cm ³]	5500	3598	4308	5500
$N_{e\max}$ [kW]/n [obr./min]	475/5000	335/8500	360/8000	490/4000
$M_{o\max}$ [N·m]/n [obr./min]	1100/4000	410/7200	465/5250	1200/–
$D \times S$ [mm × mm]	92 × 75	99,99 × 76,4	92 × 81	–
ε [–]	18	–	11,3	–
p_e [MPa]	2,51	1,43	1,36	2,74
N_v [kW/dm ³]	86	93	84	89
M_v [N·m/dm ³]	200	114	108	218



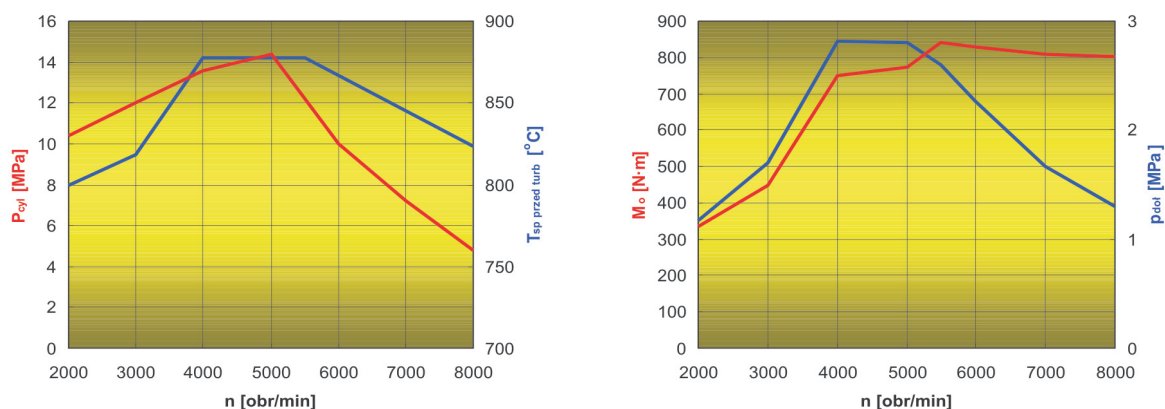
Rys. 11. Silnik i pojazd Peugeot V12 HDi FAP Le Mans [17]

Fig. 11. Engine and vehicle: Peugeot V12 HDi FAP Le Mans [17]

wadżanych do turbiny, moment obrotowy silnika i ciśnienie jego doładowania. Należy podkreślić, że w symulacyjnym ustalaniu tych parametrów zakres prędkości obrotowej wału korbowego silnika jest znacznie większy niż zakres prędkości rzeczywistej eksploatacji silnika. Silnik Audi R10 TDI maksymalną moc osiąga przy prędkości obrotowej wału korbowego równej 5000 obr/min. Dla tej prędkości silnik dysponuje prawie maksymalnym momentem obrotowym, który w wyniku dużego stopnia doładowania i odpowiedniego sterowania ciśnieniem doładowania utrzymuje stałą wartość w zakresie prędkości obrotowej od 4000 do 5000 obr/min. Silnik ten w porównaniu z silnikami o zapłonie

(Table 5). More and more frequently the vehicles participating in the race are fitted with diesel engines. The first vehicle of this type was Audi R10 TDI. Participating in Le Mans in 2006 for the first time it was “the race winner”. At present other automotive corporations also entered their CI engine powered vehicles for the competition. Audi R10 TDI and Peugeot 908 HDi FAP participated in Le Mans 2007 (Fig. 11), however, the winner was Audi R10 TDI again.

The Audi R10 TDI engine was presented in 2005 [2]. Fig. 12 presents simulations of pressure in the cylinder and torque as functions of the engine speed. In addition the temperature of exhaust supplied in the turbine, the engine torque and its



Rys. 12. Symulacyjne charakterystyki parametrów pracy jako funkcji prędkości obrotowej silnika Audi R10 TDI [2]

Fig. 12. Simulation characteristics of operating parameters of the Audi R10 TDI engine [2]

iskrowym, stosowanymi do napędu pojazdów biorących udział w wyścigu Le Mans ma zbliżoną wartość dostępnej mocy silnika, natomiast wartość momentu obrotowego, którym dysponuje jest dwukrotnie większa.

Porównując wartości poszczególnych wskaźników (tab. 5), można stwierdzić, że sukces silnika Audi R10 TDI jest niewątpliwie związany z jego parametrami eksploatacyjnymi, których wartości są znacznie większe od wartości przedstawianych silników o zapłonie iskrowym. Wartość średniego ciśnienia użytecznego jest większa o 43%. Wskaźnik elastyczności momentu obrotowego jest większy o 12%, a elastyczność prędkości obrotowej jest większa o około 6% od silnika Porsche, ale mniejsza o 18% od silnika

supercharge pressure were included. It should be pointed out that in the simulation establishing the parameters the engine crankshaft speed range is significantly larger than that of the real engine operation range. The Audi R10 TDI engine achieves the maximum power at the speed equal to 5000 rpm. For such speed, the engine has almost a maximum torque that maintains a constant value within 4000 to 5000 rpm. The engine, compared to spark-ignition engines, used to power the vehicles participating in Le Mans is close to that of the available engine power, while the value of the torque available to the engine is twice as high.

Comparing the values of the particular indexes (Table 5), one may find that the success of Audi R10 TDI is undoubtedly

Ferrari F430. Dzięki temu wskaźnik elastyczności całkowitej silnika wynosi 1,53 i jest większy o 17% od wskaźnika elastyczności silnika Porsche 911 GT3 RSR oraz mniejszy o 7% od wskaźnika elastyczności silnika Ferrari F430. Wartość objętościowego wskaźnika mocy silnika jest mniejsza o 9% od silnika Porsche 911 GT3 RSR i taka sama jak dla silnika Ferrari F430.

6. Porównanie wskaźników pracy silników wyczynowych i konwencjonalnych

W przeprowadzonej analizie literaturowej dokonano przeglądu konstrukcji i parametrów silników spalinowych pojazdów konwencjonalnych pretendujących do miana pojazdów sportowych. Spośród wszystkich pojazdów wybrano kilka, których silniki przedstawiono w tab. 6. Wyszczególniono także pojazdy sportowe dostępne na rynku pojazdów ogólnego przeznaczenia (tab. 7).

connected with its operating parameters with values significantly exceeding that of spark-ignition engines. The value of average effective pressure is by 43% higher. The displacement elasticity is by 12% higher and the elasticity of the speed is by ca. 6% higher than in the Porsche engine, but by 18% lower than in the Ferrari F430 engine. Therefore, the total elasticity index of the engine is 1.53 and is by 17% higher than the Porsche 911 GT3 RSR engine elasticity index and by 7% lower than the Ferrari F430 elasticity index. The volumetric index of the engine power is by 9% lower than in the Porsche 911 GT3 RSR engine and is the same as for the Ferrari F430 engine.

6. Comparison of high performance and conventional engine operating indexes

Literature analysis of the structure and parameters of combustion engines of conventional vehicles that aspired to be sports vehicles has been conducted. Out of all the vehicles

Tabela 6. Wybrane dane techniczne silników pojazdów konwencjonalnych [9, 15, 16, 19]

Table 6. Selected technical data of conventional vehicle engines [9, 15, 16, 19]







Pojazd/Vehicle	Mercedes CDI 420	Mercedes CLK 350	Mercedes C 230	BMW M5	Porsche 911 turbo	Volkswagen TSI 1,4
Silnik/Engine	 V8-75°, ZS, 4 zaw./cyl.	 V6 ZI, 4 zaw./cyl.	 V6 ZI, 4 zaw./cyl.	 V10 ZI, 4 zaw./cyl.	 boxer ZI, 6 cyl., 4 zaw./cyl., doład. 2. turbosprężarkami	 R4, ZI, 4 zaw./ cyl., doład. sprężarką mechaniczną i turbosprężarką
V_{ss} [cm ³]	3996	3498	2496	4941	3600	1390
$N_{e\max}$ [kW]/n [obr/min]	231/3600	200/6000	150/6100	373/7750	353/6000	125/6000
$M_{o\max}$ [N·m]/n [obr/min]	730/2200	350/2400	245/2900	520/6100	620/1950–5000	240/1750–4500
$D \times S$ [mm × mm]	86 × 86	92,9 × 86	88 × 68,4	75,2 × 92	100 × 76,4	76,5 × 75,6
ε [–]	16,7	10,7	11,4	–	9	10
p_e [MPa]	2,30	1,26	1,23	1,32	2,16	2,17
N_v [kW/dm ³]	58	57	60	75	98	90
M_v [N·m/dm ³]	183	100	98	105	172	173

Tabela 7. Wybrane dane techniczne silników pojazdów sportowych [11, 16]

Table 7. Selected technical data of sports vehicle engines [11, 16]

Pojazd/Vehicle	Aston Martin DBR9	Corvette C6R	Mercedes SLR 722
Silnik/Engine	 I, V12, 4 zaw./cyl.	 ZI, V8, 2 zaw./cyl.	 ZI, V8-90°, 3 zaw./cyl.
V_{ss} [cm ³]	5935	7011	5439
$N_{e\max}$ [kW]/n [obr/min]	448/6500	440/5400	478/6500
$M_{o\max}$ [N·m]/n [obr/min]	650/550	867/4400	820/4000
$D \times S$ [mm × mm]	89 × 79,5	104,8 × 101,6	97 × 92
ε [–]	10,2	11,0	8,8
p_e [MPa]	1,38	1,55	1,89
N_v [kW/dm ³]	75	63	88
M_v [N·m/dm ³]	110	124	151

Tłokowe silniki spalinowe można porównywać ze sobą niemal wyłącznie na podstawie wybranych wskaźników ich pracy. W tym celu wyznaczono wartości średniego ciśnienia użytecznego, elastyczności (momentu obrotowego, prędkości obrotowej i elastyczności całkowitej) oraz objętościowych wskaźników mocy i momentu obrotowego.

Z porównania wielkości parametrów przedstawionych silników wynika, że najbardziej wysiłonymi jednostkami napędzającymi pojazdy są silniki Formuły 1 (rys. 13 i 14). Z podanej specyfikacji (tab. 1) silników FO110Q (Mercedes-Benz) i RS 27 (Renault) wynika, że silniki te uzyskują moce jednostkowe odpowiednio 223 i 219 kW/dm³. Takie wartości parametrów nie są osiągane przez inne silniki tłokowe, a to dzięki dużemu zakresowi rozwijanych prędkości obrotowych wału korbowego. Prędkości obrotowe silników Formuły 1 są przynajmniej trzykrotnie większe od prędkości silników pojazdów konwencjonalnych, także tych sprzedawanych jako pojazdy sportowe ogólnego przeznaczenia. Skutkuje to dwukrotnie większą wartością mocy jednostkowej niż w przypadku silników pozostałych pojazdów. Duża prędkość obrotowa silnika Formuły 1 w konsekwencji uniemożliwia osiągnięcie dużych wartości momentu obrotowego, gdyż konstrukcja układu korbowego musi być „zwarta”, czyli wszystkie masy wirujące układu powinny znajdować się w możliwie bliskiej odległości od głównej osi wału. Wartości średniego ciśnienia użytecznego wynoszą odpowiednio 1,55 i 1,57 MPa i są maksymalnie o 35% większe od wartości dla silników ZI przedstawionych pojazdów (rys. 14). Silniki F1 uzyskują objętościowy wskaźnik momentu obrotowego około 125 N·m/dm³, co jest wartością przeciętnie osiąganą przez silniki konwencjonalne lub też silniki pojazdów sportowych. Dla pojazdów WRC wskaźniki te są dwukrotnie większe.

Przepisy dotyczące silników biorących udział w wyścigu Le Mans dopuszczają możliwość istnienia 10% różnic w konstrukcji tych jednostek napędowych pojazdów w stosunku do produkowanych seryjnie. Moc jednostkowa tych silników o zapłonie iskrowym wynosi 84–93 kW/dm³ i jest większa od porównywalnych silników pojazdów konwencjonalnych o co najmniej 40%. Dla tych silników jednostkowy moment obrotowy wynosi 108–114 N·m/dm³ i jest to wartość zbliżona do ich konwencjonalnych odpowiedników. Wartości średniego ciśnienia użytecznego są również zbliżone. Silniki o zapłonie samoczynnym napędzające pojazdy w wyścigu Le Mans charakteryzują się mocą jednostkową wynoszącą

several were selected and their engines were presented in Table 6. Sports vehicles available on the market (conventional) were also specified (Table 7).

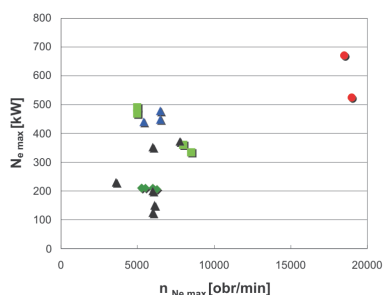
Piston combustion engines may be compared to one another on account of some selected operating indexes. The values of average effective pressure, elasticity values were determined for this purpose (torque, speed and total elasticity) and volumetric power and torque indexes.

As a result of comparison of the presented engine parameters one may state that the units with the highest displacement-power ratio driving the vehicles are Formula 1 engines (Fig. 13 and 14). The specification presented (Tab. 1) of the FO110Q (Mercedes-Benz) and RS 27 (Renault) engines suggests that the engines achieve 223 and 219 kW/dm³, respectively. Such parameter values cannot be achieved by other piston engines, this is thanks to the wide range of crankshaft speeds. The Formula 1 engine speeds are at least three times higher than those of conventional vehicles, also the ones sold as sports vehicles of general purpose. High engine speed of a Formula 1 engine in consequence impedes the obtainment of high torque values because the crankshaft structure must be “compact”, i.e. all the rotating weights of the system should be possibly close to the main shaft axis. The values of average effective pressure are 1.55 and 1.57 MPa, respectively and are by 35% maximum higher than the value for SI engines of the vehicles presented (Fig. 14). The F1 engines obtain volumetric torque index of 125 N·m/dm³, which is the average value obtained by conventional engines of sports engines. For the WRC vehicles the indexes are twice as high.

The regulations concerning the vehicles participating in Le Mans permit the existence of 10% differences in the structure of the drive units of the vehicles compared to the serial production. The unit power of the spark-ignition engines is 84–93 kW/dm³ and is higher than comparable conventional vehicles by at least 40%. The unit torque for the engines is 108–114 N·m/dm³ and this is a value close to its conventional equivalents. The values of average effective pressure are also close. The internal combustion engines powering the vehicles in Le Mans are characterized with unit power of ca. 86 kW/dm³ (Audi R10) and 89 kW (Peugeot 908). Compared to the ZS Mercedes-Benz CDI 400 (58 kW/dm³) engines, these are values higher by 32 and 34%, respectively. The values of powers achieved occur at high crankshaft speeds – ca. 5000

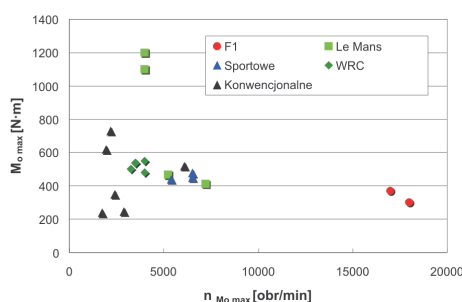
rpm (for a conventional engine the maximum values fall at ca. 3600 rpm). The values of unit torque are 200 N·m/dm³ (Audi R10) and 218 N·m/dm³ (Peugeot 908) and are by 8% and 16% respectively higher than the values of a conventional engine. The values correspond to the average effective pressure.

The engines of vehicles participating in WRC are characterized with high volumetric index and torque: 105 kW/dm³ and 241–275



Rys. 13. Rozkład punktów mocy maksymalnej i momentu maksymalnego silnika w zależności od prędkości obrotowej

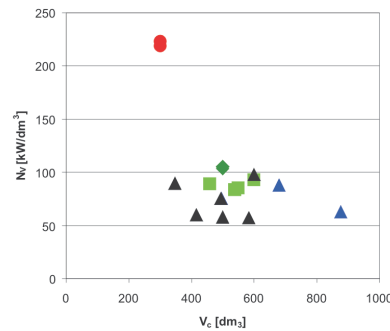
Fig. 13. The distribution of maximum power and maximum torque of engine, depending on the crankshaft speed



cą około 86 kW/dm^3 (Audi R10) i 89 kW (Peugeot 908). W porównaniu do silnika ZS Mercedes-Benz CDI 400 (58 kW/dm^3) są to wartości większe odpowiednio o 32 i 34%. Wartości osiąganych mocy występują przy dużych prędkościach obrotowych wału korbowego – około 5000 obr/min (dla silnika konwencjonalnego wartości maksymalne przypadają przy prędkości około 3600 obr/min). Wartości jednostkowego momentu obrotowego wynoszą $200 \text{ N}\cdot\text{m/dm}^3$ (Audi R10) i $218 \text{ N}\cdot\text{m/dm}^3$ (Peugeot 908) i są odpowiednio większe o 8% i 16% od tych wartości dla silnika konwencjonalnego. Wartości te są analogiczne do średniego ciśnienia użytecznego.

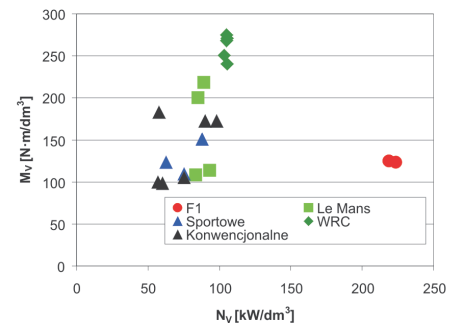
Silniki pojazdów biorących udział w wyścigach WRC charakteryzują duże wartości objętościowego wskaźnika mocy i momentu obrotowego: odpowiednio 105 kW/dm^3 oraz $241\text{--}275 \text{ N}\cdot\text{m/dm}^3$. Różnią się one znacznie od wartości tych parametrów dla silników konwencjonalnych. Objętościowy wskaźnik mocy tych pierwszych jest większy o 28% (porównując silnik BMW M5), a wskaźnik momentu obrotowego o 24–59% od odpowiadających im silników konwencjonalnych. Tak duża różnica wartości momentu obrotowego silnika wynika przede wszystkim z dużego ciśnienia doładowania silników pojazdów WRC. Wysoki stopień doładowania silnika o zapłonie iskrowym decydująco wpływa na wartość średniego ciśnienia użytecznego, która dla silników tego typu wynosi $3,02\text{--}3,46 \text{ MPa}$ i jest większa od wartości średniego ciśnienia użytecznego silników konwencjonalnych o 24–59%.

Silniki przeznaczone do napędu pojazdów F1 charakteryzują się małym wskaźnikiem elastyczności wynoszącym $1,12\text{--}1,16$. Silniki będące jednostkami napędowymi pojazdów typu WRC (rys. 15) osiągają wartości wskaźnika elastyczności na poziomie $1,81\text{--}3,05$. Dla porównania silniki konwencjonalne wolnossące charakteryzują się wskaźnikiem elastyczności całkowitej na poziomie $1,65\text{--}3,50$, natomiast jednostki doładowane osiągają te wskaźniki na poziomie $1,95\text{--}4,13$. Sytuacja taka ma ścisły związek z przeznaczeniem silnika i postawionymi wymaganiami. Silniki Formuły 1 to jednostki wolnossące bez układów dolotowych o zmiennej geometrii. Pojedyncze i jednocześnie krótkie przewody układu dolotowego zapewniają dużą moc i wysoki moment obrotowy w zakresie dużych prędkości obrotowych. Skutkiem ubocznym takiego podejścia jest mały



Rys. 14. Wskaźnik mocy jednostkowej jako funkcja pojemności cylindra oraz objętościowy wskaźnik momentu jako funkcja objętościowego wskaźnika mocy silnika

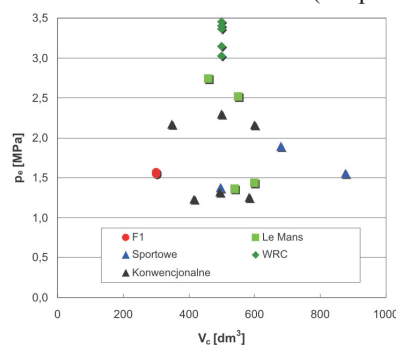
Fig. 14. Unit power index as a function of cylinder capacity and volumetric torque index as a function of volumetric power of the engine



$\text{N}\cdot\text{m/dm}^3$, respectively. The values significantly differ from the values of those parameters for conventional engines. The volumetric power index is by 28% higher (comparing the BMW M5 engine), and the torque index – by 24–59% than the corresponding conventional engines. The significant difference of the engine torque value is chiefly the result of high supercharge pressure of the WRC vehicle engines. The high spark-ignition engine supercharge level decisively affects the value of average effective pressure being $3.02\text{--}3.46 \text{ MPa}$ for this type of engines and is by 24–59% higher than the value of conventional engine effective pressure.

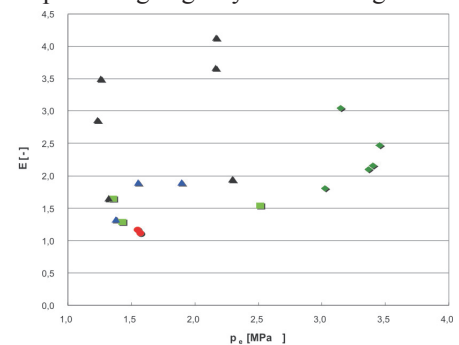
The engines designated to power vehicles are characterized with low elasticity index of $1.12\text{--}1.16$. The engines being the drive units of WRC vehicles (Fig. 15) achieve elasticity index values on the level $1.81\text{--}3.05$. For comparison, the conventional unsupercharged engines are characterized with elasticity index on the level of $1.65\text{--}3.50$, while supercharged units reach the indexes of $1.95\text{--}4.13$. Such a situation is closely related to the designation of the engine and the requirements. The Formula 1 engines are unsupercharged units without variable geometry inlet systems. A single and a short inlet system provides high power and torque within the range of high engine speeds. The side effect of such an approach is the low elasticity index of the engine. The defect was neutralized with the use of a high number of transmission speeds.

Supercharged engines achieve the best elasticity results (no problems with providing high cylinder filling coef-



Rys. 15. Wartości średniego ciśnienia użytecznego oraz elastyczności całkowitej silników

Fig. 15. Values of average effective pressure and total elasticity of the engines



wskaźnik elastyczności silnika. Wadę tę zneutralizowano, stosując dużą liczbę przełożeń skrzyni biegów pojazdu.

Najlepsze wskaźniki elastyczności mają silniki doładowane (brak problemu z zapewnieniem dużego współczynnika napełnienia silnika). Skutkuje to uzyskaniem maksymalnych wartości momentu obrotowego w szerokim zakresie prędkości obrotowych wału korbowego silnika, również w zakresie mniejszej prędkości obrotowej. Do silników wyczynowych mających największy wskaźnik elastyczności należą silniki typu WRC. Natomiast wśród silników pojazdów konwencjonalnych najniższym wskaźnikiem elastyczności charakteryzują się silniki BMW M5 i Mercedes CDI 420. Wartości ich współczynników elastyczności to odpowiednio 1,65 oraz 1,95.

8. Podsumowanie

Podjęta w artykule próba porównania silników wyczynowych z silnikami konwencjonalnymi została oparta na studium literatury, z której wybrano reprezentatywne jednostki napędowe. Wyszczególnione wskaźniki pracy poddano analizie grupowej z podziałem na typy pojazdów. Pozwoliło to na sformułowanie kilku spostrzeżeń:

- kształtowanie charakterystyki silnika spalinowego w znacznym stopniu zależy od przepisów regulujących daną dyscyplinę sportów samochodowych,
- obecny znaczny wzrost zużycia paliw przez silniki pojazdów wyczynowych może być ograniczony przez zastosowanie napędów alternatywnych, np. w postaci układów hybrydowych lub systemów odzyskiwania energii,
- znaczące wysilenie silników pojazdów wyczynowych (głównie Formuły 1) powoduje wzrost ich jednostkowych wskaźników mocy i (w niewielkim stopniu) momentu obrotowego, jednakże skutkuje znacznie gorszymi wskaźnikami elastyczności silnika.

ficient). This results in the obtainment of maximum torque values within a wide range of engine crankshaft speeds, also within the range of lower engine speeds. The high performance engines with the largest elasticity index include the WRC engines. However, among the conventional vehicle engines the BMW M5 and Mercedes CDI 420 engines are characterized with the lowest elasticity index. Their elasticity coefficient values are 1.65 and 1.95, respectively.

8. Summary

The attempt to compare high performance engines to conventional engines taken up in this paper has been based on reference study, out of which exemplary drive units have been selected. The operating indexes specified were subjected to group analysis, with division into vehicle types. This allowed the formulation of a number of observations:

- Formation of the characteristics of a combustion engine largely depends on the regulations governing in a particular automobile sport discipline,
- The present significant growth of fuel consumption by high performance vehicle engines may be restricted by the application of alternative drives, e.g. in the form of hybrid or energy recuperation systems,
- Significant power/displacement ratio of high-performance vehicles (mainly Formula 1) causes a growth of their unit power indexes and (to a slight extent) the torque, however it results in significantly worse elasticity indexes of the engine.

Artykuł recenzowany

Literatura/Bibliography

- Alten H.: Mercedes-Ilmor Zehn Jahre Entwicklung am V10-Formel-1-Motor, MTZ Motortechnische Zeitschrift, nr 7–8, 2005.
- Cornwell R., Morrison D., Sapsford S.: V10-Dieselmotor für Le Mans, MTZ Motortechnische Zeitschrift, nr 7–8, 2005.
- Formula One 2011: Power-Train Regulation Framework, Barcelona, 24.5.2007, www.fia.com
- Patynowski D.: Silniki w Formule 1, Auto Technika Motoryzacyjna, nr 1, 2007.
- rajdy.terramail.pl

- Rychter W.: Dzieje samochodu, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
- Schommers J., Mürwald M., Arbeiter E., Büter H., Holtmann U., Laulies S.: Der neue 4,0-l-V8-Dieselmotor von Mercedes-Benz, MTZ Motortechnische Zeitschrift, nr 1, 2006.
- Sokół M.: Peugeot 908 HDi FAP. Auto Technika Motoryzacyjna, nr 6, 2007.
- www.allfl.info
- www.castrol.com
- www.corvetteracing.com
- www.experiencelemans.com
- www.fltechnical.net
- www.lemans.org
- www.porsche.com
- www.rsportscars.com
- www.seriouswheels.com
- www.subaruimpreza.bajtnet.pl
- www.volkswagen.de
- www.allcarnews.com

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – Profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Prof. Jerzy Merkisz, DSc, MEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.



Dr inż. Ireneusz Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Mr Ireneusz Pielecha, DEng. – assistant professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.



Dr inż. Jarosław Markowski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Mr Jarosław Markowski, DEng. – assistant professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

