

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

**Model soustrojí spalovací motor-asynchronní generátor
pro statické modelování chodu v SW Dynast**

Software pro počítačovou simulaci
PROTOTYP

Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Anotace

Práce popisuje počítačový model pro simulaci v prostředí DYNAST chod asynchronního generátoru se spalovacím motorem, libovolný počet válců. Tento model umožňuje zkoumat poměry při nerovnoměrném chodu spalovacího motoru, resp. chování generátoru při kývavém momentu na hřídeli spalovacího motoru.

Tento materiál obsahuje výsledky výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektu č. MSM0021630516.

Anotation

Computer simulation model of asynchronous generator with combustion engine. This model enables simulate working of generator with variable force of torque on a combustion engine shaft.

This material contains the results of research works funded from project No. SM0021630516 of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic.

Obsah

Úvod.....	4
Spalovací motor.....	4
Klikový mechanismus.....	6
Závěr.....	11
Reference.....	12
Příloha A	13

Úvod

Kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory se v současné době objevují stále častěji jako malé zdroje elektrické energie pracující do distribuční sítě nízkého napětí a nebo jako autonomní zdroje v ostrovním provozu. Pro menší jednotky se používají asynchronní generátory, které jsou konstrukčně jednodušší a levnější. I když principiálně výroba elektrické energie v asynchronním stroji není ničím neobvyklým, z elektrárenského hlediska zde existují určité negativní vlastnosti, které zhoršují kvalitu výroby elektrické energie a mohou být i zdrojem potenciálního rušení. Mezi negativní vlastnosti patří zejména:

- buzení rotoru stroje probíhá pouze přes stator a je závislé na otáčkách stroje
- generátor pracuje se skluzem otáček, u generátoru se rotor se točí rychleji než magnetické pole stroje
- stroj není schopen dodat pouze činnou složku výkonu, vždy spotřebovává jalový výkon.

Na druhé straně stojí pozitiva pro asynchronní stroje – především jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost, nízká cena, připojení k síti bez nutnosti fázování, u malých jednotek je lze využít i jako startér spalovacího motoru. Kromě toho lze přičíst pozitiva malých kogeneračních jednotek, které představují velice rychlý zdroj energie a mohly by být použity pro terciální regulaci v případě vytvoření clusteru, což je seskupení více jednotek do jednoho logického bloku, který nemusí být nutně lokalizován v jediném bodě připojení.

Pokud se bude kogeneračních jednotek v budoucnu nasazovat větší množství, a jejich rozvoj tomu nasvědčuje, je vhodné předem simulací posoudit jejich chování. Soustrojí se spalovacím motorem má jedno zapomínané specifikum – pístový spalovací motor nedodává časově konstantní moment, což vede až k proměnným poměrům v generátoru. Pístový motor převádí posuvný pohyb na rotační pomocí klikového mechanismu a činnost motoru probíhá v přesně daných taktech, z nichž pracovní je pouze jeden ze čtyř. Větší rovnoměrnost zajišťují motory s vyšším počtem válců. V současné době se u malých jednotek používají na druhou stranu i motory tříválcové, kde už může být nerovnoměrnost značná, neboť existuje minimálně 60 úhlových stupňů chodu bez dodávaného momentu, který musí být hrazen ze setrvačnicku.

V článku je pozornost soustředěna na dvě části: simulaci chodu spalovacího motoru v ustáleném stavu a simulaci chování generátoru připojeného k takovému spalovacímu motoru.

Popíšme si jednotlivé části systému:

Spalovací motor

je pístový tepelný stroj, kde mechanická práce vzniká transformací tepelné energie na energii expandujícího plynu, který svým vysokým tlakem posouvá volně uložený píst ve válci. Posuvný pohyb je měněn pomocí klikového mechanismu na rotační. Přesun plynu do a z pracovního prostoru zajišťuje ventilový systém ovládaný přes rozvody vačkového hřídele. Ohřev plynu je proveden spalováním hořlavé směsi, u kogenerace především zemním plynem se vzduchem. Chování motoru tedy ovlivňuje hned několik faktorů:

- bohatost hořlavé směsi tj., poměr vzduchu a zemního plynu
- teplota směsi na vstupu
- okamžik zapálení směsi a rychlost hoření směsi v motoru

- nastavení ventilového systému
- stav opotřebení motoru
- odvod tepla z pracovního prostoru válce
- zatížení a otáčky stroje
- další faktory výše nezahrnuté

Motor pracuje ve čtyřech taktech, přičemž energeticky zdrojový je pouze jeden. Ostatní takty energii spotřebovávají a ta se musí dodat buď z jiných válců a nebo ze setrvačné hmoty rotačních částí. To samo o sobě znamená, že energie je dodávána nerovnoměrně a rovnoměrnost se zlepšuje prostřednictvím momentu setrvačnosti setrvačnicku. To však znamená zvýšení hmotnosti celého motoru. V automobilu, pro který je spalovací motor primárně určen, se setrvačná síla podstatně zvyšuje přídatnou hmotou pohybujícího se automobilu. Ta je natolik velká, že vliv nerovnoměrnosti chodu motoru je prakticky zanedbatelný.

U soustrojí kogenerační jednotky je však rotační hmota podstatně menší a nerovnoměrnost chodu se již projevit může a lze ji naměřit na svorkách generátoru jako proměnný výkon, který jednotka dodává. V této chvíli je třeba upozornit, že se jedná o výkon okamžitý nikoliv střední, který je průměrnou hodnotou tohoto okamžitého výkonu.

Na následujícím obrázku je analýza naměřených hodnot z jednotky 22kW.

Vliv se navíc zvyšuje v případě, že motor nepracuje rovnoměrně, tj. jednotlivé válce dodávají různý výkon a to např. vlivem chybného seřízení ventilové vůle (ta má vliv na časování ventilů), nerovnoměrné opotřebení vačkového hřídele, nerovnoměrné zapalování vlivem chybné funkčnosti rozdělovače. Jisté nerovnoměrnosti motor dosahuje i vlivem jiných hydraulických odporů v sacím a výfukovém potrubí, kdy krajní válce jsou více vzdáleny a potrubí k nim vede nepřímochaře než válce prostřední. Vliv těchto nerovnoměrností je možné odsimulovat na počítači. K tomu je třeba mít k dispozici vhodný matematický model pístového stroje a simulační program, který s tímto modelem bude umět provést simulační výpočet. Jelikož se jedná o dynamický systém, lze jej popsat obecnou stavovou rovnicí

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = g(x, u)$$

kde x je stavová proměnná, y je výstupní proměnná a u je proměnná vstupní. Obecně proměnné mohou být vektory hodnot, tj. více stavových veličin, více vstupů i výstupů. Pokud bychom chtěli modelovat obecný systém, kde se jeho parametry v čase mění, můžeme přidat proměnnou čas, která popisuje systémy t -variantní

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

$$y = g(x, u, t)$$

s počátečními podmínkami vektoru stavu $x(0) = x_0$

Celý systém lze rozdělit na dílčí podsystémy a sdílet mezi sebou vstupní a výstupní veličiny, tj. jedna výstupní veličina může být vstupní veličinou jiného systému.

V našem případě bychom mohli motor rozložit na jednotlivé válce, válec rozložit na část mechanickou a část tepelnou. U mechanické části můžeme sledovat jak pohyb vlastního pístu

a klikové hřídele a ojnice, tak pohyb jednotlivých ventilů, které zajišťují přesun pracovní náplně skrz motor.

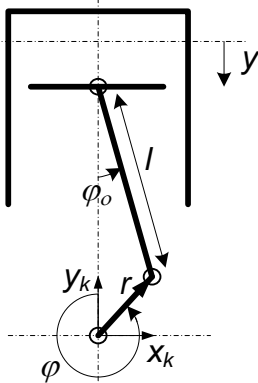
U tepelného schématu můžeme sledovat výměnu tepla mezi příchozí směsí a stěnami motoru, kompresi plynu, vznik tepla při hoření směsi, expanzi plynu, předávání tepla zpět stěnám motoru a pístu. Už z tohoto výčtu je zřejmé, že celý systém je poměrně komplikovaný a je nutné zavést řadu zjednodušujících předpokladů.

V první řadě je vhodné motor z mechanického hlediska považovat za soustavu hmotných bodů, tj. nebude nás zajímat rozložení hmotnosti v prostoru a silové působení v jednotlivých částech hmoty, ale pouze působení sil v těžištích jednotlivých součástí.

Z termodynamického hlediska budeme pracovat s ideálním plynem a jeho stavovou rovnicí a nebudeme řešit rozložení teplot v objemu stroje. Činnost ventilů lze opět zjednodušit na pouhé otevření a zavření ve vhodný okamžik bez uvažování hydraulických odporů, resp. s konstantními hydraulickými odpory potrubí a ventilů.

Klikový mechanismus

Schématicky je uveden klikový mechanismus na následujícím obrázku. charakteristickými veličinami jsou délka ojnice l , poloměr klikové hřídele r , úhel natočení klikové hřídele φ a poloha pístu y



Pro klikový mechanismus můžeme napsat soustavu rovnic.

$$y_k = r \cos \varphi$$

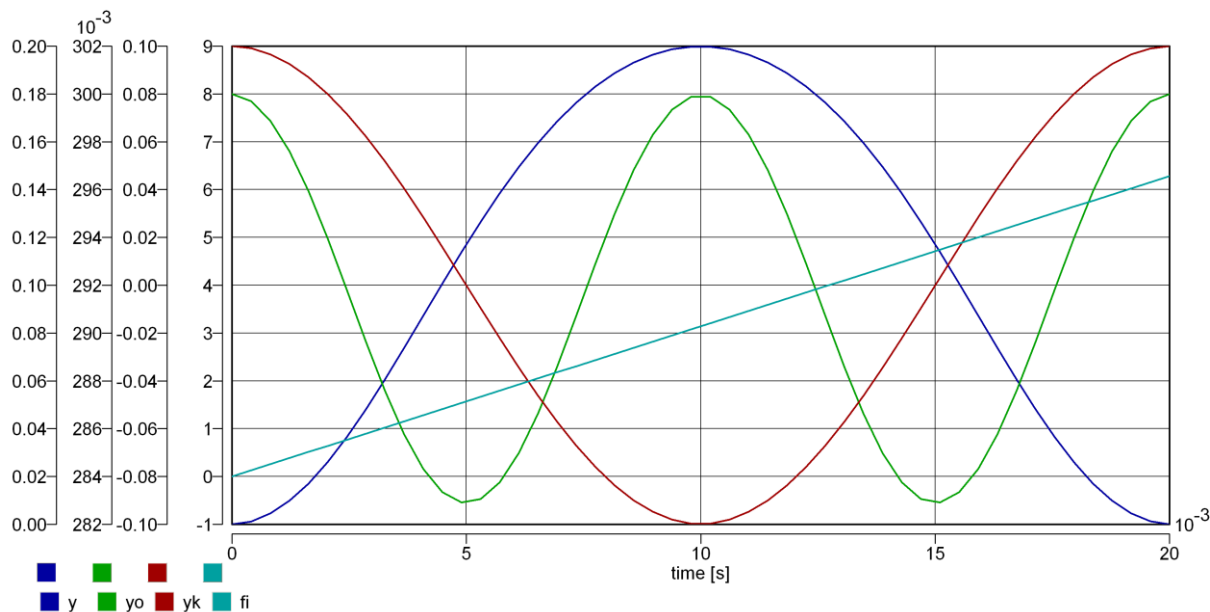
$$x_k = r \sin \varphi$$

$$y_o^2 = l^2 - x_k^2$$

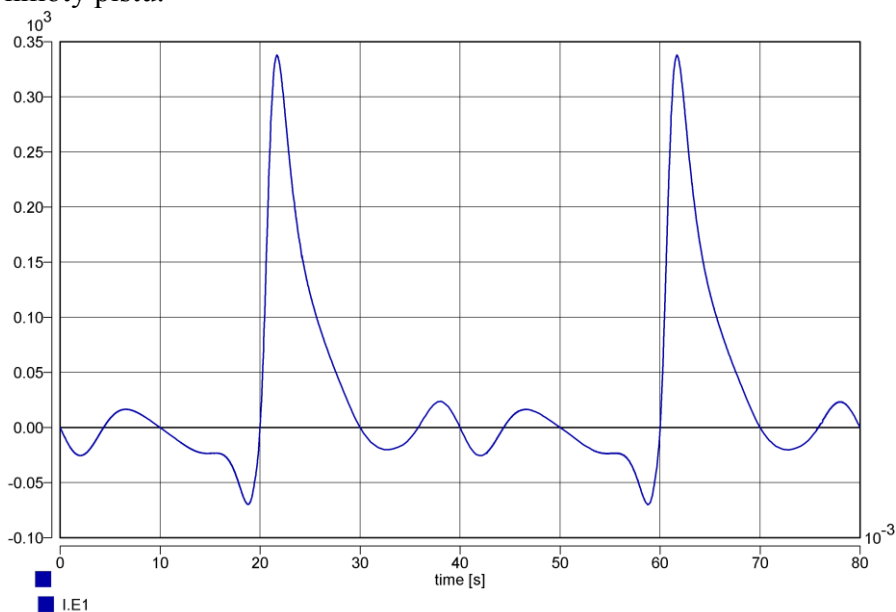
$$y = r + l - y_o - y_k$$

Pro simulaci lze využít simulační program DYNAST, který nabízí široké možnosti definice problémové úlohy.

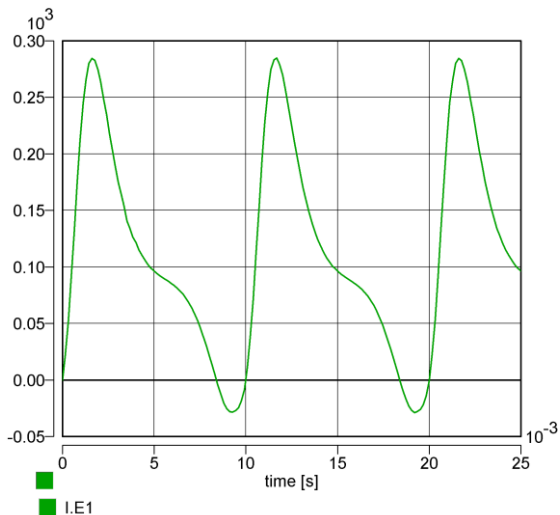
Výsledek simulace je zobrazen na následujícím obrázku pro rychlost otáčení 3000 min^{-1} .



Aby se mechanismus samovolně pohyboval, musíme zavést zdroj síly působící na hmotné body. Na píst působí síla tlaku expandujícího plynu a proti pohybu působí setrvačná síla akcelerujícího pístu. Termodynamické procesy jsou poměrně složité a není cílem tohoto článku zde podrobně tyto jevy rozebírat. Pro simulaci mechanických vlastností postačí použít vzorek indikovaného tlaku ve válci a spočítat jednoduchou simulaci s uvažováním setrvačné hmoty pístu.



Při spojení čtyřválcového soustrojí získáme moment rovnající se součtu momentů jednotlivých válců posunutých o fázový úhel 180 stupňů.

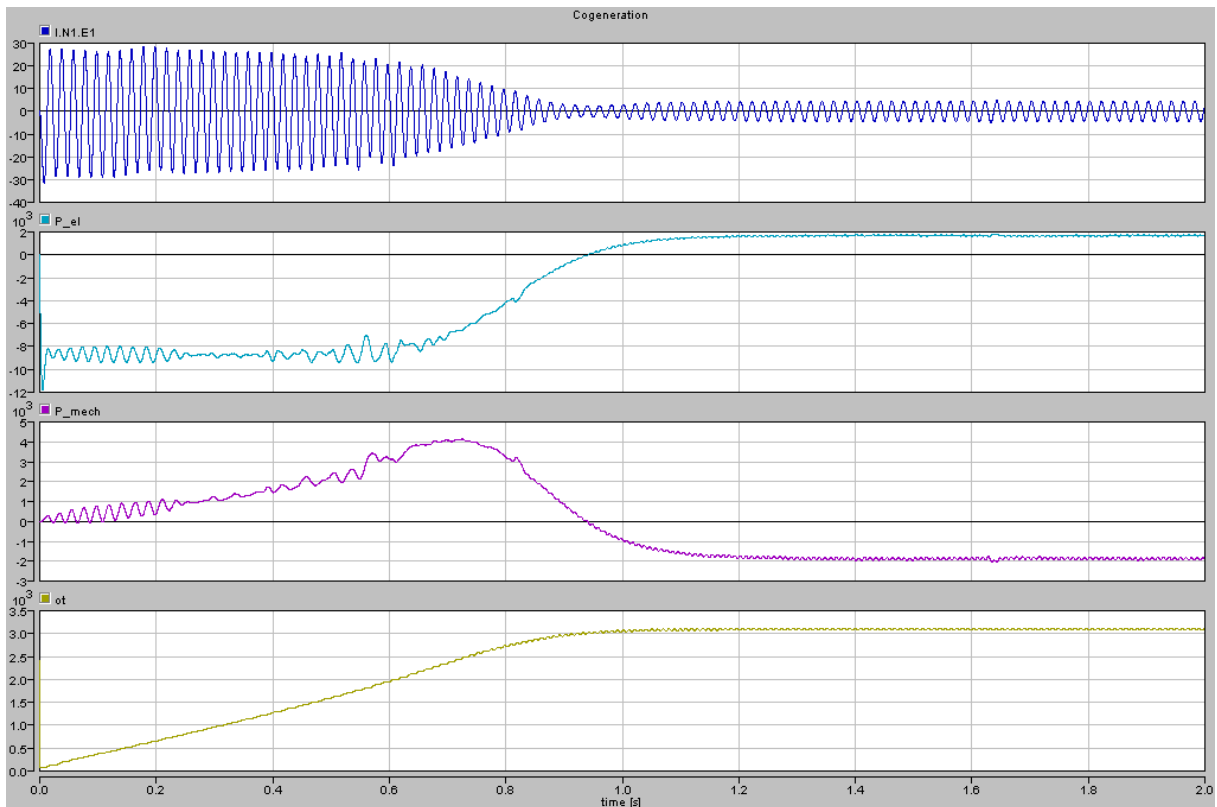


Tento moment je dále vyhlazen přidavným působením setrvačných hmot rotačních částí a závisí na momentu setrvačnosti jak generátoru, tak vlastního motoru, ale také na otáčkách stroje. V simulaci byly použity testovací hodnoty blížíící se skutečným parametrům kogeneračních jednotek o výkonu 22 kW.

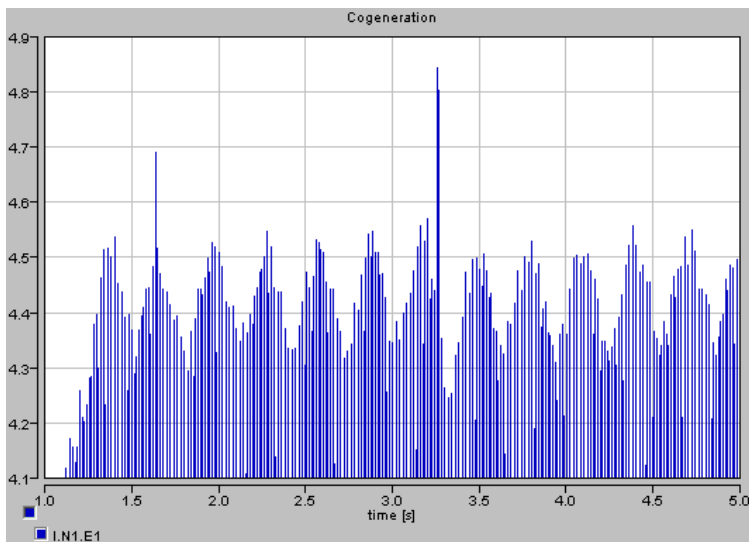
Zdroj momentu spalovacího motoru může pohánět asynchronní generátor, jehož model je dostupný v simulačním programu DYNAST. Stačí upravit parametry generátoru v souladu se skutečností.

Generátor připojíme na idealizovaný zdroj napětí, který bude tvořen ideálními zdroji napětí pouze s činným výstupním odporem. V praxi by bylo možné samozřejmě simulaci provádět s komplikovanějšími konfiguracemi, zde to není vhodné, neboť chceme demonstrovat vliv nerovnoměrného momentu na výsledné elektrické veličiny na generátoru.

Na následujícím obrázku je výsledek simulace přechodu jednotky z motorického do generátorického provozu, jednotlivé grafy představují průběhy okamžitých hodnot proudu, elektrického výkonu (třífázového), mechanického výkonu na hřídeli generátoru, a okamžitých otáček generátoru.



Z obrázku je patrné, že kolísání momentu se přenáší na všechny systémové veličiny a dochází k rušení i v elektrické síti. Patrné je zejména kolísání amplitudy proudu. Na následujícím obrázku je výřez v trvání asi 4 sekund v oblasti vrcholových hodnot proudu. Patrná je modulace nižší harmonickou složkou rozdílového kmitočtu otáček generátoru a frekvence sítě s deformací vlivem neharmonického působení silového momentu.

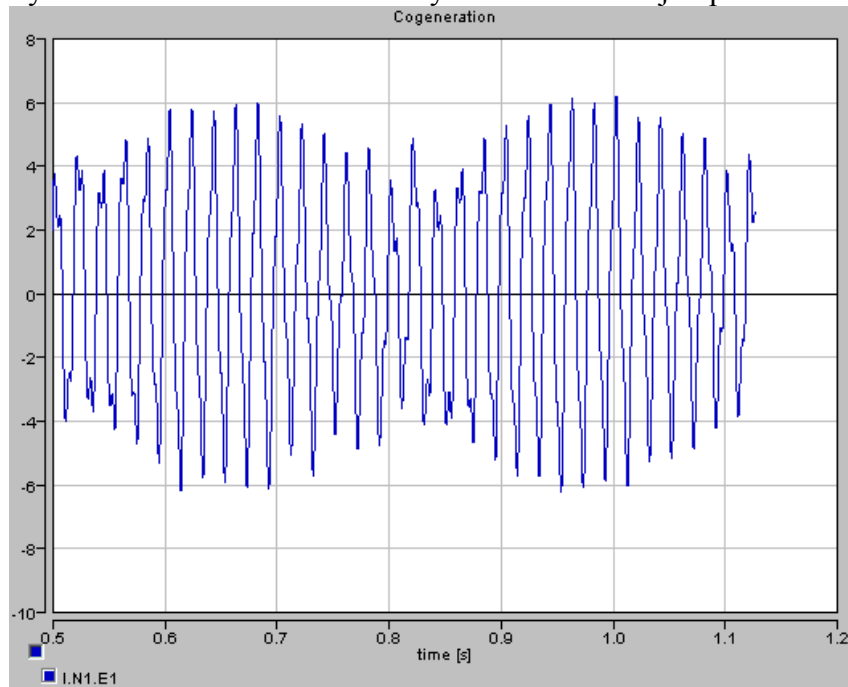


Zajímavé jsou zejména proudové špičky způsobené interferencí rozdílových kmitočtových složek. Minimální a maximální hodnota proudu se liší až o 15%. Toto kolísání proudu vytváří i kolísání úbytku napětí na přívodních vodičích a tím i kolísání napětí v místě připojení jednotky. Kolísání napětí bude tím větší, čím měkčí síť je, tj. čím větší je její podélná impedance. Velikost kolísání lze kvantifikovat flickerem.

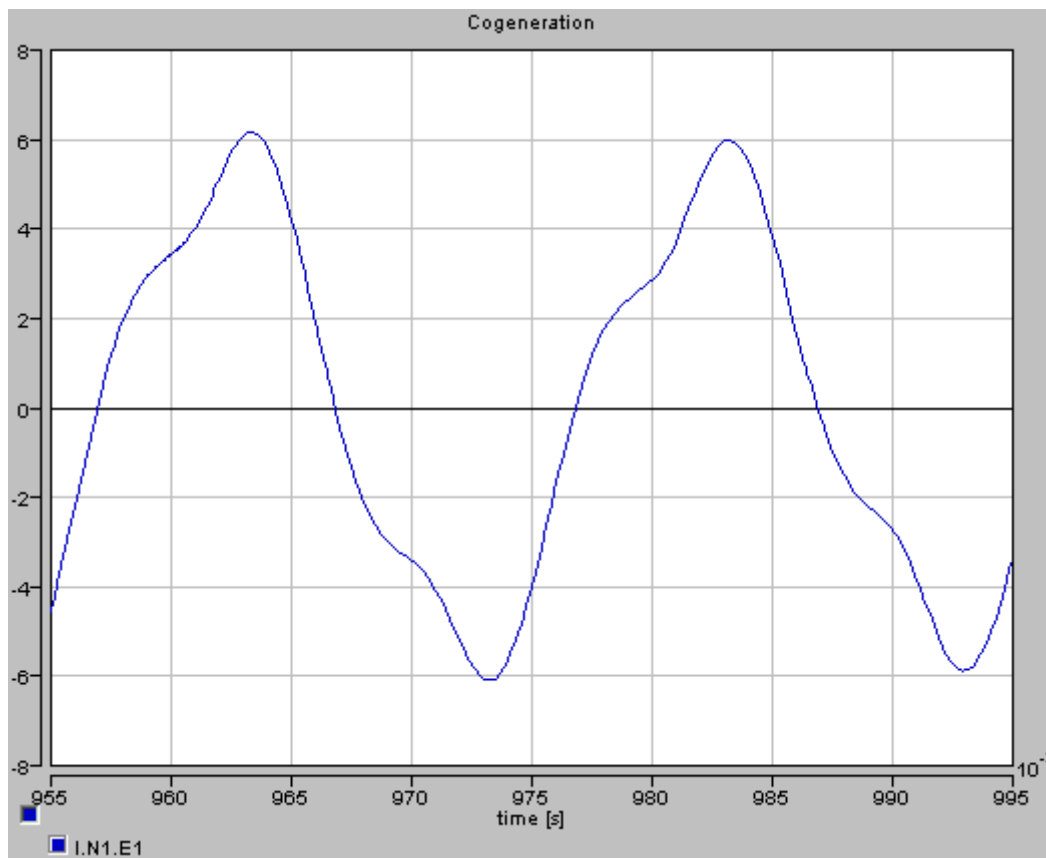
Připojení více jednotek do jednoho bodu nebo i více bodů připojených přes společné vedení, může způsobovat další interference s ještě nižšími kmitočty. Např. pokud jedna jednotka bude pracovat na jmenovitých otáčkách 3070 min⁻¹ a druhá jednotka na otáčkách 3060 min⁻¹, pak rozdílové otáčky 10 min⁻¹ se projeví vznikem subharmonické složky o frekvenci 1/6 Hz = 0,1666 Hz, tj. s délkou periody 6 sekund.

Simulaci lze snadno ověřit vliv akumulčních prvků na rovnoměrnost dodávaného proudu. Mechanická akumulace v podobě rotující hmoty představuje významný filtrační prvek. Dalším prvkem může být pružná spojka akumulující energii prostřednictvím zkrutu (torze).

System s minimální akumulací by dodával následující proud



Projev kolísání je značný nehledě na deformace proudu v rámci jedné periody



Závěr

Počítačová simulace je dnes na poměrně pokročilé fázi vývoje. Nicméně tvorba počítačových modelů stále vyžaduje poměrně značné úsilí a dobré teoretické základy. Problematické jsou zejména multidisciplinární simulace, kde se spojuje více systémů do jednoho celku. Zde provedené simulace byly provedeny v simulačním programu DYNAST za podpory modelů v doméně elektrické a mechanické. Spalovací motor byl simulován pouze na základě znalostí průběhu indikovaného tlaku ve spalovacím prostoru v závislosti na úhlu natočení. Podrobnější termodynamické schéma motoru analyzováno nebylo, nicméně pro popis dynamických přechodových jevů by bylo užitečné model o tyto vlastnosti rozšířit. Simulace se pak ovšem stávají poměrně časově náročné a vyžadují výkonné počítače.

Zpřesňování modelů reálných systémů vede i k zpřesňování výsledků simulace. Dosud hojně používané simulace modelů v ustáleném stavu neposkytují potřebné informace týkající se zejména dynamických dějů. Znalost dynamiky systému je důležitá při hodnocení stability systému. Soustrojí s pístovými spalovacími motory až konstrukčně poměrně jednoduché, z hlediska zkoumání stability představuje systém poměrně komplikovaný. Provedené simulace prokázaly, že nerovnoměrnost chodu spalovacího motoru se přenáší až na úroveň napájecí sítě. Vznik subharmonických složek je podmíněn interferenčními ději rozdílných rychlostí motoru a elektrické sítě. Potenciální riziko vzniku flickeru zejména při připojení jednotky k měkké síti bylo simulací ověřeno a odpovídá i prováděným měřením.

Existence počítačových modelů má jednu zásadní výhodu a to, že lze provádět pokusné experimenty bez rizika vzniku škod. Nabízejí se možnosti simulace poruchy na jednom válci, nesymetrie sítě, rázové zkoušky v mechanické oblasti, např. při zkratu generátoru.

Praktických možností je samozřejmě více a bude jim věnován prostor v dalších publikacích.

Reference

- [1] Mann, H.: DYNAST multidisciplinary Web-based simulator, <http://virtual.cvut.cz>
- [2] Beroun, S., Blažek, J., Hájek, T., Salhab, Z.: Calculation programme TLAK-macro-1101.xls –. describition of the programme (in Czech)

Příloha A

Parametry motoru (generátoru) SIEMENS 1LG4 183 2AA

Jmenovitý výkon	22 kW
Jmenovité otáčky	2945 min ⁻¹
Účinnost	91,9 %
Cos φ	0,86 při 100% zatížení, 0,82 při 0,75% zatížení
Jmenovitý proud	40,5 A
Jmenovitý moment	71 Nm
Moment setrvačnosti	0,068 kg.m ⁻²