

# Konvergenca, stabilnost in računska zahtevnost numeričnih shem za 0-D modeliranje procesov v valju motorjev z notranjim zgorevanjem

Tomaz Ktrašnik<sup>1,\*</sup> – Henrik Aleš Schuemie<sup>2</sup> – Johann C. Wurzenberger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

<sup>2</sup> AVL List GmbH, Napredne simulacijske tehnologije, Avstrija

Razvoj 0-D modelov motorjev z notranjim zgorevanjem, ki so namenjeni simulacijam procesov v realnem času, zahteva izbiro ustreznih numeričnih metod z ozirom na konvergenco, stabilnost in računsko zahtevnost. Model valja predstavlja računsko najzahtevnejši element, saj so za valj značilni največji gradienti termodinamskih parametrov. Zato so lastnosti dveh eksplicitnih in štirih večkoraknih numeričnih shem za reševanje sistemov navadnih diferencialnih enačb analizirane na primeru enovaljnega motorja povezanega s polnilnim in izpušnim zbiralnikom.

Motivacija za izvedbo takšne analize izhaja iz dejstva, da takšna analiza še ni bila opravljena, in iz dejstva, da se za validacijo natančnosti simulacijskih modelov najpogosteje uporablja zgolj podatek o ujemanju z izmerjenimi parametri. Slednje ujemanje pa nikakor ne zagotavlja, da je rešitev simulacijskega modela tudi numerično konvergentna ali stabilna. Nastavitve kalibracijskih parametrov, ki se v največji meri nanašajo na parametre modelov zgorevanja in parametre modelov prestopa toplote, so lahko zato uporabljene ne zgolj za povečevanje konsistentnosti med virtualnim modelom in simuliranim objektom, ampak tudi za odpravljanje numeričnih nekonsistentnosti. Težave takšnih modelov se odražajo v odstopanju parametrov med simulacijo motorja v širokem razponu delovnih pogojev in med delovanjem v prehodnem režimu.

V članku so podane vodilne enačbe modela valja in modela prenosa snovi skozi ventile. Numerični eksperiment je izveden za en valj realnega dizelskega motorja in več delovnih točk motorja. Doprinos članka izhaja tudi iz identifikacije delovnih pogojev motorja, delov cikla in parametrov, ki so primerni za analizo stabilnosti in konvergence rešitev. Analiza rezultatov sloni na analizah potekov krivulj parametrov v valju v odvisnosti od zasuka ročične gredi, ki so osnovni pokazatelj stabilnosti in konvergence rešitev. Te osnovne analize primerov so nato nadgrajene z analizo brezdimenzijske vsote kvadratov odstopkov posameznih parametrov čez celoten cikel in računskega časa. Takšna interpretacija rezultatov namreč omogoča enostavno primerjavo natančnosti rezultatov v odvisnosti od računske zahtevnosti posamezne sheme.

Rezultati analize kažejo, da se natančnost posameznih numeričnih shem znatno razlikuje ob enaki računski zahtevnosti, kar nakazuje potrebo po izbiri ustreznih shem. V vseh analiziranih primerih je bila v območju časovnih zahtevnosti, ki so primerne za simulacije v realnem času, natančnost rezultatov največja v primeru uporabe eksplicitne Runge-Kutta sheme četrtega reda, ki je ob tej računski zahtevnosti omogočala izračun konvergentnih in stabilnih rezultatov. V članku je tudi pokazano, da integralni motorski parametri, kot sta srednji indiciran in efektivni tlak procesa, niso primerni kot merilo za določitev konvergence in stabilnosti modela, saj dobro ujemanje integralnih parametrov ni zadosten pogoj za dobro ujemanje potekov parametrov v valju skozi celoten cikel.

Članek tako poda jasne napotke za izbiro ustreznih metod za 0-D modeliranje procesov v valju motorja z notranjim zgorevanjem. V članku je prikazana tudi primerjava simulacijskih in izmerjenih podatkov tlakov v valju sodobnega tlačno polnjenega dizelskega motorja, ki potrjuje primernost in natančnost predstavljenega modela za modeliranje procesov v valju.

**Ključne besede:** modeliranje motorjev z notranjim zgorevanjem, integracijske sheme, konvergenca, stabilnost, računska zahtevnost