



A SIMPLE SIMULATION MODEL OF AN INJECTION ENGINE FOR ELECTRIC AGGREGATES

Jaroslav KALOUS *

Summary: The paper presents a simple non-linear model of a Diesel engine based on producer's catalogue data and on thermodynamic calculations of static torque-to-speed characteristics of the engine. A speed-dependent feedback loop was added to that model to make possible to simulate various operation conditions of an electric generating aggregate.

1. Úvod

K pohonu elektrických generátorů mobilních zdrojů elektrické energie (zkr. elektrocentrál) se používají zážehové a vznětové spalovací motory, popř. spalovací turbíny. S elektrickým generátorem, jímž může být synchronní nebo asynchronní generátor v případě střídavých elektrocentrál nebo dynamo v případě mobilních zdrojů stejnosměrných, jsou zpravidla spojeny bez převodové skříně přes spojku. Statické a dynamické vlastnosti takového soustrojí, vztažené k výstupní generované elektrické energii, jsou dány vlastnostmi jak samotného elektrického generátoru, tak i hnacího motoru. Proto je účelné se zabývat statickými a dynamickými vlastnostmi obou těchto hlavních částí elektrocentrál. V příspěvku je uveden způsob vytváření simulačního dynamického modelu vznětového spalovacího motoru. Postup tvorby modelu je demonstrován na příkladu vybraného skutečného motoru.

2. Výchozí podklady a termodynamické výpočty

Pro pohon elektrocentrály byl vybrán jednoválcový vznětový motor s následujícími základní parametry:

- jmenovitý výstupní výkon

a) při 3000 min^{-1} 7,6 kW,

b) při 2000 min^{-1} 5,5 kW,

- maximální točivý moment 28 Nm,

- hmotný moment setrvačnosti vztažený k výstupnímu hřídeli $0,24 \text{ kg.m}^2$.

V katalogovém listě vybraného motoru je obvykle k dispozici tabulka, udávající výkon motoru při různých otáčkách, která byla základem termodynamických výpočtů dle [1]. Jejich výsledkem je sada tabulek, z nichž je možné zjistit závislosti řady provozních i vnitřních

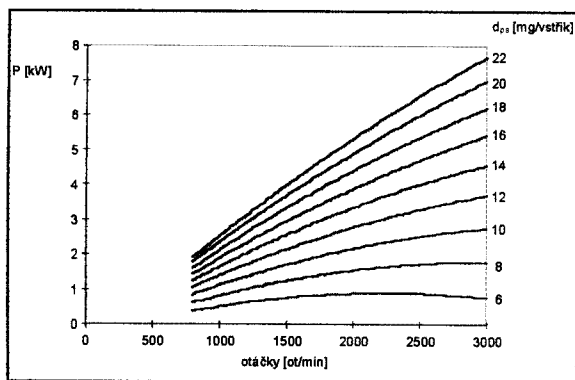
* Doc. Ing. Jaroslav Kalous, CSc., Vojenská akademie v Brně, PS 13-K301, Kounicova 65, 612 00, Brno, tel.: +420-5-4118 2323, fax: +420-5-4118 2888, e-mail: jaroslav.kalous@vabo.cz

parametrů motoru na jeho otáčkách pro různé konstantní dávky paliva při jednom vstřiku palivového čerpadla [2]. V Tabulce 1 jsou pro ilustraci uvedeny výsledky termodynamických výpočtů při dávce 22 mg/vstřik.

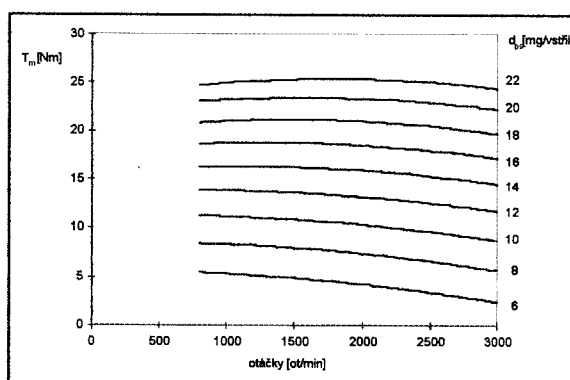
Tabulka 1. Termodynamické veličiny při dávce 22 mg/vstřik

Dávka 22 mg			1500	1800	2000	2300	2600	3000
Indikovaný výkon	Pi	kW	4,6	5,7	6,3	7,4	8,4	9,7
Užitečný výkon	Pe	kW	4	4,8	5,3	6,1	6,8	7,7
Indik. točivý moment	Mi	Nm	29,5	30	30,3	30,5	30,7	30,8
Točivý moment	Mt	Nm	25,3	25,4	25,4	25,2	24,9	24,4
Odvedené teplo	Qo	kW	3,7	4,2	4,6	5,1	5,6	6,2
Měrná indik. spotř. paliva	mpi	g/kW.h	213,9	209,9	208,1	206,4	205,2	204,7
Měrná už. spotř. paliva	mpe	g/kW.h	248,9	247,7	248	249,8	252,7	258,4
Indikovaná účinnost	ETAi	-	0,396	0,404	0,407	0,411	0,413	0,414
Mechanická účinnost	ETAm	-	0,859	0,848	0,839	0,826	0,812	0,792
Objemová účinnost	ETAv	-	0,837	0,845	0,849	0,853	0,856	0,858
Souč. přebytku vzduchu	LAM	-	1,63	1,646	1,654	1,662	1,668	1,671
Tvrdost chodu	GAM	10 ⁵ Pa/st.KH	4,249	4,295	4,319	4,345	4,365	4,377
Maximální tlak	pmax	10 ⁵ Pa	75,098	75,914	76,336	76,791	77,16	77,443
Maximální teplota	Tmax	K	1957,1	1960,9	1963,2	1966,8	1969,7	1974,4
Teplota výf. plynů	Tyf	K	753,9	766,4	773,9	784,8	794,8	808,5
Hmot. tok plynů do motoru	mm	kg/s	0,006	0,007	0,008	0,01	0,011	0,013

Pro tvorbu modelu motoru jsou nejdůležitější sít' statických výkonových charakteristik (obr. 1) a sít' statických momentových charakteristik (obr. 2). Parametrem obou těchto sítí je skutečná dávka paliva při jednom vstřiku.



Obr. 1. Statické výkonové charakteristiky

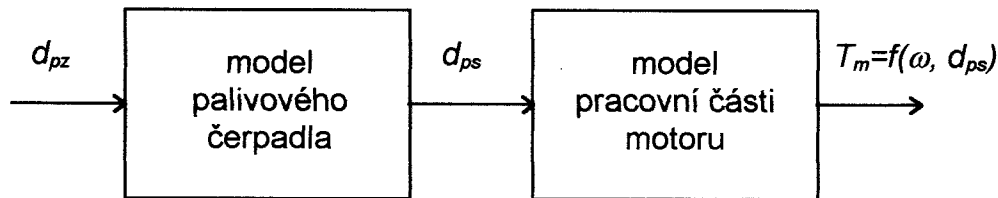


Obr. 2. Statické momentové charakteristiky

3. Simulační model

Simulační model vznětového motoru je určen jednak ke zjištění statických a dynamických vlastností samotného motoru a jednak, ve spojení se simulačním modelem elektrického generátoru, k analýze vlastností soustrojí „hnací motor - generátor“. Z tohoto hlediska je třeba jej koncipovat na základě následujících požadavků:

- 1) vstupní veličinou je žádaná dávka paliva d_{pz} , již je možné motor řídit,
- 2) výstupní veličinou je točivý moment T_m , respektující statickou momentovou charakteristiku,
- 3) model musí zahrnovat i mechanické setrvačné vlastnosti motoru, charakterizované obvykle hmotným momentem setrvačnosti hlavních rotujících částí motoru J_m ,
- 4) do modelu není třeba zahrnout rozběh a zastavení motoru, protože se předpokládá jeho využití k simulacím v omezeném rozsahu otáček $\langle n_{min}, n_{max} \rangle$.



Obr. 3. Celkové blokové schéma modelu vznětového motoru

Z těchto požadavků vyplývá celkové blokové schéma modelu na obr. 3.

Palivové čerpadlo je modelováno sériovým spojením aperiodického členu 1. řádu a oboustranného omezovače dávky paliva. Modelující rovnice mají následující tvar:

$$\tau_{pc} \frac{dd_{ps}}{dt} + d_p = d_{pz}, \quad (1)$$

$$d_{ps} = \begin{cases} d_{pmin} & \text{pro } d_p \leq d_{pmin}, \\ d_p & \text{pro } d_{pmin} < d_p < d_{pmax}, \\ d_{pmax} & \text{pro } d_{pmax} \leq d_p, \end{cases} \quad (2)$$

kde d_{ps} je skutečná dávka paliva,

d_{min} , d_{max} je minimální, resp. maximální dávka paliva,

τ_{pc} je časová konstanta palivového čerpadla, vyjadřující jeho setrvačnost.

Model pracovní části motoru zahrnuje:

- 1) zdroj točivého momentu a
- 2) rotor motoru.

Zdroj točivého momentu motoru musí respektovat skutečnost, že moment T_m závisí jednak na skutečné dávce paliva d_{ps} a jednak na úhlové rychlosti ω , resp. na otáčkách n motoru. Na základě analýzy sítě statických momentových charakteristik na obr. 2 se ukázalo, že je lze s dostatečnou přesností aproximovat polynomem 2. stupně s proměnnými koeficienty ve tvaru

$$T_m = a_2(d_{ps})\omega^2 + a_1(d_{ps})\omega + a_0\omega. \quad (3)$$

Číselné hodnoty koeficientů pro jednotlivé dávky paliva jsou pro zvolený příklad modelovaného vznětového motoru uvedeny v Tabulce 2, v níž je symbolem R označen tzv. činitel spolehlivosti aproximace (dle MS EXCEL).

Z Tabulky 2 je zřejmé, že zatímco koeficient a_2 je záporný, jsou koeficienty a_1 a a_0 kladné, přičemž se všechny zvětšují s rostoucí dávkou paliva d_{ps} . Podrobnou analýzou bylo zjištěno, že závislosti těchto koeficientů na skutečné dávce paliva d_{ps} mohou být aproximovány polynomem 3. stupně s konstantními koeficienty ve tvaru

$$a_i(d_{ps}) = b_{3i}d_{ps}^3 + b_{2i}d_{ps}^2 + b_{1i}d_{ps} + b_{0i}. \quad (4)$$

Číselné hodnoty koeficientů b_{ij} jsou uvedeny v Tabulce 3 spolu s činitelem spolehlivosti aproximace R. I když je jeho velikost nižší ve srovnání s údaji v Tabulce 2, lze použitou aproximaci (4) považovat pro dané účely za vyhovující.

Tabulka 2. Koeficienty aproximačních polynomu momentových charakteristik

	$y=a_2*x*x+a_1*x+a_0$			
Dávka paliva [mg]	a2	a1	a0	R
6	-3,310E-05	1,556E-04	5,612E+00	9,994E-01
8	-3,546E-05	2,099E-03	8,446E+00	9,996E-01
10	-3,444E-05	2,826E-03	1,120E+01	9,997E-01
12	-3,871E-05	6,051E-03	1,362E+01	9,994E-01
14	-4,644E-05	1,072E-02	1,569E+01	9,964E-01
16	-4,933E-05	1,355E-02	1,780E+01	9,988E-01
18	-5,861E-05	1,837E-02	1,969E+01	9,963E-01
20	-5,597E-05	1,872E-02	2,185E+01	9,996E-01
22	-6,422E-05	2,427E-02	2,309E+01	9,941E-01

Tabulka 3. Koeficienty aproximačních polynomů b_i

	b3	b2	b1	b0	R
a2	1,238E-08	-5,728E-07	6,133E-06	-5,241E-05	9,648E-01
a1	-5,083E-06	2,439E-04	-2,060E-03	4,920E-03	9,873E-01
a0	3,024E-04	-3,417E-02	1,859E+00	-4,359E+00	9,995E-01

Rotor motoru, zatížený elektromagnetickým momentem hnaného generátoru je modelován známou pohybovou rovnicí

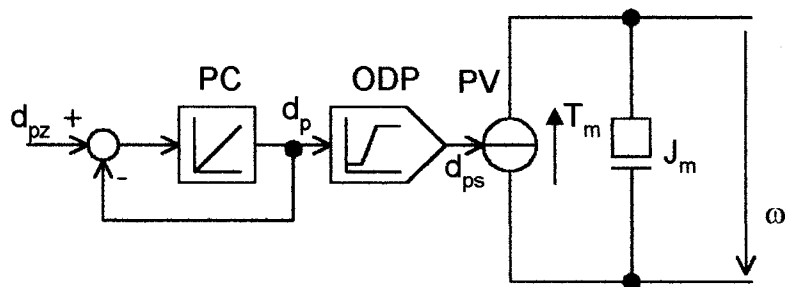
$$J_m \frac{d\omega}{dt} = T_m(\omega, d_{ps}) - T_g, \quad (5)$$

kde J_m je celkový hmotný moment setrvačnosti rotoru motoru,

$T_m(\omega, d_{ps})$ je moment motoru dle (3) a

T_g je elektromagnetický moment elektrického generátoru.

Na obr. 4 je nakresleno úplné schéma modelu vznětového motoru, jež bylo vzato spolu s výrazy (1) až (5) za základ formulace v příslušném simulačním jazyce.



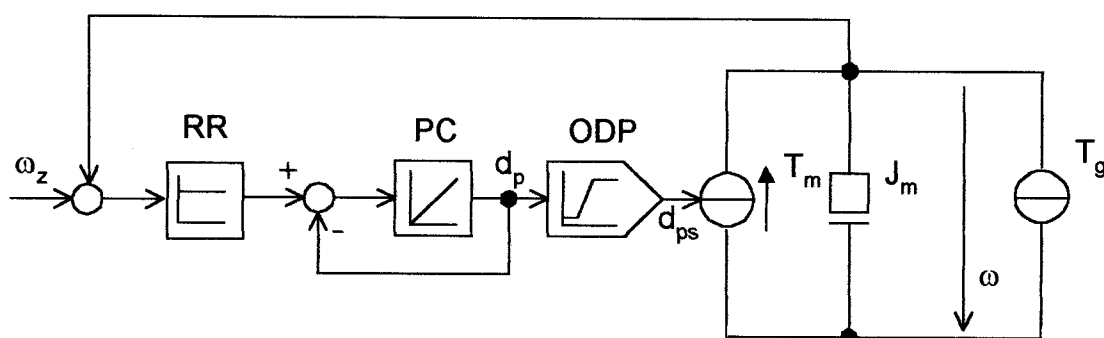
Obr. 4. Úplné schéma modelu vznětového motoru

PC - palivové čerpadlo, ODP - omezovač dávky paliva, PV - pracovní válec, d_{pz} - žádaná dávka paliva, d_{ps} - skutečná dávka paliva, J_m - hmotný moment setrvačnosti rotoru, ω - úhlová rychlost hřídele motoru

4. Simulační výpočty

Výše popsany model vznětového motoru byl použit k simulaci dynamické odezvy soustrojí „vznětový motor - asynchronní generátor“ na různé druhy zatížení při regulaci motoru na konstantní otáčky, což je typický pracovní režim současných elektrocentrál.

Na obr. 5 je nakresleno simulační schéma regulace motoru na konstantní úhlovou rychlost výstupního hřídele, které vychází z modelu vznětového motoru na obr. 4. Na vstup simulačního modelu byl zařazen proporcionální regulátor rychlosti RR, vstupní veličinou je



Obr. 5. Simulační schéma regulace motoru na konstantní rychlost

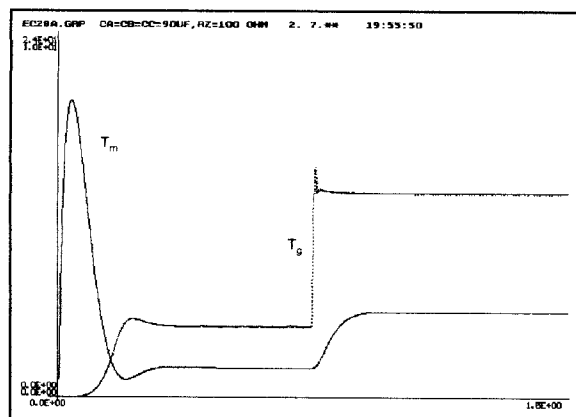
RR - regulátor rychlosti, M_z - zatěžovací moment, ω_z , ω - žádaná a skutečná úhlová rychlost hřídele motoru

žádaná úhlová rychlost ω_z . Asynchronní generátor je v tomto schématu představován zatěžovacím momentem T_g . Z návrhu regulátoru v [2] vyplynulo, že při zesílení regulátoru rychlosti $K_R \leq 2,4$ se bude motor chovat jako aperiodický člen 2. řádu, při $K_R > 2,4$ bude motor představovat kmitavý dynamický člen. Pro účely simulací bylo zvoleno zesílení regulátoru $K_R = 2,4$.

Byly simulovány následující případy zatěžování soustrojí [3]:

- 1) chod naprázdno,
- 2) trojfázová odporová symetrická zátěž,
- 3) trojfázová odporová nesymetrická zátěž,
- 4) nelineární trojfázová zátěž a
- 5) jednofázový krátkodobý zkrat.

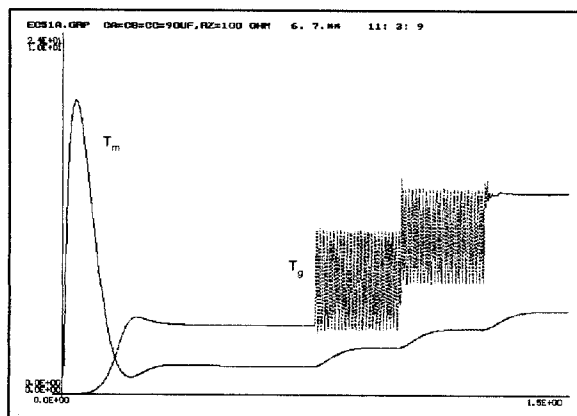
Na počátku každého simulačního experimentu byla rychlost soustrojí nastavena na hodnotu 2960 ot.min^{-1} a žádaná rychlost na hodnotu 3050 ot.min^{-1} , čímž bylo zabezpečeno, že generovaná napětí budou mít kmitočet 50 Hz. Díky těmto počátečním podmínkám vždy nejdříve proběhl přechodný děj, během něž se rychlost soustrojí zvětšila na žádanou velikost a asynchronní generátor se samovolně vybudil tak, že se jeho výstupní napětí ustálilo na předpokládané velikosti. Během tohoto přechodného děje se moment motoru nejdříve prudce zvyšoval až na hodnotu 20 Nm a poté klesal na ustálenou velikost cca 2 Nm, odpovídající chodu celého soustrojí naprázdno. Toto relativně velké zatížení motoru při chodu naprázdno (cca 640 W) je způsobeno průchodem poměrně velkých proudů vinutím generátoru, které zabezpečují jeho udržování ve vybuzeném stavu.



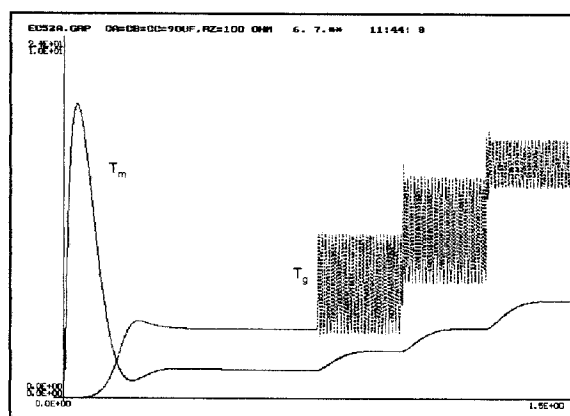
Obr. 6. Odezva na připojení trojfázové symetrické odporové zátěže.

Na obr. 6 je uvedena odezva hnacího momentu motoru T_m na připojení trojfázové symetrické odporové zátěže, představované například trojfázovým topným tělesem. Je zřejmé, že moment generátoru T_g se prakticky skokem zvýší na novou velikost, na což reaguje hnací motor aperiodickým zvětšením svého hnacího momentu T_m v souladu s dynamickými vlastnostmi rychlostně závislé zpětnovazební smyčky. Doba trvání přechodného děje je relativně krátká. Rychlost celého soustrojí se poněkud snížila díky skutečnosti, že zesílení regulátoru bylo zvoleno tak, aby se celé soustrojí během přechodných dějů nerozkmitalo.

Na obr. 7 je uvedena odezva momentu T_m na postupné připojování stejných odporových zátěží (např. jednofázová topná tělesa o stejném výkonu) a na obr. 8 odezva momentu T_m na postupné připojování nesterýných odporových zátěží (např. osvětlovací okruhy o nesterýném výkonu) k jednotlivým fázím generátoru.



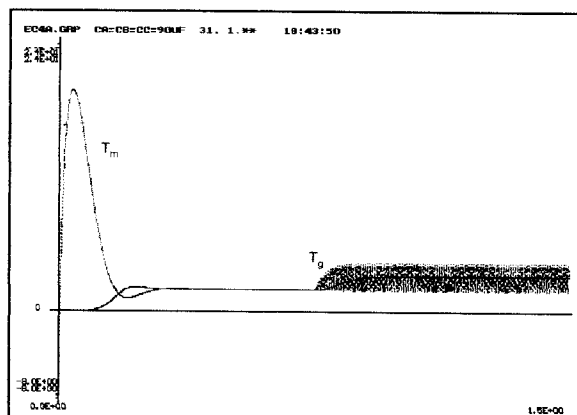
Obr. 7. Odezva na postupné připojování odporových zátěží stejného výkonu



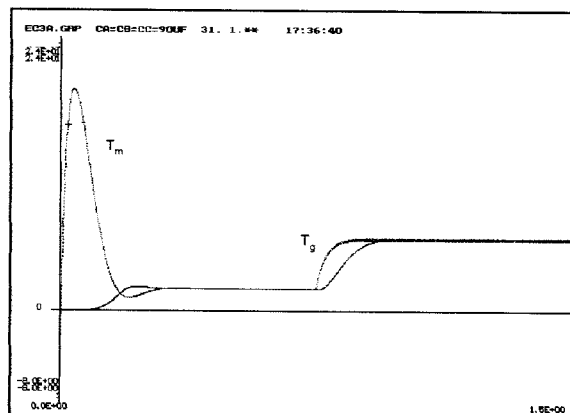
Obr. 8. Odezva na postupné připojování odporových zátěží různého výkonu.

Z těchto obrázků je patrné, že v časovém intervalu, kdy je asynchronní generátor zatěžován nesymetricky, má jeho elektromagnetický moment T_g , působící ve vzduchové mezeře mezi jeho státorem a rotorem, má výrazně kmitavý charakter. Přitom frekvence těchto kmitů je rovna dvojnásobku frekvence generovaného napětí, tedy v našem případě 100 Hz. Díky hmotnému momentu setrvačnosti rotoru generátoru se však tyto kmity bezprostředně neprojeví v odezvách samotného hnacího motoru.

Dalším z provedených simulačních experimentů bylo připojení dvou základních typů trojfázového usměrňovače k asynchronnímu generátoru. Přitom oba usměrňovače byly zatíženy naprosto stejnou odporově induktivní stejnosměrnou zátěží (např. stejnosměrný motor). Na obr. 9 je uvedena odezva momentu T_m na připojení trojpulsního usměrňovače a na obr. 10 odezva téhož momentu na připojení šestipulsního usměrňovače. Díky použité zátěži obou usměrňovačů se elektromagnetický moment generátoru nezmění po připojení usměrňovače skokem, ale mění se postupně. Přitom v případě trojpulsního usměrňovače výrazně kmitá s trojnásobkem frekvence generovaného napětí, zatímco v případě šestipulsního usměrňovače je toto kmitání prakticky zanedbatelné.

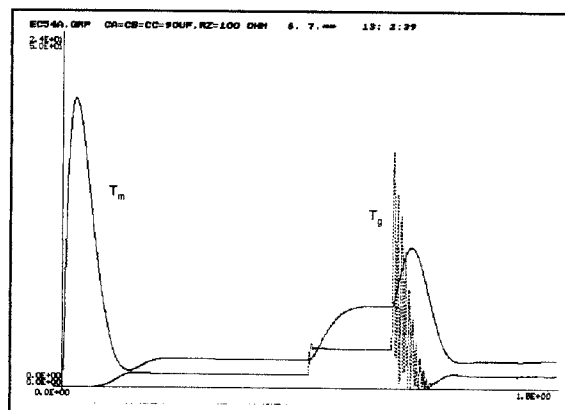


Obr. 9. Odezva na připojení trojpulsního usměrňovače



Obr. 10. Odezva na připojení šestipulsního usměrňovače

Posledním z provedených simulačních experimentů byla odezva soustrojí na



Obr. 11. Odezva na jednofázový zkrat

jednofázový krátkodobý zkrat mezi jednou fázovou svorkou generátoru a tzv. nulovou svorkou. Z obr. 11 je patrné, že elektromagnetický moment generátoru díky takovému zkratu prudce vzroste na mnohonásobek původní velikosti (v uvažovaném případě na cca 35 Nm) a poté kmitavě klesá k nule díky tomu, že se asynchronní generátor postupně odbuzuje. Pokud by takový zkrat trval příliš dlouho, generátor by se úplně odbudil a nebyl by tedy schopen se po odstranění zkratu znovu vybudit. Vznětový motor reaguje na takový zkrat krátkodobým zvětšením hnacího momentu T_m a následným zmenšením na velikost, odpovídající ustálené velikosti elektromagnetického momentu generátoru.

5. Závěr

Jednoduchý simulační model vznětového motoru, sestavený na základě katalogových údajů a vypočítaných sítí statických výkonových a zejména momentových charakteristik je určen k využití při simulacích zdrojové části elektrocentrál. Jeho skladba vychází z požadavku na jednoduchost modelu s tím, aby co nejlépe vystihoval vlastnosti motoru při běžném chodu.

Odkazy

- [1] Dolejší, B.: Zdokonalená metoda výpočtu charakteristik leteckých pístových motorů. Habilitační práce. Brno: Vojenská akademie 1996;
- [2] Kalous, J. - Dolejší, B.: Simulační model vznětového motoru pro elektrocentrály. Výzkumná zpráva čís. 0917-1-2000. Vojenská akademie v Brně, září 2000.
- [3] Kalous, J.: Simulační analýzy chodu indukčního generátoru při zatížení. Výzkumná zpráva čís. 0917-2-2000. Vojenská akademie v Brně, říjen 2000.

Tato práce byla vytvořena v rámci grantového projektu reg. č. 102/00/0917 GAČR s názvem „Výzkum mobilních zdrojů elektrické energie (elektrocentrály) 3. generace“.