

Optimální kalibrace spalovacího motoru

Bez optimalizované kalibrace spalovacího motoru nelze docílit vyvážené kombinace jeho dynamického výkonu a šetrnosti k životnímu prostředí. Dosáhnout optimálního nastavení současných komplexních pohonů s mnoha stupni volnosti však není snadné ani pro zkušené konstruktéry. Existuje zde příliš mnoho variant, než aby bylo možné ověřit všechny kombinace proměnných veličin individuálně, a vztahy mezi výkonem, účinností, emisemi a spolehlivostí pohonu jsou velmi složité.

Společnost Mercedes-AMG vyvinula vlastní nástroj pro kalibraci pohonů založený na výpočetním prostředí Matlab a jeho nadstavbách *Model-Based Calibration Toolbox* a *Parallel Computing Toolbox* (obr. 1). Z jeho předností mohou těžit vývojáři na všech úrovních. Nástroj je využíván v celém procesu kalibrace spalovacího motoru od návrhu experimentů, přes tvorbu a výběr modelu až po optimalizační úlohy.

Úloha kalibrace ve vývoji motoru

Chování motoru závisí na přesném řízení velkého počtu parametrů, který roste od roku k roku. Současné řídicí jednotky např. umožňují vstříkovat palivo do válce

několikrát během spalovacího cyklu, pokaždé v jiném množství, což vede k mnohem většímu počtu parametrů v systému než při jednorázovém vstřiku. Kalibrovat motor znamená ladit všechny jeho dostupné parametry za účelem získat maximální výkon v celém pracovní rozsahu otáček a zatížení.

Účinky změn hodnot jednotlivých parametrů jsou na sobě závislé, proto není možné parametry jednoduše optimalizovat jeden po druhém. Naproti tomu je zde více než deset proměnných, každá s mnoha různými hodnotami, a tak není možné ani vyzkoušet všechny kombinace. Východisko z této situace nabízí technika zvaná *plánování experimentů* (*Design of Experiments*; viz vložený text), která při použití plánovaných zkoušek efektivně určuje povahu odezvy pohonu. Navržený kalibrační nástroj umožňuje použít techniku plánování experimentů jako součást souhrnného kalibračního procesu, a to i vývojářům bez předchozích zkušeností s touto metodou.

Plánování experimentů

Plánování experimentů je disciplína matematické statistiky, která se zabývá sběrem dat v situaci, kdy je hledaná informace zatížena nahodilostí a provázaností efektů změn hodnot vstupních parametrů. Součástí experimentu je obvykle zásah experimentátora, přičemž cílem je zjistit jeho účinek, zlepšit kvalitu informace a odstranit nadbytečná data. Dobře navržený experiment umožňuje omezit množství měřených údajů na minimum a zároveň poskytnout dostatečnou informaci k přesnému odhadu parametrů modelu a určení kauzálního působení zásahů.

Vznik kalibračního nástroje

Kalibrační nástroj byl vyvinut ve třech fázích. V první bylo nutné sestavit celý postup robustního návrhu, modelování a optimalizace pro



Obr. 1. Hlavní menu programu pro kalibraci pohonů

systematickou kalibraci motorů. Práci usnadnilo dodávané grafické rozhraní programového nástroje *Model-Based Calibration Toolbox*.

Po sestavení kalibračního procesu byly jednotlivé kroky převedeny z grafického rozhraní do funkcí nástroje *Model-Based Calibration Toolbox* volaných z příkazové řádky výpočetního prostředí Matlab. Cílem bylo vytvořit vlastní aplikační program pracující se specifickými vstupy z výrobního procesu, který by umožnil snadno zahrnout požadavky konstruktérů. Z uvedeného důvodu bylo ve třetí fázi vývoje kalibračního nástroje vytvořeno nové grafické rozhraní, které volalo potřebné funkce a bylo přizpůsobeno konkrétním potřebám společnosti Mercedes-AMG.

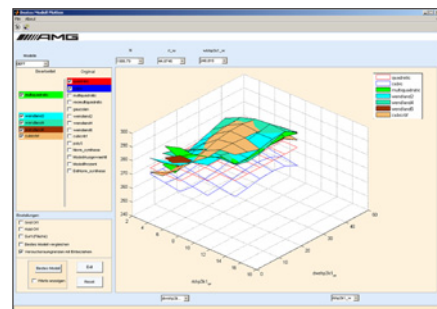
Proces kalibrace motoru

V procesu kalibrace je nutné nejprve zadat známá omezení proměnných veličin, jako např. minimální a maximální množství vstří-

kovaného paliva (v miligramech na vstřik), mezní časy pro zážeh směsi (měřené v úhlech natočení klikové hřídele) atd. Aplikační rozhraní požaduje pouze ty údaje, které jsou konstruktéři schopni poskytnout. Kalibrační nástroj poté zavolá funkce nadstavby *Model-Based Calibration Toolbox*, které vytvoří minimalizovanou sadu zkušebních bodů určených k proměření motoru na dynamometru.

Zjištěné údaje o krouticím momentu, emisích a spotřebě paliva jsou poté přeneseny zpět do kalibračního nástroje, který vytvoří sadu matematických modelů daného motoru (obr. 2). Generování modelů a vyhodnocení vhodných kandidátů jsou výpočetně náročné úlohy. K jejich urychlení byly využity schopnosti prostředí Matlab pracovat s vícejádrovými procesory, v nichž je výpočetní zátěž rozložena na několik paralelních procesů.

Posledním krokem je optimalizace kalibračních nastavení napříč pracovním rozsahem otáček a zatížení motoru. Například je možné určit emisní limity dané platnými regulačními požadavky a zadat omezení spotřeby paliva. Aplikační program pak vypočítá opti-



Obr. 2. Porovnání variant a výběr modelu motoru

mální průběh krouticího momentu s ohledem na výkon motoru. Výsledkem řešení této rozsáhlé podmíněné optimalizační úlohy jsou tabulkové funkce připravené k exportu do elektronické řídicí jednotky pohonu.

Závěr

Výpočetní prostředí Matlab a funkce obsažené v nadstavbě *Model-Based Calibration Toolbox* umožnily vytvořit efektivní nástroj, který byl bez potíží začleňován do existujícího kalibračního procesu. Hlavní předností vlastního kalibračního nástroje je respektování veškerých potřeb konstruktérů, kteří se tak mohou zaměřit na specifické požadavky vyvíjených motorů. Mezi splněné cíle patřilo např. snížení emisí navrženého pohonu v souladu s normou Euro 6.

Ing. Jaroslav Jirkovský,
Humusoft s. r. o.