

Abstrakt

W świetle coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin, optymalizacja silników spalinowych pod kątem oszczędności paliwa, wykorzystania paliw alternatywnych oraz redukcji emisji spalin pozostaje priorytetem działań inżynierskich. Aby zapewnić odpowiednią efektywność, optymalizacja taka wymaga oceny parametrów wydajnościowych silnika oraz emisji spalin w warunkach przejściowych, typowych dla rzeczywistych cykli jazdy. Jednakże fizyczne testy na stanowiskach badawczych są zarówno kosztowne, jak i też czasochłonne, w efekcie czego powstaje zapotrzebowanie na narzędzia symulacyjne, które wspierałyby proces dalszego rozwoju silników spalinowych.

Niniejsza praca przedstawia zintegrowany łańcuch narzędzi komputerowych (ang. simulation toolchain) do symulacji procesów silnikowych w stanach przejściowych oraz w czasie rzeczywistym. Zaproponowany system narzędzi, integruje zero-wymiarowy model reaktora stochastycznego mieszania (ang. SRM) do symulacji procesów silnikowych z wykorzystaniem modeli szczegółowej kinetyki chemicznej do spalania oraz emisji spalin, z platformami symulacyjnymi typu Model-in-the-Loop (MiL) i Hardware-in-the-Loop (HiL) poprzez zastosowanie standardu Functional Mock-up Interface (FMI). Dzięki konwersji modelu SRM do formatu Functional Mock-up Unit (FMU) możliwym stały się symulacje międzyplatformowe, wypełniające lukę między dokładnością modelowania fizycznego a praktyczną przydatnością symulacji na platformach MiL/HiL w procesie rozwoju silników spalinowych. Opracowany łańcuch narzędzi umożliwia symulacje w czasie rzeczywistym na platformach MiL/HiL oraz w trybie autonomicznym i jest traktowany jako fizyczny model-symulator cyklu jezdny silnika. Tak zdefiniowany symulator pozwala na predykcję emisji spalin oraz parametrów wydajnościowych pracy silnika w stanach przejściowych charakterystycznych dla cykli jezdnych, takich jak Worldwide harmonised Light vehicles Test Procedure (WLTP) i Non-Road Transient Cycle (NRTC). Poprzez opracowanie, opartego na sztucznej sieci neuronowej, metamodelu symulatora cyklu jazdy, koszt obliczeniowy symulacji obniżono znacznie poniżej czasu rzeczywistego, przy zachowaniu dokładności modelu fizycznego. Opracowany łańcuch narzędzi oparty na standardzie FMU pozwala też na płynną integrację modelu SRM z modelami układu oczyszczania spalin, umożliwiając spójną symulację procesu od spalania do rzeczywistej emisji spalin.

Opracowany łańcuch narzędzi i schemat symulacji zastosowano w trybie autonomicznym jak również w zintegrowanych środowiskach MiL/HiL dla silników z zapłonem samoczynnym (ZS) oraz iskrowym (ZI) w przejściowych warunkach jazdy cykli WLTP i NRTC. Badania silników ZI koncentrowały się na symulacji parametrów wydajności silnika i emisji spalin podczas fazy zimnego rozruchu w trakcie cyklu jezdny dla silników zasilanych sprężonym gazem ziemnym. Symulacje silników ZS dotyczyły przewidywania emisji spalin takich jak CO₂, NO_x, sadzy, niespalonych węglowodorów i CO oraz ich niepowtarzalności w trakcie cykli jezdnych. Zastosowanie zestawu narzędzi w konfiguracjach MiL i HiL zostało zweryfikowane na systemie firmy dSPACE i wykazało płynną integrację z tym środowiskiem oraz działanie w czasie rzeczywistym. Możliwość co-symulacji z modelami oczyszczania spalin została zweryfikowana na podstawie połączenia modelu silnika z modelem katalizatora selektywnej katalitycznej redukcji zastosowanego do symulacji silnika napędzanego amoniakiem i biodieslem. Wyniki uzyskane z różnych zastosowań opracowanego łańcucha narzędzi wskazują na jego wszechstronność i przydatność w badaniach zachowania silnika w warunkach przejściowych, gdzie istotne są szczegóły tworzenia się emisji spalin oraz wpływ paliwa. Ponadto, może on być pomocny do testów certyfikacyjnych silników oraz przyczynia się do dalszego rozwoju wirtualnych stanowisk badawczych oraz cyfrowych bliźniaków zarówno w kontekście badawczym, jak i przemysłowym.