

APPLICABILITY OF THE PROGRAM SNAP ON MECHATRONIC DRIVE SYSTEM ANALYSES

Jaroslav Kalous*

Summary: *The paper deals with applicability of the program SNAP on simpler drive system analyses. That program should be utilized especially in education of mechatronic experts.*

1. Úvod

Běžné numerické simulační programy obvykle poskytují pouze kvantitativní výsledky analýz dynamických soustav ve tvaru grafů, popř. souborů vypočítaných hodnot, na základě nichž je potom možné tyto grafy strojově vygenerovat. Tyto výsledky má uživatel programu k dispozici bezprostředně po vytvoření, popř. zadání modelu soustavy a požadavků na analýzu a po jejím spuštění. Bohužel však takové programy negenerují jakékoliv mezivýsledky, které mohou odpovědět na otázky uživatele, proč vyšly právě takové výsledky, jaké program vypočítal.

Na rozdíl od těchto programů jsou programy pro symbolickou a semisymbolickou analýzu dynamických soustav většinou schopny poskytnout nejen číselné výsledky, ale též mezivýsledky ve tvaru obecných vztahů a vzorců, které značně napomáhají pochopit analyzovanou soustavu mnohem podrobněji. Takovým prostředkem je program SNAP (z angl. Symbolic Network Analysis Program čili program pro symbolickou analýzu obvodů), vyvinutý na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno v první polovině 90.let minulého století, je původně určen k symbolickým analýzám lineárních a linearizovaných elektrických a elektronických obvodů v prostředí MS Windows.

V tomto příspěvku je demonstrována možnost využití programu SNAP k analýzám jednodušších rotačních pohonových soustav na základě elektromechanických analogií.

2. Stručná charakteristika programu SNAP

Program SNAP prošel postupným vývojem s cílem jednak rozšířit jeho schopnosti potřebných analýz i mimo oblast symbolické analýzy a jednak jej přizpůsobit výukovým účelům jako nástroj pro samostatnou práci studentů. Z toho důvodu je vždy jeho poslední verze volně k dispozici ke stažení [2].

SNAP je založen na aplikaci symbolických algoritmů prof. Čajky [1], [4] a lze jej charakterizovat následujícími příznaky:

* Doc. Ing. Jaroslav Kalous, CSc., katedra elektrotechniky, Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno, e-mail: jaroslav.kalous@unob.cz

- analyzovaná dynamická soustava je zapsána ve tvaru textového souboru (tzv. netlist);
- modely jednotlivých prvků soustav jsou soustředěny v knihovně prvků, která je uložena mimo vlastní program SNAP. Zahrnuje popisy modelů prvků a jejich schématické značky. V současné době obsahuje pouze modely elektrických a elektronických prvků, lze ji však průběžně doplňovat, popř. vytvořit další knihovnu pro prvky fyzikálně odlišných či různorodých dynamických soustav;
- realizace symbolických i numerických analýz.

Program SNAP poskytuje následující analytické nástroje:

- *přenosové funkce* (symbolické výrazy s použitím obecných parametrů prvků, semisymbolické výrazy s použitím numerických hodnot parametrů prvků, numerické hodnoty zesílení, nulových bodů a pólů),
- *frekvenční charakteristiky* (diagramy Bode pro amplitudu i fázi, Nyquistův diagram, grafy frekvenčních závislostí reálné a imaginární části přenosové funkce),
- *časové charakteristiky* (přechodová a impulsní charakteristika v semisymbolickém tvaru),
- *citlivostní funkce* (závislosti přenosové funkce na změnách parametrů zvolených prvků a grafy jejich frekvenčních závislostí),
- *editor funkcí* (např. nalezení a vykreslení kořenových hodografů apod.).

Symbolické a numerické výsledky jsou uživateli okamžitě k dispozici po skončení výpočtů na monitoru počítače. Přitom numerické výsledky lze následně zpřístupnit pomocí grafů, které mohou být uloženy nebo kopírovány ve vektorovém tvaru. Navíc je možné krokováním zkoumat vliv změn zvolených parametrů na tvar jednotlivých závislostí (např. na tvar frekvenčních charakteristik).

Získané výsledky je možné ze SNAPu exportovat do oblíbených matematických programů Matlab, Maple a MathCAD k dalšímu zpracování. Přitom výsledky, exportované do programu Matlab, jsou uloženy jako tzv. m-soubory a lze s nimi pracovat jako se soubory, obsahujícími např. uživatelské funkce.

3. Elektromechanické analogie v pohonových soustavách

Aby bylo možné využít SNAP k analýzám mechanických dynamických soustav, je třeba použít elektromechanickou analogii, vycházející z formální podobnosti matematických vztahů mezi elektrickými veličinami a mezi vhodně zvolenými mechanickými veličinami. Pro případ mechatronických pohonových soustav je obvyklé zvolit následující dvojice analogických výkonových veličin (Tab. 1).

Každá mechatronická pohonová soustava je složena z různých součástí, jejichž jednotlivé fyzikální vlastnosti lze vyjádřit pomocí tzv. *ideálních prvků*, pro něž platí následující vazební rovnice mezi výkonovými a energetickými veličinami

$$i(t) = p u(t), \quad \int_0^t i(t) dt = p u(t) \quad \text{a} \quad \int_0^t u(t) dt = p i(t),$$

kde p fyzikální parametr prvku. Fyzikální parametry ideálních prvků pohonových soustav jsou soustředěny v Tab. 2.

Tab. 1. Dvojice výkonových veličin

	výkonové veličiny	
	i	u
elektrický obvod	proud [A]	napětí [V]
posuvný pohyb	síla [N]	rychlost [m s ⁻¹]
rotační pohyb	otáčivý moment [N m]	úhlová rychlost [rad s ⁻¹]

Tab. 2. Fyzikální parametry prvků

	Fyzikální parametr p			
	$\frac{i}{u}$	$\frac{u}{i}$	$\frac{\int_0^t i(t) dt}{u}$	$\frac{\int_0^t u(t) dt}{i}$
elektrický obvod	vodivost G [S]	odpor R [Ω]	kapacita C [F]	indukčnost L [H]
posuvný pohyb	tlumení b [N s m ⁻¹]	<i>bez fyzikálního významu</i>	hmotnost m [kg]	poddajnost d [m N ⁻¹]
rotační pohyb	torzní tlumení b_t [N m s rad ⁻¹]	<i>bez fyzikálního významu</i>	hmotný moment setrvačnosti J [kg m ²]	torzní poddajnost d_t [rad N ⁻¹ m ⁻¹]

Z uvedeného vyplývá, že tlumič v mechanické části pohonu lze modelovat elektrickým rezistorem (jeho odpor je roven převrácené hodnotě tlumení), hmotu nebo setrvačnick elektrickým kondenzátorem (jeho kapacita je rovna hmotnosti nebo hmotnému momentu setrvačnosti) a pružinu elektrickou cívku (její indukčnost je rovna poddajnosti).

4. Použití programu SNAP pro analýzy elektrického pohonu

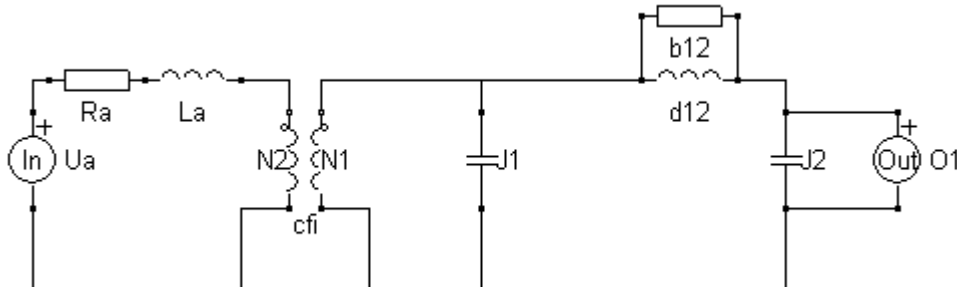
Jako příklad uvažujme elektrický pohon s pružnou vazbou mezi motorem a pracovním strojem. Hnací jednotkou je stejnosměrný motor s permanentními magnety, napájený ze stejnosměrného elektrického zdroje. Jeho rotor je spojen s poháněným strojem pružným hřídelem s danou poddajností a tlumením, spojení je bez vůle.

Na obr. 1 je uvedeno obvodové schéma modelu uvažovaného pohonu, vytvořené pomocí schématického editoru v programu SNAP. V tomto schématu je model motoru reprezentován následujícími prvky:

- R_a a L_a jsou parametry vinutí kotvy motoru,
- transformátor $c\Phi$ převádí jednak proud kotvy motoru na elektromagnetický točivý moment ve vzduchové mezeře motoru ($M = c\Phi I_a$) a jednak úhlovou rychlost hřídele motoru na indukované napětí ve vinutí kotvy ($U_i = c\Phi \omega$),
- J_I je rotor motoru,

- d_{12} a b_{12} představují poddajnost a proporcionální tlumení hřídele a
- J_2 je setrvačník, reprezentující pracovní stroj.

Vstupem modelu je prvek In , reprezentující zdroj napětí U_a , k výstupu je připojen prvek Out , který „měří“ úhlovou rychlost hřídele motoru O_1 (napětí na kondenzátoru J_2).



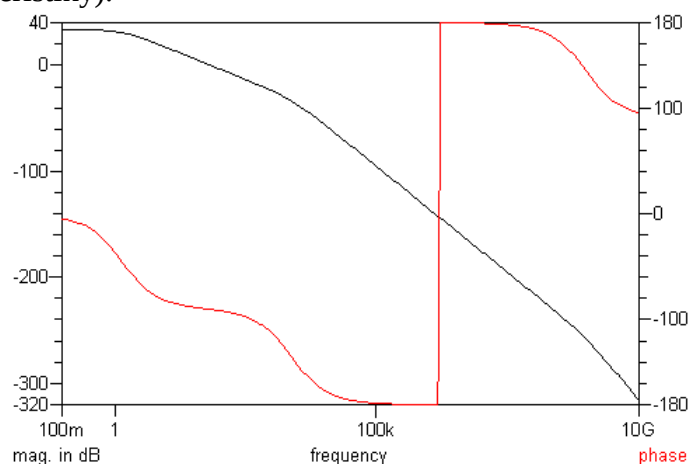
Obr. 1. Obvodový model elektrického pohonu

Přenos vstupního napětí U_a do úhlové rychlosti hřídele motoru O_1 je v tomto případě vyjádřen jako poměr výstupního napětí k napětí vstupnímu, který je ve SNAPu označen jako K_v . V Tab. 3 je uveden jednak přenos v symbolickém i v semisymbolickém polynomiálním tvaru a jednak nulové body a póly přenosu v nezkráceném tvaru (přenos má společný nulový bod s jedním pólem).

Tab. 3. Přenos vstupního napětí do výstupní rychlosti

symbolic
$\frac{c_{fi} \cdot b_{12}}{s \cdot (d_{12} \cdot c_{fi})}$ $\frac{c_{fi}^2 \cdot b_{12}}{s \cdot (d_{12}^2 \cdot c_{fi}^2 + J_2 \cdot R_a \cdot b_{12} + J_1 \cdot R_a \cdot b_{12}) + s^2 \cdot (J_2 \cdot d_{12} \cdot R_a + J_1 \cdot L_a \cdot b_{12} + J_2 \cdot d_{12} \cdot c_{fi}^2 \cdot b_{12} + J_1 \cdot d_{12} \cdot R_a) + s^3 \cdot (J_1 \cdot J_2 \cdot d_{12} \cdot R_a \cdot b_{12} + J_2 \cdot d_{12} \cdot L_a + J_1 \cdot d_{12} \cdot L_a) + s^4 \cdot (J_1 \cdot J_2 \cdot d_{12} \cdot L_a \cdot b_{12})}$
semisymbolic
Multip. Coefficient = 3.89759173322264E+0016 $\frac{2.33333333333333E-0004}{1.00000000000000E+0000 \cdot s}$ $1.92800871070080E+0011$ $8.26311167140831E+0014 \cdot s$ $9.30844206325037E+0013 \cdot s^2$ $6.07266548236136E+0009 \cdot s^3$ $1.00000000000000E+0000 \cdot s^4$
zeros
$-2.33333333333333E-0004$
poles
$-6.07265015389386E+0009$ $-1.53195853407468E+0004$ $-8.88192157256630E+0000$ $-2.33333333333385E-0004$

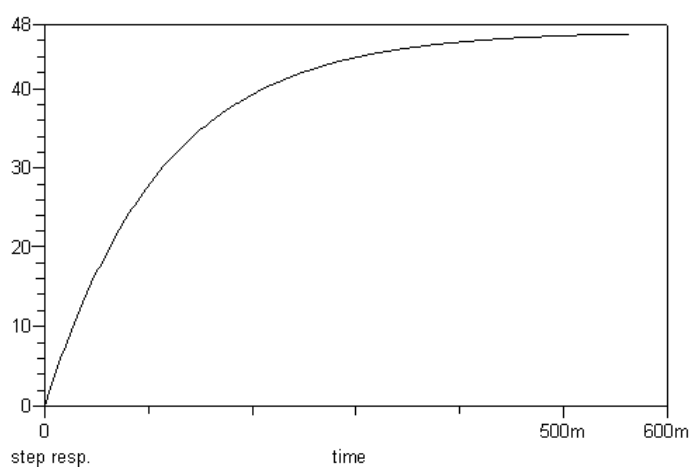
Na základě semisymbolického přenosu program SNAP vypočítá Bodeho diagramy pro amplitudu a fázi (obr. 2) a také semisymbolické tvary přechodové a impulsní charakteristiky (Tab. 4), popř. i jejich časové průběhy (na obr. 3 je pro ilustraci uveden časový průběh přechodové charakteristiky).



Obr. 2. Bodeho diagramy

Tab. 4. Semisymbolické tvary přechodové a impulsní charakteristiky

step response
$4.71698113207551E+0001$ $-1.74045442497533E-0013 \cdot \exp(-6.07265015389386E+0009 \cdot t)$ $2.73638388903929E-0002 \cdot \exp(-1.53195853407468E+0004 \cdot t)$ $-4.71971751596558E+0001 \cdot \exp(-8.88192157256630E+0000 \cdot t)$ $1.04450233184038E-0011 \cdot \exp(-2.33333333333385E-0004 \cdot t)$
pulse response
$1.05691708316717E-0003 \cdot \exp(-6.07265015389386E+0009 \cdot t)$ $-4.19202665131827E+0002 \cdot \exp(-1.53195853407468E+0004 \cdot t)$ $4.19201608226432E+0002 \cdot \exp(-8.88192157256630E+0000 \cdot t)$ $-1.16876947564570E-0008 \cdot \exp(-2.33333333333385E-0004 \cdot t)$



Obr. 3. Přechodová charakteristika

Protože možnosti programu SNAP a jeho grafických nástrojů jsou do jisté míry omezené, je v řadě případů výhodné exportovat získané výsledky do programu Matlab ve tvaru uživatelské funkce, obsahující v záhlaví pokyny pro práci s ním (Tab. 5).

Tab. 5. Záhlaví souboru funkce (export výsledků z programu SNAP)

```
function Z = jmeno(s)
% Voltage gain (open output) of circuit
% c:\progra~1\snap\examples\jmeno.snn
%
% usage: jmeno (s) - return complex value of circuit function for given s
%         jmeno ('numer') - return vector of numerator coefficients
%         jmeno ('denom') - return vector of denominator coefficients
%         jmeno ('export') - export network parameters to global workspace
%         jmeno ('show') - show network parameters
%         jmeno ('clear') - clear global workspace
%
% polynomials are in the Matlab style, ie. C(1)*s^N + ... + C(N)*s + (N+1)
```

V programu Matlab je potom možné vygenerovat operátorový přenos příkazem

prenos = tf(jmeno ('numer'), jmeno ('denom'))

a na základě něj potom vypočítat celou řadu potřebných výsledků (grafické rozložení nulových bodů a pólů, Bodeho, Nyquistovy a Nicolsovy diagramy, přechodovou a impulsní charakteristiku, lineární simulace atp.). Přitom grafické výsledky jsou v programu Matlab snáze editovatelné a tudíž jejich vzhled lze účelně přizpůsobit danému účelu. Nabízí se též možnost v Matlabu konvertovat uvažovaný elektrický pohon na lineární stavový systém a s ním potom realizovat řadu dalších simulačních experimentů.

5. Závěr

Dosavadní zkušenosti ukazují, že program SNAP je velmi užitečný nástroj pro výuku jak elektrických, tak i mechatronických dynamických soustav i pro základní analýzy takových soustav, protože výrazně snižuje množství časově náročných ručních výpočtů [3]. Kromě toho je vytváření modelů a jejich odladění ve SNAPu mnohem rychlejší. Je však třeba brát v úvahu skutečnost, že vzhledem k užití symbolické analýzy jsou rozměry analyzovaných soustav omezeny pouze na několik málo desítek prvků.

Aby byl program SNAP uživatelsky přístupnější pro odborníky mechatronického zaměření, bude vhodné vytvořit novou knihovnu modelů základních prvků a nově definovat potřebné operátorové přenosy, tj. nahradit symboly a názvy přenosů typu K_v (voltage gain), K_i (current gain), Z_t (transimpedance), Y_t (transductance) a další, které jsou odborníkům v elektrotechnice srozumitelné, příhodnějšími symboly a názvy. To ovšem závisí na tom, zda by byl modifikovaný program SNAP pro výše uvedené uživatele zajímavý a užitečný. Autoři programu SNAP [2] jsou ochotni, samozřejmě ve spolupráci s potenciálními uživateli, takové přizpůsobení udělat.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory grantového projektu GAČR čís. 101/06/0063 a Výzkumného záměru Ústavu termomechaniky AV ČR čís. AVO Z20 760514.

Odkazy

- [1] Čajka, J., Vrba, K. & Biolek, D. (1994) Improved Program for Symbolic Analysis and Synthesis of Electrical Networks. *Proc. of AMSE'94*, Lyon, Vol. 1, pp. 299 – 302;
- [2] <http://snap.webpark.cz/>;
- [3] Kalous, J., Kratochvíl, C. & Heriban, P. (2007) *Dynamika rotačních elektromechanických pohonů*. ÚT AVČR - Centrum mechatroniky, Brno;
- [4] Kolka, Z. (1999) SNAP – Program for Symbolic Analysis. *Radioengineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 23-24. <http://www.urel.feec.vutbr.cz/RADIOENG/>.