

# MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ

D. Pachner, J. Pekař

Honeywell Laboratory Praha

## Abstrakt

**Prezentovaný přístup návrhu řídicího systému spalovacího motoru výrazně zkracuje dobu potřebnou pro vývoj. Namísto tradičního postupu, který předpokládá časově velmi náročné ladění lineárních regulátorů a mnoha vyhledávacích tabulek přímo na běžícím motoru, je to metoda systematická. Je založena na modelování a následné numerické optimalizaci založené na modelu. Metoda je vyvinuta v prostředí Matlab a Simulink a výstupem je kód, který lze zkompileovat pro existující řídicí jednotky.**

## 1 Úvod

Cílem příspěvku je vysvětlit současné problémy řízení motorů především s ohledem na dodržování emisních limitů a prezentovat řešení *Honeywell Advanced Control Technology*. Podrobněji se soustředíme na část modelování a optimalizace pracovních bodů motoru. Optimální zpětnovazební řízení bude vysvětleno jen stručně. Zaměříme se na tři problémy, na kterých ukážeme, že přímočará aplikace v systému Matlab existujících numerických algoritmů není vždy nejlepším řešením. Zde je výhodou, že systém Matlab je otevřený a umožňuje uživateli vytvořit doplňující algoritmy tam, kde standardní nástroje nestačí.

## 2 Popis problému

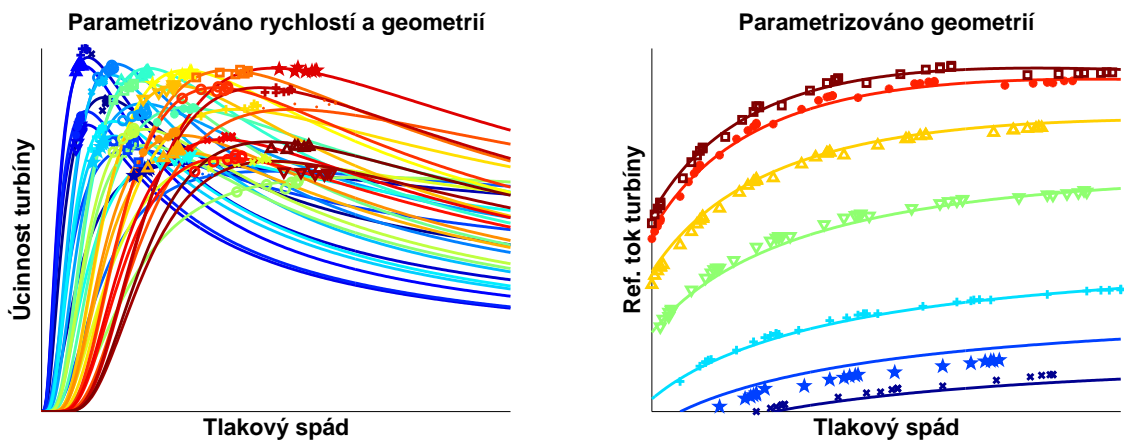
Zpřísnování emisních norem vede u nových motorů k nutnosti přesnějšího řízení mnoha veličin. Jde hlavně o nutnost přesné a dynamické koordinace hmotnostních toků paliva a vzduchu, která ovlivňuje emise  $\text{NO}_x$  a pevných částic (sazí). Na tvorbu  $\text{NO}_x$  má vliv tlak, teplota a koncentrace kyslíku v plnicím plynu. Krátkodobý nedostatek kyslíku ve válci se projevuje u diesellových motorů viditelnou kouřivostí a tento jev známe i u moderních motorů. Taková krátkodobá odchylka od správného poměru je způsobena chybnou dynamickou koordinací. Přebytek kyslíku naopak zvyšuje produkci toxických  $\text{NO}_x$  a snižuje tepelnou účinnost motoru. Dalšími zajímavými veličinami, jejichž řízení může být prospěšné, jsou u větších motorů stavové veličiny plynu vsupujícího do reaktoru selektivní katalytické redukce  $\text{NO}_x$  známého pod zkratkou SCR, neboť ty ovlivňují jeho účinnost. Tím dimenzionalita problému dále roste.

Pro dosažení těchto cílů slouží zvyšující se počet akčních členů a senzorů (odhad průměrného počtu prvků):

rok	senzorů	akčních členů
1990	4	6
2010	25	15

Pro řízení poměru kyslíku a paliva ve válci slouží u moderních motorů ventil recirkulace ochlazených spalín, který vrací část spalín do válce a tím snižuje množství kyslíku. Pro řízení hmotnostního toku vzduchu slouží u motorů s turbodmychadlem ventil obtoku turbíny nebo proměnná geometrie lopatek, čímž se snižuje tlak vzduchu před motorem, tzv. *boost*. Průběh spalování je u *common rail* motorů řízeno rozložením vstřikovaného paliva na menší dávky.

Zvýšením počtu akčních členů, omezení a dalších požadavků se z řízení motoru stává komplikovaný dynamický mnohazměrový optimalizační problém. Nastavení akčních členů je kompromisem,



Obrázek 1: Model účinnosti a toku turbíny s proměnnou geometrií lopatek získaný metodami nelineárních nejmenších čtverců.

kteří musí zohledňovat několik kritérií: emise, materiálová omezení a sledování aktuálního požadavku na moment motoru. To vyžaduje zohlednění vlivu nastavení akčních členů na všechny řízené veličiny a spolu s komplikovaností interakcí znesnadňuje rozdělení řídicího systému na nezávislé řídicí smyčky. Chování motoru je značně nelineární, dokonce se změnami znamének v matici statického zesílení lokálních linearizovaných modelů. Tj. řízené veličiny reagují nekonzistentně.

Klasické řešení tohoto problému je založeno na výběru dominantních interakcí a řízení každé veličiny jedním akčním členem, příp. se uvažují interakce maximálně dvojic veličin. Síla interakcí se mění podle režimu práce motoru, a proto může se struktura řídicího systému měnit dynamicky např. podle otáček a zátěže. Protože zpětnovazební zesílení nemůže vzhledem k neurčitosti modelu (nelinearity) být velké, slouží spíše k odintegrování chyby hodnoty přímovazebního signálu. Než zareaguje zpětná vazba, jsou akční členy nastaveny přímovazebně do polohy dané vyhledávacími tabulkami. Vzhledem k tomu je přesnost vyhledávacích tabulek kritická. Tento systém má velmi mnoho stupňů volnosti a jeho nastavení je tudíž pracné a jeho optimalita neprokazatelná. Systém je nepružný a při jakékoliv změně je často třeba nastavovat a testovat znovu. Jedná se o komplikovanou kombinaci logických podmínek, lineárních zpětných vazeb a nelineární přímých vazeb.

Odpovídající úloha optimálního řízení nelineárního mnohazměrového systému je natolik složitá, že je těžko myslitelné její periodické řešení každých cca 50ms v řídicí jednotce motoru. Řešení firmy Honeywell je proto založeno na vyřešení této úlohy explicitně na stolním počítači a vygenerování optimálních po částech konstantních hodnot zpětnovazebních zesílení spolu s vyhledávacími tabulkami přímovazebního řízení. Výhodou tohoto řešení je, že struktura řídicího systému není závislá na formulaci úlohy, mění se pouze hodnoty a velikosti číselných polí popisujících hodnoty přímé vazby, zesílení a množiny tvaru mnohostěnu ve stavovém prostoru definujících obor platnosti konstantního zákona řízení. Výsledkem je generický a jednoduchý algoritmus, který lze nahrát do řídicí jednotky motoru a nahradit celou řídicí strategii, nebo pouze její část. Optimalizace je založená na modelu, který je potřeba parametrizovat podle experimentálních dat.

### 3 Model spalovacího motoru

Model užitečný pro definici optimalizačního problému je značně odlišný od modelů používaných během vývoje motoru. Z tohoto důvodu je použit zjednodušený model se soustředěnými parametry, *Control Oriented Model*. Model je tzv. *Mean Value Model*, tj. popisuje střední hodnoty tlaků, teplot a toků během otáčky klikového hřídele. Detailnější *Crank Angle* modely popisují průběhy těchto veličin během otáčky. Pro účely řídicího systému je to zbytečné, protože akční členy zůstávají během otáčky v podstatě na místě

a reagují jen na změny zátěže a otáček. Model se soustředí na popis vlastností toků plynů.

Jednodušší části modelu jsou založeny na fyzikálních zákonech, např. na zákonech zachování, Bernoulliho rovnici atd. Komplikovanější části jsou empirické: experimentálně změřené charakteristiky kompresorů a turbín, tzv. mapy. Modelování koncentrace kyslíku je založeno na stochiometrii spalování, model koncentrace  $\text{NO}_x$  je semiempirický. Vstupní veličiny do modelu  $\text{NO}_x$  popisující stav stlačovaného plynu jsou modelovány fyzikálně. Množina vstupních veličin i tvar závislostí jsou zvoleny na základě znalosti mechanismu vzniku  $\text{NO}_x$ . Podobně je modelováno množství pevných částic. Výsledný model je nízkého řádu, typicky 5-15 podle struktury motoru. Přesnost takto jednoduchého modelu je zajištěna kalibrací na experimentálních datech. Jedná se o tzv. reaktivní model, nikoliv o proaktivní, který může být sestaven dřív, než je vyroben prototyp motoru. Díky zpětné vazbě od dat, která upraví parametry reaktivního modelu, nemusí model zacházet do detailů, např. prostorového rozložení latky a teploty. Přesnost modelu je přesto dostatečná pro účely řízení (v ustáleném stavu typicky  $\pm 5\%$  v celém pracovním rozsahu).

Model je sestaven jako blokové schéma v prostředí Simulink z knihovních bloků typu: ideální tepelný výměník, kompresor, turbína, pneumatický odpor, adiabatický zásobník plynu, isotermální zásobník plynu, semiempirický model hoření, rotující hmotnost a podobně. Bloková struktura takového modelu se da popisat jako seriové, paralelní (příklad: turbína a *wastegate*) a zpětnovazební (recirkulace, vazba turbína kompresor společnou hřídelí) spojení elementárních bloků. Bloky jsou dvojího druhu. Blok prvního typu typicky definuje tok hmotnosti a entalpie na základě okrajových podmínek, příp. externích signálů. Tyto bloky jsou odděleny bloky druhého typu, které modelují akumulaci látky a energie. Jsou to malé zásobníky plynu. Tato struktura se v Simulinku velice snadno nakreslí a je přímým převodem schemtického výkresu motoru. Nevýhodou je značná tuhost (*stiffness*) takového modelu. Dynamické módy související s rozvážením toků hmotnosti a energie odeznívají daleko rychleji než dynamické módy popisující celkový tok. Jinými slovy, každý skutečný zásobník plynu se vždy nachází blízko rovnováhy vstupního a výstupního toku. Pokud se během numerického řešení dostanou rovnice zásobníku mimo tuto rovnováhu vlivem numerické nepřesnosti nebo počáteční podmínky, vybudí se rychlý mód který donutí numerický solver ke snížení časového kroku a dojde k extrémnímu zpomalení řešení. Tuhé diferenciální rovnice proto představují značný numerický problém. Je potřeba používat pomalé implicitní stiff řešiče, obyčejné ODE solvery nefungují.

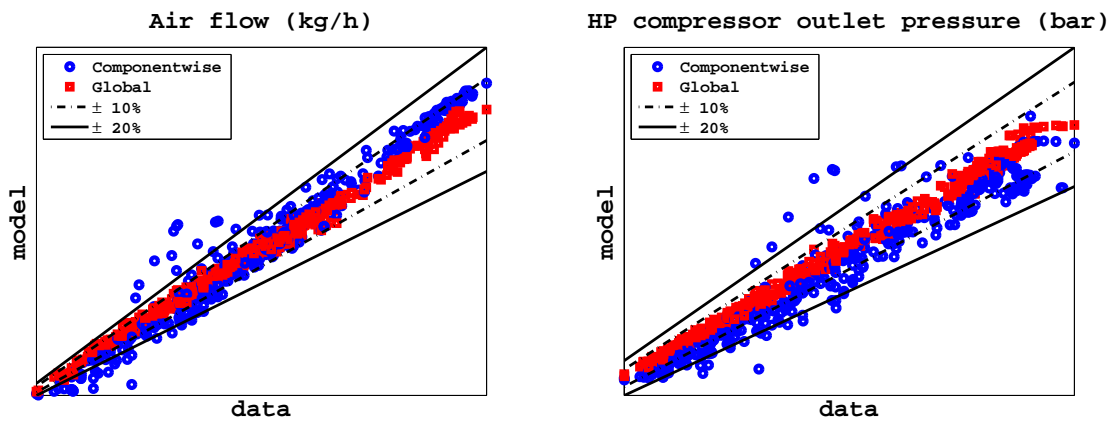
Klasický přístup řešení tohoto problému je založen na eliminaci rychlých dějů a předpokladu, že je stále ustálený a v rovnováze. Tím dojde k nahrazení příslušných diferenciálních rovnic rovnicemi algebraickými, popisujícími stav rovnováhy. Něco takového ale nelze provést s blokovým schématem v Simulinku, navíc tím dojde ke ztrátě souvislosti mezi strukturou modelu a motoru. **Toto je problém 1.**

## 4 Kalibrace modelu

Zatímco standardem v modelování motorů je tvorba velice detailních a složitých proaktivních modelů, které slouží i během vývoje motoru, je jednoduchý *Control Oriented Model* nemyslitelný bez kalibrace na datech. Zatímco proaktivní modely se na datech nekalibrují, pouze se upraví některé parametry podle výsledků měření pro dosažení lepší shody, je *Control Oriented Model* vybaven algoritmem identifikujícím jeho parametry z dat. Tento algoritmus je zásadní pro použitelnost modelu.

Protože model existuje pouze v Simulinku a nikoliv jako formální soustava rovnic, je metoda kalibrace ryze numerická a založena na nelineárních nejmenších čtvercích s omezeními. Hodnota kritéria a jeho první a druhé derivace je zjišťována funkcemi Simulinku (simulace a linearizace). Kalibrace probíhá ve třech stupních. V prvním se kalibrují jednotlivé komponenty zvlášť. V druhém se kalibrují všechny parametry proti ustáleným stavům pokrývajícím celý operační prostor. V poslední fázi se doladí parametry proti změřeným přechodovým režimům. Srovnání přesnosti 480 ustálených stavů modelů kalibrovaného po komponentách a celkově je na obrázku 2.

Algoritmus používá metody linearizace a simulace a výsledky předává optimalizačnímu toolboxu



Obrázek 2: Predikce ustálených stavů dvou základních parametrů určujících emise: tok vzduchu a boost.

přímo, tj. není použit *Simulink Response Optimization*. Důvodem je nutnost speciálního zacházení s omezeními danými omezeným definičním oborem mnoha použitých fyzikálních zákonitostí. **Nazýváme to problémem 2.**

Například zjednodušená rovnice popisující referenční tok turbíny je:

$$\dot{m} = A \Pi^k \sqrt{\Pi^{\frac{2}{\gamma}} - \Pi^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}$$

$A$	průřez turbíny $m^2$
$k$	parametr
$\Pi$	poměr výst. a vst. tlaku
$\gamma$	poměr měrných tepel spalin

(Referenční tok je za referenčních vstupních podmínek, teploty a tlaku.) Kalibrují se parametry  $A$ ,  $k$ , případně i  $\gamma$ . Pohledem na rovnici je jasné, že existuje omezení na tlaky kolem turbíny, jinak rovnice neplatí, protože výsledkem by byl formálně imaginární tok. Vzhledem k hodnotám  $\gamma$  lze ukázat, že  $\Pi$  musí být  $\leq 1$ , tj. pro tlak za turbínou vyšší nemá rovnice smysl.

Takových omezení je ve fyzice motoru hodně a během simulace i optimalizace je potřeba za každých okolností zajistit jejich splnění. Představují nelineární algebraická omezení, které jsou funkcemi vnitřních veličin modelu, nikoliv pouze jen parametrů. Mimo tato omezení není možné vyčíslit predikce, a nebo nemá výsledek smysl. Na hranici definičních oborů je funkce často nespojitá a při překročení této hranice by byla konvergence do nesprávného lokálního minima. Formálně se jedná o identifikaci parametrů nelineárního systému a nelineární omezení na stavy i parametry, přičemž tato omezení je třeba dodržet v každé iteraci (tj. během simulace i linearizace, jinak Simulink ohlásí chybu, např. pokus přiřadit komplexní číslo reálnému signálu). Proto bylo nutné vytvořit zcela speciální identifikační algoritmus.

## 5 Inverze modelu

Model motoru lze přímo použít k návrhu přímo a zpětnovazebního řízení. Přímá vazba určuje apriorní polohu řídicích členů v ustáleném stavu a je následně korigována zpětnovazebně. Zpětná vazba kompenzuje nepřesnosti přímé vazby, vliv odlišnosti konkrétního motoru a vnějších podmínek, jako je vlhkost a teplota okolního vzduchu nebo výhřevnost paliva. Přímá vazba je typicky dána tabulkami, ve kterých se interpolují např. polohy ventilu recirkulace spalin a *wastegate* podle aktuálních hodnot otáček, zatížení a dalších veličin. Tuto úlohu lze řešit jako numerickou optimalizaci minimalizováním odchylky řízených veličin od žádaných hodnot vzhledem k poloze akčních členů. Tím lze tedy nalézt požadované nastavení v konkrétním bodu.

Potíž nastává, pokud se mezi řešeními, nalezenými pro jednotlivé pracovní body, začne interpolovat. Chyba taková interpolace se snižuje se zjemňováním tabulky pouze tehdy, když tabulka obsahuje body spojitě funkce. Jinak mohou být výsledky nesmyslné. Např. pokud statická charakteristika motoru není prostou funkcí řídicích signálů. Pro příklad uvažujme, že hledáme numericky  $x$  tak, abychom řídili hodnotu  $x^2$  v určitém intervalu. Interpolací v následující tabulce mezi hodnotami  $x_1$  a  $x_2$  dostaneme velmi nesprávné výsledky, přestože tabulka je správně:

$$\begin{array}{cccc} x^2 & x_1^2 & x_2^2 & \dots \\ x & |x_1| & -|x_2| & \dots \end{array}$$

Z tohoto důvodu není přímočará optimalizace bod po bodu možná, ale je nutné optimalizovat nastavení všech pracovních bodů současně. Jinak by se stalo, že během činnosti motoru se během přechodů nastaví akční členy zcela nesmyslně. Taková situace není dokonce nepravděpodobná. **Toto je problém 3.**

## 6 Závěr

Řešení problému řízení motoru vyvíjené firmou Honeywell je založeno na optimálním mnohazměrovém řízení opírajícím se o relativně jednoduchý dynamický nelineární model nízkého řádu. Flexibilita řešení spočívá v tom, že model konkrétního motoru je sestaven z knihovných bločků v Simulinku graficky. Je nepředstavitelné něco podobného provádět přímo manipulací se soustavami rovnic. Mimo jiné by to bylo skoro nemožné neudělat chybu. V tomto směru je význam použití Simulinku zásadní. Výsledná struktura je ale numericky velmi nevhodná, tuhá. V tomto smyslu standardní učebnicový postup selže. Systém lze simulovat pouze stiff ODE solverem, ale řešení je tak pomalé, že ho nelze použít pro optimalizaci (tj. vyčíslovat simulaci v iteracích).

Parametry modelu jsou nalezeny minimalizací chyb predikce modelu s využitím optimalizačního toolboxu. Zde je obtížné respektovat omezené definiční obory fyzikálních zákonitostí, přičemž vně těchto oborů je ztracena konvergence, pokud nedojde k jiné chybě (imaginární tok a podobně). V tomto smyslu učebnicový přístup opět selže.

Hodnoty přímovazebního řízení jsou nalezeny numerickou inverzí modelu motoru opět využitím optimalizačního toolboxu. Zde přímočaré řešení založené na optimalizaci bod po bodu a následné interpolace opět selže, pokud zapomeneme na podmínku, že minimum kritéria musí být spojitou funkcí parametrů. Tato podmínka udělá zdánlivě jednoduchou úlohu značně komplikovanou.

Závěrem tedy můžeme říct, že vývoj podobné aplikace v prostředí Matlab je velmi usnadněna jeho flexibilitou a množstvím nástrojů, ale nejedná se o pouhou aplikaci nabízených funkcí. Pro uživatele systému Matlab mohou být zajímavé příklady numerických problémů, se kterými jsme se setkali při řešení a které jsme v textu vyznačili jako problém č. 1 až č. 3.

---

Daniel Pachner

daniel.pachner@honeywell.com

Jaroslav Pekař

jaroslav.pekar@honeywell.com

Honeywell spol. s r.o., V Parku 2326/18, Praha 4