

SIMULATION OF FUEL CONSUMPTION IN THE 3RD GENERATION MOBILE POWER STATIONS

J. Kalous¹

Summary: *The 3rd generation mobile power sets operate at variable speed of the primary injection engine – generator aggregate dependent on their current loading. It results in relatively high saving of fuel in comparison with up-to-date mobile power sets operating at constant speed regardless of the actual loading. The simulation and the following measurements have demonstrated that the fuel saving can reach 10 % up to 40 %. The article deals with injection-engine modeling and analysis of simulation results.*

1. Úvod

Jedním z hlavních cílů výzkumu mobilních zdrojů elektrické energie 3. generace (dále EC3G), probíhajícího na Vojenské akademii v Brně v letech 2000 až 2002, bylo mj. optimalizovat provozní režim soustrojí „vznětový motor – synchronní generátor s permanentními magnety“ (dále soustrojí „VzM – SGPM“) v závislosti na zatížení EC3G tak, aby spotřeba paliva (nafty) byla minimální. Toto soustrojí tvoří primární zdrojovou jednotku EC3G. Za tím účelem bylo třeba provést fyzické a simulační experimenty k získání potřebných podkladů pro takovou optimalizaci. V tomto článku jsou prezentovány výsledky simulačních analýz spotřeby paliva v motoru Hatz 1B40, který je použit ve fyzickém modelu EC3G, vybudovaného v laboratoři řešícího pracoviště.

2. Model vznětového motoru Hatz 1B40

Vznětový motor Hatz 1B40 má následující základní parametry:

- jmenovitý výstupní výkon	
a) při 3000 min ⁻¹	6,2 kW,
b) při 2000 min ⁻¹	4,5 kW,
- maximální točivý moment	24,5 Nm,
- specifická spotřeba paliva	
a) při 3000 min ⁻¹	275 g/kWh,
b) při 2000 min ⁻¹	260 g/kWh,

¹ Doc. Ing. Jaroslav Kalous, CSc.: Vojenská akademie v Brně, katedra elektrotechniky a elektroniky, PS 13-K301, Kounicova 65, 612 00 Brno, tel.: +420 541 183 965, e-mail: jaroslav.kalous@vabo.cz

- hmotný moment setrvačnosti vztažený k výstupnímu hřídeli 0,12 kgm².
- časová konstanta palivového čerpadla 20 ms

Simulační model motoru Hatz 1B40 je popsán následující soustavou rovnic (Kalous 2000 a 2001):

a) *palivové čerpadlo s omezovačem dávky paliva*

$$2 \cdot 10^{-2} \frac{dd_p}{dt} + d_p = d_{pz},$$

$$d_{ps} = \begin{cases} d_{min} & \text{pro } d_p \leq d_{min}, \\ d_p & \text{pro } d_{min} < d_p < d_{max}, \\ d_{max} & \text{pro } d_{max} \leq d_p, \end{cases} \quad (1)$$

kde d_{ps} je skutečná dávka paliva při jednom vstřiku,

$d_{min} = 2 \text{ mg/vstřik}$, resp. $d_{max} = 24 \text{ mg/vstřik}$ je minimální, resp. maximální dávka paliva při jednom vstřiku.

b) *zdroj hnacího momentu (statická momentová charakteristika)*

$$T_m(\omega, d_{ps}) = a_2(d_{ps})\omega^2 + a_1(d_{ps})\omega + a_0(d_{ps}), \quad (2)$$

přičemž

$$\begin{aligned} a_0(d_{ps}) &= 2,997 \cdot 10^{-4} \cdot d_{ps}^3 - 3,124 \cdot 10^{-2} \cdot d_{ps}^2 + 1,607 \cdot d_{ps} - 3,278, \\ a_1(d_{ps}) &= -1,017 \cdot 10^{-6} \cdot d_{ps}^3 + 6,400 \cdot 10^{-5} \cdot d_{ps}^2 + 2,422 \cdot 10^{-4} \cdot d_{ps} - 5,248 \cdot 10^{-3}, \\ a_2(d_{ps}) &= -1,259 \cdot 10^{-9} \cdot d_{ps}^3 + 1,970 \cdot 10^{-8} \cdot d_{ps}^2 - 9,468 \cdot 10^{-7} \cdot d_{ps} - 2,631 \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (3)$$

Symbolem ω je označena úhlová rychlost rotoru motoru.

c) *rotor*

$$0,12 \frac{d\omega}{dt} = T_m(\omega, d_{ps}) - T_g, \quad (4)$$

kde T_g je zatěžovací moment motoru, představovaný v EC3G elektromagnetickým momentem SGPM při daném zatížení.

Aby mohl být tento model použit k simulacím statického režimu vznětového motoru, byl doplněn zpětnovazební smyčkou s proporcionálním regulátorem úhlové rychlosti rotoru motoru, na jehož vstup se přivádí jednak žádaná a jednak skutečná úhlová rychlost rotoru.

3. Hodinová spotřeba paliva a její optimalizace

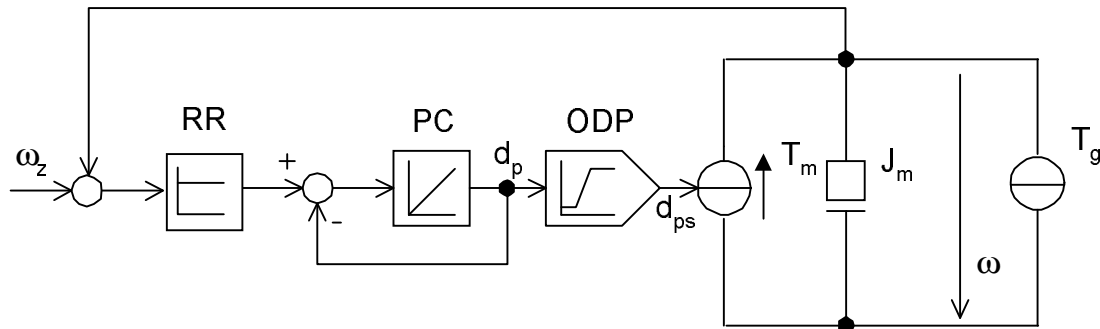
Pro zjišťování hodinové spotřeby paliva a získání údajů pro její optimalizaci byl simulován ustálený chod motoru při konstantních otáčkách jeho výstupního hřídele za předpokladu, že výkonové zatížení je rovněž konstantní. Přitom žádaná rychlost motoru byla volena

v předpokládaném rozsahu otáček od 1500 min^{-1} do 3000 min^{-1} . Motor byl při jednotlivých rychlostních režimech zatěžován konstantním momentem T_g , daným vztahem

$$T_g = \frac{P_g}{\omega}, \quad (5)$$

kde P_g je výkon zátěže SGPM, pohybující se v rozmezí od 500 W do 5000 W.

Simulační schéma motoru s rychlostní regulační smyčkou a se zátěží je znázorněno na obr. 2.



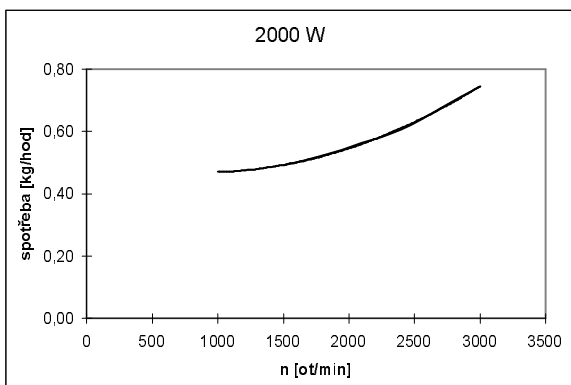
Obr. 1 Simulační schéma vznětového motoru se zátěží

RR - regulátor rychlosti, PC – palivové čerpadlo,
ODP – omezovač dávky paliva, ω_z , ω - žádaná a
skutečná úhlová rychlost hřídele motoru

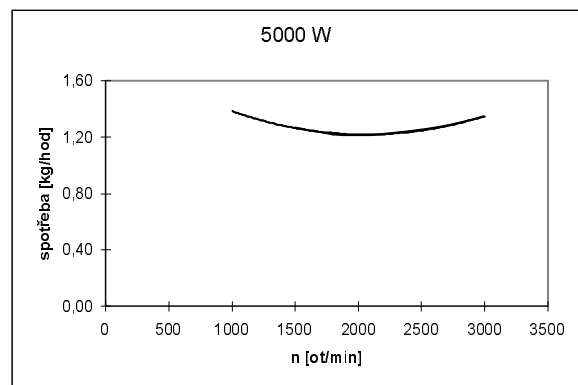
Jednou z výstupních veličin simulačního modelu motoru je též skutečná dávka paliva d_{ps} v mg/vstřik. Hodinovou spotřebu hs lze potom snadno vypočítat pro čtyřdobý motor pomocí vztahu

$$hs = 3 \cdot 10^{-5} \cdot d_{ps} \cdot n \quad [\text{kg/hod}; \text{mg/vstřik}, \text{min}^{-1}]. \quad (6)$$

Na obr. 2 a 3 jsou pro ilustraci uvedeny vypočítané grafy závislosti hodinové spotřeby v kg/hod na otáčkách motoru při zatěžovacích výkonech 2000 W a 5000 W. Je zřejmé, že hodinová spotřeba je při daném výkonu závislá na konkrétních otáčkách vznětového motoru. Přitom zejména při vyšších výkonech zátěže je na grafech $hs = f(n)$ (obr. 3) patrné určité minimum čili při určitých otáčkách motoru je jeho hodinová spotřeba minimální.



Obr. 2



Obr. 3

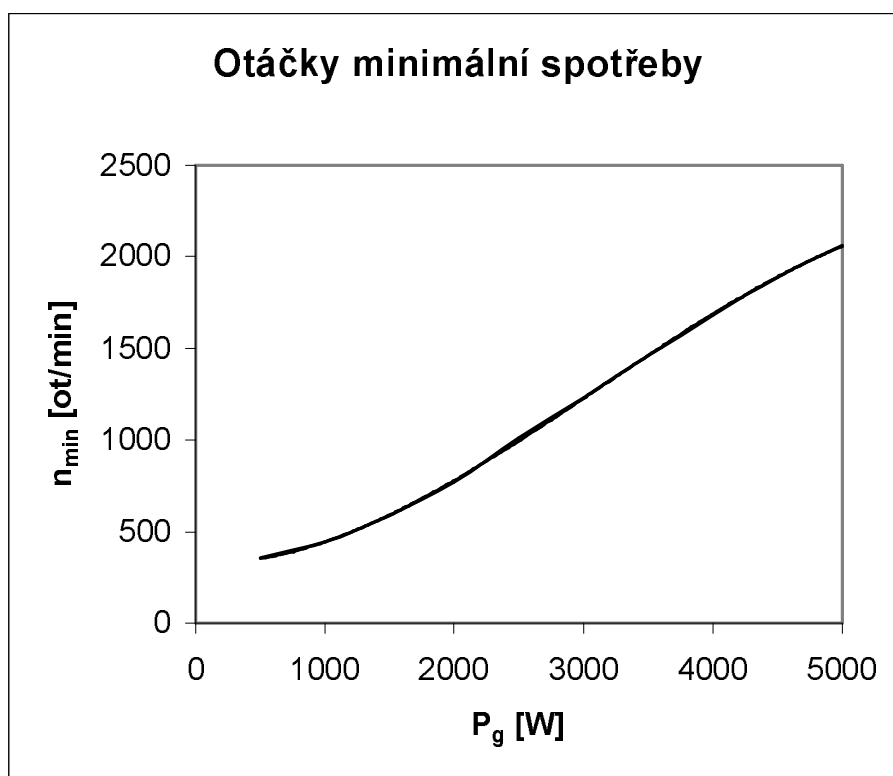
Ke zjištění otáček motoru, při kterých je hodinová spotřeba minimální, se použije obvyklý postup hledání lokálního extrému funkce $hs = f(n)$ při konstantním výkonu zátěže. Jak ukázaly podrobné analýzy závislosti hodinové spotřeby na otáčkách motoru (Kalous 2002), lze funkce $hs = f(n)$ pro jednotlivé zatěžovací výkony aproximovat s vysokou přesností pomocí polynomů 2. stupně ve tvaru

$$hs \doteq a_2 n^2 - a_1 n + a_0.$$

Otáčky motoru, při kterých je jeho hodinová spotřeba minimální, se pak vypočítají ze vztahu

$$n_{min} = \frac{a_1}{2a_2}.$$

Aplikací tohoto postupu na všechny simulačně zjištěné závislosti $hs = f(n)$ byla získána závislost otáček minimální spotřeby na výkonu zátěže P_g , která je uvedena na obr. 4.



Obr. 4 Závislost optimálních otáček na zatížení

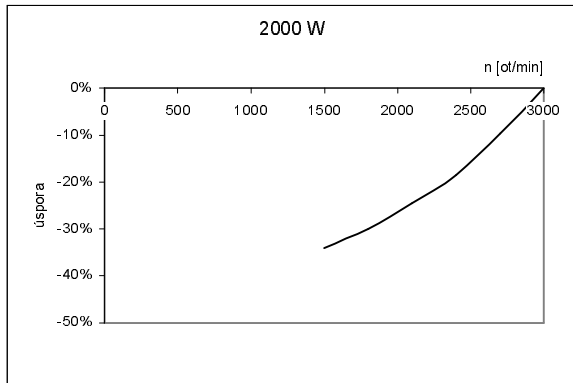
Je zřejmé, že obecně je tato závislost nelineární. V daném konkrétním případě motoru Hatz 1B40 se dá tato závislost s vysokou přesností aproximovat polynomem třetího stupně

$$n_{min} = -1,70 \cdot 10^{-8} \cdot P_g^3 + 1,59 \cdot 10^{-4} \cdot P_g^2 - 2,32 \cdot 10^{-2} \cdot P_g + 3,26 \cdot 10^2. \quad (7)$$

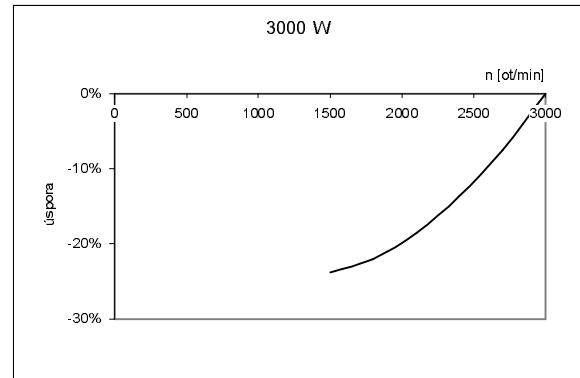
Otáčky n_{min} jsou tedy z hlediska spotřeby paliva optimální čili hnací motor Hatz 1B40 by měl být podle nich řízen.

4. Úspory paliva

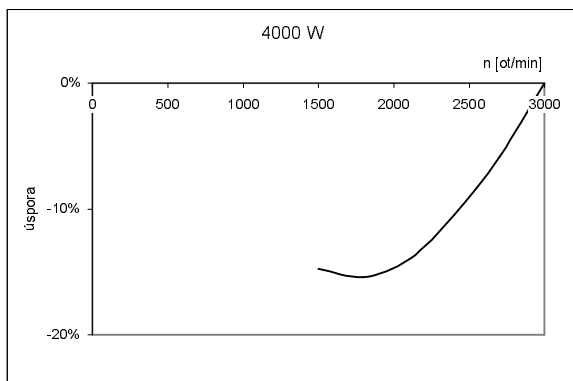
Na základě simulačních výpočtů je možné určit i úsporu paliva v EC3G vůči elektrocentrálám 2. generace, které jsou charakteristické tím, že celé zdrojové soustrojí se otáčí konstantní synchronní rychlostí (obvykle 3000 min^{-1}) bez ohledu na konkrétní zatížení, což je vyvoláno požadavkem konstantního kmitočtu a velikosti generovaného napětí. Tuto úsporu lze tedy vyjádřit jako odchylku mezi hodinovou spotřebou při daných otáčkách a hodinovou spotřebou při synchronních otáčkách, vztaženo k hodinové spotřebě při synchronních otáčkách. Na obr. 5 až 8 jsou uvedeny grafy závislosti úspory paliva na skutečných otáčkách zdrojového soustrojí EC3G při výkonech 2000 W až 5000 W.



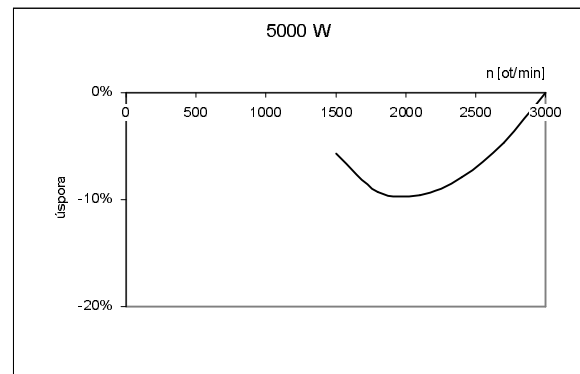
Obr. 5



Obr. 6



Obr. 7



Obr. 8

Je zřejmé, že úspory paliva dosahují pro simulované zatěžovací výkony minimálně deset procent a se snižováním výkonu zátěže vůči jmenovitému výkonu vznětového motoru se zvyšují. Navíc je patrné, že je možné zjistit optimální otáčky pro konkrétní výkon, při kterých jsou úspory paliva největší (viz obr. 7 a 8), popř. provozovat celý agregát při nejnižších možných otáčkách (viz obr. 5 a 6). Přitom se však musí zdrojová jednotka „VzM – SGPM“ provozovat při jistých minimálních otáčkách, zaručujících generování střídavého napětí na výstupu SGPM o dostatečné amplitudě.

5. Závěr

Uskutečněné simulační analýzy prokázaly možnost relativně výrazné úspory paliva při provozování EC3G, pokud bude vznětový motor rychlostně řízen v závislosti na zatížení elektrocentrály. Nalezená křivka optimálního řízení představuje pouze výchozí teoretickou

křivku, která by měla být dále modifikována podle dodatečných specifických požadavků (minimální velikost generovaného napětí na výstupu SGPM, vliv povětrnostních podmínek a nadmořské výšky na provozní vlastnosti vznětového motoru atd.).

6. Poděkování

Tato práce byla vytvořena v rámci grantového projektu reg. č. 102/03/0795 GAČR s názvem „Pokrytí výkonových špiček v inteligentní elektrocentrále pro zvýšení kvality dodávané energie“.

7. Literatura

- Kalous, J.(2000) *Simulační model vznětového motoru pro elektrocentrály*. [Výzkumná zpráva]. Vojenská akademie v Brně;
- Kalous, J.(2001) A Simple Simulation Model of an Injection Engine for Electric Aggregates. In *Národní konference s mezinárodní účastí INŽENÝRSKÁ MECHANIKA – IM 2001*. AV ČR, Ústav termomechaniky, Praha;
- Kalous, J.(2002) *Simulační analýzy spotřeby paliva v motoru HATZ 1B40*. [Výzkumná zpráva]. Vojenská akademie v Brně.