

Dobór i kalibracja wyczynowego silnika z zapłonem iskrowym, zastosowanego w jednomiejscowym bolidzie Formula SAE

Bartłomiej Urbański*
*Studenckie Koło Naukowe PolSI Racing[†],
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska*

e-mail: bartlomiej.urbanski@student.polsl.pl

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, kalibracja silników spalinowych, samochód wyścigowy, Formula SAE

Streszczenie

Praca dotyczy tematyki doboru, określenia zakresu modyfikacji oraz kalibracji wyczynowego silnika z zapłonem iskrowym. Zagadnienia te były jednym z etapów budowy jednomiejscowego bolidu Formula SAE, realizowanego przez SKN PolSI Racing.

W ramach projektu autor, przewodząc podzespołowi układu napędowego SKN PolSI Racing, zajmował się powyższą problematyką, spośród której głównym elementem była kalibracja silnika. Wykonano ją z wykorzystaniem hamowni podwoziowej oraz monitorowaniem składu spalin. Rezultatem jest poprawnie działający silnik bolidu.

* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym inżynierskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką dra inż. Grzegorza Przybyły.

[†] Prace prowadzone były w ramach projektu pt. „Budowa jednomiejscowego bolidu Formula SAE”, realizowanego przez Studenckie Koło Naukowe PolSI Racing.



Spis oznaczeń

i_w - wartość przełożenia wstępnego, -

i_g - wartość przełożenia głównego, -

i_{b1}, i_{b2}, \dots - wartości przełożeń poszczególnych przełożeń skrzyni biegów, -

v - prędkość jazdy, km/h

n_o - prędkość obrotowa silnika spalinowego, obr./min

N_e - moc efektywna, kW

M - moment obrotowy, Nm/rad

F_w - całkowita siła oporów ruchu, N

F_r - siła tarcia tocznego, N

F_l - siła oporu powietrza, N

F_s - siła oporu wzniesienia, N

F_a - efektywna siła napędowa, N

F_{ab1}, F_{ab2}, \dots - rozporządzalna siła napędowa na poszczególnych przełożeniach skrzyni biegów, N

1. Wstęp

1.1. Wiadomości ogólne nt. Formula SAE

Formula SAE, opierając się na definicji Society of Automotive Engineers, jest konkursem inżynierskim dla studentów. Rywalizacja stwarza możliwość zastosowania oraz rozwijania zdobytej podczas toku studiów wiedzy w praktyce. Celem, dla zespołów studenckich, jest zaprojektowanie i zbudowanie jednomiejscowego samochodu wyścigowego dla kierowców nieprofesjonalnych, przy założeniu jak najlepszych rozwiązań konstrukcyjnych i produkcyjnych, z uwzględnieniem osiągnięć oraz kosztów. Historia zawodów sięga 1981 roku, kiedy to pierwsza ich edycja została zorganizowana przez University of Texas, Austin. Wzięło w niej udział 6 zespołów studenckich [5]. Obecnie Formula SAE, to 10 oficjalnych rund na całym świecie i około 4 rundy nieoficjalne, całość zamyka się zaangażowaniem ponad 500 uczelni. Ross Brawn, były dyrektor techniczny zespołu Ferrari, wypowiedział się na temat powyższych zawodów w następujący sposób:

"There are two really innovative forms of motorsport left: Formula 1 and Formula Student"[‡][4].

O randze zawodów Formula SAE, świadczy też fakt, że udział w takim projekcie jest uznawany przez niektóre fabryczne zespoły rajdowe/wyścigowe za doświadczenie traktowane na równi z doświadczeniem zdobytym podczas pracy w profesjonalnym zespole sportów samochodowych.

W Gliwicach, od 2013 roku, działa jedno z dwóch Studenckich Kół Naukowych, zajmujących się budową bolidów Formula SAE, tj. SKN PolSI Racing. Efektem działalności koła jest zbudowanie pojazdu pokazanego na rysunku 1.



Rysunek 1. Bolid Formula SAE skonstruowany przez SKN PolSI Racing.

[‡] „Pozostają dwie prawdziwie innowacyjne formy sportu samochodowego: Formuła 1 i Formuła Student.”

1.2. Cel oraz zakres projektu

Celem projektu było dobranie jednostki napędowej do bolidu Formula SAE oraz jej skalibrowanie, zgodnie z postawionymi warunkami.

Problematyka powyższego zagadnienia opiera się głównie na teorii budowy samochodów wyczynowych, a w szczególności, w niniejszym przypadku, także na charakterystyce oraz wymogach regulaminowych zawodów Formula SAE.

Zakres projektu obejmuje:

- Określenie warunków doboru jednostki napędowej,
- Dobór jednostki napędowej,
- Dobór charakterystyki układu przeniesienia napędu,
- Kalibrację jednostki napędowej,
- Wnioski oraz plany modyfikacji na przyszły sezon.

2. Dobór silnika

2.1 Uwarunkowania doboru silnika

Podczas doboru silnika do bolidu mającego wziąć udział w zawodach Formula SAE, kierowano się następującymi warunkami:

- Wymagania regulaminu Formula SAE na sezon 2016,
- Parametry techniczne,
- Dostępność na rynku,
- Niski poziom skomplikowania konstrukcji,
- Kompaktowa budowa [2].

Najważniejsze wymagania regulaminu Formula SAE na sezon 2016 dla samochodów z silnikiem spalinowym zostały przedstawione poniżej [7]:

„Silniki Spalinowe

Artykuł 1: Silniki Spalinowe

IC1.1 Ograniczenia dotyczące silnika

IC1.1.1 Silniki używane do napędzania samochodu muszą być tłokowymi silnikami działającymi zgodnie z obiegiem czterosuwowym o pojemności nieprzekraczającej 610 ccm na cykl. Napędy hybrydowe, używające silników elektrycznych napędzanych zgromadzoną energią, są zabronione. UWAGA: Ciepło tracone z obiegu może być użyte. Metoda konwersji nie jest ograniczona do obiegu czterosuwowego.

IC.1.1.2 Silnik może być modyfikowany z uwzględnieniem ograniczeń przepisów.

IC.1.1.3 Jeżeli jest używany więcej niż jeden silnik, łączna ich objętość nie może przekroczyć 610 ccm i powietrze musi przechodzić przez pojedynczą zwężkę wlotu powietrza (zobacz IC1.6 „Zwężka wlotu powietrza.”)

2.2 Wybór dostępnego na rynku silnika

Opierając się na charakterystyce zawodów, podczas dobierania parametrów technicznych jednostki napędowej, ważne było żeby silnik posiadał wysoką sprawność i generował jak największą moc. Kluczową sprawą była także elastyczność dobieranego silnika w kontekście możliwej do uzyskania charakterystyki układu przeniesienia napędu. Mając jednak na uwadze, że projekt ten był pierwszym samochodem budowanym przez SKN PolSI Racing, jako priorytetowy został uwzględniony warunek dostępności na rynku. Przy ograniczonym budżecie, czasie, wsparciu przemysłu oraz wdrażaniu się w charakter projektu konieczny był dobór takiej jednostki napędowej, którą można łatwo zakupić [1]. Po przeanalizowaniu rynku okazało się, że najkorzystniejszym wyborem będzie silnik stosowany w motocyklu, zwłaszcza ze względu na szeroką ofertę jednostek o narzuconej regulaminem pojemności.

Warunek niskiego poziomu skomplikowania konstrukcji był istotny z dwóch względów. Pierwszym z nich jest zasada, stosowana w sportach samochodowych, żeby jak tylko to możliwe stosowane rozwiązania były nieskomplikowane. Rośnie wtedy niezawodność układu, która jest ważna, z uwagi na konkurencyjność oraz osiągnięcie satysfakcjonujących wyników. Drugi powód to fakt, że prostsze konstrukcje są zazwyczaj łatwiejsze w serwisowaniu i diagnozowaniu [2]. W przypadku prezentowanego projektu, należało wziąć pod uwagę dostępne zasoby zespołu i dobrać układ napędowy na miarę jego możliwości. Z tego względu odrzucona została koncepcja zastosowania silnika wyposażonego w turbosprężarkę/kompresor, który jest znacznie bardziej skomplikowaną konstrukcją niż silnik wolnossący [1].

Odnosząc się do kwestii kompaktowości jednostki napędowej, można stwierdzić, że jest ona znacząca w przypadku tak małego pojazdu, jakim jest bolid Formula SAE. Ograniczona ilość miejsca, a także większa swoboda w wyważaniu pojazdu są argumentami za zwartym silnikiem. Również nie bez znaczenia jest fakt, że przy założeniu tych samych materiałów konstrukcyjnych, z których silniki są wykonane, jednostka bardziej kompaktowa będzie lżejsza, co jest ważne w kontekście masy całego pojazdu, więc i uzyskiwanych przez niego osiągnięć.

Po uwzględnieniu wszystkich ww. warunków, stwierdzono, że co najmniej 3 silniki je spełniają. W tabeli nr 1 porównano podstawowe parametry techniczne wybranych jednostek napędowych.

	Pojemność skokowa [cm ³]	Średnica [mm] / skok tłoka [mm]	Stopień kompresji	Moc maksymalna [kW / obr./min]	Maksymalny moment obrotowy [Nm / obr./min]
Honda CB600RR (PC40)	599	67 / 42,5	12,2:1	88,1 / 13 500	66 / 11 250
Honda CB600F (PC41)	599	67 / 42,5	12,0:1	75 / 12 000	63,5 / 10 500
Yamaha YZF-600 R6	599	67 / 42,5	12,4:1	87,6 / 13 000	68,5 / 12 000

Tabela 1. Wybrane jednostki napędowe.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 1, można stwierdzić że najlepsze parametry spośród wybranych silników mają Honda CB600RR (PC40) oraz Yamaha YZF-600 R6. Biorąc jednak pod uwagę warunek dostępności, który jak wcześniej wspomniano jest ważny

dla początkującego zespołu, podjęto decyzję o zastosowaniu najpopularniejszego oraz najkorzystniejszego cenowo silnika spośród ww., tj. jednostki napędowej z Hondy CB600F (PC41).

3. Modyfikacje wybranego silnika

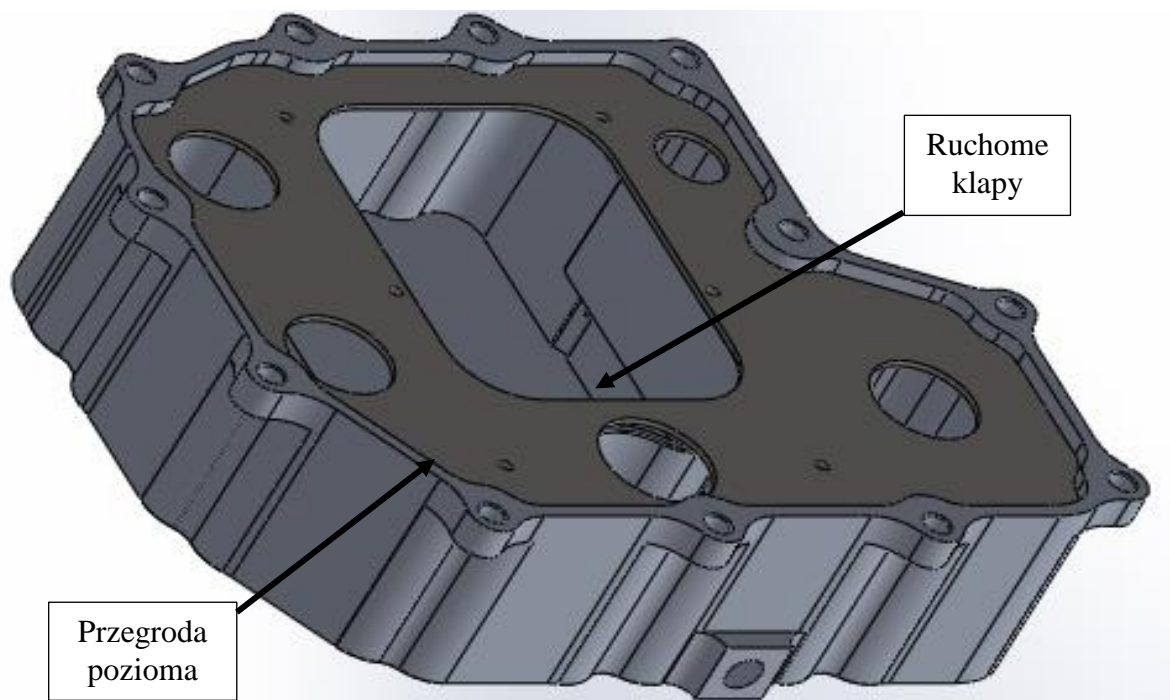
3.1. Modyfikacje wybranego silnika

Z powodu przyjętych założeń dla pierwszego projektu, realizowanego przez SKN PolSI Racing, zdecydowano, że zakres modyfikacji jednostki napędowej, zostanie ograniczony do zastosowania nowej miski olejowej, układów dolotowego, wylotowego, zasilania, sterowania i chłodzenia. Przyjęto, że silnik będzie napędzany standardowym dla niego paliwem, czyli benzyną bezołowiową.

3.2. Miska olejowa

Ze względu na kształt miski olejowej w wybranym silniku, konieczne było wykonanie jej od podstaw. Celem było obniżenie silnika w ramie, więc i środka ciężkości pojazdu. Kwestia ta ma wpływ na stabilność bolidu, a więc przekłada się na jakość jego prowadzenia. Seryjna miska olejowa była wykonana w kształcie pozwalającym na zamontowanie i zapewniającym smarowanie w motocyklu, dlatego spełniała inne warunki niż te, którym musiała sprostać przy montażu w samochodzie. Aby ograniczyć niekorzystne i niebezpieczne dla silnika zjawisko odpływania oleju w zakrętach, zastosowano ruchome kłapy, blokujące odpływ środka smarnego z głównej, środkowej komory miski olejowej.

Na rysunku 2, zaprezentowano wygląd zaprojektowanej miski olejowej z wyszczególnionymi częściami, mającymi wpływ na zapobieganie odpływaniu oleju podczas jazdy. Poza ww. uchylnymi kłapami, zastosowano również przegrodę pomiędzy górną a dolną częścią miski, mającą zapobiegać falowaniu oleju.

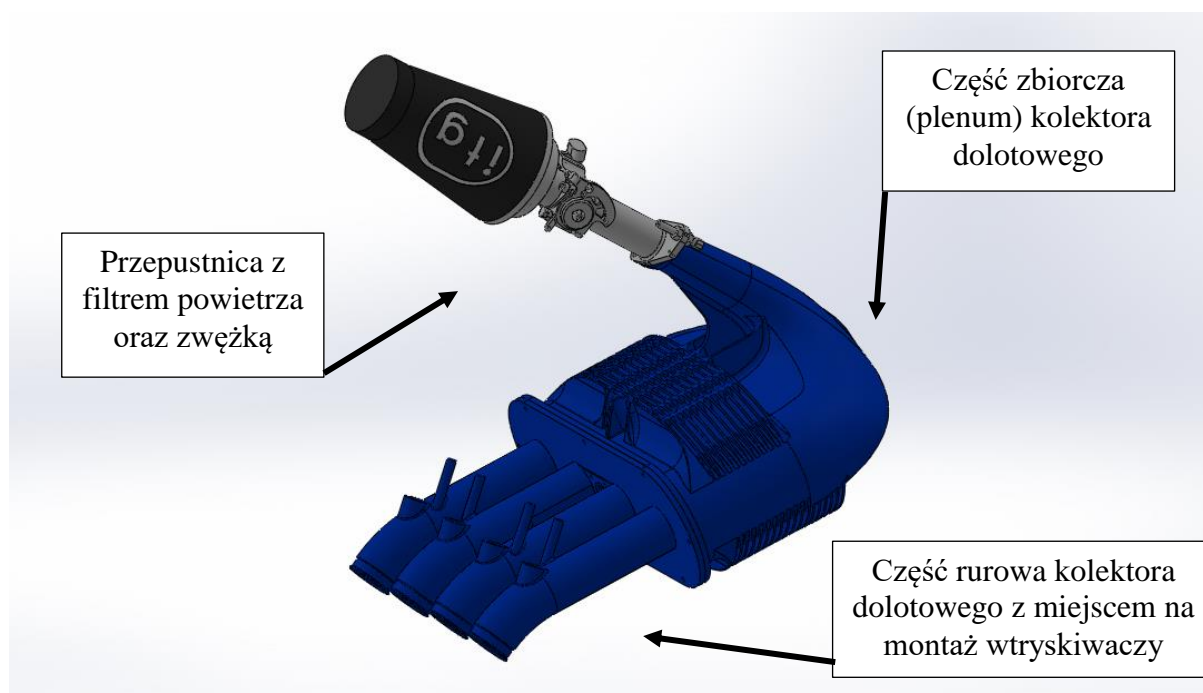


Rysunek 2. Miska olejowa.

3.3. Układ dolotowy

Układ dolotowy, podobnie jak miska olejowa, musiał zostać wykonany od podstaw. Wymóg regulaminu, narzucający zastosowanie zwężki o średnicy 20 mm przed przepustnicą [7], spowodował konieczność zaprojektowania całkowicie nowego kolektora ssącego i zastosowania przepustnicy firmy AT Power Throttles.

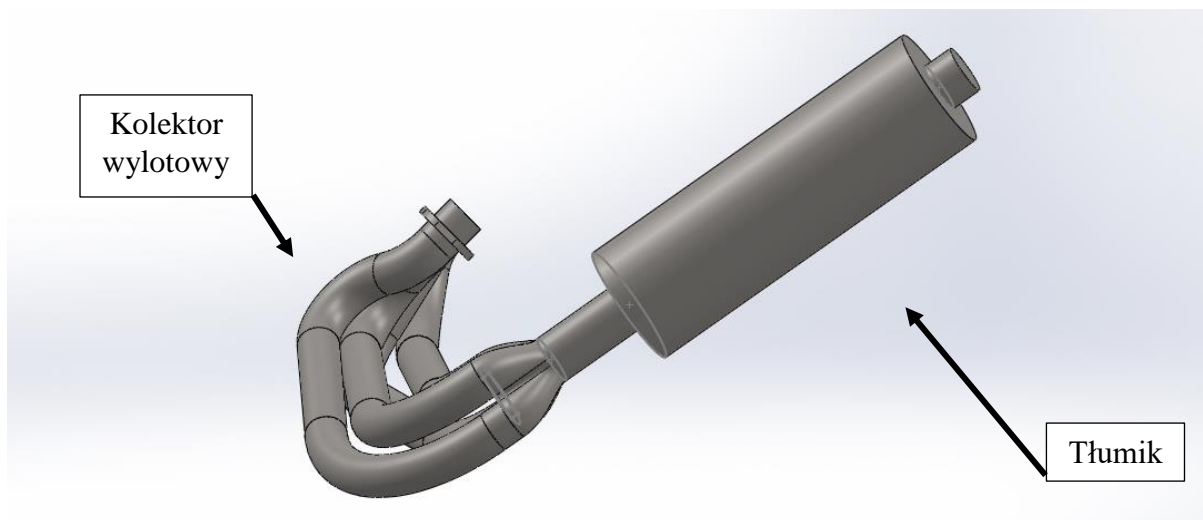
Całość procesu projektowania została opisana w pracy magisterskiej mgr. inż. Krzysztofa Święckiego, członka SKN PolSI Racing, który był odpowiedzialny za przygotowanie projektu i wykonanie układu dolotowego, zaprezentowanego na rysunku 3.



Rysunek 3. Kolektor dolotowy z przepustnicą [4].

3.4. Układ wydechowy

Konstrukcja układu wydechowego, to efekt współpracy SKN PolSI Racing z firmą Tenneco Rybnik. Zastosowano jeden tłumik, a sam kolektor zachowuje jednakowe długości rur. Na zawodach Formula SAE jednym z elementów kontroli technicznej przed startem jest sprawdzenie głośności bolidu na wolnych obrotach oraz na każdych innych obrotach, w zakresie przewidzianym dla danego modelu silnika. Dla wolnych obrotów maksymalny, dopuszczalny poziom głośności to 100 dBC, natomiast dla pozostałego zakresu prędkości obrotowej silnika wynosi on 110 dBC [7]. Na rysunku 4 przedstawiono koncepcję układu wydechowego bolidu SKN PolSI Racing. Po wykonanych pomiarach głośności tego układu, konieczne było obniżenie poziomu emitowanej głośności. Problem doraźnie rozwiązano, z racji ograniczonego czasu, za pomocą zmniejszenia średnicy kanału wylotowego z tłumika.



Rysunek 4. Układ wydechowy.

3.5. Układ zasilania

Układ zasilania został dobrany i zaprojektowany pod kątem niezawodnego i bezpiecznego zastosowania w bolidzie. Zaprojektowano nowy zbiornik paliwa, dobrano elektryczną pompę zewnętrzną firmę BOSCH, zewnętrzny filtr paliwa oraz zastosowano manualnie nastawiany regulator ciśnienia w układzie. Listwa paliwowa, ze względów regulaminowych, nie mogła być standardową z silnika Honda CB600F (PC41) (listwa ta jest łączona z układem szybkozłączem, którego stosowanie jest zabronione przez regulamin Formuła SAE) [7]. Zastosowano więc listwę z silnika Honda CBR600RR (PC37), wykonaną ze stali, wyposażoną w przyłącze skręcane. Rozstawy wtryskiwaczy w ww. silnikach są identyczne, dlatego zastosowanie listwy spełniającej wymogi nie spowodowało komplikacji związanych z montażem. W tabeli 2, zestawiono podstawowe dane nt. układu zasilania.

Pompa BOSCH	Wydajność [dm ³ /h]	Ciśnienie układu [kPA]	Napięcie znamionowe [V]
	98-148	400	12
Wtryskiwacze paliwa DENSO	Wydajność [cm ³ /min]	Dla ciśnienia [kPA]	Dla napięcia [V]
	165	350	12
Zbiornik paliwa	Pojemność [dm ³]		
	10		

Tabela 2. Podstawowe parametry elementów układu zasilania.

3.6. Sterowanie oraz czujniki

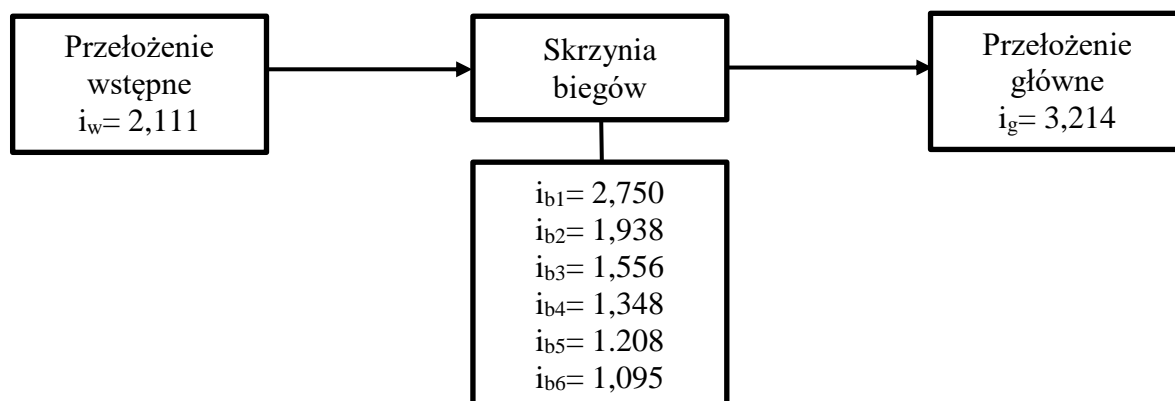
Sterowanie pracą układu wtryskowego oraz zapłonowego, dzięki nawiązaniu współpracy z firmą Ecumaster, odbywa się za pomocą jednostki sterującej EMU.

Silnik Honda CB600F (PC41) standardowo nie jest wyposażony w czujnik spalania stukowego. Ze względu na rozszerzone możliwości diagnostyki oraz kalibracji silnika, zdecydowano się na jego montaż. Zastosowanie nowej miski olejowej, spowodowało podjęcie decyzji o zamontowaniu czujnika ciśnienia oleju, który umożliwia monitorowanie oraz ocenę jakości działania nowego rozwiązania. W ww. silniku, w rozwiązaniu seryjnym stosowany jest tylko czujnik reagujący na spadek ciśnienia, poniżej jednej, przyjętej wartości.

Kolejną modyfikacją układu sterowania miał być montaż czujnika położenia wałka rozrządu, ale po konsultacji z firmą Ecumaster, uznano, że na tym etapie projektu jest on niepotrzebny i zapłon może być realizowany w trybie wasted spark. Ze względu na oszczędność miejsca, zastosowano indywidualne cewki zapłonowe z silnika Honda CBR600RR (PC40).

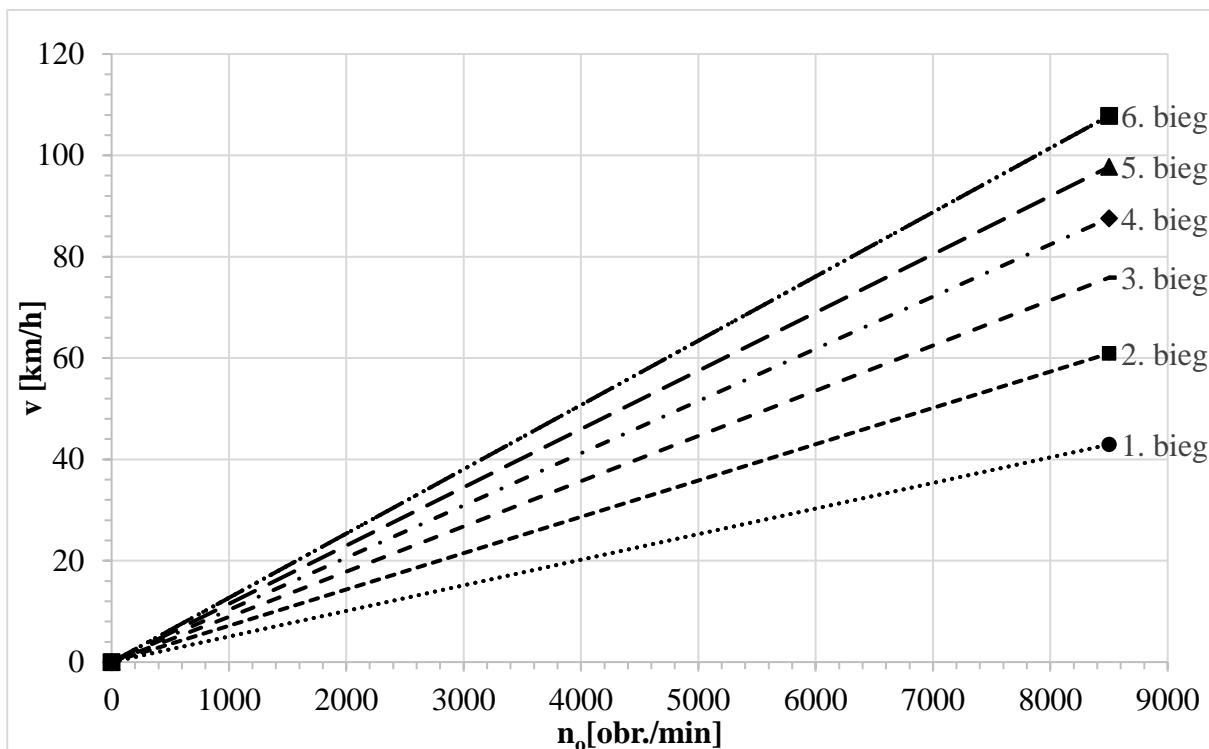
4. Dobór charakterystyki układu przeniesienia napędu

Z powodu ograniczeń przytoczonych przy warunkach doboru silnika, podjęto decyzję o zastosowaniu seryjnej skrzyni biegów z silnika Honda CB600F (PC41) o 6 przełożeniach. Wartości przełożeń poszczególnych biegów zostały zachowane. Na rysunku 5, przedstawiono schemat oraz wartości przełożeń układu napędowego bolidu.



Rysunek 5. Schemat układu napędowego bolidu SKN PolSI Racing.

W celu dopasowania do charakteru zawodów zmienione zostało przełożenie główne, tak aby prędkość maksymalna nie wynosiła więcej niż 120 km/h (zgodnie z regulaminem FSAE, maksymalna prędkość w trakcie konkurencji Endurance nie może wynosić więcej niż około 105 km/h [7]), a przyspieszenia bolidu na każdym z biegów było jak największe. Duże zagęszczenie przełożeń pozwala na optymalne wykorzystanie mocy silnika, jednak generuje straty związane z ich przełączaniem [2]. Aby zniwelować to niekorzystne zjawisko, zastosowano układ pneumatycznej zmiany biegów, zmieniający biegi bez użycia sprzęgła, z zastosowaniem wycinania zapłonów w momencie przełączania. W rezultacie powyższych założeń otrzymano charakterystykę przekładni zaprezentowaną na rysunku 6.



Rysunek 6. Charakterystyka przekładni bolidu SKN PolSl Racing.

Jak widać na rysunku 6, zastosowane przełożenia są progresywne [2], co można wywnioskować z coraz to mniejszych różnic pomiędzy prędkościami osiąganymi przez bolid na każdym kolejnym biegu. Teoretycznie bolidem można rozwinąć maksymalną prędkość 115 km/h.

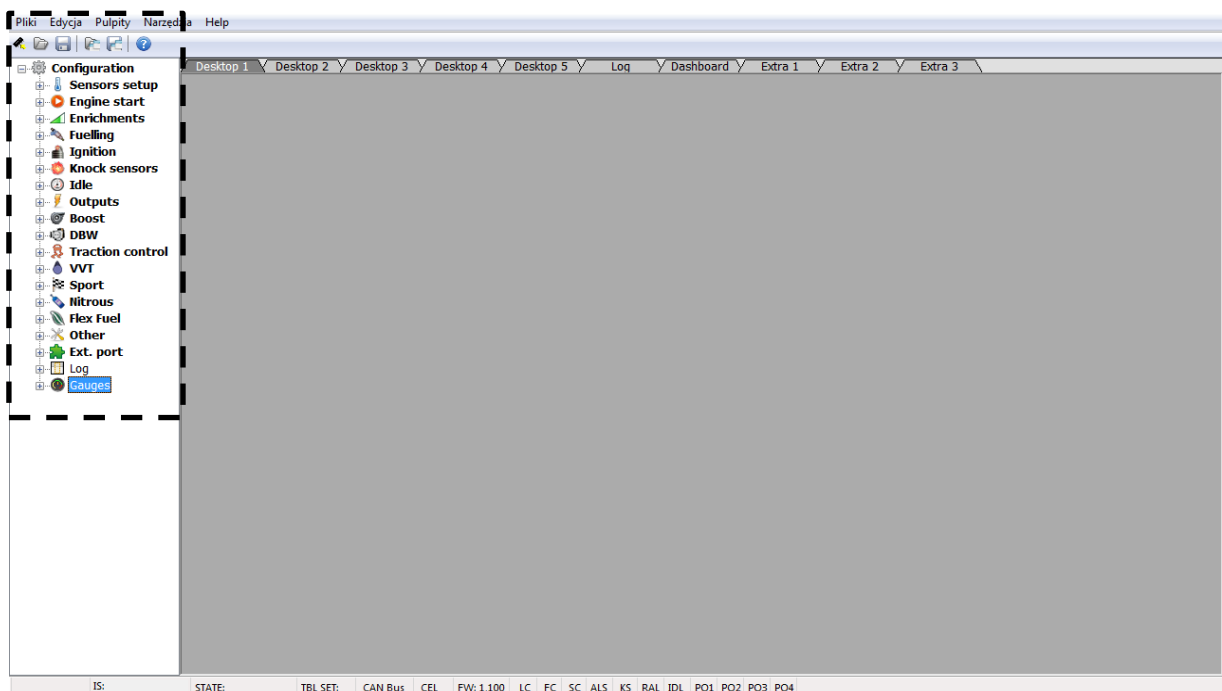
5. Kalibracja silnika

5.1. Założenia

Celem kalibracji było uzyskanie z zastosowanej jednostki napędowej jak najwyższej mocy oraz momentu obrotowego w jak najszerszym zakresie jej obrotów. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na hamowni podwoziowej MAHA LPS 3000, na wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, korzystając z programu pomiarowego o nazwie „Symulacja obciążenia”. Program ten pozwala na zasymulowanie stałej siły napędowej, prędkości obrotowej lub prędkości jazdy [6]. Planowano także wyregulować aktywny układ dolotowy, ale niestety z racji wad wykonania jego pierwszej wersji i małej ilości czasu do zawodów, zdecydowano zastosować uproszczoną, nieregulowaną jego wersję, ale z możliwością uruchomienia zmiennej długości rur ssących w przyszłości. Nastawy jednostki sterującej zmieniano za pomocą dedykowanego do tego celu oprogramowania. Do pracy silnika przewidziano przede wszystkim dwa podstawowe czujniki, tj. czujnik położenia wału korbowego oraz czujnik położenia przepustnicy.

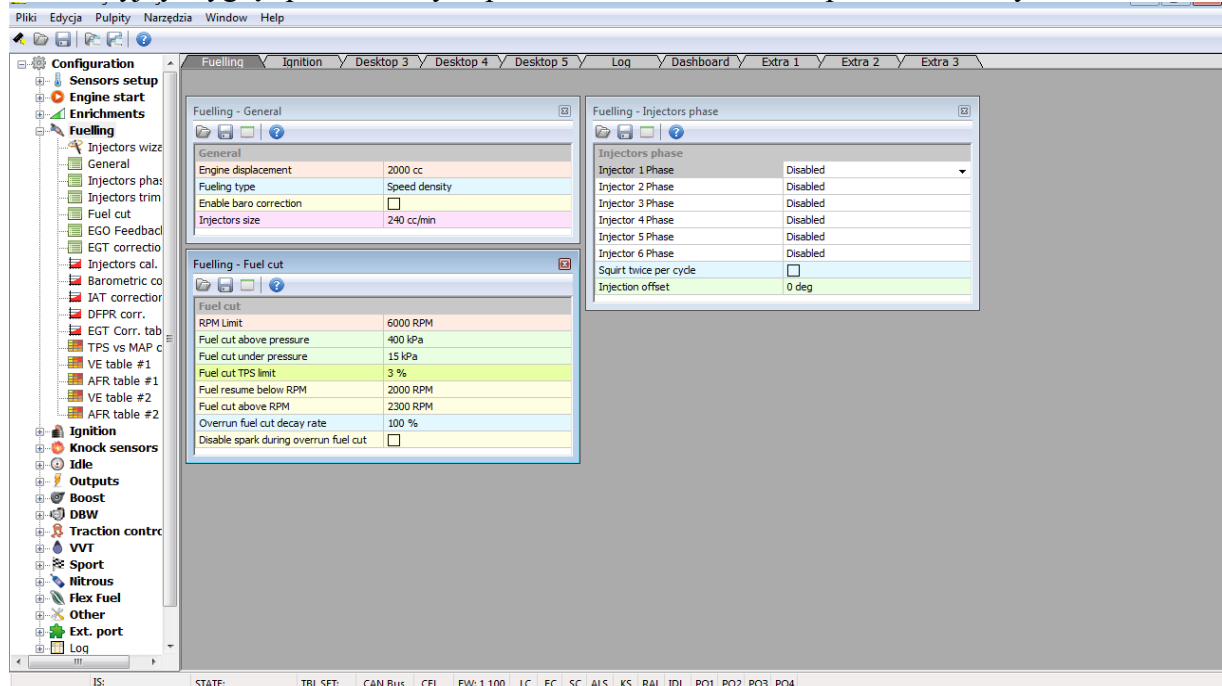
5.2. Interfejs programu oraz czynności wstępne

Rozpoczynając pracę z programem Ecumaster Engine Management Unit Client, otwiera się okno pokazane na rysunku 7. Na pasku po lewej stronie znajdują się zakładki, z których każda reprezentuje inną funkcję możliwą do regulacji. Po wybraniu funkcji, praca odbywa się na pulpitych, które można indywidualnie konfigurować pod kątem wyświetlanych parametrów.



Rysunek 7. Okno podstawowe EcuMaster EMU.

Żeby uruchomić silnik, pracę należy rozpocząć od ustawień w zakładkach Fuelling oraz Ignition, które odnoszą się do nastaw układów paliwowego i zapłonowego. Zakładka Fuelling, dotyczy ustawień związanych z wtryskiem paliwa, tj. m.in. wyboru strategii obliczania mieszanki, przypisanie wtryskiwaczy, określenie warunków wyłączenia wtryskiwaczy. Orientacyjny wygląd podstawowych parametrów ww. zakładki pokazano na rysunku 8.



Rysunek 8. Ustawienia związane z wtryskiem paliwa Fuelling.

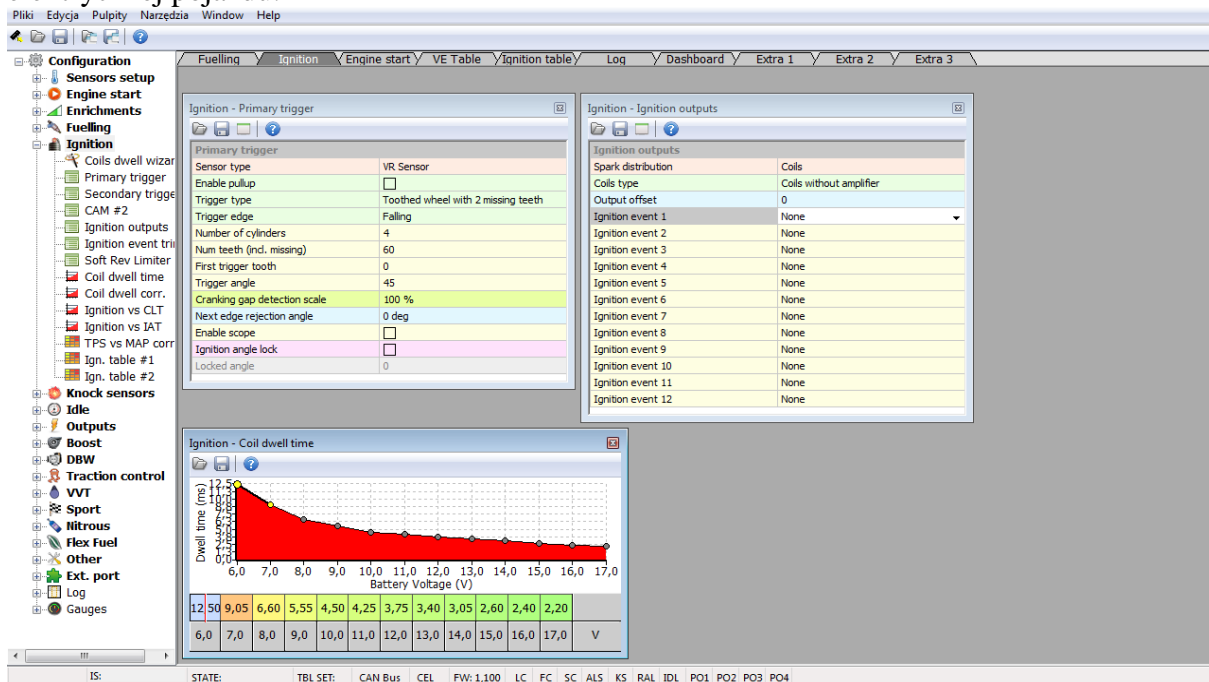
Odnosząc się w dalszym ciągu do rysunku 8, następujące grupy parametrów muszą zostać skonfigurowane:

- General,
- Fuel cut,
- Injection phase.

Po zakończeniu prac w zakładce Fuelling, należy przejść do konfiguracji parametrów w zakładce Ignition (zostały przedstawione na rysunku 9), dotyczących układu zapłonowego. W zakładce tej, jeżeli chodzi o podstawowe nastawy, wyróżniamy poniższe grupy parametrów:

- Primary trigger,
- Ignition outputs,
- Coil dwell time.

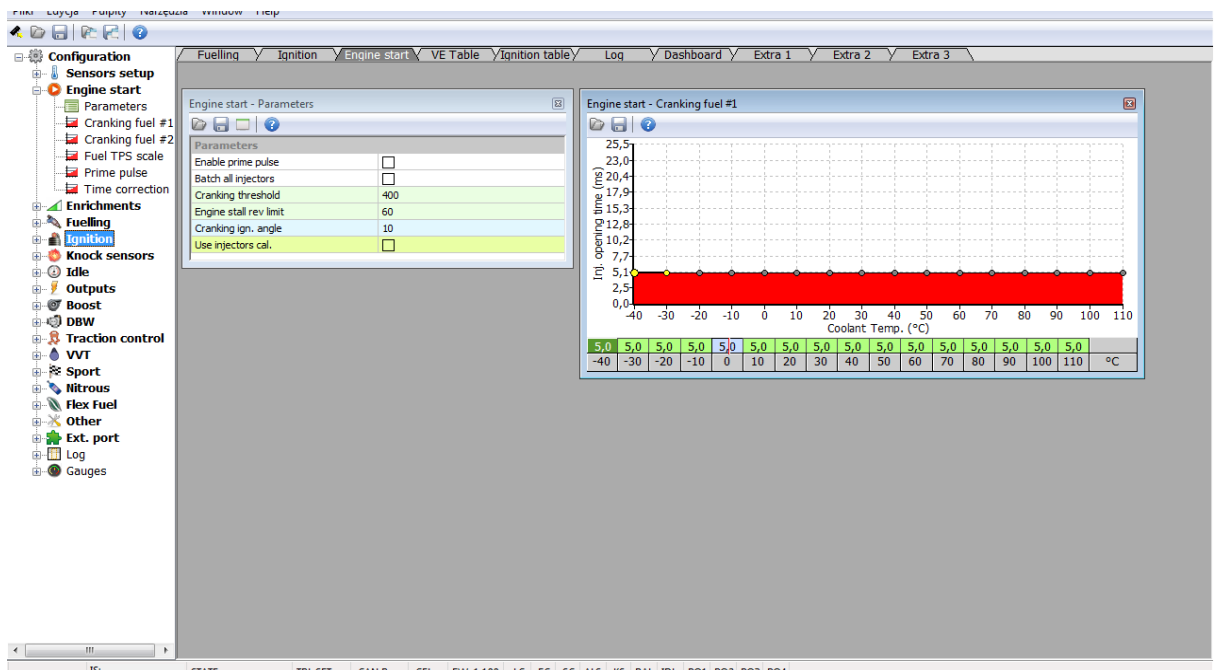
Przed pierwszym uruchomieniem silnika, ważne jest prawidłowe skonfigurowanie parametrów wieńca i czujnika położenia wału korbowego. Jest to jedna z najważniejszych nastaw, determinująca właściwe uruchomienie i pracę silnika, ponieważ jest odniesieniem do wszystkich zdarzeń zapłonowych oraz wtryskowych. W zakładce tej należy także zdefiniować rodzaj układu zapłonowego, przypisać wyjścia zapłonowe komputera dla danych cylindrów, a także np. określić czas ładowania cewek, w zależności od napięcia w instalacji elektrycznej pojazdu.



Rysunek 9. Ustawienia związane z układem zapłonowym Ignition.

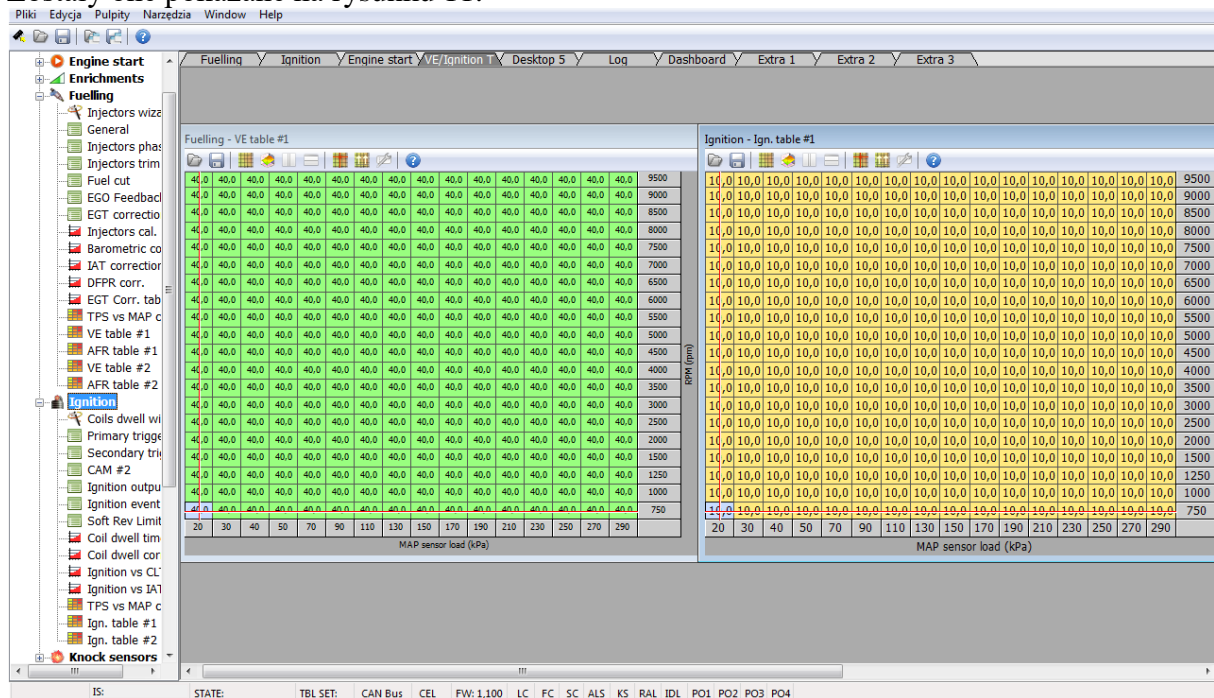
Po wprowadzeniu powyższych, podstawowych danych, można przystąpić do regulacji ustawień w zakładce Engine start. Na rysunku 10, widać ważne z perspektywy pierwszego uruchomienia silnika, okienka. Są to:

- Parameters,
- Cranking fuel.



Rysunek 10. Ustawienia Engine Start.

Po skonfigurowaniu podstawowych parametrów w tej zakładce, dotyczących m. in. zakresu obrotów silnika czy też kąta wyprzedzenia zapłonu w czasie rozruchu silnika, należy określić dawkę wtryskiwanego paliwa, w funkcji temperatury płynu chłodzącego dla trybu Engine start. Następnie, gdy zostanie uzyskana stabilna praca silnika po uruchomieniu, można przystąpić do pracy na właściwych mapach regulacyjnych, tj. efektywności wolumetrycznej i zapłonowej. Zostały one pokazane na rysunku 11.



Rysunek 11. Mapa efektywności wolumetrycznej VE oraz zapłonowa Ignition.

Każda z tych map jest wyznaczona w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika. Odpowiednia ich konfiguracja polega na regulacji jak największej ilości komórek, w zadanym zakresie, co powodować będzie dobre dopasowanie ww. map do kalibrowanego silnika.

5.3. Kalibracja

Jak już zostało wyżej wspomniane, po osiągnięciu stabilnej pracy silnika spalinowego, można przystąpić do jego kalibracji. Aby ocenić jakość kalibracji, posługiwano się sygnałem z sondy lambda, a także pomiarami na hamowni. Hamownia oprócz funkcji pomiarowej, umożliwiała również zasymulować warunki obciążenia pojazdu.

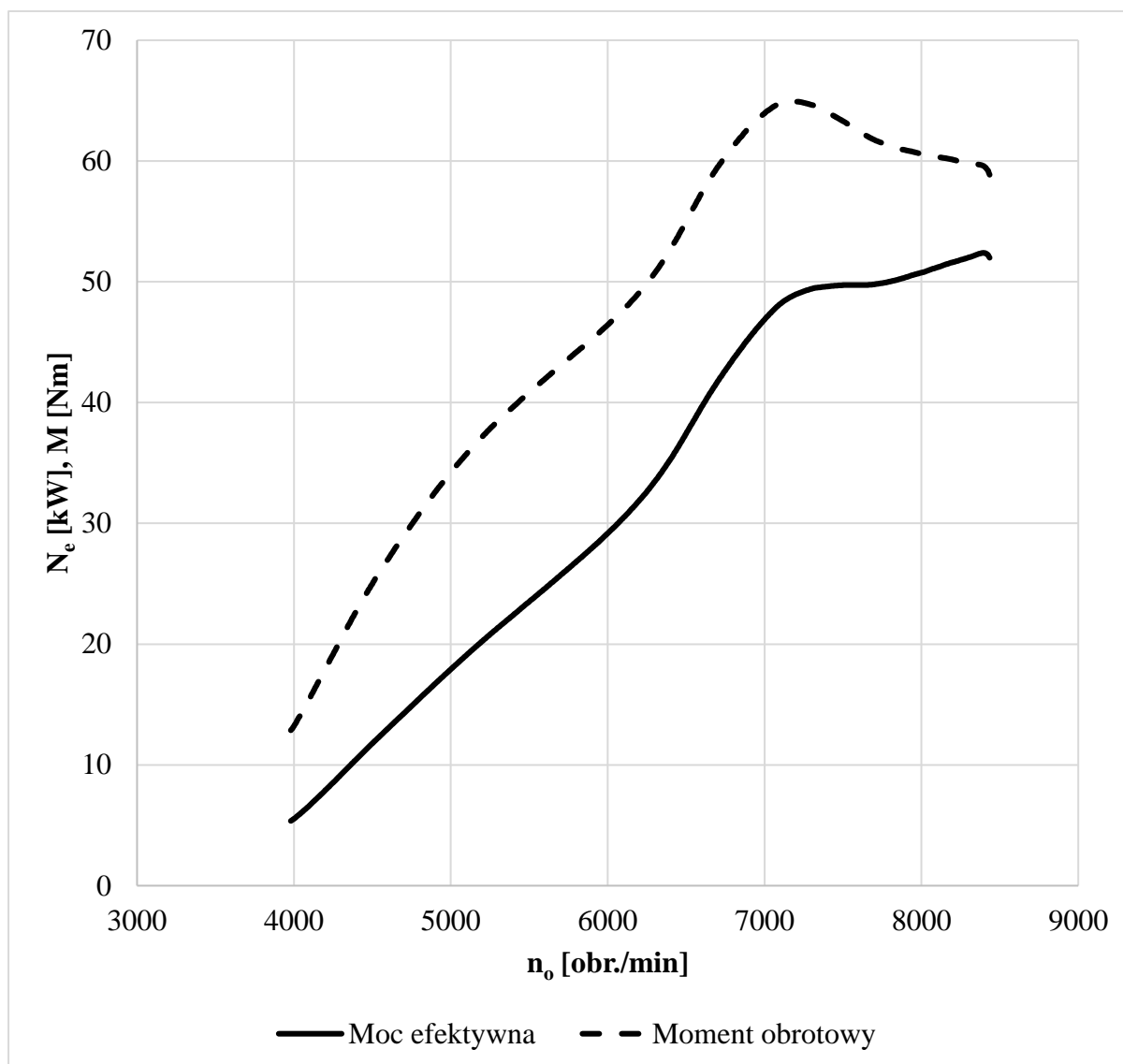
Strategia kalibracji była następująca- przy zgrubnych nastawach kąta wyprzedzenia zapłonu dla danych prędkości obrotowej i obciążenia silnika, operowano zmiennymi w mapie zależnościami obciążenia silnika od prędkości obrotowej. Po dobraniu właściwej dawki paliwa dla danego zakresu, optymalizowano wartość kąta wyprzedzenia zapłonu.

5.4. Napotkane trudności

Największym problemem okazał się układ dolotowy. Wykonany ze złych materiałów rozpuszczał się w wyniku działania paliwa i temperatury oraz pękał na skutek działania wibracji. Stopień zaawansowania uszkodzeń kolektora, nie pozwolił na jego naprawę i podjęto decyzję o wykonaniu nowego, którego części wykonane były z dwóch różnych materiałów. Dolna część, czyli rury łączące plenum z głowicą, zostały wykonane z odpornego na działanie temperatury oraz paliwa aluminium, natomiast górna część, czyli plenum, wykonana została z materiałów kompozytowych. Budowa oraz rodzaj użytych materiałów spowodowały iż elementy posiadały niską wagę części oraz zapewniały ich ponadprzeciętną wytrzymałość. Kolejnym problemem okazał się układ stabilizacji ciśnienia układu paliwowego. Pulsacje ciśnienia uniemożliwiały właściwe ustalenie parametrów wtryskiwaczy, ponieważ warunki ich pracy zmieniały się niekontrolowanie.

5.5. Uzyskane parametry jednostki napędowej po kalibracji

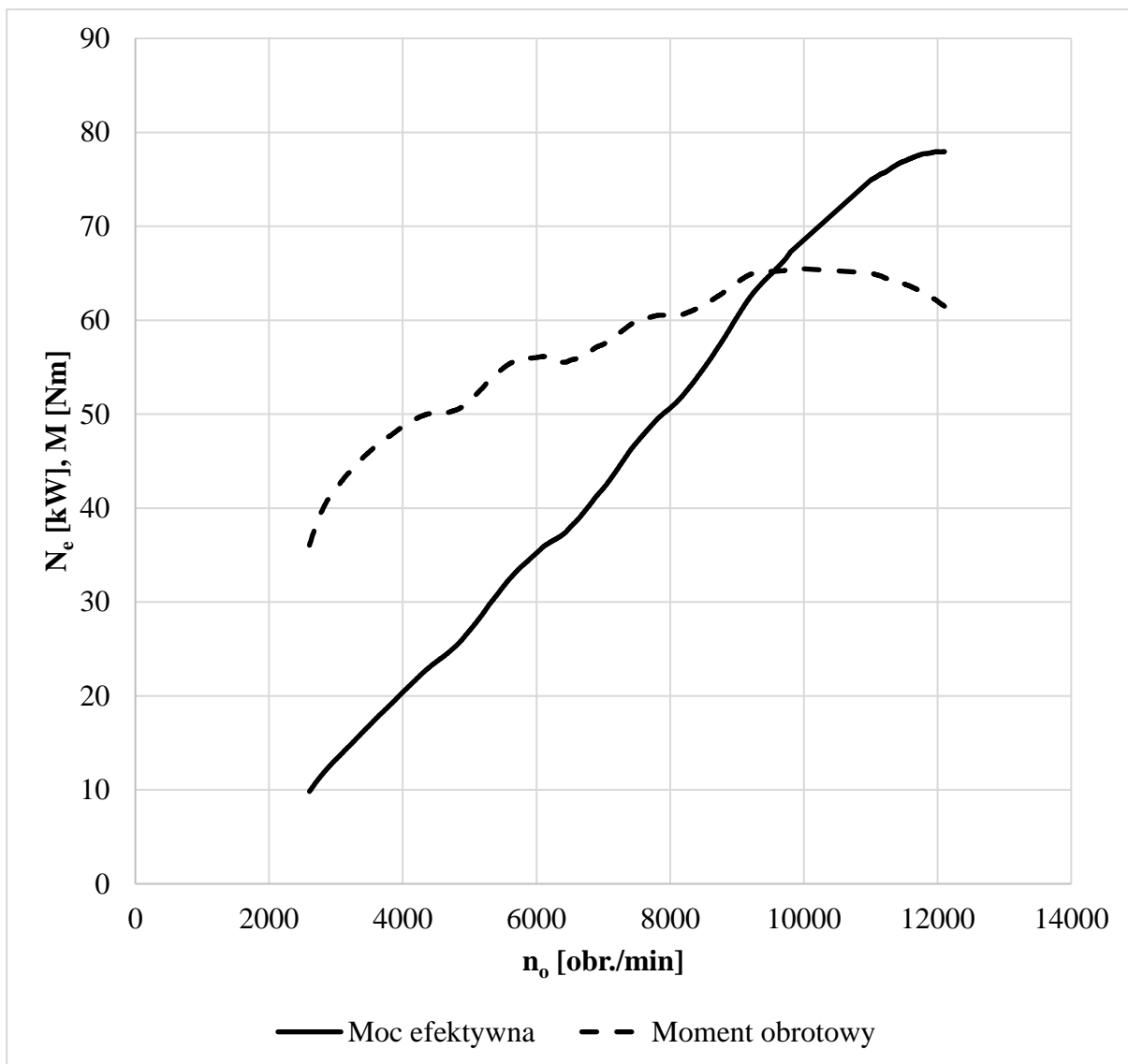
Po kalibracji został przeprowadzony, z użyciem tryby ciągłego hamowni podwoziowej, pomiar charakterystyki zewnętrznej silnika, którą zaprezentowano na rysunku 12.



Rysunek 12. Charakterystyka zewnętrzna silnika bolidu SKN PolSI Racing (PC41).

Kalibrację wykonano w ograniczonym zakresie prędkości obrotowej, co można wywnioskować z rysunku 12. Wynikało to z faktu napotkanych problemów, których eliminacja zajęła na tyle dużo czasu, że nie udało przeprowadzić się pełnej kalibracji przed zawodami FS East. Uzyskany przebieg momentu obrotowego, wskazuje na jego dużą zmienność w całym zakresie prędkości obrotowej silnika, który stabilizuje się dopiero w przedziale od 7 000 obr./min. do 8 000 obr./min. Wyciągając z tego wstępne wnioski, powyższy fakt może wskazywać na problemy z napełnieniem cylindrów mieszanką palną.

Na rysunku 12, zaprezentowano charakterystykę zewnętrzną silnika seryjnego Honda CB600F (PC41).



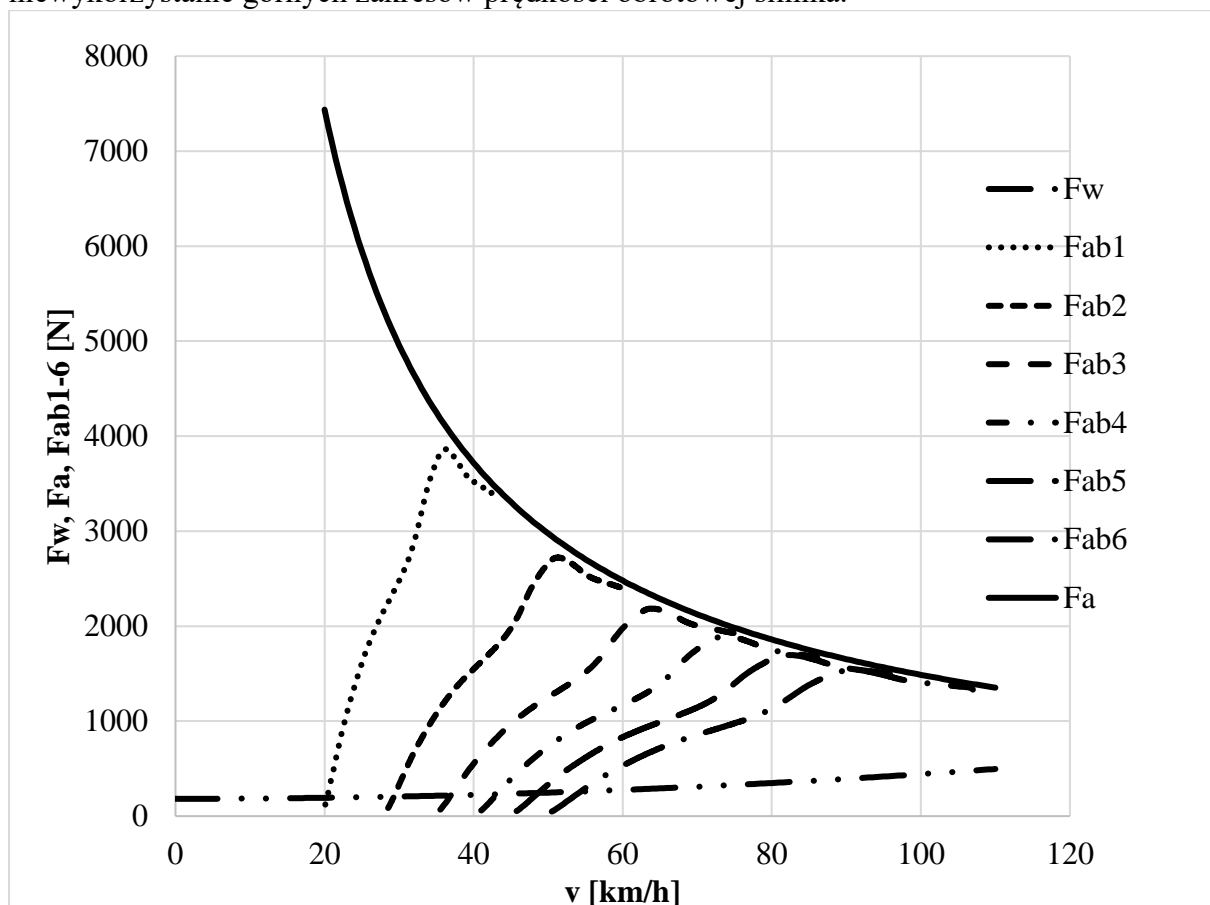
Rysunek 13. Charakterystyka zewnętrzna silnika motocykla Honda CB600F (PC41).

Już pobieżne porównanie wskazuje na zupełnie inny przebieg krzywej momentu obrotowego w silniku seryjnym, który jest o wiele bardziej korzystny, ponieważ jego zmienność w funkcji prędkości obrotowej silnika jest znacznie mniejsza. Porównując dalej charakterystykę zewnętrzną silnika bolidu do charakterystyki silnika seryjnego Honda CB600F (PC41), można spostrzec obniżenie się mocy efektywnej dla możliwego do porównania zakresu obrotów. Jest to spowodowane zastosowaniem zwężki w układzie dolotowym, a co za tym idzie ograniczeniem ilości dostarczanej mieszanki do cylindrów [1]. Aby mieszanka pozostała stechiometryczna konieczne jest w tym momencie ograniczenie dawki paliwa, co powoduje uwolnienie niższej ilości ciepła w procesie spalania.

6. Charakterystyka układu napędowego bolidu

Rysunek 14 przedstawia rozporządzalną siłę napędową na poszczególnych przełożeniach skrzyni biegów oraz sumę sił oporów ruchu F_w , działających na bolid. Uwzględniono następujące opory ruchu: F_r - siła tarcia toczonego, F_l - siła oporu powietrza, F_s - siłę oporu wzniesienia, które składają się na sumę sił oporów ruchu F_w . Siła oporu wzniesienia F_s , została założona dla wzniesienia o nachyleniu 5%, ponieważ zawody odbywają się na torach bez znacznych różnic wysokości. Krzywa F_a jest zobrazowaniem działania efektywnej siły napędowej, tj. po uwzględnieniu efektywności układu przeniesienia napędu. Wyznaczana jest na podstawie teoretycznej siły napędowej, która wynika z maksymalnej mocy silnika.

Jak można zauważyć, bolid charakteryzuje się dużą nadwyżką siły napędowej nad sumę sił oporów ruchu, co pozwala na jej wykorzystanie, w każdym zakresie prędkości obrotowej, jak i na każdym biegu, do przyspieszania pojazdu, co ma kluczowe znaczenie w wykorzystaniu wyczynowym. Widać, że niekorzystna jest zbyt duża liczba biegów, spowodowana przejściem skrzyni biegów wprost z motocykla. Niepotrzebna nadwyżka liczby przełożeń powoduje straty związane z ich przełączaniem, a także zwiększenie masy pojazdu. Wykres obrazuje także czytelnie, to, co zostało wspomniane wcześniej przy kalibracji, tzn. niewykorzystanie górnych zakresów prędkości obrotowej silnika.



Rysunek 14. Wykres sił napędowych na poszczególnych biegach oraz sił oporów.

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prac oraz badań stwierdzono, że przyjęte założenia doboru oraz modyfikacji jednostki napędowej, a zwłaszcza warunek niskiego poziomu skomplikowania konstrukcji, były słuszne. Pomimo napotkanych trudności silnik bolidu został uruchomiony oraz skalibrowany w założonym czasie do zawodów FS East, na których funkcjonował bezawaryjnie. Należy jednak stwierdzić, że uzyskana charakterystyka zewnętrzna nie jest optymalna i jednostka napędowa wymaga dalszych kalibracji. Konieczne jest również rozszerzenie użytecznego zakresu prędkości obrotowej silnika oraz uruchomienie aktywnego układu dolotowego, ponieważ obecna konfiguracja jest wynikiem kompromisu czasowego i nie jest docelowa.

Układ przeniesienia napędu dobrze spełnia swoje zadanie, natomiast zbyt duża liczba biegów i związane z nią straty czasowe na ich przełączanie oraz podwyższona masa bolidu, mają negatywny wpływ na wyniki uzyskiwane w konkurencjach dynamicznych, więc układ ten wymaga dopracowania.

8. Podsumowanie po zawodach oraz planowane modyfikacje

Udział w zawodach FS East, okazał się krokiem milowym dla SKN PolSI Racing. Konstrukcja bolidu została wysoko oceniona przez sędziów, którzy na co dzień są profesjonalistami branży motoryzacyjnej. Szczególnie doceniona została wiedza oraz przygotowanie merytoryczne podzespołu zajmującego się układem napędowym. Sam przebieg zawodów pokazał, że bolid SKN PolSI Racing jest dobrze zaprojektowaną konstrukcją, która posiada duży potencjał rozwojowy. Usterką, która uniemożliwiła na ukończenie koronnych zmagania, tj. Endurance, było uszkodzenie półosi napędowej. Pomimo tego, że bolid w dalszym ciągu był jezdny, to regulamin nie pozwala na udział w konkurencji pojazdów, które są jakkolwiek uszkodzone. Planowane modyfikacje na przyszły rok, to przede wszystkim dopracowanie oraz uruchomienie aktywnego układu dolotowego. Kolejnym zagadnieniem jest zastosowanie niezawodnego układu paliwowego, który zapewni poprawne warunki pracy wtryskiwaczy. W miarę możliwości finansowych, zostanie także zoptymalizowany układ przeniesienia napędu, a zwłaszcza przełożenia skrzyni biegów. Nacisk zostanie położony także na skalibrowanie silnika w całym zakresie dopuszczalnych obrotów silnika. Usterka związana z uszkodzeniem półosi napędowej została już zdiagnozowana i wyeliminowana. Dalsze modyfikacje wynikać będą z przeprowadzonych pomiarów oraz testów.

Literatura

- [1] M Royce, S. Royce, *Learn&Compete A primer for Formula Student and Formula Hybrid Teams*, Wyd. 1, Racecar Graphic Limited, London 2012.
- [2] M. Trzesinowski, *Rennwagentechnik Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme*, Wyd. 1, Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008.
- [3] K. Świącicki, praca magisterska: „Konstrukcja układu dolotowego powietrza do silnika pojazdu konkursowego”, Gliwice 2015.
- [4] Ross Brawn & James Allison discuss Formula Student, strona internetowa *IMechE (Institution of Mechanical Engineers)*, <http://formulastudent.imeche.org/formula-student/news-media/news/2012/06/20/watch-ross-brawn-james-allison-talk-formula-student>, dostęp 20 lipca 2016r.
- [5] Competition History 1981-2004, strona internetowa SAE International, <http://www.sae.org/students/fsaehistory.pdf>, dostęp 15.11.2016r.
- [6] Oryginalna instrukcja użytkownika hamowni podwoziowej LPS 3000, MAHA Maschinenbau Haldenwang GmbH & Co. KG., BA052301-pl
- [7] 2016 Formula SAE© Rules, SAE International, 2015.

Selection and calibration of high performance spark-ignition engine, used in single-seater Formula SAE car

Bartłomiej Urbański[§]
*Student Research Group PolSI Racing***,
Institute of Thermal Technology, Silesian University of Technology

e-mail: bartlomiej.urbanski@student.polsl.pl

Key words: internal combustion engines, calibration of internal combustion engines, race car, Formula SAE

Abstract

This thesis project concerns selection, specify the range of modifications and calibration of high performance spark-ignition engine. These issues were one of the stages of single-seater Formula SAE car construction, carried out by Student Research Group PolSI Racing.

In this project, author, leading powertrain team of Student Research Group PolSI Racing, dealt with above mentioned issues, of which the main element was the calibration of the engine. It was made using a chassis dynamometer and monitoring the composition of the exhaust gases. The result is a properly functioning car's engine.

[§] This chapter was prepared during engineering thesis project at the Institute of Thermal Technology, Department of Energy and Environmental Engineering of the Silesian University of Technology, under the supervision of dr Grzegorz Przybyła.

^{**} This research was carried out within the Students Research Group PolSI Racing project, titled: „Construction of a single-seater Formula SAE car.”.