České vysoké učení technické v Praze

Snadné počítačové modelování dynamických soustav

Příručka k systému DYNAST

Doc.Ing. Heřman Mann, DrSc.
a Ing. Michal Ševčenko. PhD.

Praha 2015

TENTO PROJEKT BYL SPOLUFINANCOVÁN EVROPSKÝM SOCIÁLNÍM FONDEM
A STÁTNÍM ROZPOČTEM ČESKÉ REPUBLIKY

Komu je příručka určena

Tato příručka je vydávána ke kurzu *Snadné počítačové modelování dynamických soustav* vypracovanému v rámci projektu uvedeného níže. Hlavní cílovou skupinou kurzu jsou praktikující technici. A to jak čerství absolventi, kteří si chtějí doplnit co jim škola nedala, tak i ti starší, kteří mají zájem zlepšit si své šance na trhu práce. Vedoucím pracovníkům kurz může naznačit jednu z cest ke zvýšení prosperity jejich podniku. Přidaná hodnota kurzu spočívá v tom, že se jím mohou inspirovat rovněž učitelé na středních a vysokých školách. Aktivnější studenti mohou kurz využívat i samostatně. Kurz je na adrese

Inovační prvky kurzu

- Metoda modelování dynamických soustav prezentovaná v kurzu minimalizuje nároky na čas i odbornost uživatelů.
- Metodu lze uplatnit současně na mechanické, elektrické, magnetické, hydraulické či pneumatické, akustické, tepelné i jiné dynamické jevy.
- Kurz je podporován online softwarem DYNAST, který rovnice charakterizující modelované soustavy nejen vyřeší, ale i automaticky zformuluje.
- Volně přístupné interaktivní prostředí kurzu obsahuje mnoho řešených příkladů z nejrůznějších oborů, které lze modifikovat a po Internetu znovu řešit.
- Kurz je uzpůsoben pro individuální studium i pro studium prezenční nebo distanční formou pod vedením lektora.
- Kurz podporuje zvyšování úrovně znalosti technické angličtiny jeho uživatelů.

Jak příručku užívat

Jádro příručky tvoří podrobný uživatelský popis softwarového systému DYNAST, po kterém volali účastníci pilotáže kurzu. Kapitoly příručky jsou uspořádány tak, jak by je měl číst ten, kdo by se chtěl systematicky seznámit se všemi možnostmi, které DYNAST uživatelům nabízí. Pokud ale potřebujete např. řešit soustavu rovnic, můžete začít rovnou od kapitoly 4 *Nelineární rovnice*. Teprve když si nebudete vědět rady jak zadat třeba některou složitější funkci, můžete se vrátit k některé předcházející kapitole. Stejně tak k tomu, abyste mohli analyzovat např. schéma elektrického obvodu, nejspíš vám bude stačit nahlédnout rovnou do kapitoly 8 *Schémata v grafické podobě*.

Název projektu:	Počítačové modelování, simulace a analýza technických soustav
Číslo / koordinátor:	CZ.04.1.03/3.3.02.1/0043 / doc.Ing. Heřman Mann, DrSc.
Realizace projektu:	Výpočetní a informační centrum ČVUT
Grantové schéma:	Rozvoj kapacit dalšího profesního vzdělávání
Web / kontakt:	http://virtual.cvut.cz/vypocty/ / dyn@virtual.cvut.cz

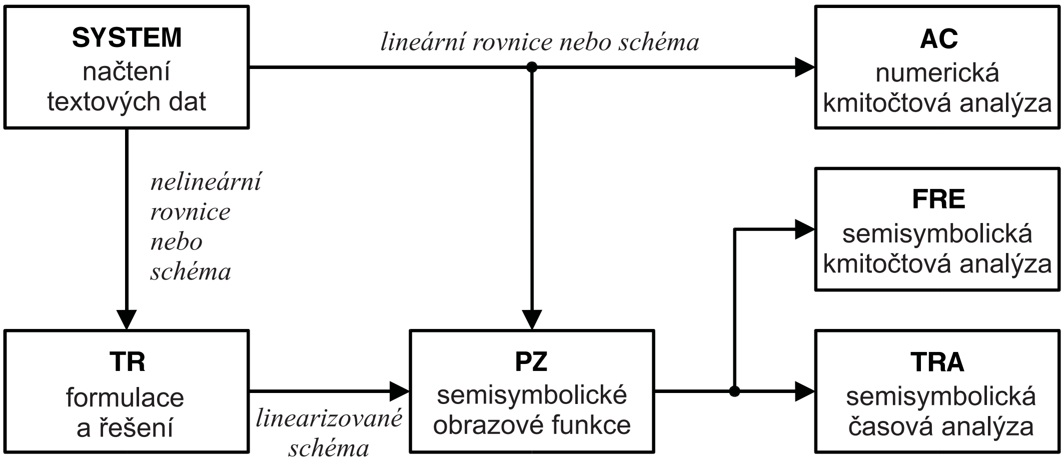
Obsah

Kapitola 1

Simulační systém DYNAST

1.1 Program DYNAST Solver

Simulační systém DYNAST sestává z celé řady programů, jejichž jádro představuje DYNAST Solver. Následující obrázek znázorňuje tok dat mezi sekcemi tohoto programu.



Sekce SYSTEM načítá v textové podobě soustavy nelineárních rovnic, které mají být řešeny, nebo fyzikální či bloková schémata dynamických soustav, která mají být analyzována. Řešené rovnice mohou být algebraické nebo diferenciální či algebro-diferenciální. Rovnice i schémata mohou být nelineární i parametricky závislá.

K řešení soustavy nelineárních rovnic a k analýze nelineárních schémat je určena sekce TR. Ta počítá přechodné i ustálené složky řešení rovnic čí odezev dynamických soustav, případně provede jejich statickou analýzu. Takovéto analýzy může v jednom běhu i několikrát opakovat pro různé hodnoty parametrů. Analýza přechodných dějů může vycházet z počátečních podmínek zadaných uživatelem nebo vypočítaných programem pro ustálené konstantní řešení. Pro ustálené periodické řešení může být v sekci TR vypočítáno rovněž kmitočtové spektrum pomocí Fourierovy analýzy. Sekci TR lze rovněž využít k automatické linearizaci řešených rovnic nebo analyzovaného schématu v okolí klidového nebo jiného pracovního bodu.

Lineární nebo linearizovaná schémata mohou být podrobena numerické kmitočtové analýze v sekci AC. Předností tohoto způsobu kmitočtové analýzy je její použitelnost i pro modely soustav s rozprostřenými parametry.

Sekce PZ umožňuje semisymbolickou analýzu lineárních časově nezávislých modelů soustav se soustředěnými parametry. DYNAST dokáže pro tyto modely nalézt a v semisymbolickém tvaru vyjádřit jejich přenosové funkce a Laplaceovy obrazy odezev na počáteční podmínky. V semisymbolickém tvaru pak dokáže v sekci TRA vyjádřit i příslušné časové charakteristiky pomocí symbolické zpětné Laplaceovy transformace. Tyto charakteristiky zde vyhodnocuje i numericky. Sekce FRE slouží k numerickému vyhodnocování různých složek kmitočtových charakteristik přenosových funkcínesm .

1.2 Uživatelské prostředí DYNAST Shell

DYNAST Shell, nebo také DynShell (nesměšujte s instalačním programem dynshell.exe}je program umožňující pohodlné využívání softwarového systému DYNAST pod MS Windows. Byl navržen tak, aby vyhovoval jak začátečníkům, tak i zkušeným uživatelům. Všechny operace jsou podporovány nápovědami a poradci nabízenými automaticky v návaznosti na prováděnou operaci.

Zadávaná data jsou průběžně kontrolována z hlediska správnosti jejich syntaxe. Grafické dialogy umožňují zadávání úloh bez znalosti vstupního jazyka programu. Fyzikální i bloková schémata lze zadávat v grafické podobě s využitím grafického editoru, jenž je součásti programu DYNAST Shell. Program zahrnuje i grafický editor pro vytváření značek modelů částí dynamických soustav.

Program DYNAST Shell umožňuje výsledná data vynášet do grafů v různém uspořádání. Grafy je pak možno exportovat v různých formátech. Doprovodný dokumentační software usnadňuje dokumentování simulačních experimentů a exportovat je do PostScriptu, PDF a HTML. Tento software dovoluje i animaci vyobrazení dynamických soustav. DYNAST Shell může být rovněž využíván jako modelovací toolbox pro MATLAB a Simulink.

Kapitola 2

Uživatelské funkce

Obsah kapitoly

DYNAST vám dovoluje definovat některé užitečné uživatelské funkce, které pak můžete užívat s libovolnými argumenty. Definice těchto funkcí musí předcházet prvnímu výrazu, ve kterém jsou užity. Tabelované funkce lze rovněž načítat z externích souborů vygenerovaných např. měřícími přístroji.

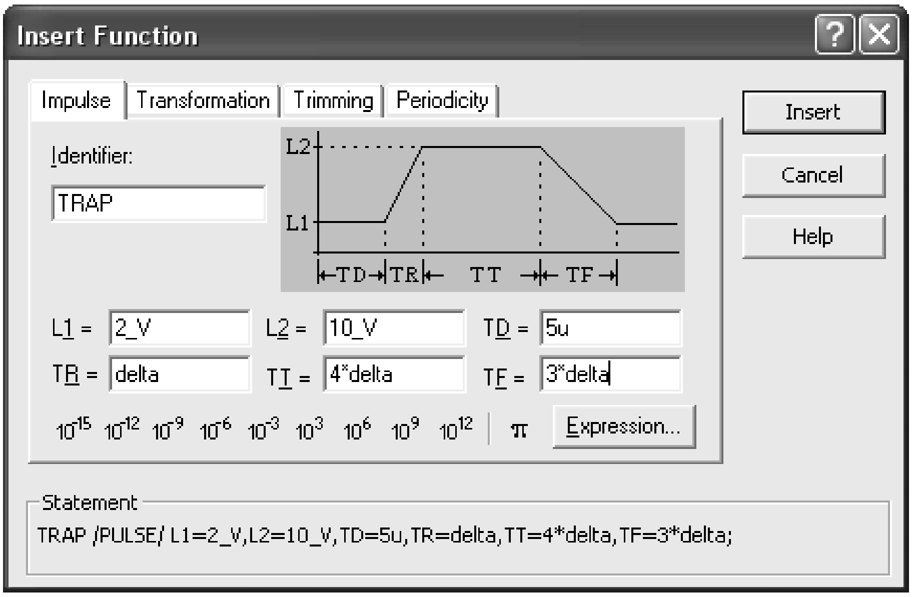
2.1 Zadávání uživatelských funkcí

Dialogy pro zadávání uživatelských funkcí si můžete otevřít z menu System. Zadání pak provedete v následujících krocích:

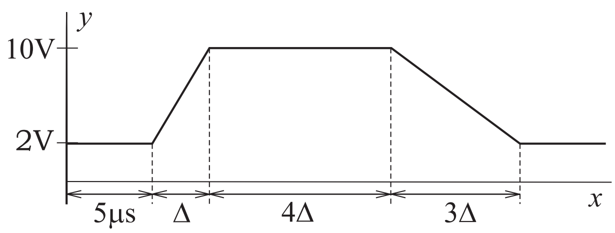
1. Zvolíte si identifikátor zadávané uživatelské funkce.
2. Pro zvolenou uživatelskou funkci zadáte hodnoty jejích parametrů v souladu s popisem v následujících odstavcích.
3. V dalším kroku můžete zadávanou uživatelskou funkci modifikovat s využitím záložek dialogu (kapitola 3).

2.2 Impulzní funkce

Dialog pro vkládání impulzních funkcí si můžete otevřít z menu System volbou Insert Impulse Function (Vložit impulzní funkci). Význam jednotlivých parametrů impulzních uživatelských funkcí objasňuje obrázek přímo v dialogu, který je uveden dále. Parametry mohou být zadány v podobě numerických konstant nebo symbolických výrazů. Implicitně je hodnota parametru $L_2 = 1$, implicitní hodnoty ostatních parametrů jsou nulové.



Zadávání impulzních funkcí.



Příklad. Pro zobrazenou impulzní funkci, pro kterou byl zvolen identifikátor TRAP, dialog vygeneruje příkaz

```
TRAP /PULSE/ L1 = 2_V, L2 = 10_V, TD = 5u, TR = delta,
TT = 4*delta, TF = 3*delta;
```

Všimněte si, že hodnoty některých parametrů této funkce jsou ve tvaru symbolického výrazu, neboť byly zadány jako násobek proměnné `delta`. Vytvořená funkce potom může být využívána s různými argumenty jako např. v rovnicích

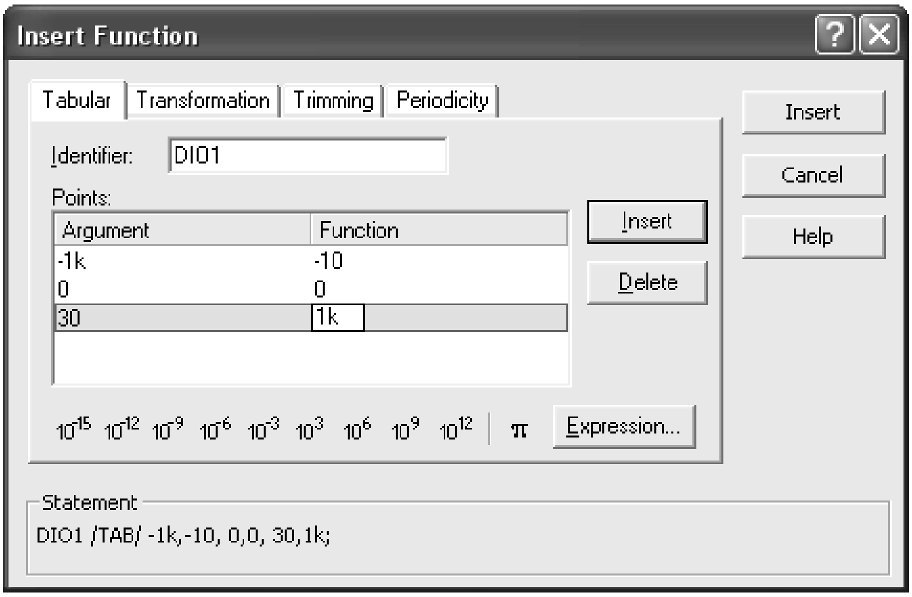
```
v1 = TRAP(time - t0); y2 = TRAP(x1**2);
```

2.3 Tabelované funkce

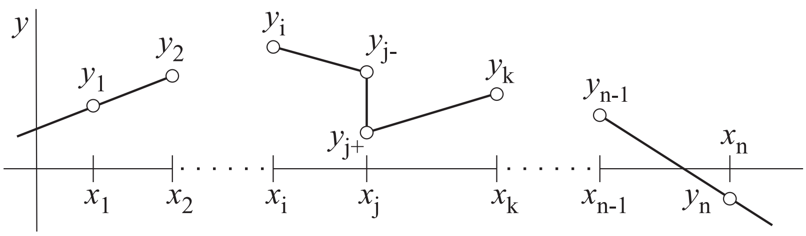
2.3.1 Tabelované funkce pomocí dialogu

DYNAST vám rovněž nabízí možnost funkci $y = f(x)$ zadat ve formě posloupnosti dvojic diskrétních hodnot jejích argumentů x a příslušných hodnot funkce y. Poslouží vám k tomu dialog Insert Tabular Function (Vložit tabelovanou funkci) zvolený v menu System.

Hodnoty argumentu x_i a hodnoty odpovídající funkce y_i, $i = 1, 2\ldots$ mohou být numerické konstanty nebo symbolické výrazy. Hodnoty argumentu se zadávají ve vzestupném pořadí, takže $x_i \leq x_{i+1}$ pro každé i. Případná funkční nespojitost $y_{i-} \neq y_{i+}$ v x_i se zadá dvěma dvojicemi hodnot: x_i, y_{i-} a x_i, y_{i+}.



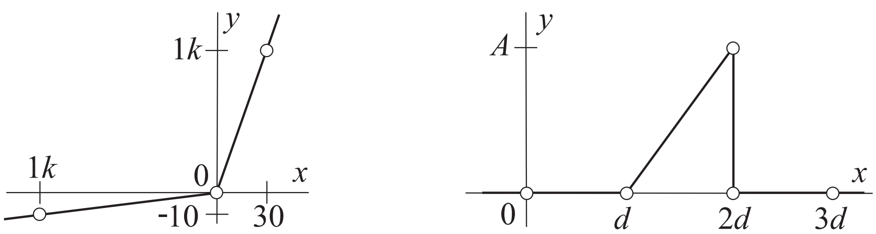
Zadávání tabelovaných funkcí.



Obrázek ilustruje způsob vyhodnocování tabelované funkce mezi zadanými diskrétními body. DYNAST interpoluje funkci $y = f(x)$ v bodech ležících mezi sousedními zadanými hodnotami x_i a x_{i+1} (kde $x_i < x < x_{i+1}$) lineárně, takže

$$y = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}(x - x_i) + y_i$$

Vně intervalu zadaných argumentů $< x_1, x_n >$ je funkce lineárně extrapolována. Pro každé $x < x_1$ je tedy funkce aproximována přímkou procházející prvními dvěma body tabulky x_1 a x_2. Podobně pro každé $x > x_n$ je funkce aproximována přímkou procházející posledními dvěma body tabulky x_{n-1} a x_n.



(a) (b)

Příklady. Funkci znázorněnou na obr. *a* lze pomocí dialogu zadat následovně:

```
DIO1 /TAB/ -1k,-10, 0,0, 30,1k;
```

Impulzní pilovitou funkci z obr. *b* lze zadat výrazem

```
GAP/TAB/ 0,0, d,0, 2*d,A, 2*d,0, 3*d, 0;
```

Výsledné funkce pak lze využít např. v rovnicích

```
i = DIO1(v);   Z = GAP(time);
```

2.3.2 Import tabelovaných funkcí

DYNAST vám rovněž umožňuje tabelované uživatelské funkce importovat ze souboru ASCII. To je užitečné zejména pro načítání hodnot funkční závislosti z některého digitálního měřícího přístroje.

Tabulka se ukládá do souboru

soubor.FTN

kde *soubor* značí název souboru.

Obsahem souboru je posloupnost dvojic argumentů a přislušných funkčních hodnot v podobě numerický konstant oddělených mezerami, nebo čárkami.

Příkaz pro načtení souboru s tabelovanou uživatelskou funkcí je ve tvaru

FILE = *soubor*;

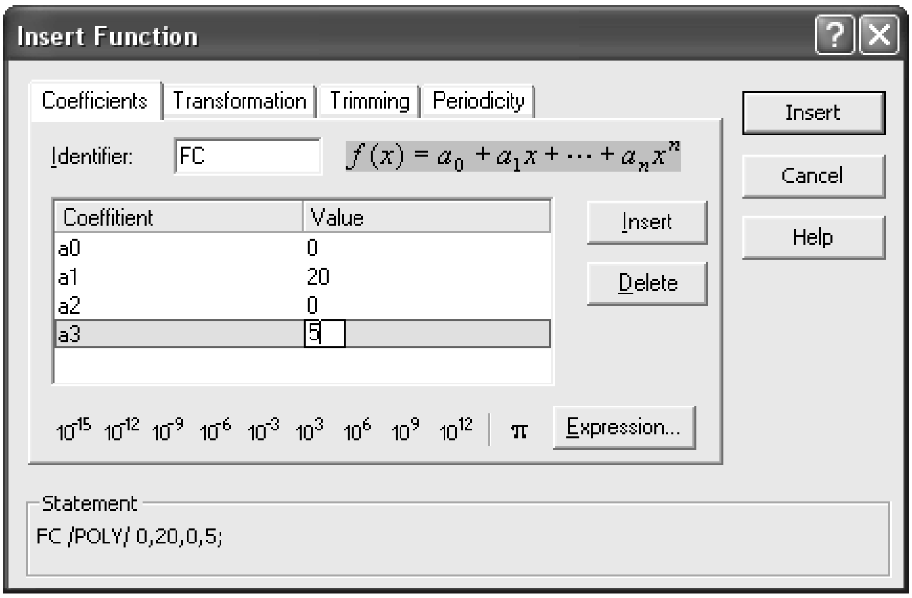
Příklady. Tabelovaná uživatelská funkce `DIO1` z předchozího příkladu tak může být uložena např. v souboru `FD.FTN` obsahujícího data

```
-1k -10   0 0   30 1k
```

Tabelovaná uživatelské funkce uložená v souboru `F1.FTN` pak může být načtena příkazem

```
DIO1 /TAB/ FILE=FD;
```

2.4 Polynomiální funkce



Zadávání polynomiálních funkcí prostřednictvím koeficientů.

Reálnou polynomiální funkci

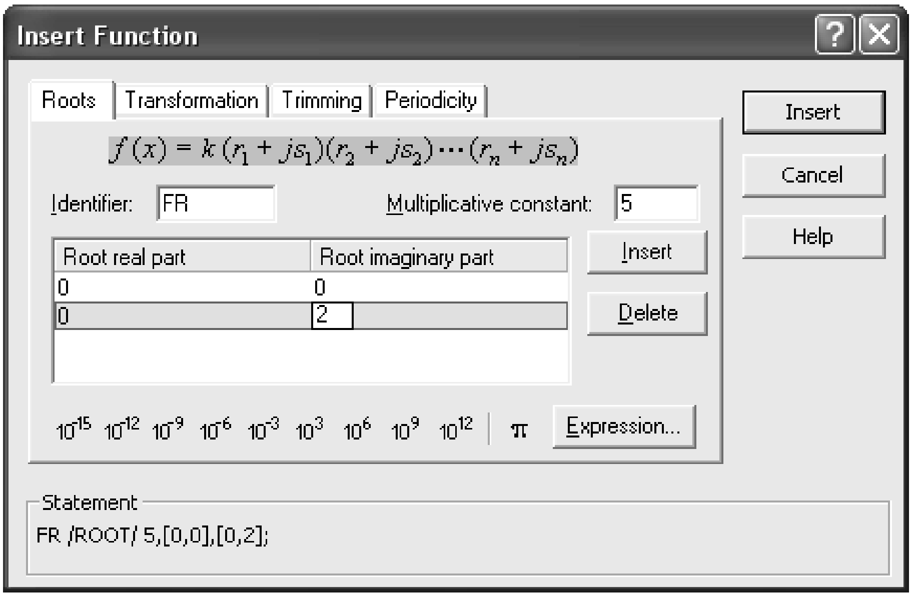
$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \ldots = k(x - x_1)(x - x_2)\ldots$$

můžete zadat buď prostřednictvím jejích koeficientů nebo kořenů. Pro každý z těchto dvou způsobů zadávání polynomů si v menu System volbou Insert Polynomial a Given by Coefficients (Vložit polynom a Daný koeficienty) nebo Insert Polynomial a Given by Roots (Vložit polynom a Daný kořeny) můžete otevřít příslušný dialog.

Jak koeficienty, tak i kořeny včetně násobku k, mohou být zadány v podobě numerických konstant nebo symbolických výrazů. Řád polynomu si DYNAST určí automaticky sám z počtu zadaných koeficientů nebo kořenů. Pokud má zadávaný reálný polynom komplexní kořen, musí mít i kořen, který je k němu komplexně sdružený. Z dvojice komplexních kořenů

$$x_k = \mathrm{Re}\, x_k + j\,\mathrm{Im}\, x_k,\ \ \bar{x}_k = \mathrm{Re}\, x_k - j\,\mathrm{Im}\, x_k$$

stačí proto zadat jen jeden, přičemž na znaménku imaginární části $\mathrm{Im}\, x_k$ nezáleží.



Zadávání polynomiálních funkcí prostřednictvím kořenů.

Příklady. Výše zobrazené dialogy demonstrují oba způsoby vkládání polynomu

$$y = 5x^3 + 20x = 5x(x - 2j)(x + 2j)$$

Po zadání této funkce prostřednictvím koeficientů s identifikátorem FC první dialog vytvoří příkaz s koeficienty seřazenými podle jejich řádu od nultého k nejvyššímu

```
FC /POLY/ 0, 20, 0, 5;
```

Příkaz vytvořený druhým dialogem pro uvedenou polynomiální funkci zadanou jejími kořeny a označenou identifikátorem FR má tvar

```
FR /ROOT/ 5, 0, [0, 2];
```

Všimněte si, že parametr udávající násobný činitel polynomu je na prvním místě. Reálná a imaginární část dvojice komplexně sdružených kořenů je zde v hranatých závorkách. Znaménko imaginární části může být libovolné.

Každou z těchto uživatelských funkcí je pak možné využívat s libovolnými argumenty. Např. rovnici $q_1 = 5v_1^3 + 20v_1$ můžeme zadat jako `q1 = FC(v1)` a rovnici $q_2 = 5v_2^3 + 20v_2$ jako `q2 = FC(v2)`.

2.5 Text uživatelských funkcí

Příkaz pro zadávání impulzních, tabelovaných a polynomiálních funkcí má tvar

funkce / *typ* / *seznam;*

funkce je uživatelem zvolený identifikátor zadávané funkce.

typ je identifikátor typu funkce umístěný mezi lomítky `/ /`. Přehled identifikátorů typu uživatelských funkcí uvádí tabulka 2.1.

seznam je seznam parametrů funkce oddělených čárkami `,`. Význam parametrů uživatelských funkcí jednotlivých typů uvádí předchozí odstavce.

Tabulka 2.1: Typy uživatelských funkcí.

TYP	FUNKCE
`PULSE`	impulzní funkce
`TAB`	funkce zadaná tabulkou
`POLY`	polynomiální funkce zadaná koeficienty
`ROOT`	polynomiální funkce zadaná kořeny

Do výrazů využívajících uživatelské funkce se tyto funkce vkládají ve tvaru

funkce(*argument*)

funkce je identifikátor uživatelské funkce.

argument je libovolný argument zadaný jako numerická konstanta nebo symbolický výraz uzavřený v závorkách `( )`.

Příkazy definující uživatelské funkce musí předcházet výrazům, v nichž jsou tyto funkce použity. Všimněte se, že každou uživatelskou funkci můžete v téže úloze užít opakovaně s různými argumenty.

Kapitola 3

Složené funkce a události

Obsah kapitoly

Potřebné funkce můžete vytvářet rovněž modifikováním standardních funkcí (kapitola **??***) nebo uživatelských funkcí (kapitola 2). Události indikují různé stavy odezev rovnic nebo schémat a mohou být využity k řízení jejich změn během nelineární analýzy (kapitola 10).*

3.1 Zadávání modifikovaných funkcí

DYNAST vytvoří **modifikovanou funkci** $f(\bullet)$ ze standardní nebo uživatelské funkce $g(\bullet)$ jejím transformováním, omezením intervalu její platnosti nebo jejím periodickým opakováním, případně všemi těmito způsoby modifikace funkce $g(\bullet)$ současně.

Dialog pro **modifikaci standardní funkce** $g(\bullet)$ si můžete otevřít z menu System volbou Insert Altered Function (Vložení modifikované funkce). Modifikaci pak zadáte v následujících krocích:

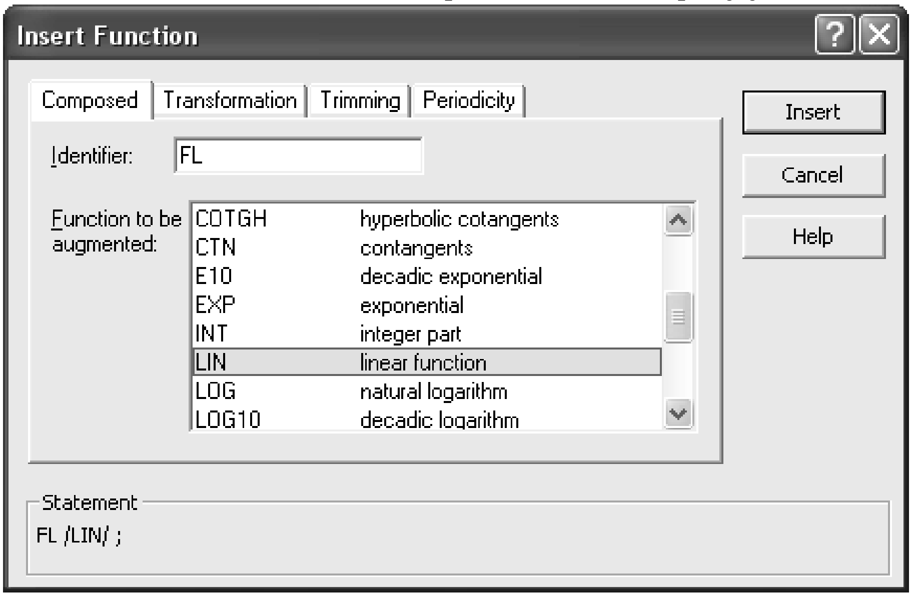
1. Zvolíte si identifikátor zadávané modifikované funkce $f(\bullet)$, kde $\bullet$ značí libovolný argument.

2. Určíte funkci $g(\bullet)$, kterou chcete v zadávané modifikované funkci modifikovat.

3. Vyberete si způsob modifikace: Transformation (Transformace), Trimming (Omezení) nebo Periodicity (Periodičnost)

4. Zadáte parametry zvolené modifikované funkce podle návodů v dalších odstavcích. Při zadávání více modifikací téže funkce rozvažte vliv jejich pořadí na tvar výsledné funkce.

Uživatelské funkce můžete modifikovat přímo v dialozích pro jejich zadávání (kapitola 2).



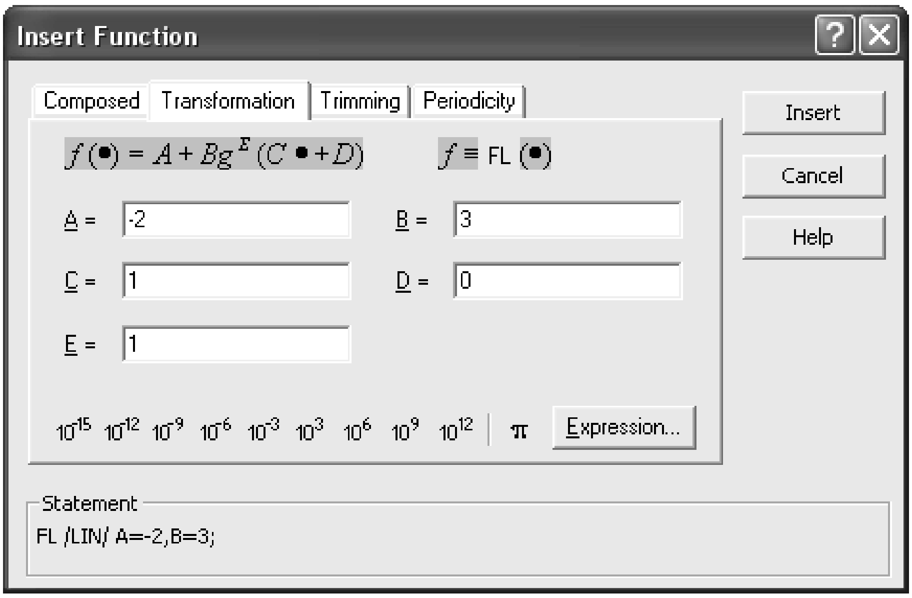
Volba modifikované funkce.

3.2 Transformované funkce

Transformací standardní nebo uživatelské funkce $g(\bullet)$ DYNAST vytvoří funkci $f(\bullet)$, která je obecně ve tvaru

$$f(\bullet) = A + Bg^E(C\bullet + D)$$

Implicitní hodnoty parametrů této funkce jsou: $A = D = 0$ a $B = C = E = 1$. Hodnoty těchto parametrů mohou být zadány numerickými konstantami nebo symbolickými výrazy.



Zadávání transformace funkce.

Příklad. Funkci charakterizující lineární závislost $f(\bullet) = 3\bullet - 2$ označenou např. identifikátorem `FL` lze zadat jako transformaci funkce `LIN` (identita) s parametry $A = -2$ a $B = 3$. Ostatní parametry si zachovají implicitní hodnotu. Dialog po zadání této funkce zobrazí příkaz

```
FL /LIN/ A = -2, B = 3;
```

Např. rovnice $v = 3t - 2$ a $Q = 3p - 2$ pak můžeme do vstupních dat pro DYNAST vložit jako `v = FL(time); Q = FL(p);`.

Příklad. Funkci $f(\bullet) = I_0(e^{\theta\bullet} - 1)$ označenou identifikátorem `DIOD` můžete vytvořit transformací standardní funkce $\exp(\bullet)$ s parametry $A = -I_0, B = I_0, C = theta$. Dialog pro tuto funkci vygeneruje příkaz

```
DIOD /EXP/ A = -I0, B = I0, C = theta;
```

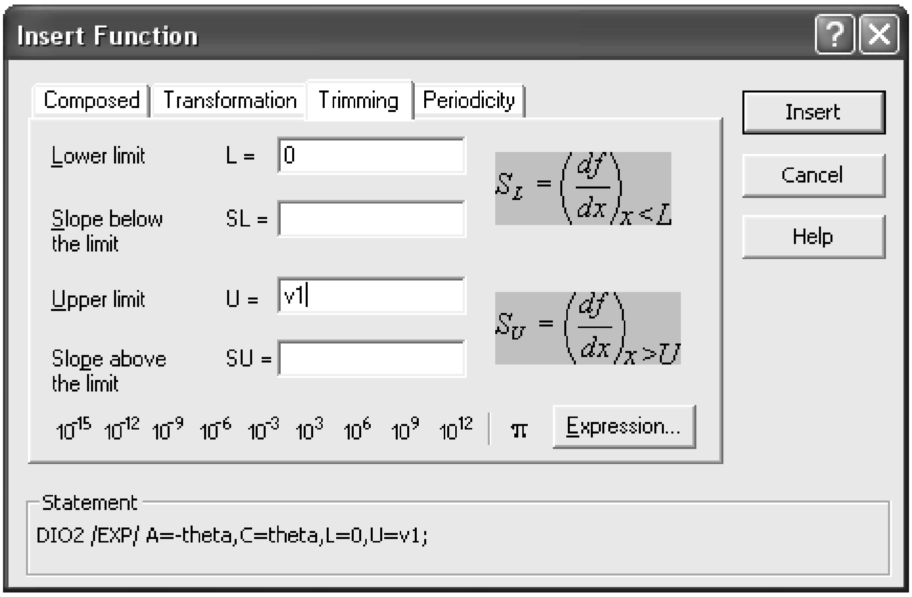
Výslednou modifikovanou funkci pak můžete použít s různými argumenty, jako např. v rovnicích
`i1 = DIOD(v1); i2 = DIOD(v2);`

Příklad. Funkce zadaná jako

```
F /POLY/ 0, 1, 0, 5, A = -4, B = 3, C = 2, D = -1, E = 2;
q = F(p);
```

představuje matematický výraz $q = -4 + 3\left[(2p-1) + 5(2p-1)^3\right]^2$

3.3 Omezené funkce



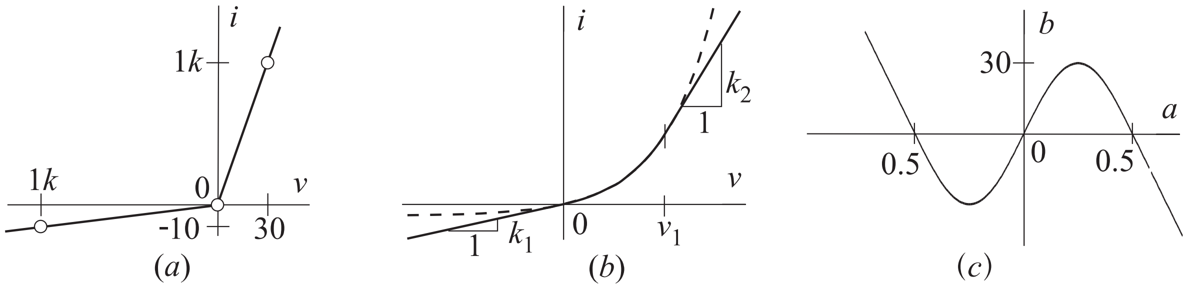
Zadávání omezení funkce.

Omezenou funkci $f(\bullet)$ DYNAST vygeneruje z funkce $g(\bullet)$ ohraničením platnosti této funkce na interval argumentu $L < \bullet < U$ a lineární extrapolací vzniklé funkce vně tohoto intervalu tak, že

$$f(x) = \begin{cases} g(L) + S_L(\bullet - L) & \bullet < L \\ g(\bullet) & L \leq \bullet \leq U \\ g(U) + S_U(\bullet - U) \quad \text{for} & \bullet > U \end{cases} \tag{3.1}$$

Hodnoty parametrů L, U, S_L a S_U lze specifikovat numerickou konstantou nebo symbolickým výrazem. Implicitní hodnoty parametrů L a U jsou $L = -\infty$, $U = \infty$. Pokud jsou hodnoty parametrů L a U specifikovány, ale hodnoty strmostí S_L a S_U specifikovány nejsou, DYNAST zvolí S_L a S_U tak, aby funkce $f(\bullet)$ byla v bodech $\bullet = L$ a $\bullet = U$ spojitá, tj. aby

$$S_L = \left(\frac{dg}{d\bullet}\right)_{\bullet=L} \quad \left(\frac{dg}{d\bullet}\right)_{\bullet=U}$$



Příklad. Po úsecích lineární charakteristika z obr. *a* může být zadána jako

```
DIO1 /LIN/ L=0, U=0, SL=10/1k, SU=1k/30; i = DIO1(v);
```

Příklad. Na obr. *b* je znázorněna charakteristika $i = I_0(e^{\theta v} - 1)$ linearizovaná vně intervalu $0 < v < v_1$ tak, aby její derivace di/dv zůstala spojitá, tj. aby

$$i = \begin{cases} I_0\theta v & \text{pro} \quad v < 0 \\ I_0\left(e^{\theta v} - 1\right) & \quad 0 \leq v \leq v1 \\ I_0\theta e^{\theta v_1}(v - v_1) + I_0\left(e^{\theta v_1} - 1\right) & \quad v > v_1 \end{cases}$$

Tato charakteristika může být zadána jako transformovaná a omezená exponenciální funkce

```
DIO2 /EXP/ A = -theta, C = theta, L = 0, U = v1; i = I0*DIO2(v);
```

Příklad. Obr. *c* ukazuje sinusoidální funkci $b = 30\sin(2\pi a)$ omezenou pro $-0.5 < a < 0.5$, která byla zadána současně jako transformovaná funkce

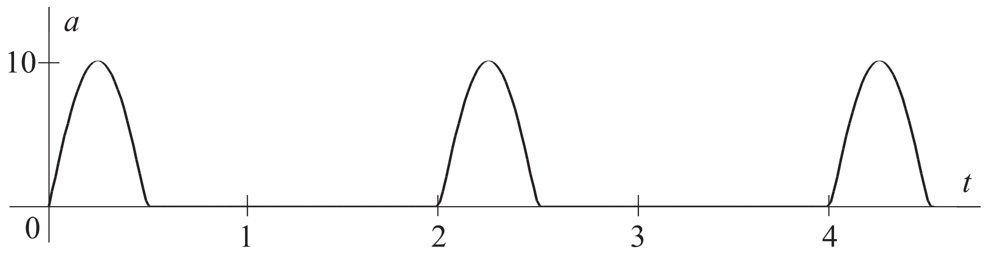
```
FA /SIN/ B = 30, C = 2pi, L = -1/2, U = 1/2; b = FA(a);
```

3.4 Periodické funkce

Funkci $g(\bullet)$ DYNAST převede na funkci periodickou $f(\bullet)$ takovou, že

$$f(\bullet) = g(\bullet) \quad \text{pro} \quad 0 \leq \bullet < P \quad \text{a} \quad f(\bullet + k \cdot P) = f(\bullet)$$

kde k je celé číslo a P je perioda funkce $f(\bullet)$.



Příklad. Znázorněná periodická funkce $a(t)$ může být vytvořena modifikací sinusovky s využitím transformace a omezení jako

```
halfsin /SIN/ B = 10, C = 2pi, L = 0, U = .5,
SL = 0, SU = 0, P = 2;     a = halfsin(time);
```

Příklad. Periodickou impulzní funkci lze uvedeným způsobem snadno získat z impulzní uživatelské funkce (kapitola 2). Např.

```
Fimp /PULSE/ TD = -2, TR = 1, TT = 2, TF = 1, P = 5;
v = Fimp(time);
```

Tutéž periodickou impulzní funkci však lze snadno získat i z tabelované uživatelské funkce:

```
Fimp /TAB/ 0,1, 1,1, 2,0, 3,0, 4,1, 5,1, P = 5;
v = Fimp(time);
```

3.5 Text modifikovaných funkcí

Příkaz pro zadávání modifikovaných funkcí

funkce `/` *typ* `/` [*seznam*`,`] *modifikace*`;`

funkce je uživatelský identifikátor modifikované funkce

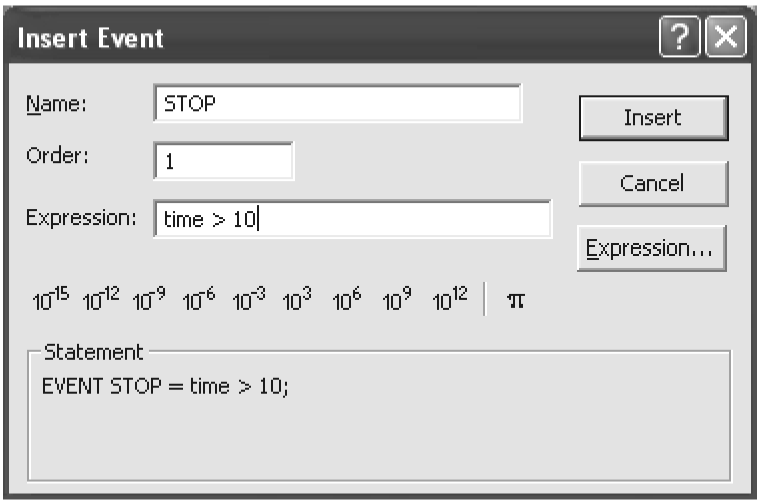
typ indikuje typ modifikované standardní nebo identifikátor uživatelské funkce umístěný mezi lomítky `/ /`. V případě lineární funkce se jako *typ* zadává řetězec `LIN`

seznam je seznam parametrů uživatelské funkce, je-li tato modifikovanou funkcí

modifikace je seznam parametrů definovaných v předchozích odstavcích pro modifikace aplikované na zvolenou funkci

3.6 Události

Události představují náhlé změny stavu modelu dynamické soustavy. Časové průběhy proměnných událostí indikují tyto změny a mohou být využity k řízení parametrů modelu během jeho nelineární analýzy (kapitola 10).



Zadávání událostí.

Několik událostí lze zadat společným příkazem ve tvaru

`EVENT` *proměnná* [`(`*řád*`)`] = *výraz*[`,` *proměnná* [`(`*řád*`)`] = *výraz*...]`;`

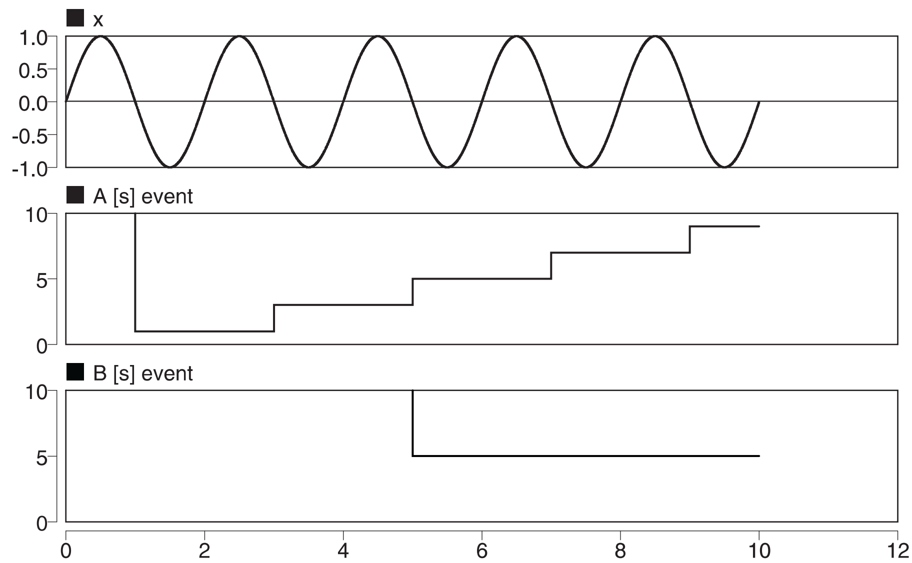
`EVENT` (událost) je klíčovým slovem uvedeného příkazu

proměnná je uživatelský identifikátor příslušné **proměnné události**. Až do okamžiku, kdy událost nastane, hodnota její proměnné je 10^{300}. Jakmile událost nastane, její proměnná nabude hodnotu rovnající se proměnné `TIME` v okamžiku výskytu události. Je-li identifikátor události zadán řetězcem `STOP`, v okamžiku jejího výskytu se analýza ukončí.

výraz je logický výraz charakterizující událost. Je-li tento výraz pravdivý již na počátku předpokládá se, že událost dosud nenastala.

řád je kladné celé číslo n indikující **řád události**. Jeho implicitní hodnota je $n = 1$.

- je-li $n \geq 1$, proměnná události změní svou hodnotu z 10^{300} na hodnotu proměnné `TIME` pouze jednou, a to v okamžiku, kdy se *výraz* stal pravdivým po n-té
- je-li $n = 0$, hodnota příslušné proměnné události se změní na hodnotu proměnné `TIME` vždy, když se *výraz* stane znovu pravdivým



Příklad. Na obrázku jsou průběhy proměnné x a proměnných událostí A a B (počáteční hodnota 10^{300} je mimo rozsah měřítka svislé osy) zadaných příkazy

```
x = sin(1pi*time);
EVENT A (0) = x < 0;
EVENT B (3) = x < 0;
EVENT STOP = (time > 10);
```

Událost `A` tedy nastává vždy, kdy x přechází z kladných hodnot do záporných. Událost `B` nastane během analýzy pouze jednou, a to když uvedená změna x nastane potřetí. Hodnota 10^{300} proměnných A a B před první událostí je ovšem mimo zvolený rozsah měřítka na svislé ose grafů. Z obrázku je patrno, že po uskutečnění události `STOP` dojde k zastavení výpočtu.

Kapitola 4

Nelineární rovnice

Obsah kapitoly

V této kapitole se dozvíte, jak do DYNASTu zadávat soustavy nelineárních algebraických, diferenciálních nebo algebro-diferenciálních rovnic. Tyto rovnice pak mohou být vyhodnocovány nebo řešeny pomocí nelineární numerické analýzy (kapitola 10). Řešení lineárních algebro-diferenciálních rovnic DYNAST dokáže vypočítat i v semisymbolickém tvaru (kapitola 12).

4.1 Rovnice a jejich proměnné

Při výpočtu numerické hodnoty určité proměnné mohou nastat dvě rozdílné situace:

- musíme **řešit** rovnici nebo soustavu rovnic kde proměnná, jejíž hodnotu hledáme, vystupuje jako neznámá
- pro hledanou proměnnou známe matematický vztah i všechny numerické hodnoty, které je nutno do tohoto vztahu dosadit, abychom jej mohli **vyhodnotit** bez nutnosti jej řešit.

Je proto potřeba rozlišovat mezi vyhodnocováním a řešením proměnných. Vztahy pro vyhodnocování proměnných se do DYNASTu zadávají v podobě explicitních rovnic, zatímco rovnice, které musí být řešeny, se zadávají v implicitním tvaru.

Příklad. Pokud v kvadratické rovnici

$$x^2 + bx + c = 0 \tag{4.1}$$

numerické hodnoty parametrů b a c známe, hodnotu x můžeme získat buď řešením této implicitní rovnice, nebo snadněji vyhodnocením známého explicitního vzorce

$$x = -b/2 \pm \sqrt{(b/2)^2 - c} \tag{4.2}$$

Explicitní rovnici pro vyhodnocovanou proměnnou $y(t)$ předpokládejme v obecném tvaru

$$y(t) = g(z_1, z_2, \ldots, z_n, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \ldots, t) \tag{4.3}$$

kde $g(\bullet)$ je známá funkce a t je nezávislá proměnná (obvykle čas).

Budeme přitom předpokládat, že numerické hodnoty všech proměnných nebo parametrů na pravé straně, tj. $z_1(t), z_2(t), \ldots$ a jejich derivací $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \ldots$, jsou v době zpracovávání této rovnice již známé. Mohly být zadány přímo uživatelem nebo získány z předcházejících vyhodnocených nebo vyřešených rovnic.

Soustava n algebraických, diferenciálních nebo algebro-diferenciálních **implicitních rovnic**, které mají být řešeny, se předpokládá v obecném tvaru

$$\begin{aligned}
f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \ldots, \dot{x}_n, z_1, z_2, \ldots, t) &= 0 \\
f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \ldots, \dot{x}_n, z_1, z_2, \ldots, t) &= 0 \\
\cdots &= 0 \\
f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \ldots, \dot{x}_n, z_1, z_2, \ldots, t) &= 0
\end{aligned} \tag{4.4}$$

kde $f_1(\bullet), f_2(\bullet), \ldots, f_n(\bullet)$ jsou známé funkce, $x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)$ jsou řešené proměnné, kdežto $\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \ldots, \dot{x}_n(t)$ jsou jejich derivace vzhledem k nezávisle proměnné t. V případě algebraických rovnic jsou tyto derivace nulové. O proměnných nebo parametrech $z_1(t), z_2(t), \ldots$ se předpokládá, že v době řešení této soustavy rovnic jsou jejich numerické hodnoty již známé.

Diferenciální rovnice ℓ-tého řádu musí být před zadáním do DYNASTu převedeny na ℓ rovnic prvního řádu pomocí jednoduchých substitucí pro derivace vyšších řádů. Počáteční hodnoty řešených proměnných jsou součástí zadání nelineární analýzy (kapitola 10).

Příklad. Abychom mohli řešit časově závislou Besselovu diferenciální rovnici druhého řádu

$$t^2 \ddot{y} + t\dot{y} + (t^2 - k^2)y = 0 \tag{4.5}$$

pro $k = 2$, musíme nejprve zadat k pomocí explicitní rovnice a teprve potom můžeme zadat s použitím substituce $\dot{y} = y_D$ dvě implicitní rovnice prvního řádu ekvivalentní rovnici (4.5):

$$\begin{aligned}
k &= 2 \\
y_D - \dot{y} &= 0 \\
t^2 \dot{y}_D + t y_D + (t^2 - k^2)y &= 0
\end{aligned} \tag{4.6}$$

4.2 Zadávání explicitních rovnic

Při zadávání explicitních rovnic můžete postupovat následovně:

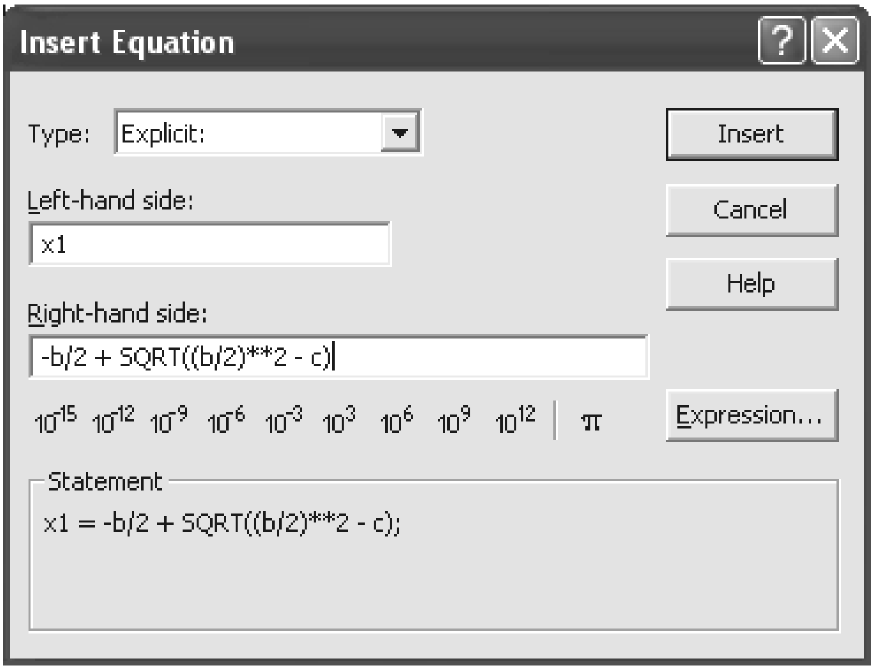
1. V menu File (Soubor) zvolte New (Nový), čímž se vám otevře dialog New File.
2. Zde si jako File type zvolte Problem text, v poli File name zadejte název nového souboru a v poli Title název zadávané úlohy. Po kliknutí na OK se vám otevře textový soubor typu *.PRB.
3. Otevřete si dialog pro zadávání rovnic tím, že si v menu System zvolíte Insert Equation (Vložit rovnici).

4. Zde si vyberte Type: Explicit a v poli Left-hand-side (Levá strana) zapište identifikátor vyhodnocované proměnné, kterou chcete explicitní rovnicí vyhodnotit.

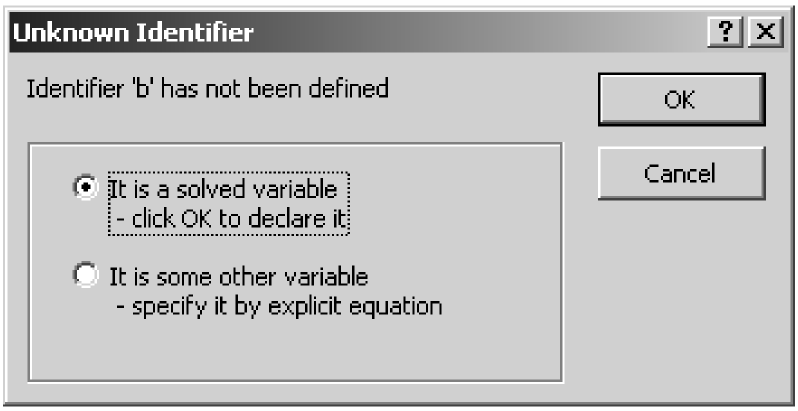
5. Pravou stranu rovnice pak zadejte v okénku Right-hand-side (Pravá strana). Můžete přitom využívat dialog Expression (Výraz) a tlačítka násobných konstant (kapitola **??**). Zadaná explicitní rovnice se zobrazí v dolním políčku dialogu, kde ji můžete snadno překontrolovat.

6. Klikněte na Insert (Vložit). Pokud se v zadání rovnice nachází identifikátor proměnné, která dosud nebyla nijak definována, otevře se dialog Unknown Identifier (Neznámý identifikátor), který vás na to upozorní. Současně budete požádáni, abyste určili, zda se jedná o identifikátor řešené, nebo některé jiné proměnné. Jde-li o řešenou proměnnou, zvolte It is a solved variable (Jde o řešenou proměnnou) a klikněte na OK. Pokud tomu tak není, zvolte It is some other variable (Je to jiná proměnná). V tomto případě se po kliknutí na OK otevře nový dialog pro zadání další explicitní rovnice, abyste neznámou proměnnou mohli definovat.

7. Teprve po dodefinování všech proměnných, jejichž identifikátory vystupují v původně zadávané explicitní rovnici, po kliknutí na Insert v dialogu Insert Equation se zadávaná rovnice vloží do otevřeného souboru *.PRB.



Zadávání explicitních rovnic.



Třídění nezadaných proměnných.

Příklad. Ve zobrazeném dialogu Insert Equation je zadána explicitní rovnice (4.2). Po kliknutí na tlačítko Insert se místo vložení zadaného vztahu do souboru `*.PRB` objeví dialog se zprávou Identifier `b` has not been defined (Identifikátor `b` nebyl definován), pokud jste jeho numerickou hodnotu nezadali předem. Další dialog vám umožní tak učinit dodatečně. Teprve po zadání obou hodnot vám bude umožněno zadávaný vztah vložit do datového souboru.

Zvolíme=li např. $b = 3$ a $c = -4$, pomocí uvedených dialogů se tak postupně vytvoří posloupnost explicitních rovnic v podobě příkazů

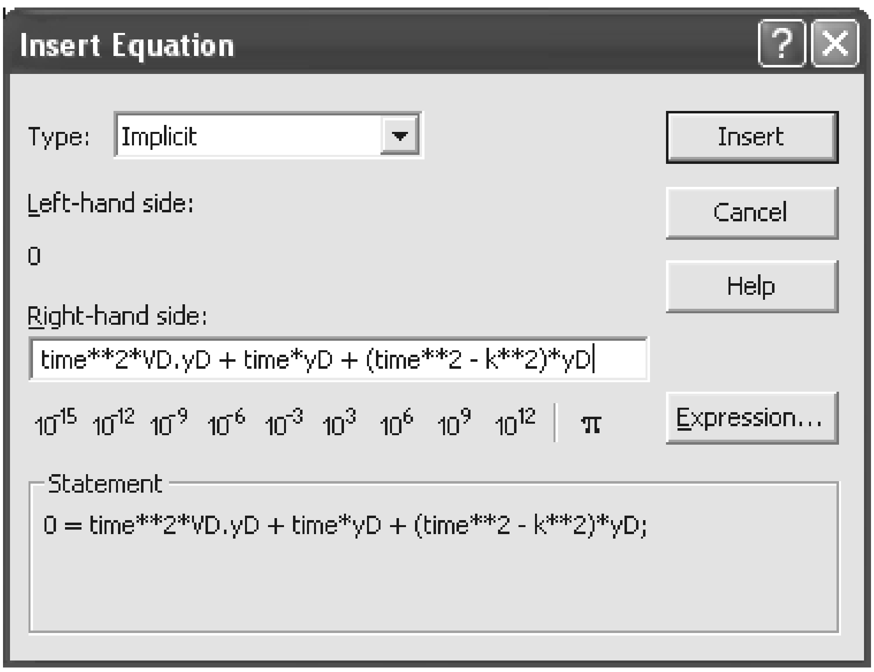
```
*SYSTEM;
b = 3; c = -4;
x1 = -b/2 + SQRT((b/2)**2 - c);
x2 = -b/2 - SQRT((b/2)**2 - c);
*TR; DC; PRINT x1, x2; RUN; *END;
```

Všimněte si, že DYNAST explicitní rovnice pro b a c automaticky předřadil rovnicím pro x_1 a x_2. Číselné hodnoty pro b a c jsme ovšem mohli dosadit přímo do výrazů pro x_1 a x_2, čímž by první dvě explicitní rovnice odpadly. Příkazy v posledním řádku jsou určeny pro nelineární analýzu této úlohy (kapitola 10).

Příklad. Data pro vyhodnocení proměnné $f = A(t)\sin 2\pi\,\omega t$ s amplitudou $A(t) = 200 \bullet e^{\zeta t}$, kde $\omega = 5$ a $\zeta = -4.46$ mají podobu

```
*SYSTEM;
zeta = -4.46; A = 200*exp(zeta*time);
omega = 5;    f = A*sin(2pi*omega*time);
*TR; tr -.5 .5; PRINT (201) A, f; RUN; *END;
```

4.3 Zadávání implicitních rovnic



Zadávání implicitních rovnic.

Postup pro zadávání implicitních rovnic se od postupu pro zadávání explicitních rovnic pomocí dialogu liší v tom, že ve 4. kroku si v seznamu Type: zvolíte Implicit. Tím se vám v poli Left-hand-side objeví znaky `0 =`, takže můžete rovnou přejít ke kroku 5.

Příklad. Předcházející obrázek ilustruje zadání druhé implicitní rovnice ze soustavy (4.6).

4.4 Text nelineárních rovnic

Příkaz pro **explicitní rovnici** má tvar

proměnná = *výraz* ;

proměnná je uživatelský identifikátor vyhodnocované proměnné nebo parametru

výraz je numerická konstanta nebo symbolický výraz. Ve druhém případě musí dané explicitní rovnici předcházet explicitní rovnice určující numerické hodnoty argumentů symbolického výrazu.

Příkazy pro jednotlivé **implicitní rovnice** jsou ve tvaru

`0 =` *výraz*;

`0 =` je řetězec uvádějící příkaz

výraz je symbolický výraz. Numerická hodnota parametrů tohoto symbolického výrazu musí být určena vyhodnocením nebo řešením rovnic, které předcházejí zadávané soustavě.

Zadání implicitních rovnic musí navíc předcházet deklarace všech řešených proměnných v podobě příkazu

SYSVAR *řešená* [, *řešená*...];

řešená je uživatelský identifikátor řešené proměnné. Identifikátor nezávisle proměnné *t* je `TIME`. Derivace řešené proměnné vzhledem k nezávisle proměnné *t* se v tomto výrazu označují jako `VD.`*řešená*.

Příklad. Data pro řešení kvadratické rovnice (4.1) budou mít podobu:

```
*SYSTEM;
b = 3;
c = -4;
SYSVAR x;
0 = x**2 + b*x + c;
*TR; DC; PRINT x; RUN; *END;
```

To, které ze dvou možných řešení x_1 a x_2 DYNAST nalezne, můžeme ovlivnit volbou počátečního odhadu řešení (kapitola 10).

Příklad. Soustavu dvou nelineárních algebraických rovnic

$$0.5\sin(u \bullet v) - \frac{v}{4\pi} - 0.5u = 0 \tag{4.7}$$

$$\left(1 - \frac{1}{4\pi}\right)\left(e^{2u} - e\right) + e \bullet \left(\frac{3v}{\pi} - 2u\right) = 0 \tag{4.8}$$

lze pro řešení u a v zadat jako

```
*SYSTEM;
SYSVAR u, v;
0 = .5*sin(u*v) - v/4pi - .5*u;
0 = (1 - 1/4pi)*(exp(2*u) - exp(1)) + exp(1)*(3*v/1pi - 2*u);
*TR; DC; PRINT u, v; RUN; *END;
```

Příklad. Řešení Besselovy rovnice (4.5) v intervalu $0 \le t \le 10$ jednak pro $k = 1$ a jednak pro $k = 2$ za předpokladu, že $y(0) = 0$ a $\dot{y}(0) = 0.5$ lze zadat příkazy

```
*SYSTEM;
k = 1;
SYSVAR y, yD;
0 = yD - VD.y;
0 = time**2*VD.yD + time*yD + (time**2 - k**2)*y;
*TR; TR 0 10; INIT yD=.5; PRINT y; RUN HOLD;
MODIFY k=2; RUN; *END;
```

Příklad. Van der Polovu nelineární diferenciální rovnici

$$\ddot{x} - \varepsilon(1 - \dot{x}^2) + x = 0 \tag{4.9}$$

kde $x(0) = 0$ a $\dot{x}(0) = 1$, lze vyřešit pro $\varepsilon = 0.01$ a $\varepsilon = 10$ v intervalu $0 \le t \le 20$ pomocí dat

```
*SYSTEM;
SYSVAR x, Dx;
e = 0.01;
0 = Dx - VD.x;
0 = VD.Dx + x - e*(1 - Dx**2)*Dx;
*TR; TR 0 20;
PRINT x, Dx; INIT Dx = 1; RUN HOLD;
MODIFY e=10; RUN; *END;
```

Všimněte si, že v zápisech nelineárních rovnic je nezávisle proměnná t zadána jako `time` a operátor numerického derivování d/dt je zadán řetězcem znaků `VD.`

Kapitola 5

Fyzikální schémata

Obsah kapitoly

Zatímco běžně známá bloková schémata graficky zobrazují soustavy rovnic, fyzikální schémata zobrazují energetické interakce mezi částmi reálných dynamických soustav. Přednost fyzikálních schémat spočívá v tom, že je lze konstruovat, aniž by bylo nutné formulovat nějaké rovnice. Pro fyzikální schémata sestavená pomocí grafického editoru DYNAST si příslušné rovnice zformuluje a vyřeší automaticky sám. Tato kapitola vysvětluje, na jakých principech je modelování dynamických soustav s použitím fyzikálních schémat založeno. V následujících kapitolách pak najdete návody jak schémata sestavovat a analyzovat.

5.1 Princip mnohopólového modelování

5.1.1 Zjednodušující předpoklady

Chování reálné dynamické soustavy je dáno tokem energie a hmoty mezi soustavou a jejím okolím i mezi jednotlivými částmi soustavy. Uvnitř jednotlivých částí energie i hmota může měnit svou formu, nebo zde může být akumulována a později vrácena zpět do soustavy. Energie však může být rovněž rozptylována mimo soustavu v podobě tepla. Rozdělení prostoru mezi soustavu a její okolí, stejně tak jako rozdělení soustavy na její části, je věcí naší volby závisející na tom, které dynamické jevy chceme vyšetřovat.

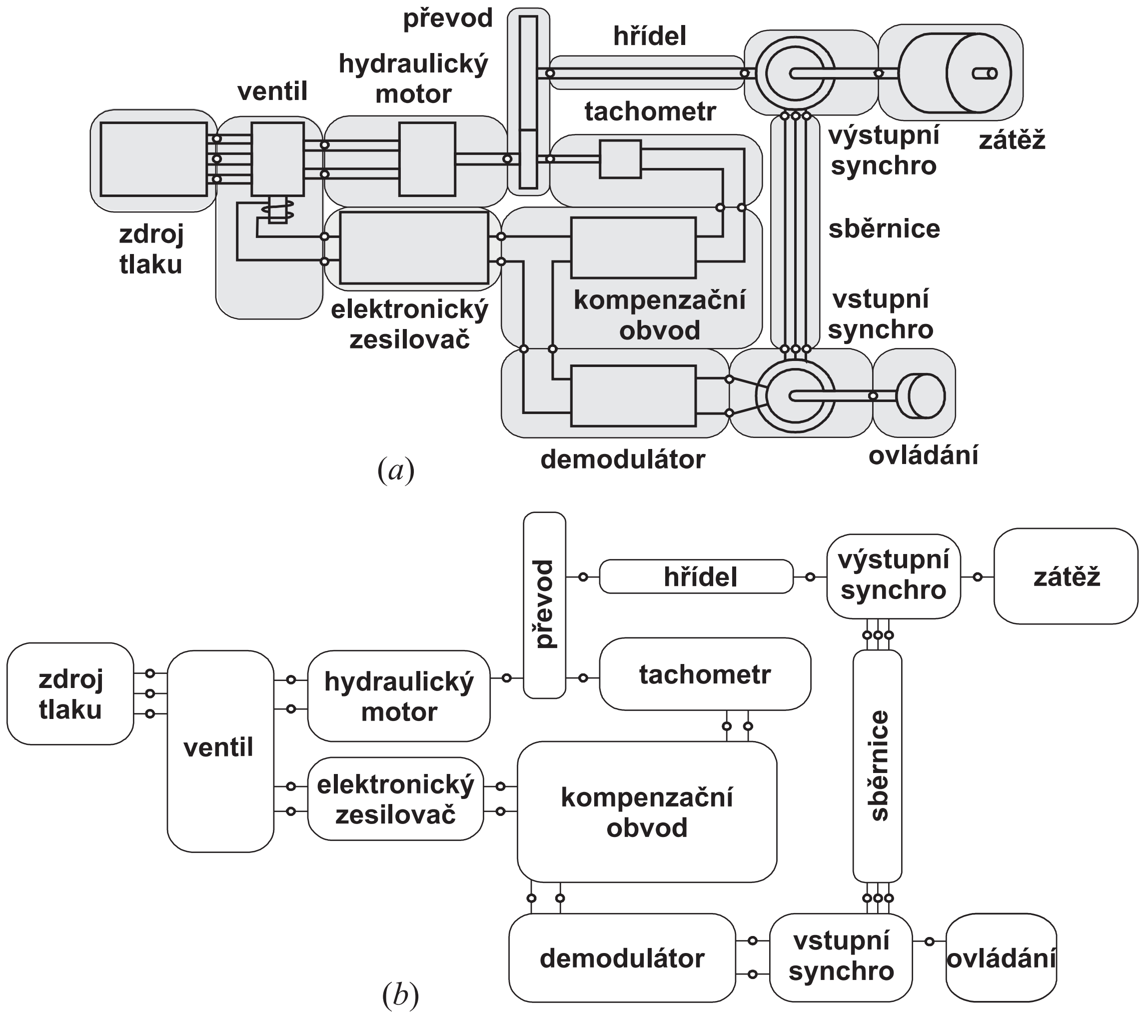
Kdybychom chtěli přesně vyšetřit tok energie a hmoty do určité části soustavy, museli bychom ji od soustavy oddělit myšlenou uzavřenou plochou a pak sčítat infinitesimální toky podél celé této **interakční obálky** dané části. (Obdobnému účelu slouží např. pojem kontrolní plochy v termodynamice nebo pojem uvolňování těles v mechanice.)

Při vyšetřování chování reálných dynamických soustav v praxi se však velmi často uchylujeme k následujícím zjednodušujícím předpokladům:

- K toku energie nebo hmoty do každé části soustavy dochází pouze v omezeném počtu oblastí její interakční obálky. Jsou plochy příčných řezů elektrických vodičů, potrubí s tekutinou, hřídelů apod. procházejících obálkou a umožňujících tok energie nebo hmoty do nebo z části.

- Tok energie nebo hmoty každou takovou oblastí lze aproximovat pomocí dvojice navzájem komplementárních **výkonových veličin**, jejichž součin má fyzikální rozměr výkonu. Přitom se uvažují střední hodnoty těchto veličin v oblasti interakce.

Příklady dvojic výkonových fyzikálních veličin uvádí tab. **??**. V dalším budeme uvažovat pouze tok energie, neboť tok hmoty $\dot{m} = dm/dt$ se obvykle převádí na objemový průtok tekutiny $Q = \dot{m}/\rho$, kde ρ je střední hodnota specifické hmotnosti protékající hmoty.



Příklad. Na obr. *a* je znázorněna reálná soustava s částmi využívajícími současně jevy z několika různých energetických domén (mechanické, elektrické a tekutinové). Jednotlivé části soustavy jsou od sebe odděleny interakčními obálkami. Tyto plochy jsou voleny tak, aby se navzájem dotýkaly v oblastech předpokládaných vzájemných energetických interakcí, které jsou označeny malými kroužky.

5.1.2 Mnohopólové modely dynamických soustav

Z uvedených zjednodušujících předpokladů vychází mnohopólové modelování. **Mnohopóly** jsou modely individuálních reálných částí charakterizující jejich dynamické chování. Oblasti, kde energie protéká interakční obálkou části, reprezentují **póly mnohopólu**, modelujícího chování části. Mnohopól má tolik pólů, kolik dvojic výkonových veličin je potřeba k aproximaci toku energie příslušnou interakční obálkou. Graficky se mnohopólové modely obvykle znázorňují grafickými značkami modelovaných reálných částí, v některých případech standardizovanými. Z obrysů značek vyčnívají úsečky představující jednotlivé póly.

V mnohopólovém modelu celé soustavy místa vzájemných energetických interakcí reálných částí představují **uzly mnohopólového modelu** soustavy. Graficky mnohopólový model soustavy zobrazuje jeho **fyzikální schéma**. Podle toho, s kterými póly jsou jednotlivé uzly ve schématu propojeny čarami je patrno, mezi kterými reálnými částmi a jakým způsobem dochází k interakci. Na uvedené spojovací čáry můžeme pohlížet jako na ideální spoje, které přenáší energii, aniž by přitom docházelo k její ztrátě, k akumulaci nebo k jakékoliv přeměně.

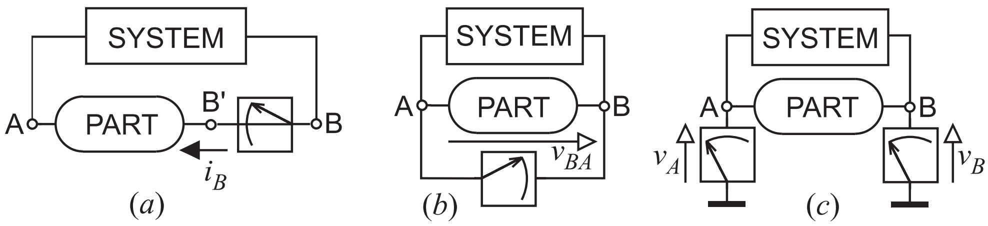
Příklad. Na obr. *b* uvedeném výše je naznačen mnohopólový model soustavy z obr. *a*. V něm jsou mnohopóly modelující jednotlivé části vyznačeny uzavřenými křivkami původně znázorňujícími interakční obálky reálných částí. Kroužky původně představující oblasti vzájemných interakcí zde označují uzly schématu s nimiž jsou propojeny póly mnohopólů.

Obr. *a* zobrazuje **geometrii** soustavy, neboť po jeho okótování bychom z něho mohli odečítat rozměry, vzdálenosti a polohy částí. Obr. *b* zobrazuje **topologii** soustavy, z něhož sice žádné geometrické údaje odečíst nelze, ale velmi názornou formou naznačuje vzájemné interakce částí ovlivňující dynamiku celé soustavy.

5.2 Veličiny mnohopólových modelů

5.2.1 Výkonové a energetické veličiny

Jedna z veličin v každé dvojici výkonových veličin v tab. **??** představuje tzv. **průtokovou veličinu** a druhá **spádovou veličinu**. Tabulka rovněž uvádí odpovídající dvojice tzv. **energetických veličin**, které lze odvodit integrací výkonových veličin podle času. Prázdné místo v tabulce odpovídá veličině, jejíž existence nebyla pozorována.



(*a*) (*b*) (*c*)

Průtokové a spádové veličiny se navzájem liší způsobem jejich přímého měření. Chceme-li měřit průtok některým pólem určité části soustavy, pól musíme v místě měření nejprve odpojit od uzlu soustavy a pak jej znovu připojit prostřednictvím příslušného měřícího přístroje, jak ukazuje obr. *a*. Naproti tomu měření spádové veličiny, znázorněné na obr. *b*, se provádí přístrojem zapojeným mezi dvěma různými uzly soustavy, aniž by bylo nutné soustavu rozpojovat.

Jeden z uzlů soustavy je vždy považován za vztažný a jeho spádová veličina za nulovou. Je-li **spádová veličina uzlu** měřena vzhledem ke vztažnému uzlu, což ilustruje obr. *c*, jedná se o **absolutní spádovou veličinu**, jinak jde o měření **spádové veličiny relativní**. Vztažný uzel v elektrické doméně obvykle reprezentuje nulové napětí uzemnění, v tekutinové doméně tlak volného prostředí a v mechanické doméně rychlost vztažného rámu.

Tabulka 5.1: Příklady vztažných uzlů pro měření absolutních spádových veličin

ENERGETICKÁ DOMÉNA	VZTAŽNÝ UZEL	ZNAČKA
elektrická	elektrické uzemnění	
tekutinová či akustická	volná atmosféra	
mechanická	vztažný rám	

5.2.2 Orientace veličin

Hodnota veličiny je kladná nebo záporná v závislosti na její polaritě vzhledem k její předpokládané kladné orientaci. Je-li polarita veličiny opačná vzhledem k této orientaci, hodnota veličiny je považována za zápornou. Předpokládanou kladnou orientaci veličin budeme v případě potřeby označovat pomocí šipek, které jsme již použili v obrázku uvedeném výše.

Orientace spádových veličin

- Předpokládanou kladnou orientaci spádových veličin budeme vždy vyznačovat šipkami s prázdným hrotem.
- Tyto šipky budou vždy směřovat z místa o menší do místa o větší předpokládané kladné hodnotě příslušné absolutní spádové veličiny.

Orientace průtokových veličin

- Předpokládanou kladnou orientaci průtokových veličin budeme vždy vyznačovat šipkami s plným hrotem.
- Tyto šipky budou vždy ukazovat předpokládaný kladný směr pohybu příslušného média.

Předpokládaný kladný směr pohybu se týká v případě elektrického proudu pohybu kladně nabitých částic, v případě objemového průtoku pohybu částic tekutiny, v případě síly pohybu tělesa způsobeného jejím vlivem a obdobně v případě momentu síly rotace tělesa způsobené vlivem tohoto momentu.

Příkon mnohopólu

Celkový příkon n-pólu lze definovat jako

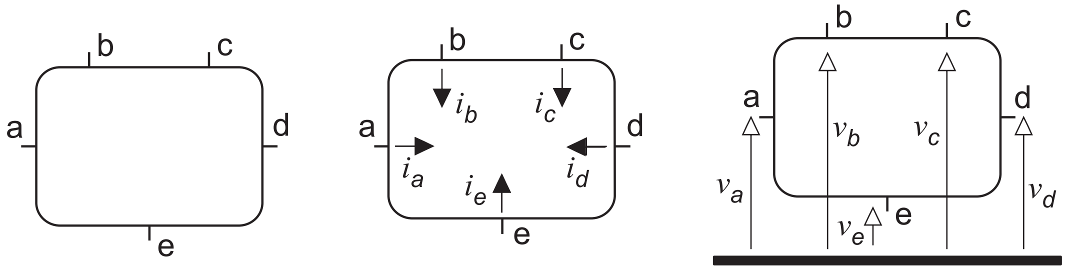
$$P(t) = \sum_{j=1}^{n} i_j(t).v_j(t) \tag{5.1}$$

kde i_j je průtoková a v_j absolutní spádová veličina j-tého pólu. Předpokládáme tedy, že příkon mnohopólu je kladný, pokud v něm je v daném okamžiku energie spotřebovávána (tj. měněna v teplo) nebo akumulována. Pokud mnohopól energii do soustavy naopak dodává, jeho příkon je záporný.

5.3 Vztahy mnohopólových modelů soustav

5.3.1 Postuláty kontinuity a kompatibility

Mnohopólové modelování je rovněž založeno na aproximačním předpokladu, že veličiny účastnící se vzájemné energetické interakce reálných částí jsou navzájem vázány postuláty kontinuity a kompatibility. Interpretaci těchto postulátů v podobě fyzikálních zákonů uplatňujících se v jednotlivých energetických doménách ukazuje tab. 5.2. Uvedené postuláty nelze dokázat, ale v oboru klasické nerelativistické fyziky nebyly pozorovány žádné kvazistatické jevy, které by jim odporovaly.



(*a*) (*b*) (*c*)

Tabulka 5.2: Postuláty kontinuity a kompatibility.

ENERGETICKÁ DOMÉNA	POSTULÁT KONTINUITY	POSTULÁT KOMPATIBILITY
elektrická	Kirchhoffův zákon proudů	Kirchhoffův zákon napětí
magnetická	kontinuita magnet. toku	Ampérův zákon smyček
tekutinová a akustická	princip zachování hmoty	princip skládání tlaků
mechanická přímočará	dynamická rovnováha sil	princip skládání pohybů
mechanická rotační	dyn. rovnováha momentů sil	princip skládání rot. pohybů

Podle postulátu kontinuity platí vztah

$$\sum_k i_k = 0 \tag{5.2}$$

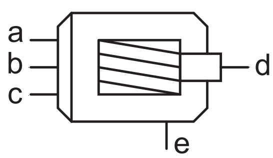
kde i_k jsou průtokové veličiny 'vtékající' do téhož mnohopólu. Jelikož uzly mnohopólového modelu soustavy můžeme považovat za degenerované mnohopóly je zřejmé, že vztah (5.2) splňují i průtokové veličiny 'vtékající' do téhož uzlu.

Podle postulátu kompatibility platí

$$v_{jk} = v_j - v_k \tag{5.3}$$

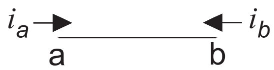
kde v_j a v_k jsou absolutní spádové veličiny dvou pólů mnohopólu a v_{jk} je relativní spádová veličina mezi těmito póly.

Postuláty obecně nelze považovat za platné pro všechny veličiny pólů téhož mnohopólu současně. Konfigurace některých mnohopólů nebo soustav je taková, že postuláty platí pro veličiny jejich dílčích sekcí.



Příklad. V případě mnohopólu modelujícího třífázový indukční motor na obrázku, musíme každý z postulátů vyjádřit zvlášť pro póly a, b a c jeho elektrické sekce a zvlášť pro póly d a e jeho mechanické sekce. V tomto případě je postulát kontinuity vyjádřen dvěma vztahy $i_a + i_b + i_c = 0$ a $i_d + i_e = 0$. Podle postulátu kompatibility např. $v_{ba} = v_b - v_a$ nebo $v_{ed} = v_e - v_d$, nikoliv však např. $v_{da} = v_d - v_a$.

Propojení určitých pólů ideálními spoji s některým uzlem v mnohopólovém schématu naznačuje způsob, jakým dochází mezi modelovanými částmi k energetické interakci. Ideální spoje symbolizují okamžitý přenos energie bez jakékoliv její přeměny nebo akumulace, který může probíhat oběma směry.



Postuláty kontinuity a kompatibility platí samozřejmě i pro ideální spoje. Tak pro absolutní spádové veličiny v_a a v_b na koncích a a b spoje uvedeného na obrázku v souhlase s (5.3) platí $v_a(t) = v_b(t)$, neboť $v_{ab} = 0$. Podobně pro průtokové veličiny i_a a i_b podle (5.2) v tomto případě platí $i_a(t) + i_b(t) = 0$. Jinými slovy: "co do ideálního spoje na jednom jeho konci přiteče, to z něj na druhém konci v témže okamžiku odteče". V nemechanických doménách tedy ideální spoje představují ideální elektrické vodiče, ideální potrubí s ideální tekutinou apod.

V mechanické doméně ideální spoj představuje nehmotnou tuhou tyč o konstantní délce, která přenáší sílu z jednoho konce na druhý beze změny a oba její konce mají shodnou rychlost. Délka této nehmotné tyče však není nijak definována.

5.3.2 Konstituční vztahy modelů částí soustav

Jak jsme uvedli, mnohopólový způsob modelování nám umožňuje zvlášť popsat vzájemné energetické interakce částí soustavy a zvlášť akumulaci nebo přeměnu energie v každé z částí. Mnohopól modelující určitou část je z matematického hlediska charakterizován **konstitučními vztahy** udávajícími vzájemnou závislost mezi jeho spádovými a průtokovými veličinami. Zatímco vztahy popisující energetické interakce mnohopólů v podobě postulátů kontinuity a kompatibility si DYNAST na základě graficky zadaného fyzikálního schématu odvodí sám, volba modelů jednotlivých částí je na uživatelích.

Mnohopólový způsob modelování použitý v DYNASTu dovoluje

- určitý model pro danou část vypracovat jednou provždy, uložit jej do knihovny modelů v paměti počítače a opakovaně jej pak využívat s různými hodnotami parametrů

- modely částí z různých disciplin, např. z elektroniky, elektrických strojů, hydrauliky apod. vypracovávat příslušnými specialisty bez závislosti jednoho na druhém

- v tomtéž schématu použít mnohopólové modely popsané různým způsobem

- snadno provádět výměnu modelu určité části za jiný bez zásahu do zbytku schématu soustavy

Pro jednu a tu samou reálnou část volíme různé typy modelů v závislosti na tom

- jaké jevy v chování části nás zajímají

- s jakou přesností tyto jevy potřebujeme znát

Tabulka 5.3: Modely podle velikosti změn veličin.

ZMĚNY	MODELY	ROVNICE
malé	lineární	s konstantními koeficienty
velké	nelineární	s koeficienty závislými na průběhu veličin
malé i velké	parametrické	s koeficienty závislými navíc na čase

- pro jak dlouhý časový interval má model platit
- k jak velkým změnám veličin v části v uvedeném intervalu dochází
- jak jsou tyto změny rychlé

Tab. 5.3 a 5.4 uvádí různé typy modelů a jejich konstitučních vztahů v podobě rovnic s přihlédnutím k posledním dvěma kritériím.

I když je archiv mnohopólových modelů DYNASTu bohatý může se stát, že v něm potřebný model pro určitou část nenajdete a musíte si jej vytvořit sami. DYNAST podporuje vytváření uživatelských modelů částí včetně příslušných grafických značek a jejich ukládání do archivu.

Při vytváření modelů částí můžete využívat např.

- znalost rozměrů a materiálových vlastností částí
- hypotézu o průběhu fyzikálních dějů v částech
- analýzu vnitřní konfigurace částí
- naměřené charakteristiky částí

Tabulka 5.4: Modely podle rychlosti změn veličin.

ZMĚNY	MODELY	ROVNICE
pomalé	statické	algebraické
rychlé	dynamické se soustředěnými parametry	obyčejné diferenciální
velmi rychlé	dynamické s rozprostřenými parametry	parciální diferenciální

V technické praxi se různé způsoby **identifikace modelů** částí často kombinují. Např. parametry vztahů vyplývajících z určité hypotézy se následně upřesní na základě porovnání hypotetických charakteristik s charakteristikami naměřenými na reálné části.

DYNAST umožňuje mnohopólové modely částí zadávat v podobě **submodelů** charakterizovaných některým z následujících popisů nebo jejich kombinací:

- mnohopólového modelu vnitřní konfigurace části
- rovnic vyjadřujících konstituční vztahy částí
- tabulek naměřených charakteristik částí

Vhodná volba modelů částí závisí do značné míry na kvalifikaci a zkušenostech jejich uživatele. Čím je model určité části složitější, tím náročnější a nákladnější je jeho identifikace. Proto se v praxi často postupuje tak, že z počátku se použijí jen jednoduché modely a teprve v další fázi se ty modely částí, které se z hlediska věrohodnosti výsledků projeví jako kritické, postupně zpřesňují.

Kapitola 6

Fyzikální prvky

Obsah kapitoly

Fyzikální prvky tvoří ucelenou stavebnici dvoupólových modelů, z níž lze sestavovat širokou třídu modelů dynamických soustav na základě pouhé inspekce jejich konfigurace. Rovnice potřebné pro analýzu těchto modelů si DYNAST zformuluje sám. Fyzikální prvky mohou být nejen lineární, ale i nelineární a závislé na čase i na nejrůznějších veličinách nebo parametrech modelované soustavy a jejího okolí. V modelech soustav mohou být kombinovány s bloky a rovnicemi.

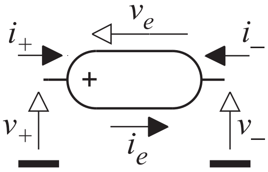
6.1 Veličiny fyzikálních prvků

6.1.1 Příkon fyzikálních prvků

Fyzikální prvky jsou dvojpólové modely reálných částí dynamických soustav. Lze tedy předpokládat, že jejich energetické interakce fyzikálního prvku charakterizuje s dostatečnou přesností **příkon prvku**

$$P(t) = i_e(t) \cdot v_e(t), \tag{6.1}$$

kde $i_e(t)$ je **průtoková veličina prvku** a $v_e(t)$ je **spádová veličina prvku**. Příklady těchto veličin v několika energetických doménách byly uvedeny v tab. **??**.



Na obrázku je schématická značka obecného doménově nezávislého fyzikálního prvku. Úsečky vyčnívající z oválu – **vývody značky** – představují póly znázorňovaného prvku. **Polarita prvku** je dána znaménkem $+$ v blízkosti jednoho z vývodů. Odpovídající pól budeme označovat jako $+$pól, zatímco na druhý z obou pólů se budeme odkazovat jako na $-$pól. Absolutní spádové veličiny v_+ a v_- jsou **spádové veličiny pólů prvku**, i_+ a i_- jsou **průtokové**

veličiny pólů prvku. Šipky na obrázku ukazují předpokládanou kladnou orientaci těchto veličin.

Příklady. Na levé straně tab. 6.1 jsou velmi jednoduché dynamické soustavy z různých energetických domén. Elektrickou soustavu tvoří obvod RLC napájený elektronicky řízeným zdrojem proudu. Pumpa v hydraulické soustavě působí jako zdroj objemového průtoku kapaliny čerpané z rezervoáru do otevřené nádrže. Kapalina se vrací zpět do rezervoáru potrubím s tryskou na konci. K přímočarému pohybu mechanické soustavy dochází vlivem gravitační síly působící na závaží zavěšené na laně. Lanem je vlečen prostřednictvím kladky hydraulický tlumič. Rotační mechanickou soustavu tvoří setrvačník poháněný spalovacím motorem a spojený hřídelem s ventilátorem.

S určitou přibližností můžeme jednotlivé části znázorněných soustav modelovat jako dvojpóly. Místa předpokládaných energetických interakcí mezi těmito dvojpóly jsou ve všech soustavách označena písmeny M, N a 0. Poslední z nich současně v každé soustavě představuje referenci příslušných spádových veličin.

6.1.2 Orientace veličin prvků

Abychom co nejvíce zjednodušili určování znamének u hodnot veličin fyzikálních prvků, zavedeme pojem **spádové veličiny prvku** v_e a **průtokové veličiny prvku** i_e. S využitím postulátů kontinuity a kompatibility zavedeme následující dohodu určující jednoznačnou souvislost mezi polaritou prvku a orientací jeho veličin:

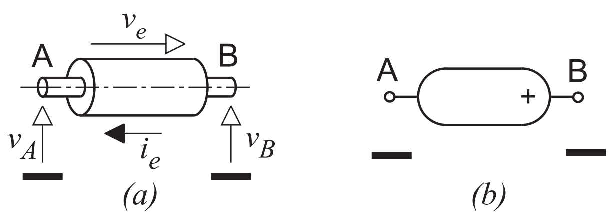
$$v_e = v_+ - v_- \qquad i_e = i_+ = -i_-$$

Jak naznačuje obrázek s obecným fyzikálním prvkem, šipka pro spádovou veličinu prvku v_e bude vždy směřovat od $-$ pólu prvku k jeho $+$ pólu, kdežto šipka s plným hrotem pro průtokovou veličinu prvku i_e bude vždy orientována opačným směrem. Cílem uvedené dohody však je, abychom tyto šipky nemuseli vůbec používat.

Všimněte si, že pokud mají hodnoty spádové a průtokové veličiny prvku shodné znaménko, příkon prvku (6.1) je kladný a modelovaná část tudíž odebírá energii ze soustavy v níž působí. V opačném případě energii do soustavy dodává.

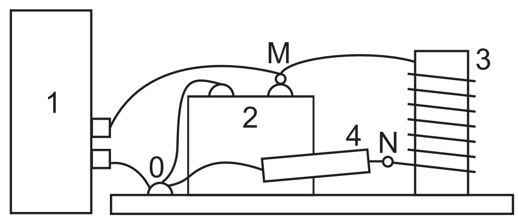
Orientace nemechanických veličin

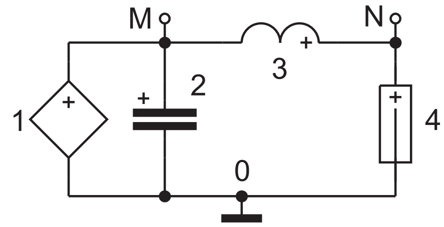
Na obr. *a* je naznačena reálná část, jejíž vnější energetické interakce jsou nemechanické povahy. Vtoky energie a a b účastnící se této interakce mohou být představovány např. elektrickými svorkami, vtoky tekutiny apod. Obr. *b* uvádí značku fyzikálního prvku použitého k modelování uvedené části. Z označení vývodů značky je patrno, že +pól prvku reprezentuje vtok reálné části B a -pól koresponduje se vtokem a. Z této volby vyplývá, že spádová veličina prvku v_e v tomto případě představuje relativní spádovou veličinu v_{BA}, tj. spádovou veličinu vtoku B měřenou vzhledem ke vtoku A. Současně je zřejmé, že průtoková veličina prvku i_e odpovídá průtoku média vstupujícího do modelované části vtokem B a vystupujícího z ní vtokem A.



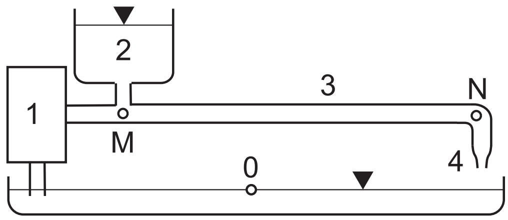
Tabulka 6.1: Příklady jednoduchých dynamických soustav a jejich fyzikálních schémat.

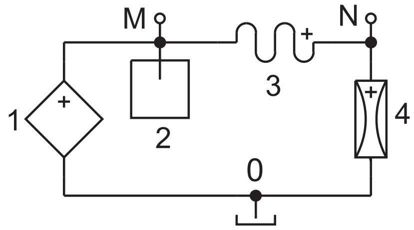
REÁLNÉ SOUSTAVY	MODELY SOUSTAV



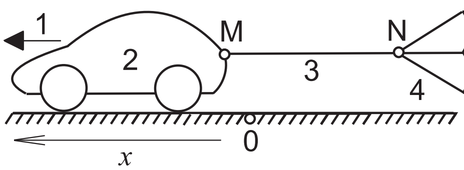


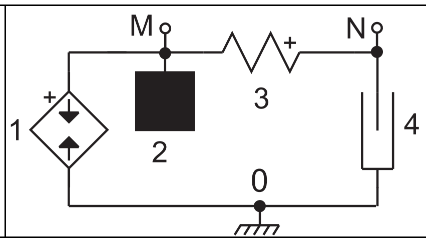
Část	Reálné části	Fyzikální prvky
1	elektronický zdroj	zdroj elektrického proudu
2	elektrický kondenzátor	elektrický kapacitor
3	cívka	elektrický induktor
4	elektrický rezistor	elektrický konduktor



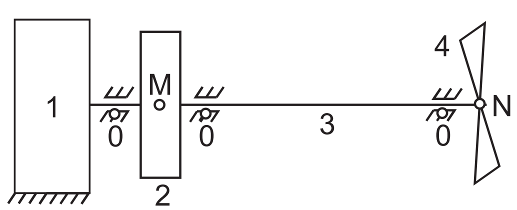


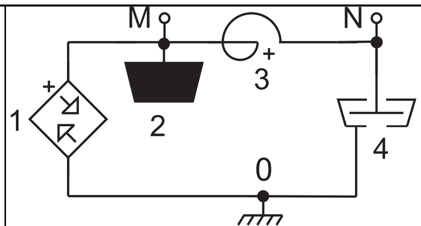
Část	Reálné části	Fyzikální prvky
1	pumpa poháněná motorem	zdroj objemového průtoku
2	otevřená nádrž	tekutinový capacitor
3	dlouhé potrubí	tekutinový induktor
4	tryska omezující průtok	tekutinový konduktor





Část	Reálné části	Fyzikální prvky
1	síla motoru	zdroj síly
2	hmota auta	inertor
3	dlouhé lano	pružina
4	padák	tlumič



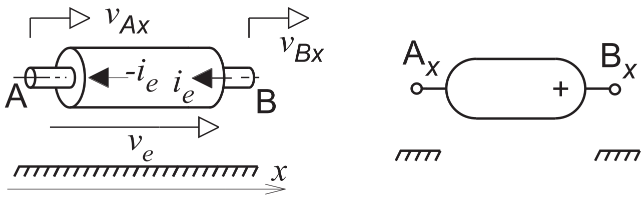


Část	Reálné části	Fyzikální prvky
1	motor	zdroj momentu síly
2	setrvačník	rotační inertor
3	dlouhý hřídel	torzní pružina
4	ventilátor	rotační tlumič

Orientace mechanických veličin

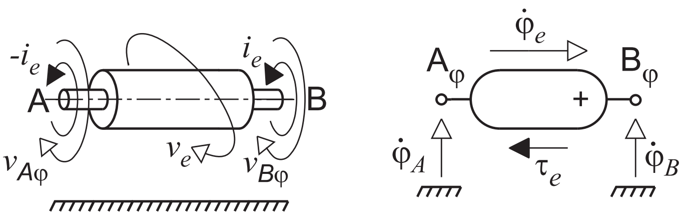
Obr. *a* znázorňuje mechanickou část jejíž oba vtoky energie A a B jsou v přímočarém pohybu rovnoběžném s osou *x* narýsovanou na vztažném rámu. V tomto případě je výhodné fyzikální prvek vzhledem ke vtokům reálné části orientovat tak, aby kladná hodnota spádové veličiny prvku v_e znamenala, že vzájemná vzdálenost vtoků A a B se zvětšuje a záporná hodnota, že se tato vzdálenost zmenšuje.

Z obrázku je dále patrno, že při takovéto volbě orientace prvku vzhledem k souřadné ose průtoková veličina prvku i_e představuje reakční sílu vyvažující ve vtoku odpovídajícím $+$pólu působení vnější síly, která se snaží oba vtoky reálné části oddálit. Kladná hodnota i_e potom znamená, že část je napínána, kdežto záporná hodnota indikuje stlačování části. Zkuste pro zajímavost zjistit, jak by se vztahy mezi veličinami části a prvku změnily, kdyby jeho orientace vzhledem k ose *x* byla zvolena opačně.



(a) *(b)*

Další obrázek uvádí příklad reálné části se dvěma vtoky mechanické energie rotujícími kolem pevné osy. V tomto případě je potřeba nejprve zvolit souřadný systém pevně spojený se vztažným rámem umožňující odečítání úhlu pootočení obou vtoků. I zde je výhodné fyzikální prvek modelující část orientovat vždy tak, aby kladná hodnota úhlové rychlosti prvku $\dot{\varphi}_e$ odpovídala zvětšování a záporná hodnota zmenšování úhlu mezi vtoky části. Potom spádová veličina prvku představuje relativní úhlovou rychlost $\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_a$ a průtoková veličina prvku i_e odpovídá reakci vtoku b na působení vnějšího momentu síly *M*.



(a) *(b)*

6.2 Typy fyzikálních prvků

6.2.1 Prvky rozptylující nebo akumulující energii

Tab. **??** uvádí grafické značky užívané ve schématech zadávaných do DYNASTu pro fyzikální prvky, které modelují akumulaci nebo ztráty energie v dynamických soustavách. Značka pro magnetické induktory v tabulce chybí, neboť odpovídající reálný prvek není znám. Není zde uvedena ani značka pro mechanický rezistor, neboť se tento pojem nevžil.

Fyzikální prvky jsou považovány za **ryzí modely** v tom smyslu, že reprezentují specifické fyzikální jevy charakterizované jednoduchými **konstitučními vztahy**, jež jsou uvedeny v tabulce **??** spolu se značkami. Fyzikální podstatu parametru *p* vystupujícího v konstitučních vztazích prvků různého typu a jejich fyzikální rozměr uvádí tab. **??**.

Ryzí konduktory, rezistory a tlumiče modelují rozptyl energie, tj. její přeměnu na teplo. Tuto energii není možné získat zpět a vrátit do dynamických soustav. Ryzí kapacitory a inertory modelují akumulaci energie vlivem časové změny příslušné spádové veličiny. Inertory tak reprezentují akumulaci inerciální energie v důsledku buď přímočarého nebo rotačního pohybu hmoty. Ryzí induktory a pružiny modelují akumulaci energie vlivem časové změny příslušné průtokové veličiny. Energie akumulovaná v ryzích kapacitorech, inertorech, induktorech a pružinách z nich může být kdykoliv získána zpět.

Všimněte si, že u nesymetrických značek prvků znak $+$ je pro zjednodušení vypuštěn. Předpokládá se ale, že $+$pól odpovídá tomu vývodu značky, který je v tab. **??** uveden v horní poloze. U značek tekutinových a akustických kapacitorů stejně jako u značek přímočarých a rotačních inertorů jeden vývod v zájmu zjednodušení schémat dokonce zcela chybí. Odpovídající pól sice existuje, ale je skrytý, neboť by příslušný vývod musel být vždy spojován se vztažným uzlem, což ale DYNAST zajišťuje automaticky.

6.2.2 Zdroje energie a příbuzné prvky

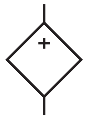
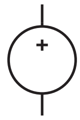
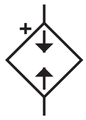
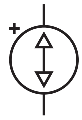
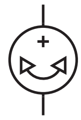
Vedle prvků akumulujících nebo rozptylujících energii potřebujeme rovněž fyzikální prvky představující ryzí zdroje energie. Takovéto prvky se nejčastěji používají k modelování dostatečně mocných zásobníků energie. Rozlišujeme dva krajní případy takových zásobníků podle toho, jestli buď jejich spádovou nebo průtokovou veličinu lze považovat za nezávislou na množství energie ze zásobníku odebírané nebo do něj dodávané. První druh takových zásobníků aproximujeme **nezávislým zdrojem spádové veličiny** a druhý **nezávislým zdrojem průtokové veličiny**. Např. zemská přitažlivost působící na těleso, jehož pohyb zkoumáme, může být zpravidla modelována nezávislým zdrojem průtokové veličiny, tj. gravitační síly. Elektrická rozvodná síť napájející analyzované přístroje je obvykle modelována jako nezávislý zdroj spádové veličiny v podobě síťového napětí.

Značky pro zdroje používané v DYNASTu uvádí tab. 6.2. Konstituční vztah zdroje průtokové veličiny je nezávislý na spádové veličině tohoto zdroje. Obdobně konstituční vztah pro zdroj spádové veličiny specifikuje pouze spádovou veličinu tohoto zdroje.

Stojí za povšimnutí, že zdroj nulové spádové veličiny se chová jako **ideální spoj**, kdežto zdroj nulové průtokové veličiny se chová jako **rozpojený spoj**. Zdrojem nulové spádové veličiny proto lze modelovat **ideální indikátor** nebo **ideální čidlo** komplementární průtokové veličiny. Podobně lze zdrojem nulové průtokové veličiny modelovat ideální indikátory nebo čidla příslušné spádové veličiny. Značky pro ideální indikátory a čidla používané v DYNASTu jsou uvedeny v tab. 6.3.

Příklady. V pravém sloupci tab. 6.1 jsou uvedena fyzikální schémata jednoduchých soustav z pravého sloupce tabulky. Uzly schémat jsou označeny písmeny M a N shodně s označením odpovídajících interakčních míst v obrázcích reálných soustav. Vztažný uzel je označen číslicí 0. V každém z uvedených příkladů se předpokládá, že předmětem analýzy je dynamické chování soustavy složené z částí č. 2, 3 a 4. Části č. 1 jsou považovány za okolí soustav a jsou proto modelovány zdroji energie. Každá z částí soustav je nahrazena některým fyzikálním prvkem z tab. **??**. Všimněte si, že např. dlouhé potrubí zde není modelováno ideálním spojem, ale induktorem respektujícím nezanedbatelnou setrvačnost kapaliny v potrubí. Obdobně nezanedbatelné poddajnosti lana a hřídele jsou zde modelovány pružinami. Ještě realističtější model každé z částí by bylo možno vytvořit z několika fyzikálních prvků.

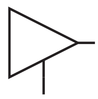
Tabulka 6.2: Zdroje energie.

TYP	J	E
Univerzální	zdroj průtokové veličiny 	zdroj spádové veličiny 
Mechanické translační	zdroj síly 	zdroj rychlosti 
Mechanické rotační	zdroj momentu síly 	zdroj úhlové rychlosti 
Konstituční vztah	$i = p$	$v = p$

Tabulka 6.3: Ideální indikátory a čidla.

TYP	J	E
Univerzální	indikátor spádové veličiny 	indikátor průtokové veličiny 
Konstituční vztah	$i = 0$	$v = 0$

Tabulka 6.4: Ideální spínače a operační zesilovače.

TYP	S	OA
Univerzální	ideální spínač 	ideální operační zesilovač 
Konstituční vztah	je-li p pravdivé, potom $v = 0$, není=li, pak $i = 0$	p je výraz, který OA vynuluje

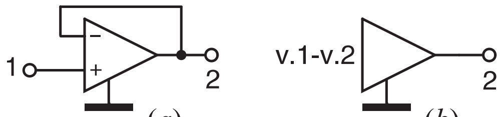
6.2.3 Ideální spínače a operační zesilovače

Tab. 6.4 představuje další dva fyzikální prvky uvažované v programu DYNAST. **Ideální spínač** zůstává otevřen, pokud logický výraz, který charakterizuje jeho parametr p, je nepravdivý. Jakmile se výraz stane pravdivým spínač se zavře a začne se chovat jako ideální spoj.

Příklady. Představme si dva spínače, jeden s parametrem $p = v_{in} > v_{ref}$ a druhý s parametrem $p = time > t_1$. První spínač je řízen spádovou veličinou $p = v_{in}$, druhý časem.

Ideální operační zesilovač je v DYNASTu považován za řízený dvoupólový fyzikální prvek. Jeho parametr p představuje řídící veličinu, která vlivem zapojení tohoto zesilovače do modelu soustavy nabude nulovou hodnotu. Velikost spádové i průtokové veličiny ideálního operačního zesilovače závisí na konfiguraci soustavy, do které je zapojen.

Příklad. Na obr. *a* je reálné zapojení tzv. sledovače napětí, na obr. *b* je model tohoto obvodu využívající ideální operační zesilovač. Elektrická napětí neinvertujícího a invertujícího vstupu reálného operačního zesilovače jsou v_1 a v_2. Potom parametr p ideálního zesilovače může být zadán buď jako $p = v_1 - v_2$, nebo jako $p = v_2 - v_1$. V obou případech bude výsledkem analýzy $p = 0$. Ideální operační zesilovač se v této obvodové konfiguraci bude z hlediska jeho výstupu v soustavě chovat jako ideální zdroj napětí $v_2 = v_1$ schopný dodávat tolik elektrického proudu, kolik si (konzistentní) soustava vyžádá.



(*a*) (*b*)

6.2.4 Obecně proměnné fyzikální prvky

Je-li parameter p v konstitučním vztahu fyzikálního prvku konstantní, jedná se o **prvek ideální**. Fyzikální prvky používané v modelech pro DYNAST však nemusí být jen ideální. Mohou být nelineární, časově závislé nebo řízené veličinami jiných prvků, bloků nebo rovnic. Mohou záviset i na parametrech okolí modelovaných soustav, jako je např. teplota.

Parametr p fyzikálního prvku může být zadán symbolickým výrazem nebo tabulkou hodnot. Symbolický výraz může mít obecně tvar

$$p = f(z_1, z_2, \ldots \dot{z}_1, \dot{z}_2, \ldots, t) \tag{6.2}$$

kde $z_1, z_2, \ldots$ jsou proměnné nebo parametry modelu soustavy a $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \ldots$ jsou jejich derivace podle času.

Příklady. Polovodičová dioda je často modelována nelineárním konduktorem s parametrem $p = I_0[\exp(\theta.v) - 1]$. Na ukázku časově závislého prvku uveďme rezistor s parametrem $p = R_0 \sin \omega t$, kde I_0, θ, R_0 a ω jsou konstanty.

6.2.5 Řízené zdroje

V tab. 6.5 jsou uvedeny čtyři typy **řízených zdrojů**. Tyto zdroje jsou řízeny buď spádovou nebo průtokovou veličinou některého jiného prvku v modelu soustavy. Tabulka rovněž uvádí vžité názvy parametrů těchto zdrojů. Řízené zdroje bývají rovněž označovány jako **závislé zdroje** na rozdíl od nezávislých, tj. neřízených zdrojů (které však mohou být závislé na čase).

Tabulka 6.5: Řízené zdroje.

ŘÍZENÝ ZDROJ	ŘÍDÍCÍ VELIČINA	VZTAH	PARAMETR p
spádové veličiny	spádová	$v = p \cdot v_c$	přenos spádové veličiny
spádové veličiny	průtoková	$v = p \cdot i_c$	přenosový odpor
průtokové veličiny	průtoková	$i = p \cdot i_c$	přenos průtokové veličiny
průtokové veličiny	spádová	$i = p \cdot v_c$	přenosový konduktor

6.2.6 Ekvivalentní náhrady prvků

Všimněte si, že řízené zdroje mohou být rovněž využívány k ekvivalentní náhradě prvků rozptylujících nebo akumulujících energii. Tak např. nelineární a časově závislý rezistor R na obr. *a*, jehož parametr r je funkcí $r = r(i,t)$, může být plnohodnotně nahrazen ekvivalentním zdrojem spádové veličiny E_{eq} s parametrem $e = r(i,v,t) \cdot i$. Podobně nelinepární a časově závislý konduktor G na obr. *b* s parametrem $g = g(v,t)$ lze nahradit zdrojem průtokové veličiny J_{eq} s parametrem $j = g(v,t) \cdot v$.

(*a*) (*b*)

K modelování časově závislých akumulačních dvojpólů však jeden fyzikální prvek nestačí. Uvažme nelineární časově závislý dvojpól charakterizovaný vztahem $q = f(v,t)$, kde q je náboj kapacitoru. Jeho průtokovou veličinu můžeme vyjádřit jako

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{\partial f}{\partial v} \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{\partial f}{\partial t} \tag{6.3}$$

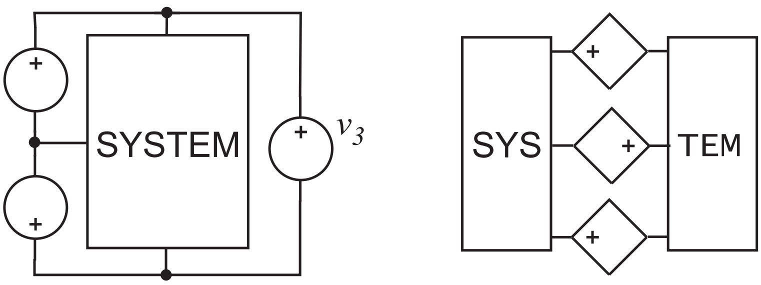
Uvažovaný dvojpól tedy může být modelován dvěma fyzikálními prvky působícími paralelně: kapacitorem C_{eq} s parametrem $c = \partial f / \partial v$ a zdrojem průtokové veličiny J_{eq} s parametrem $j = \partial f / \partial t$, jak ukazuje obr. c.

Podobně můžeme odvodit model nelineárního časově závislého dvojpólu charakterizovaného vztahem $\lambda = f(i,t)$, kde λ je spřažený magnetický tok dvojpólu a jeho spádová veličina $v = d\lambda / dt$. Derivováním dospějeme k tomu, že dvojpól je potřeba modelovat induktorem L_{eq} s parametrem $ll = \partial f / \partial i$ v sérii se zdrojem spádové veličiny E_{eq} o parametru $e = \partial f / \partial t$ podle obr. d. Obdobným způsobem lze ovšem nahrazovat rovněž mechanické prvky.

6.3 Nepřípustné konfigurace fyzikálních prvků

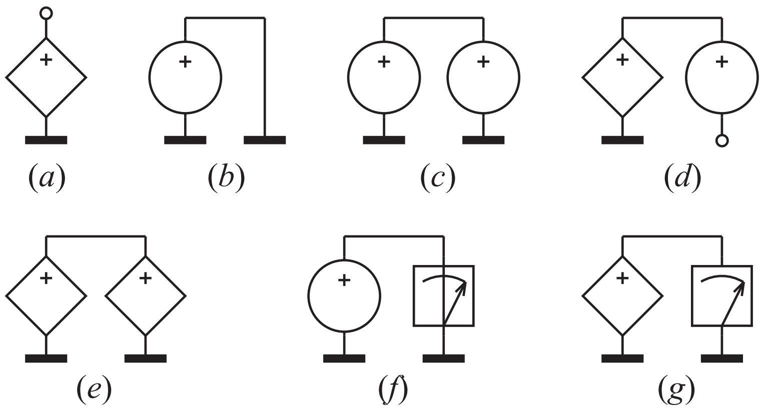
Ideální nezávislé zdroje můžete ve schématech používat velmi pružným způsobem, nikoliv však bez jakýchkoliv omezení. Některá uspořádání zdrojů mohou díky přílišné idealizaci porušovat principy mnohopólového modelování nebo způsobovat singularitu odpovídajících rovnic.

Obr. *a* ukazuje schéma, ve kterém tři nezávislé zdroje spádových veličin vytváří uzavřenou smyčku. Pokud součet spádových veličin podél smyčky není nulový, smyčka porušuje postulát kompatibility a příslušné rovnice nemají řešení. Pokud tento součet nulový je, rovnice jsou singulární. Všimněte si, že ve druhém případě se odstraněním jednoho ze zdrojů ostatní veličiny ve schématu vůbec nezmění. Na obr. *b* je duální případ, kde tři nezávislé zdroje průtoku rozdělují schéma na dvě separátní části. Pokuste se vysvětlit, proč i toto uspořádání je nepřípustné.



(*a*) (*b*)

Příklady. Všimněte si, že všechny konfigurace nezávislých zdrojů uvedené na následujících obrázcích jsou nepřípustné.



Kapitola 7

Bloková schémata

Obsah kapitoly

Bloková schémata jsou grafickým zobrazením soustav rovnic. Jejich použití pro modelování dynamiky reálných soustav předpokládá, že uživatel jak potřebné rovnice, tak i příslušné blokové schéma napřed sám vytvoří a pak teprve zadá do počítače. DYNAST umožňuje pružnější vytváření blokových schémat i jejich robustnější analýzu než třeba Simulink. Mj., vedle explicitních bloků připouští i bloky implicitní a netrpí problémem 'algebraických smyček'. Bloky přitom mohou být kombinovány s mnohopóly i rovnicemi.

7.1 Princip blokových schémat

Každý blok představuje specifický matematický vztah mezi jeho vstupními a výstupními proměnnými. Jednotlivé bloky jsou ve schématu znázorněny svými grafickými značkami. Přenos výstupní proměnné určitého bloku na vstup jiného bloku obvykle graficky znázorňuje spoj propojující výstup prvního bloku se vstupem bloku druhého. Propojením bloků spoji vznikne grafická reprezentace určité soustavy rovnic.

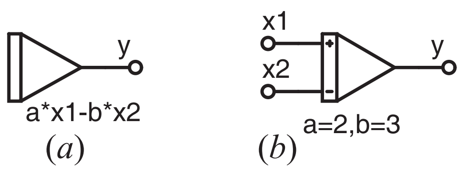
Pro bloková schémata analyzovaná DYNASTem platí tato specifická pravidla:

- Výstup každého bloku je spojen s některým uzlem schématu, přičemž jméno uzlu se shoduje se jménem výstupní proměnné připojeného výstupu.
- Ke kterémukoliv uzlu schématu může být připojen nejvýše jeden výstup.
- K témuž uzlu může být připojen libovolný počet vstupů bloků, přičemž jména vstupních proměnných těchto vstupů jsou shodná se jménem uzlu.
- Vstup a výstup téhož bloku nesmí být připojen ke stejnému uzlu (s vyjímkou základního implicitního bloku).
- Všechny vstupní proměnné musí být definovány (vstupy nemohou zůstat nepřipojeny).

Ve schématech analyzovaných DYNASTem lze zadávat jednak **základní bloky** a jednak **bloky v podobě submodelů**. Rozdíly mezi dvěma druhy bloků udává tab. 7.2.

Tabulka 7.1: Vlastnosti bloků a jejich značek.

ZÁKLADNÍ BLOKY	BLOKY V PODOBĚ SUBMODELŮ
Charakter vztahu bloku je pro každý typ bloku nadefinován přímo v DYNASTu.	Vztah bloku je nadefinován v samostatném souboru.
Značka bloku má jen jeden výstupní vývod.	Značka bloku může mít několik výstupních vývodů.
Značka bloku (kromě přenosového) nemá žádný vstupní vývod.	Značka bloku může mít několik vstupních vývodů.
Při každém použití bloku musí být zadán jeho úplný vztah.	Zadávají se pouze změněné parametry vztahu bloku, nikoliv jeho vztah.



Příklad. Bloky na obrázku se liší se tím, že první z nich je zadán jako základní blok a druhý jako submodel. Avšak oba bloky jsou diferenční integrátory, které mají shodnou funkci charakterizovanou vztahem

$$y = \int_{t_0}^{t} (ax_1 - bx_2)\,dt + y_0$$

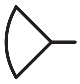
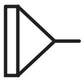
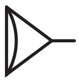
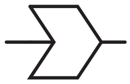
Jak uvádí tab. 7.2, značka většiny základních bloků nemá žádný vstupní vývod. Přitom ale počet vstupních proměnných není u těchto bloků nijak omezen, mohou to být kterékoliv proměnné zadávané soustavy. A to i takové, které nejsou proměnnými některých z uzlů schématu. To poskytuje velkou pružnost z hlediska konfigurace celého schématu. Charakter vztahů základních bloků uvádí tab. 7.2. V dialozích pro zadávání základních bloků se tyto vztahy zapisují do pole Parameter.

Vztahy bloků zadaných v podobě submodelů mohou být daleko rozmanitější, neboť se definují v samostatných souborech. Prostředí DYNASTu umožňuje uživatelům snadno vytvářet nové bloky tohoto druhu včetně jejich značek. Vstupní proměnné jsou však u těchto bloků omezeny na proměnné uzlů schématu.

7.2 Základní bloky

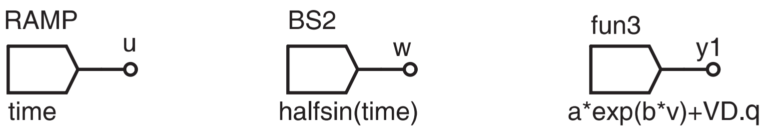
V tab. 7.2 najdete pro základní bloky definované v DYNASTu vztahy mezi jejich vstupními proměnnými $u_i(t)$, $i = 1, 2, \ldots$ a výstupní proměnou $y(t)$.

Tabulka 7.2: Základní bloky

TYP	BLOK	ZNAČKA	VZTAH BLOKU
BS	explicitní blok		$y = f(u_1, u_2, \dots \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, t)$
BO	implicitní blok		$f(y, \dot{y}, u_1, u_2, \dots \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dots, t) = 0$
BI	integrátor		$y = \int_{t_0}^{t} (k_1 u_1 + k_2 u_2 + \dots)\, dt + y_0$
BD	derivační blok		$y = \frac{d}{dt}(k_1 u_1 + k_2 u_2 + \dots)$
BT	přenosový blok		$Y(s) = F(s) \cdot U(s),\ F(s) = K \frac{M(s)}{N(s)}$

Explicitní blok

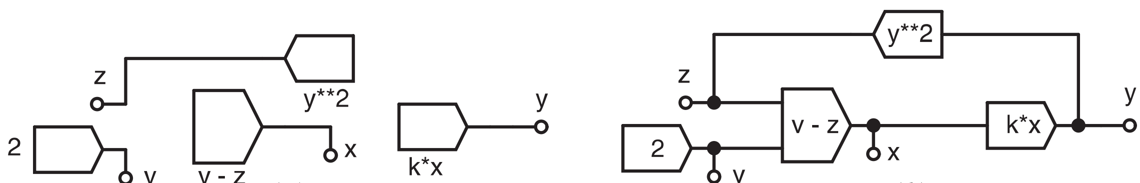
Výstupní proměnná explicitního bloku je definována explicitní rovnicí (4.3). Neznámé proměnné nebo parametry na pravé straně této rovnice představují vstupní proměnné explicitního bloku. Pokud žádná neznámá proměnná nebo parametr v rovnici nevystupuje, potom se takovýto nezávislý explicitní blok chová jako **autonomní zdroj** výstupní proměnné.



(*a*) (*b*) (*c*)

Příklady. Nad značkami explicitních bloků na předchozím obrázku jsou uvedena jména bloků, pod značkami jsou výrazy charakterizující jejich funkci. Blok na obr. *a* působí jako zdroj rampové funkce $u(t) = t$. Blok na obr. *b* je zdrojem periodických půlsinusovek $w(t)$, pokud před zadáním tohoto bloku byla zadána uživatelská složená funkce `halfsin` definovaná v kapitole 3. Za předpokladu, že $q(t)$ je řešená proměnná zadávané dynamické úlohy, blokem na obr. *c* je realizován vztah

$$y_1(t) = ae^{bv} + dq/dt$$



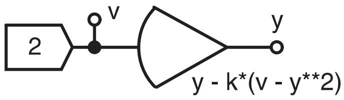
(*a*) (*b*)

Příklad. Blokové schéma na obr. *a* představuje jednoduchou statickou soustavu s kvadratickou zpětnou vazbou charakterizovanou soustavou nelineárních algebraických rovnic. Soustava je buzena v $t = 0$ skokovou funkcí o amplitudě 2 a sestává ze tří základních explicitních bloků (jejich jména jsou zde skryta). Na obr. *b* je totožné blokové schéma, jen pro větší názornost doplněné úsečkami graficky znázorňujícími cestu proměnných od uzlů schématu ke ‘vstupům’ bloků.

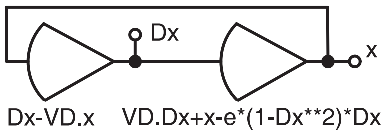
Implicitní blok

Implicitní blok je podstatně univerzálnější než blok explicitní. Představuje jednu z algebro-diferenciálních implicitních rovnic soustavy (4.4). Výstupní proměnná tohoto bloku může záviset nejen na proměnných a parametrech jiných bloků, ale i na jeho vlastní výstupní proměnné. Jeden ze vstupů tohoto bloku tedy může být ‘propojen’ s jeho výstupem (což u bloků ostatních typů dovoleno není).

Příklad. Zpětnovazební kvadratickou soustavu z předchozího příkladu lze charakterizovat jediným implicitním blokem:



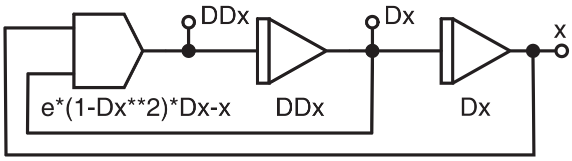
Příklad. Van der Polovu rovnici (4.9) lze zadat blokovým schématem



Integrátor

Integrátory představují explicitní lineární integrální rovnici pro výstupní proměnnou. Počáteční stav této veličiny se nedefinuje v blokovém schématu, ale při zadávání analýzy (kapitoly 10 a 12).

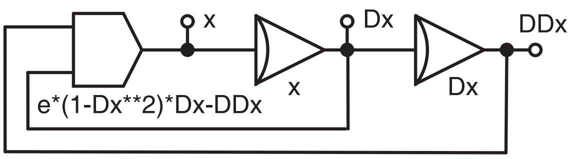
Příklad. Van der Polovu rovnici (4.9) lze zadat následujícím blokovým schématem s integrátory:



Derivační blok

Derivační bloky charakterizují explicitní lineární diferenciální pro výstupní proměnnou.

Příklad. Van der Polovu rovnici (4.9) lze zadat následujícím blokovým schématem s derivačními bloky:



Přenosový blok

Přenosové bloky jsou charakterizovány racionální lomenou přenosovou funkci $F(s)$, jejímž argumentem je proměnná Laplaceovy transformace s, takže

$$F(s) = K\frac{M(s)}{N(s)}$$

kde

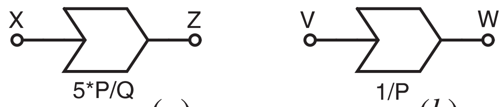
$$M(s) = s^m + a_{m-1}s^{m-1} + \ldots + a_0 \quad \text{a} \quad N(s) = s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \ldots + b_0$$

K je násobná konstanta.

Příklad. Přenosové bloky s přenosy

$$Z(s) = 5\frac{s^2+1}{(s+1-j)(s+1+j)}X(s) \quad \text{a} \quad W(s) = \frac{1}{s^2+1}V(s)$$

mohou ve schématu představovat značky



(a) (b)

za předpokladu, že příslušné polynomy byly zadány jako

```
P /poly/ 1,0,1; Q /root/ 1, [-1,1];
```

7.3 Bloková schémata fyzikálních modelů

Na rozdíl od fyzikálních schémat, bloková schémata neznázorňují konfigurace určitých reálných dynamických soustav. Vývody grafických značek bloků značí vstupy a výstupy bloků, nikoliv póly. Spoje mezi výstupy a vstupy bloků představují jednosměrný přenos jediné matematické proměnné či signálu, zatímco každý spoj propojující póly mnohopólů přenáší dvě výkonové proměnné, a to oběma směry. Proměnné spojů v blokovém schématu nejsou navzájem vázány postuláty kontinuity a kompatibility nebo jinými fyzikálními zákony a vůbec nemusí mít fyzikální rozměr.

Postup, který je nutno podstoupit s tužkou na papíru předtím, než je možné výsledné blokové schéma zadat do počítače k analýze ilustruje následující nenáročný příklad.

Příklad. Pokusme se ze základních bloků sestavit blokové schéma pro analýzu jednoduchých dynamických soustav z tab. 6.1. Umožní nám to následující kroky:

1. Formulace konstitučních vztahů jednotlivých částí soustav v podobě integrálních rovnic

Část	*Fyzikální prvek*	*Konstituční vztah*
1	zdroj průtokové veličiny	$i_1 = J$
2	kapacitor nebo inertor	$v_2 = 1/C\int i_2 \cdot dt$
3	induktor nebo pružina	$i_3 = 1/L\int v_3 \cdot dt$
4	konduktor nebo tlumič	$i_4 = G \cdot v_4$

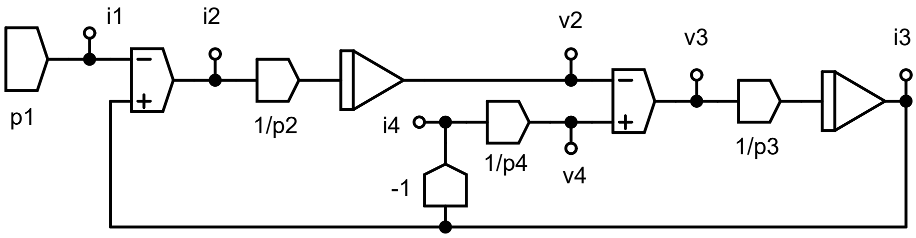
2. Formulace algebraických rovnic vyjadřujících postulát kontinuity a kompatibility

Postulát kontinuity (5.2)	Postulát kompatibility (5.3)
$i_1 + i_2 - i_3 = 0$	$v_1 = v_2$
$-i_3 + i_4 = 0$	$v_3 = v_4 - v_2$

3. Úprava na rovnice vyjadřující každou proměnnou explicitním vztahem

$$\begin{aligned} i_2 &= J & v_1 &= v_2 \\ i_2 &= -i_1 + i_3 & v_2 &= 1/C \int i_2 \cdot dt \\ i_3 &= 1/L \int v_3 \cdot dt & v_3 &= v_4 - v_2 \\ i_4 &= i_3 & v_4 &= 1/G \cdot i_4 \end{aligned}$$

4. Sestavení blokového schématu

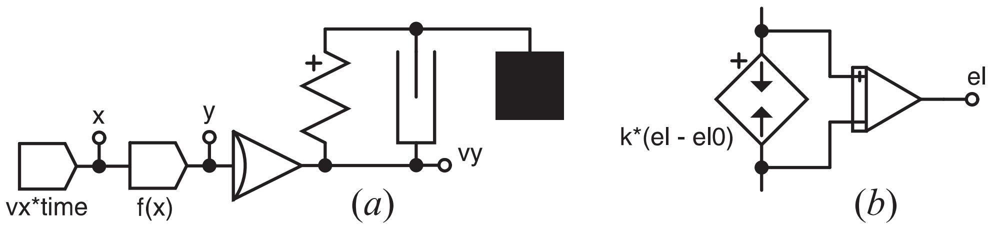


Spoje mezi uzly schématu a ‘vstupy’ základních bloků zde jsou uvedeny jen pro názornost.

7.4 Bloky ve fyzikálních schématech

Bloky mohou být ve schématech zadávaných do DYNASTu kombinovány s mnohopóly a rovnicemi. V kombinaci s mnohopóly se bloky chovají jako zdroje spádových veličin řízené vstupními proměnnými. Vstupy bloků tedy ‘neodebírají’ z modelovaných soustav žádnou energii, ale jejich výstupy mohou energii do soustav naopak ‘dodávat’.

Příklady. Tři fyzikální prvky na obr. *a* tvoří jednoduchý dynamický model kola s pneumatikou sledující nerovný povrch vozovky. Je-li v_x rychlost kola ve vodorovném směru x, potom první blok generuje polohu kola v tomto směru. Je-li závislost svislých nerovností vozovky na x dána funkcí $y = f(x)$, potom výstupem druhého bloku je závislost $y = f(t)$. Derivační blok se zde chová jako zdroj rychlosti ve svislém směru v_y potřebné k buzení dynamického modelu kola.



Na obr. *b* je model lineární pružiny o tuhosti k, jejíž délka v uvolněném stavu je ℓ_0. Vlastní model pružiny představuje zdroj síly $F = k(\ell - \ell_0)$, který je řízen výstupem z integrátoru sledujícího celkovou délku pružiny ℓ.

Kapitola 8

Schémata v grafické podobě

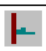
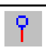
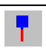
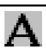
Obsah kapitoly

Fyzikální i bloková schémata si snadno sestavíte pomocí grafického editoru, jehož ovládání je velmi jednoduché a intuitivní. Pro tvorbu schémat máte k dispozici nejen značky fyzikálních prvků a základních bloků, ale i obsáhlé knihovny submodelů nejrůznějších reálných částí a dynamických jevů.

8.1 Vytváření schémat

8.1.1 Prostředí pro vytváření schémat

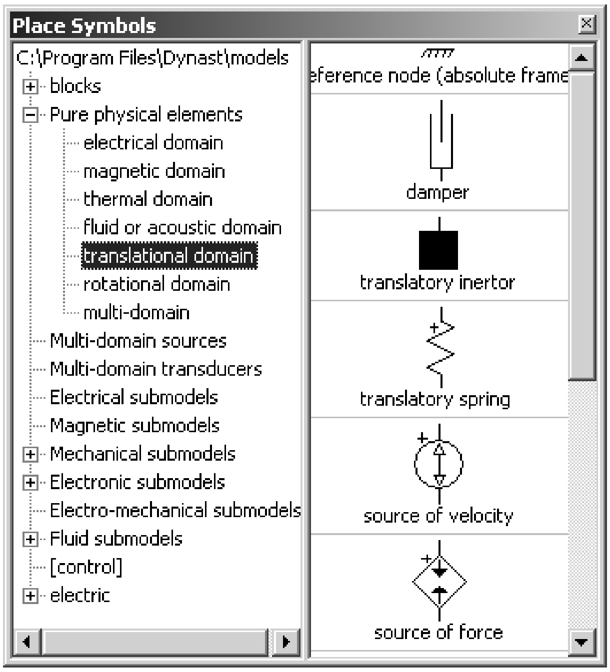
Tabulka 8.1: Ikony pro grafické editování schémat.

Ikona	Příkaz v menu Place	Význam
	Select (Vybrat)	zruší funkci nebo vybere objekt
	Part (Část)	otevře knihovny značek částí soustav
	Link (Spoj)	umožní kreslení spojů a sběrnic
	Link junction (Propojení spojů)	propojí překřížené spoje nebo sběrnice
	Multilink entry (Vstup sběrnice)	připojí spoj ke sběrnici
	Node label (Jmenovka uzlu)	umístí jmenovku uzlu
	Pole label (Jmenovka pólu)	umístí jmenovku pólu do schématu submodelu
	Text note (Textová poznámka)	umístí textovou poznámku
	Zoom in (Zvětšit)	zvětší rozlišení ve schématu
	Zoom out (Zmenšit)	zmenší rozlišení ve schématu
	Undo (Návrat)	zruší poslední změny schématu

Okno pro vytváření schémat v grafické podobě si můžete otevřít následovně:

1. V menu File (Soubor) zvolte New (Nový).
2. V rolovacím seznamu vyberte Diagram (Schéma).
3. Zadejte File name (Jméno souboru) a Title (Nadpis úlohy).
4. Klikněte na OK.

Schémata v grafické podobě se ukládají do souborů *.DIA. Příkazy pro vytváření a editování schémat vám jsou k dispozici v menu Place (Umístit). Místo nich můžete používat ikony uvedené v tab. 14.1, které se po otevření okna pro zobrazování schémat objeví na nástrojové liště.



Volba značky v knihovnách značek.

8.1.2 Umisťování otisků značek

Otisk grafické značky různých částí soustav, tj. fyzikálních prvků, základních bloků nebo submodelů, umístíte do schématu následovně:

1. V menu Place (Umístit) zvolte Insert Part (Vložit část), čímž si otevřete dialog Place Part (Umístit část).
2. Zvolte vhodnou knihovnu značek a potřebnou značku si v ní najděte.
3. Kliknete-li na zvolenou značku, ‘zavěsí’ se na kurzor myši.
4. V případě potřeby značku můžete ještě před umístěním jejího otisku
   - otočit o 90° klávesou R
   - převrátit vodorovně klávesou X
   - převrátit svisle klávesou Y

5. Kurzor myši pak přesuňte do místa, kam chcete otisk značky umístit, a na toto místo klikněte.

6. Chcete-li tu samou značku otisknout rovněž do některého jiného místa schématu, zopakujte kroky 4 a 5.

7. Rozmisťování otisků vybrané značky ukončíte pravým tlačítkem myši.

8.1.3 Specifikace otisků značek.

Každý otisk značky ve schématu je potřeba blíže specifikovat:

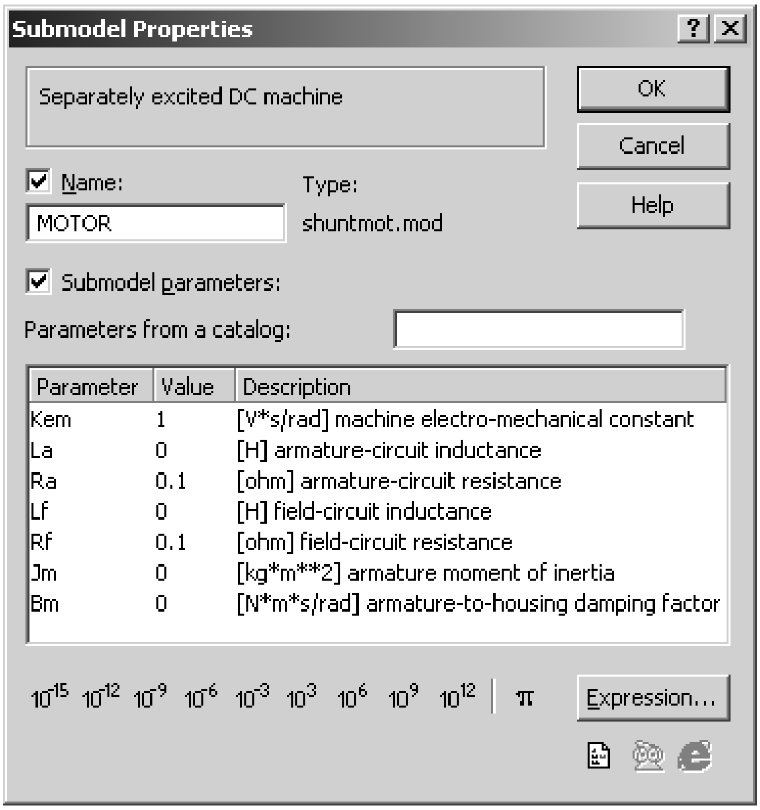
1. Dvojnásobně klikněte na otisk značky ve schématu, čímž se vám otevře příslušný dialog.

2. Zadejte jméno části schématu, kterou otisk značky reprezentuje.

3. Specifikujte parametry zadávané části:

   - V případě fyzikálního prvku zadejte jeho parametr podle kapitoly 6.
   - V případě základního bloku jako parametr zadejte jeho vztah podle kapitoly 7.
   - V případě submodelu zadejte hodnotu těch parametrů, které v dialogu buď chybí, nebo které chcete změnit. Pro bližší popis submodelu klikněte na na ikonu nebo v pravém dolním rohu dialogu.

4. Klikněte na tlačítko OK, případně doplňte údaje podle pokynů dialogu.



Specifikace otisku značky submodelu.

Je-li ve schématu více otisků téže značky, otisky musí mít navzájem odlišná jména. Pokud zadáte do schématu dva otisky téže značky se shodným jménem, DYNAST vás na tuto chybu upozorní tím, že oba otisky zobrazí ve žlutých obdélnících.

Zadávání parametrů v podobě složitějších výrazů si můžete usnadnit kliknutím na tlačítko Expression (Výraz) v dialogu. Zobrazení jména části nebo zadaných parametrů ve schématu můžete zabránit, zrušíte-li v dialogu požadavek na jejich zobrazení.

8.1.4 Propojování otisků značek

Z obrysů značek vyčnívají **vývody značek** představující póly příslušných fyzikálních modelů či vstupy a výstupy bloků. **Složené vývody** sdružují několik vývodů. Každý vývod má své jméno a doménu. **Jméno vývodu** se zobrazí, pokud na něm na několik okamžiků ponecháte kurzor myši. **Doména vývodu** je buď elektrická, magnetická, tepelná, tekutinová, nebo mechanická přímočará, mechanická rotační nebo univerzální.

Propojování vývodů. Vývody rozmístěných otisků značek lze navzájem propojovat spoji v podobě úseček, které se mohou lomit:

1. V menu Place menu vyberte Link (Spoj).
2. Postupně klikněte na konce všech vývodů, které chcete navzájem propojit jedním spojem. Klikněte rovněž na místa, ve kterých se spoj má lomit. Umisťování spoje se zakončí stiskem pravého tlačítka myši.
3. Pro propojení dalších vývodů novým spojem zopakujte krok 2.
4. Až bude chtít propojování vývodů ukončit, dvakrát stiskněte pravé tlačítko myši.

Skutečnost, že některý vývod otisku značky zůstal nepřipojen, DYNAST indikuje čtverečkem na konci vývodu. Po připojení spoje k vývodu čtvereček zmizí. Stejnými čtverečky jsou indikovány nepřipojené konce spojů. Vzájemné propojení nesourodých vývodů (např. elektrického s mechanickým, nebo jednoduchého vývodu se složeným) DYNAST indikuje žlutým čtverečkem jako chybu.

Při propojování platí:

- Spoje, které se navzájem dotknou svými konci, se automaticky propojí.
- Pokud se spoj dotýká svým koncem spoje jiného, spoje se navzájem propojí a v místě propojení se objeví výrazná tečka.
- Překřížené spoje se navzájem nepropojí automaticky.

Propojení překřížených spojů. Aby se překřížené spoje propojily,

1. V menu Place vyberte Link junction (Propojené překřížení).
2. Klikněte na překřížení propojovaných spojů.

8.1.5 Uzly schématu

Každý nepřipojený vývod i každá skupina navzájem propojených vývodů otisků značek tvoří samostatný **uzel schématu**. Při první analýze schématu DYNAST označí uzly pořadovými čísly. Číslo uzlu se zobrazí, pokud na některém jeho spoji ponecháte na několik okamžiků kurzor myši.

Alespoň jeden z uzlů v každé skupině navzájem propojených otisků značek musí být **uzlem referenčním**. Pokud tomu tak není, DYNAST po spuštění analýzy hlásí chybu v podobě singularity výpočtu. Uzel schématu se stane referenčním, připojíte-li k němu příslušnou značku z tab. 5.1. Avšak značky inertoru, tekutinového kapacitoru a základních bloků (ekvivalentních zdrojům spádové proměnné) mají skrytý vývod odpovídající jejich -pólu, který je trvale připojen k referenčnímu uzlu. Referenční uzly obsahují i některé submodely. I když schéma obsahuje více značek různých referenčních uzlů, DYNAST je vždy všechny navzájem propojí a označí nulou.

Označování uzlů uživatelskými jmény. Číslo automaticky přidělené uzlu můžete nahradit vámi zvoleným jménem následovně :

1. V menu Place kliknutím vyberte Node label (Jmenovka uzlu).
2. Jmenovku uzlu, která se 'zavěší' na kurzor myši, přesuňte na takové místo schématu, kde se vývod jmenovky dotýká spoje představujícího označovaný uzel. Na toto místo pak klikněte.
3. Obdobným způsobem můžete umístit jmenovky dalších uzlů. Pro ukončení rozmisťováni jmenovek stiskněte pravé tlačítko myši.
4. Potom na každou z rozmístěných jmenovek uzlů dvojnásobně klikněte, aby se vám otevřel dialog pro vložení jména uzlu. Dialog pak uzavřete kliknutím na OK.

Označíte-li dva uzly shodným jménem, DYNAST to bude indikovat jako chybu.

8.1.6 Používání sběrnic

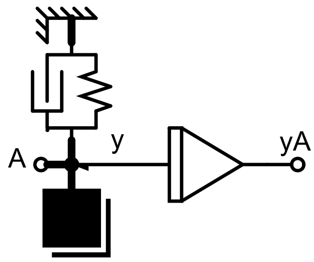
Propojování doménově slučitelných složených vývodů otisků značek rozmístěných ve schématu sběrnicemi se provádí podobně jako propojování jednoduchých vývodů jednoduchými spoji. Přesunete-li kurzor myši na sběrnici, za okamžik se objeví její popis.

Jeden ze spojů sběrnice můžete propojit s jednoduchým vývodem nebo spojem:

1. V menu Place vyberete Multilink entry (Přípoj sběrnice).
2. Klikněte nejprve na sběrnici a potom na připojované místo ve schématu (obvykle vývod otisku některé značky).
3. Dvakrát klikněte na sběrnici, aby se vám otevřel dialog Attach Multilink Entry to Link (Připojit spoj ke sběrnici) a do pole Link name zapište jméno některého vnitřního spoje sběrnice.
4. Pokud nehodláte ke sběrnici připojovat žádný další spoj, klikněte pravým tlačítkem myši

Pokud se dvě sběrnice křižují, nepropojí se. Pro propojení překřížených sběrnic se používá stejná značka jako v případě jednoduchých spojů. Jsou-li propojované sběrnice navzájem slučitelné, jejich dílčí spoje se propojí automaticky správně.

Příklad. Následující obrázek demonstruje napojení základního integračního bloku na vnitřní spoj sběrnice y.



8.1.7 Vkládání rovnic do schémat

Rovnice můžete do schémat vkládat pomocí příkazu Insert Equation v menu System. Podobným způsobem můžete vkládat i události, různé funkce apod. Ve schématu se však nezobrazí. O tom, jak zobrazit text úloh se schématy pojednává kapitola 9.

Systémové parametry, tj. parametry zadané do schémat ve tvaru explicitních rovnic s konstantní pravou stranou, můžete měnit nebo editovat jejich popis pomocí příkazu Edit System Parameters v menu System.

8.2 Úpravy, tisk a export schémat

8.2.1 Grafická editace schémat

Objekty schémat, jako otisky značek částí nebo jejich popisy, spoje, sběrnice, značky uzlů či textové poznámky můžete ve schématech otáčet, kopírovat, přesouvat, nebo mazat. Uvedené operace můžete provádět i s celými skupinami těchto objektů.

Vybírání objektů. Objekty, s nimiž chcete provést některou z uvedených operací, musíte napřed vybrat. Můžete to provést dvojím způsobem:

- Držte stisknutou klávesu Ctrl key a postupně klikněte na každý objekt ve zvolené skupině.
- Vyberte obdélníkovou oblast v níž je umístěna zvolená skupina objektů tak, že z jednoho rohu oblasti přetáhnete myš se stisknutým levým tlačítkem úhlopříčně do opačného rohu oblasti. Tlačítko pak uvolněte.

Všechny vybrané objekty změní svou barvu. Výběr objektů zrušíte kliknutím mimo vybranou skupinu.

Otáčení objektů. Vybraný objekt nebo jejich skupinu můžete

- otáčet o 90° klávesou R
- převracet vodorovně klávesou X
- převracet svisle klávesou Y

Přesouvání objektů. Vybrané objekty lze přesouvat do nové polohy několika způsoby:

- Klikněte na zvolený objekt nebo skupinu, držte levé tlačítko stisknuté a myš přetáhněte do žádoucí polohy. Pak tlačítko uvolněte.
- Budete-li držet stisknutý mezerník, budete moci vybrané objekty přesouvat pomocí kláves se šipkami.
- Při přesouvání objektů předchozími způsoby se spoje chovají jako gumové, aby se neporušilo propojení objektů. Pokud naopak budete chtít přesouvat pouze vybrané objekty bez jejich spojů, během přesouvání tiskněte klávesu Alt.

Kopírování objektů. Kopírování vybraných objektů a současně jejich přesun do nového místa můžete provádět podobně, jako jejich samotné přesouvání. Jen při tom musíte tisknout klávesu Ctrl. Nezapomeňte dát okopírovaným objektům nová jména odlišná od jmen jejich vzorů.

Vymazání objektů. Vymazat můžete vybraný objekt nebo skupinu objektů tak, že stisknete klávesu Del.

Změna názvu schématu. Když v menu Edit zvolíte Change Title otevře se dialog, ve kterém změnu můžete provést.

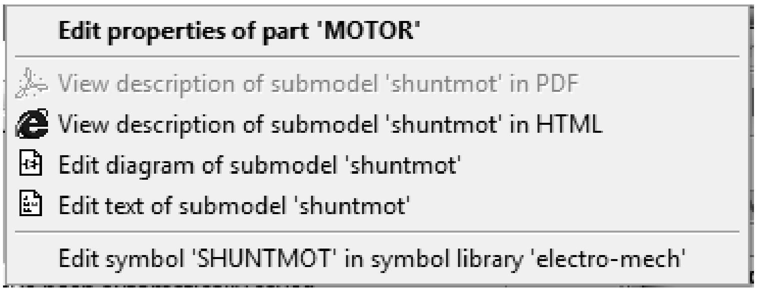
Umisťování textových poznámek. Do schématu můžete rovněž umístit textové poznámky:

1. V menu Place krátce klikněte na příkaz Text note (Textová poznámka).
2. Značku Note, která se 'zavěsí' na kurzor myši, postupně přesuňte do požadovaných míst schématu a na každé takové místo klikněte.
3. Pro ukončení rozmisťováni klikněte pravým tlačítkem myši.
4. Na každou z rozmístěných značek Note dvojnásobně klikněte, aby se vám otevřel dialog pro vložení jejího textu. Dialog pak uzavřete kliknutím na OK.

Umisťování rámečků. Složitější schémata lze pro usnadnění orientace rozdělit na části ohraničené rámečky. Rámeček do schématu umístíte tak, že v menu Place vyberete Rectangle (obdélník) a myš pak úhlopříčně přetáhnete přes oblast, kterou chcete ohraničit.

8.2.2 Úpravy submodelů a značek ve schématech

Zkušenější uživatelé mohou přímo v otevřeném schématu celé soustavy upravovat schémata a texty použitých submodelů i jejich značky. Po vybrání značky submodelu ve schématu a po kliknutí na vybranou značku pravým tlačítkem myši se zobrazí následující dialog.



Příklad menu pro úpravy submodelu.

Po případné úpravě značky submodelu a jejím uložení do příslušné knihovny značek je nutné použít příkaz Refresh Libraries (Obnovit knihovny) v menu Edit.

8.2.3 Tisk schémat a jejich export

Chcete-li zobrazené schéma vytisknout, v menu File vyberte Print nebo Print Preview (náhled tisku).

Zobrazené schéma můžete exportovat

- uložené do schránky příkazem Select All v menu Edit a pak příkazem Copy v menu File
- ve formátu EPS příkazem Export to PostScript v menu File

Textové soubory schémat. Schémata zadaná v grafické podobě se ukládají do souborů typu *.DIA. Informace o topologii schémat (tj. o způsobu vzájemného propojení značek ve schématu) společně s dalšími údaji potřebnými pro analýzu modelů soustav znázorněných schématy se ukládají do souborů ASCII typu *.PRB. Informace jsou zde zakódovány způsobem popsaným v další kapitole.

Kapitola 9

Úlohy v textové podobě

Obsah kapitoly

Úlohy zadané v uživatelsky přívětivé grafické podobě DYNAST neanalyzuje přímo, ale napřed je převede do podoby textové. Někteří uživatelé dávají přednost zadávání úloh do DYNASTu přímo v textové podobě, nebo střídavě využívají obě formy zadání. Tato kapitola je určena především pro takovéto uživatele. O zadávání rovnic v textové podobě pojednává kapitola 4. Přípravě submodelů v grafické i textové podobě je věnována kapitola 14.

9.1 Textová podoba zadání

9.1.1 Textové zadání převedené z grafického

Chcete-li vidět textovou podobu úlohy, jejíž schéma v grafické podobě máte otevřeno, pak v menu View (Náhled) zvolte Problem or Submodel text (Text úlohy nebo submodelu). V případě, že textové zadání (tj. soubor *.PRB) dosud neexistuje, odpovězte kladně na dotaz DYNASTu zda máte zájem, aby bylo vytvořeno.

Budete-li si chtít tento soubor *.PRB prohlédnout později, naleznete jej v List of Problems (Seznam úloh) zvoleném v menu View, příp. pomocí příkazu Open v menu File.

Všimněte si, že z vyobrazení schématu může být vytvořen textový popis vzájemného propojení jeho otisků značek (tzv. netlist), opačný postup však z principu možný není.

9.1.2 Synchronizace grafického a textového zadání

Po otevření souboru *.PRB kterýmkoliv z výše zmíněných způsobů, text tohoto souboru můžete editovat. Budete-li chtít využít možnost pracovat se zadáním úlohy střídavě jak v grafické, tak i v textové podobě, obě podoby zadání musí být po každé změně navzájem sesynchronizovány, aby se navzájem nelišily. Než dojde k synchronizaci, žádné z obou zadání nesmí obsahovat syntaktické chyby.

Automatická synchronizace. DYNAST vám automaticky nabídne synchronizaci textového zadání při jeho aktivaci po každé změně grafického zadání. Podobně vám nabídne automatickou synchronizací grafického zadání po změně zadání textového. Jakmile otevřete nesynchronizované textové nebo grafické zadání, DYNAST vám nabídne provedení takových změn v otevřeném zadání, které povedou k jeho synchronizaci. Pokud nabídku přijmete, DYNAST změny provede. Jestliže své rozhodnutí dodatečně změníte, stále ještě budete mít možnost zadání vrátit do původního stavu příkazem Undo (Návrat).

Následující tabulka ukazuje výsledek automatické synchronizace grafického zadání v důsledku různých druhů změn provedených v textovém zadání. Pokud naopak k některé z těchto změn došlo v grafickém zadání, DYNAST ji při synchronizaci textového souboru provede automaticky.

ZMĚNA V SOUBORU *.PRB	ZMĚNA V GRAFU SCHÉMATU
titul	text aktualizován
nová část	ignorováno s upozorněním
hodnota parametru	schéma doplněno
jméno nebo typ části	značka odstraněna
jméno uzlu	ignorováno
rovnice	ignorováno
analýza	ignorováno

Synchronizace na žádost uživatele. Chcete-li odpovídající si textové a grafické zadání navzájem sesynchronizovat nezávisle na tom, v jakém pořadí v nich byly provedeny změny, můžete o to DYNAST požádat. V menu Edit zvolte Synchronize a potom vyberte buď Update diagram according to text (Upravit grafické zadání s ohledem na textové) nebo Update Text according to diagram.

9.1.3 Editace textového zadání schémat

Chcete-li zadat schéma od začátku textově, můžete postupovat takto:

1. V menu File (Soubor) zvolte New (Nový), čímž se vám otevře dialog New File.
2. Zde si jako File type zvolte Problem text, v poli File name zadejte jméno nového souboru a v poli Title název zadávané úlohy.
3. Po kliknutí na OK se vám otevře soubor typu *.PRB.

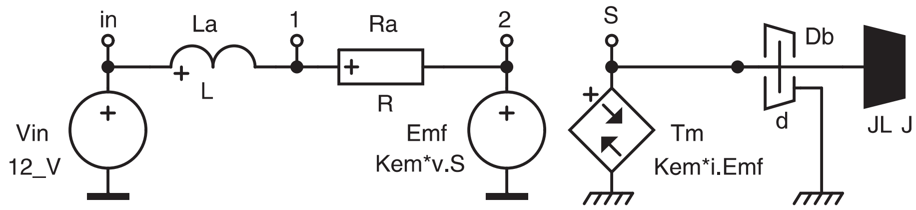
Text popisující schéma se zadává v sekci SYSTEM souboru *.PRB. Pokyny, jak zadat uspořádání fyzikálních prvků, základních bloků a submodelů v schématech pomocí textu najdete v následujících odstavcích. Texty popisující schémata můžete kombinovat s rovnicemi při dodržení pokynů z kapitoly 4. Za sekcí SYSTEM následují sekce určující způsoby analýzy schématu popsané v kapitolách 10, 11 a 12. Obecná struktura souboru *.PRB je následující:

`::` *poznámka*
`*:` *Název úlohy*
`*SYSTEM;`
parametr = *konstanta*; `::`[*jednotka*] *popis parametru*
parametr = *konstanta*; `::`[*jednotka*] *popis parametru*
...
prvky, *bloky*, *submodely*, *rovnice*
...
zadání analýzy
`RUN; ::` *název výsledků analýzy* `*END;`
`::`*proměnná* [*jednotka*] *popis proměnné*
`::`*proměnná* [*jednotka*] *popis proměnné*
...

V textových zadáních úloh zastávají užitečnou úlohu komentáře. Za komentáře jsou považovány všechny texty situované na řádku vpravo za znakem `:`(dvojtečka). Tento znak může sloužit i k deaktivování některých částí schémat nebo příkazů při odlaďování úloh.

Komentáře začínající řetězcem `::` zastávají specifické úlohy:

- na prvním řádku souboru *.PRB uvozují text, který se v seznamu List of Problems v menu View promítne ve sloupci Notes (Poznámky)
- v sekci SYSTEM slouží k upřesnění významu konstantních parametrů
- vpravo od příkazu `RUN;` slouží jako název výsledků v souboru *.O a v grafech výsledných průběhů
- za příkazem `*END;` upřesňují požadované proměnné v dialozích, ve výsledných textových souborech *.O i ve výsledných grafech



Příklad. Následující data ilustrují typické uspořádání textového souboru *.PRB (bez zadání analýzy). Příklad současně demonstruje různé způsoby využití komentářů.

```
:: bez analyzy
*: Rozbeh stejnosmerneho motoru
*SYSTEM;
Kem=.05;   ::[V*s/rad] konstanta motoru
L=1.5m;    ::[H] induknost kotvy
R=0.5;     ::[ohm] odpor kotvy
J=.25m;    ::[kg*m**2] moment setrvacnosti
d=.1;      ::[N*m*s/rad] odpor loziska
Vin > E in = 12_V;    :napajeci napeti
```

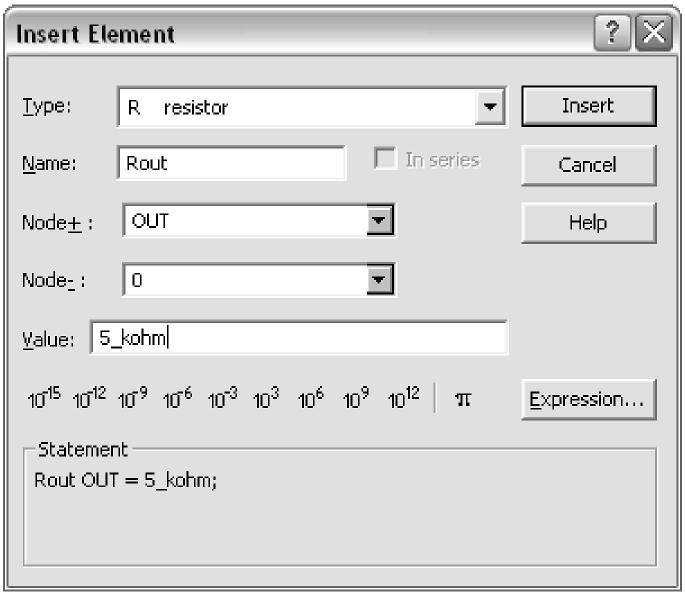
```
La in-1 = L;            :indukcnost kotvy
Ra 1-2 = R;             :odpor kotvy
Emf 2 = Kem*v.S;        :indukovane napeti
Tm > J S = Kem*i.Emf; :moment sily motoru
Db > G S = d;           :odpor v lozisku
JL > C S = J;           :setrvacnost zateze
*END;
::I.La    [A] elektricky proud motoru
::Tm      [N*m] vnitrni moment motoru
::v.S     [rad/s] uhlova rychlost hridele
```

9.2 Zadávání textů fyzikálních prvků

9.2.1 Zapojení fyzikálních prvků mezi uzly

Funkce fyzikálních prvků různého typu je popsána v kapitole 6.

Zvolíte-li v menu System příkaz Insert Element (Vložit prvek), otevře se následující dialog:



Zadávání textů fyzikálních prvků.

1. V seznamu Type vyberte typ prvku v souladu s kapitolou 6.
2. Do pole Name zapište jméno zadávaného prvku.
3. V seznamu Node+ nalistujte nebo zapište jméno uzlu, ke kterému má být připojen +pól prvku.
4. V seznamu Node- nalistujte nebo zapište jméno uzlu, ke kterému má být připojen -pól prvku.
5. Do pole Parameter zapište hodnotu parametru prvku v podobě numerické konstanty nebo symbolického výrazu.
6. Klikněte na tlačítko Insert (Vložit) a po případné výzvě dialogu doplňte chybějící údaje.

Do řádku textového souboru označeného kurzorem se vloží příkaz pro zadávaný fyzikální prvek ve tvaru

jméno [> *typ*] *uzel*+ [- *uzel*-] [= *parametr*];

Poznámky:

- Pokud je *jméno* zvoleno tak, že jeho první znaky se shodují s typem prvku, řetězec >*typ* lze vypustit.
- Je-li -*uzel* totožný s referenčním uzlem 0, lze jej vypustit.
- Je-li hodnota parametru jednotková, lze ji vypustit.

Příklad. V předchozím příkladu jsou všechny prvky zadány jako zapojené mezi uzly.

9.2.2 Zapojení fyzikálních prvků v sérii

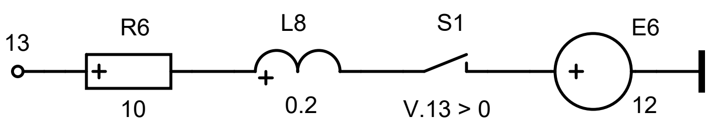
Pokud některé z fyzikálních prvků typu typ R, L, E, nebo S jsou v analyzovaném schématu zapojeny do série, můžete celé toto sériové spojení zadat zjednodušeně. Snížíte tím počet rovnic charakterizujících toto spojení DYNASTem na jedinou. DYNAST však v tomto případě kromě průtokové proměnné vypočítá pouze spádovou proměnnou na celém sériovém spojení, nikoliv na jednotlivých prvcích. Můžete k tomu využít opět výše uvedený dialog:

1. Nejprve určete, který z prvků sériového spojení bude celé spojení reprezentovat a pak tento prvek zadejte, jako kdyby byl jediným prvkem zapojeným mezi koncovými uzly sériového spojení.
2. Při zadávání každého z ostatních prvků sériového spojení zatrhněte v dialogu políčko In series a v poli In series with zapište jméno prvku reprezentujícího celé sériové spojení.

Text prvků sériového spojení kromě prvního bude mít podobu:

jméno [> *typ*] - *série* [= *výraz*];

kde *série* je jméno prvního zadaného prvku reprezentujícího celé sériové spojení.



Příklad. Uvedené sériové spojení čtyř prvků mezi uzly N13 a N11 můžete zadat třeba jako

```
E6 13 = 12; R6 - E6 = 10; L8 - E6 = .2; S1 - E6 = (V.13 > 0);
```

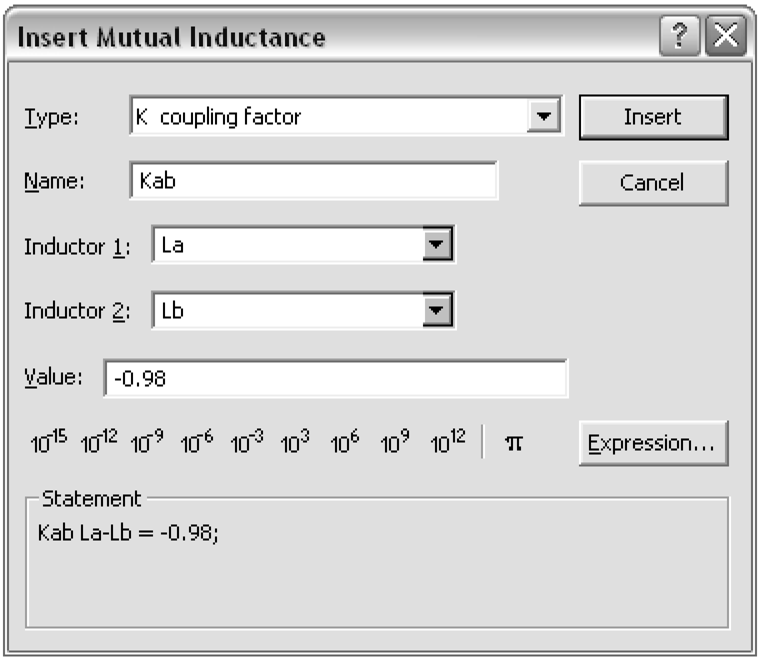
9.2.3 Induktivní vazba

Induktivní vazbu mezi dvěma induktory o vlastních indukčnostech L_a a L_b můžete charakterizovat buď pomocí jejich vzájemné indukčnosti M_{ab}, nebo činitelem jejich induktivní vazby

$$K_{ab} = \pm M_{ab} / \sqrt{L_a L_b}$$

Hodnoty M_{ab} i K_{ab} jsou kladné, pokud +póly obou induktorů představují buď začátky nebo konce vinutí modelovaných cívek, jinak jsou záporné.

V menu System zvolte Insert Inductive Coupling

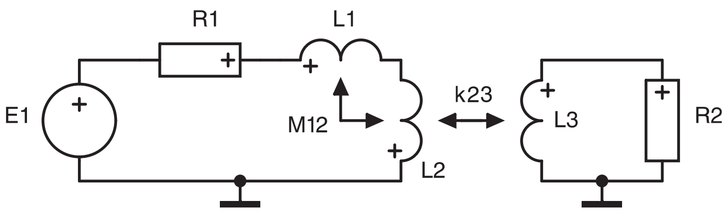


Zadávání textu vzájemné indukčnosti.

1. V seznamu Type vyberte buď M pro vzájemnou indukčnost nebo K pro činitel vazby.
2. Do pole Name zapište jméno induktivní vazby začínající písmenem M nebo K v souladu s typem.
3. V seznamu Inductor 1 nalistujte nebo zapište jméno jednoho ze dvou induktorů účastnících se zadávané induktivní vazby.
4. V seznamu Inductor 2 nalistujte nebo zapište jméno druhého z vázaných induktorů.
5. Do pole Value zapište hodnotu parametru zadávané vazby v podobě číselné konstanty nebo symbolického výrazu.

Výsledkem bude příkaz ve tvaru

jméno [> *typ*] *induktor* - *induktor* [= *hodnota*];

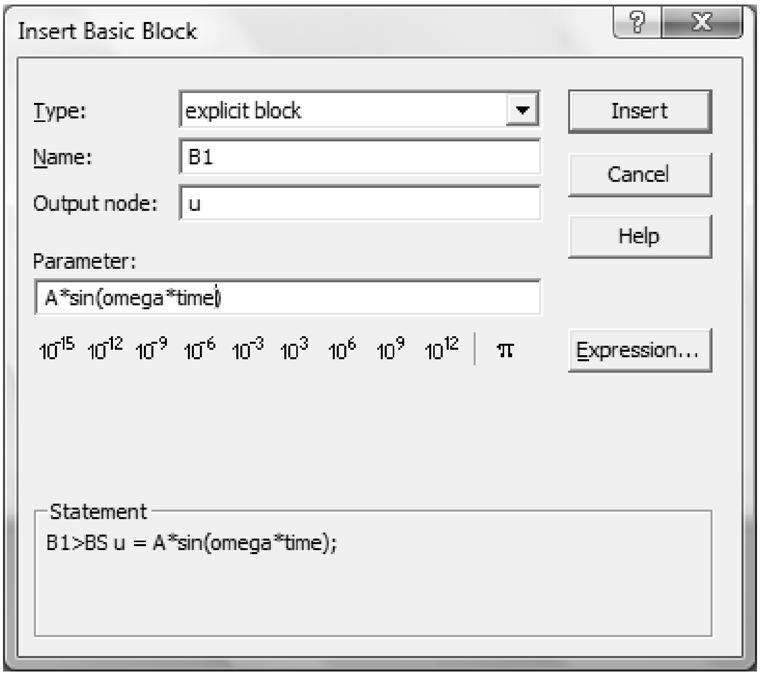


Příklad. V obvodu na obrázku jsou dvě induktivní vazby. Jednu charakterizuje její vzájemná indukčnost, druhou činitel vazby. Data uvedená níže současně demonstrují možnost zadávat fyzikální prvky vytvářející uzavřené smyčky jako sériové spojení. Prvky reprezentující sériová spojení jsou v tomto případě oběma póly připojeny k témuž uzlu (referenčnímu).

```
*: Induktivne vazane smycky
*SYSTEM;
E 0 = 12;     :prvek reprezentujici prvni smycku
:ostatni prvky prvni smycky:
R1-E = .1; L1-E = 10m; L2-E = 15m;
L3 0 = 30m;   :prvek reprezentujici druhou smycku
:zbyvajici prvek druhe smycky:
R2-L3 = .15;
:induktivni vazby:
M12 L1-L2 = -.2; k23 L2-L3 = -.98;
*TR; TR 0 1; PRINT I.E, I.L3, V.L3; RUN; *END;
```

9.3 Zadávání textu základních bloků

Funkce základních bloků různého typu je popsána v kapitole 7. Pro vkládání bloků v textové podobě můžete využít dialog, který si otevřete v menu System volbou Insert Basic Block.



Zadávání textu základních bloků.

1. V seznamu Type vyberte typ zadávaného bloku v souladu s kapitolou 7.

2. Do pole Name zapište jméno zadávaného bloku.

3. V poli Output node zapište jméno uzlu, ke kterému má být připojen výstup bloku.

4. Do pole Parameter zapište numerickou konstantu nebo symbolický výraz charakterizující funkci bloku.

5. Klikněte na tlačítko Insert a po případné výzvě dialogu doplňte chybějící údaje.

Příkaz pro definování základních bloků kromě přenosového má tvar

jméno [>*typ*] *uzel* [= *parametr*]`;`

jméno je uživatelské jméno zadávaného bloku

typ je jedno- nebo dvouznakový řetězec určující typ prvku v souhlasu s tab. 7.2. Pokud je toto jméno zvoleno tak, že jeho první znaky se shodují s jeho typem, řetězec > *typ* lze vypustit.

uzel je uživatelské jméno uzlu, k němuž je připojen výstup bloku

parametr je číselná konstanta nebo symbolický výraz udávající vztah definující výstupní proměnnou bloku. Je-li hodnota parametru jednotková, lze ji vypustit.

Příklad. V zobrazeném dialogu je zadáván explicitní blok B1 ve funkci autonomního zdroje signálu $u = A\sin\omega t$, který bude zapsán do souboru *.PRB v podobě textu

```
B1 > BS u = A*sin(omega*time)
```

Text zadání přenosových bloků o přenosové funkci $F(s) = K \cdot M(s)/N(s)$ je však odlišný:

[*činitel*][`*`][*čitatel*] [`/`*jmenovatel*]`*`*vstup*`;`

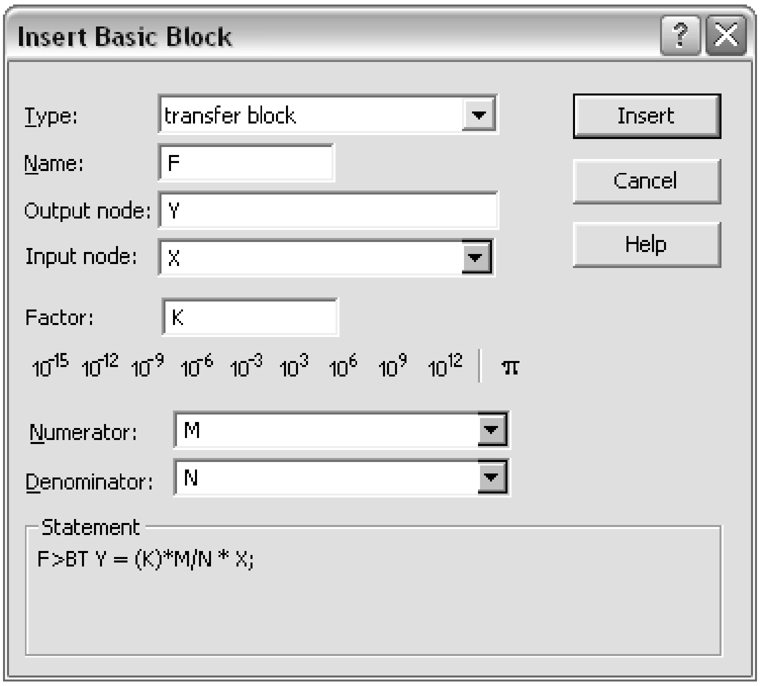
činitel je číselná konstanta nebo symbolický výraz udávající hodnotu násobného činitele K přenosové funkce bloku $F(s)$. Symbolický výraz se uzavírá do závorek (). Je-li hodnota činitele K jednotková, lze ji vypustit.

čitatel je jméno polynomu $M(s)$ v čitateli přenosové funkce bloku $F(s)$. Je-li tento polynom jednotkový, řetězec `*1` lze vypustit.

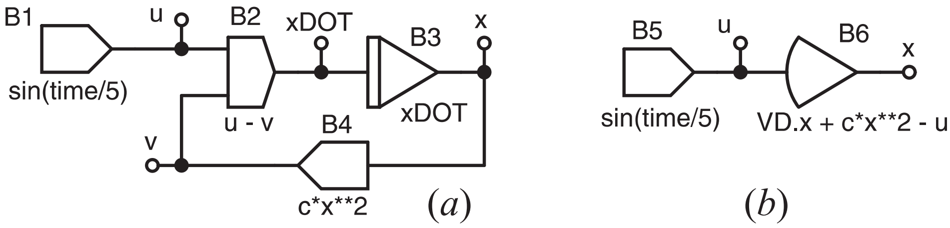
jmenovatel je jméno polynomu $M(s)$ ve jmenovateli přenosové funkce bloku $F(s)$. Je-li tento polynom jednotkový, řetězec `/1` lze vypustit.

input je uživatelské jméno uzlu, k němuž je připojen vstup zadávaného bloku

Zadání polynomů $M(s)$ a $N(s)$ přenosové funkce $F(s)$ musí předcházet zadání přenosového bloku.



Zadávání textu přenosových bloků.



Příklady. Obě bloková schémata na obrázku představují diferenciální rovnici

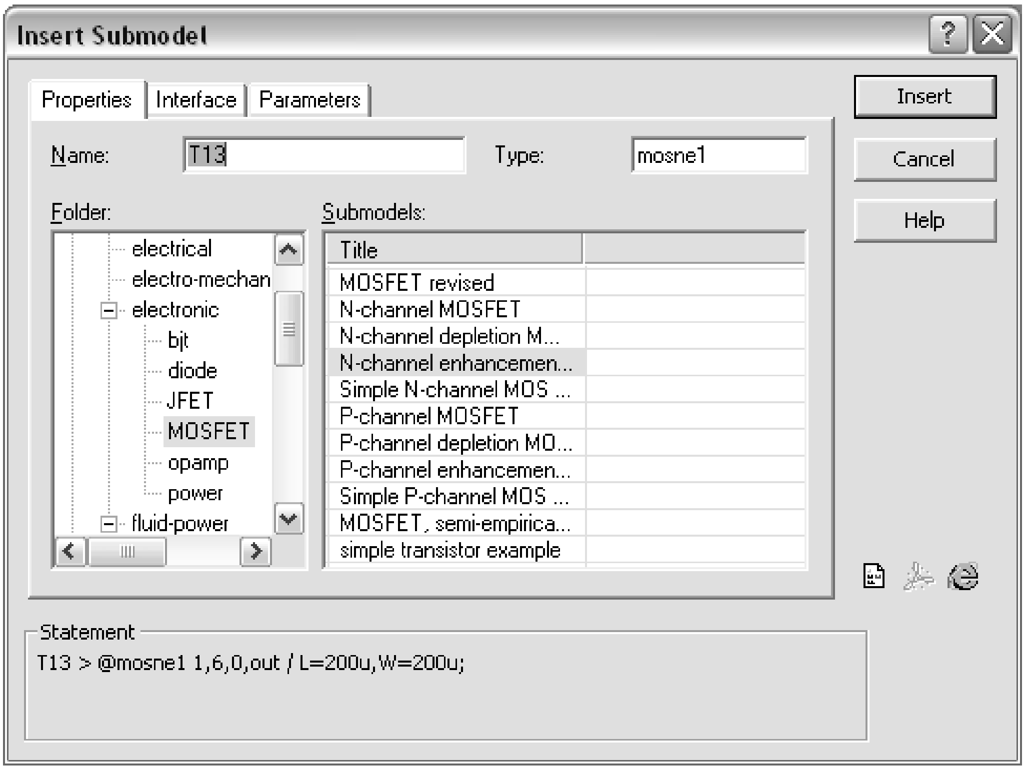
$$\frac{d}{dt}x + cx^2 = \sin t/5$$

```
 *SYSTEM; c = 1m;
 B1 > BS u = sin(time/5);
 B2 > BS xDOT = u - v;
 B3 > BI x = xDOT;
 B4 > BS v = c*x**2;
 *TR; TR 0 200; PRINT x, u; RUN; *END;

*SYSTEM; c = 1m;
 B5 > BS u = sin(time/5);
 B6 > BO x = VD.x + c*x**2 - u;
 *TR; TR 0 200; PRINT x, u; RUN; *END;
```

9.4 Zadávání textů pro vkládání submodelů

Příslušný dialog se vám otevře, když v menu System zvolíte Insert Submodel (Vložit submodel).



Zadávání textu pro vkládání submodelů.

1. Po otevření dialogu
   - buď v jeho levé části Folder nalistujte složku, v níž je uložen zadávaný submodel a v pravé části dialogu Submodels pak potřebný submodel vyberte,
   - nebo do pole Type zapište typ zadávaného submodelu
2. Zvolte jméno části modelované submodelem a zapište jej do pole Name.
3. V záložce Interface (Rozhraní) přiřaďte jednotlivým pólům submodelu uzly schématu.
4. V záložce Parameters upravte hodnoty parametrů submodelu.
5. Klikněte na tlačítko Insert.

Příkaz pro vložení submodelu má podobu:

[*jméno* >] @*type* *uzel* [- *uzel*...] [/ [*parametr* =] *hodnota* [, [*parametr* =] *hodnota*...]] ;

jméno je uživatelské jméno části, kterou ve schématu soustavy modeluje zadávaný submodel

typ značí typ submodelu, uvádí se bezprostředně za znakem @

uzel je jméno uzlu, ke kterému je připojen odpovídající pól submodelu, i když se jedná o uzel referenční (jeho jméno je vždy 0). Jména jednotlivých uzlů jsou navzájem oddělena znakem - nebo ,.

parametr je jméno externího parametru submodelu. Seznam externích parametrů je od seznamu uzlů submodelu oddělen znakem /.

hodnota je číselná konstanta nebo symbolický výraz určující hodnotu externího parametru. Není-li hodnota některého externího parametru submodelu zadána, parametr nabude svou implicitní hodnotu uvedenou v submodelu nebo nulovou hodnotu, pokud implicitní hodnota není v submodelu zadána.

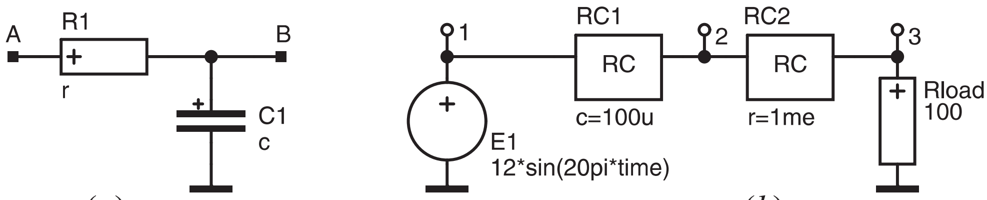
Poznámka: Pokud jsou externí parametry a jejich hodnoty zadávány ve stejném počtu a pořadí jako jsou uvedeny v seznamu, řetězce '*parametr* =' lze vypustit.

Příkazy v souboru *.PRB, do kterého byl vložen submodel, se mohou odkazovat na následující vnitřní proměnné submodelu (nelze je však z vně submodelu měnit):

- V.*jméno.uzel* ... spádová proměnná uzlu
- V.*jméno.prvek* ... spádová proměnná prvku G, C nebo J
- I.*jméno.prvek* ... průtoková veličina prvku R, L, E nebo S

Ve všech těchto případech *jméno* označuje tu část schématu modelovanou submodelem, o jejíž vnitřní proměnou se jedná.

Příklad. Na obr. *a* je schéma submodelu RC, obr. *b* uvádí příklad použití tohoto submodelu pro modelování částí RC1 a RC2 ve schématu elektrického obvodu. Pod otisky značky submodelu DYNAST zapsal hodnoty externích parametrů *r* a *c* submodelu RC, které byly zadány rozdílně od jejich implicitních hodnot.



(*a*) (*b*)

Následuje výpis souboru submodelu RC.MOD a souboru RCRC.PRB se zadáním analýzy úplného obvodu.

```
::low-pass filter
RC    ::RC circuit
A,    ::electrical pole
B /   ::electrical pole
r = 1k,    ::[ohm] resistance
c = 1u;    ::[F] capacitance
R1 A-B = r;
C1 B = c;
EO@;

*SYSTEM;
E1 1 = 12*sin(20pi*time); Rload 3 = 100;
RC1 > @RC 1,2 / c=100u;
RC2 > @RC 2,3 / r=1me;
*TR; TR 0 1; PRINT V.3, I.RC1.R1, I.RC2.R1, ; RUN; *END;
```

V části schématu RC1 byla změněna hodnota externího paramtru submodelu *c*, v části RC2 došlo ke změně parametru *r* proti jejich implicitním hodnotám. Všimněte si odkazů na interní proměnné `I.RC1.R1` a `I.RC2.R1` v příkazu `PRINT`.

9.5 Katalog parametrů součástek

Externí parametry submodelů lze načítat z katalogů reálných součástek v podobě textových souborů s příponou CAT uspořádaných následovně:

součástka
parametr = *hodnota*[, *parametr* = *hodnota*, $\cdots$];
součástka
parametr = *hodnota*[, *parametr* = *hodnota*, $\cdots$];
...

součástka je jméno (obvykle obchodní) typu reálné součástky

parametr je jméno parametru

hodnota je číselná konstanta nebo symbolický výraz vyjadřující číselnou konstantu

Poznámka: Mezi submodely a katalogy neexistuje žádná pevná vazba. Katalog je sada hodnot parametrů, které lze použít pro libovolný submodel. Pokud tedy dva různé submodely mají podobné parametry, lze pro ně použít stejný katalog. Pokud katalog obsahuje parametr, který daný submodel nemá, hodnota parametru se ignoruje.

Odkaz na katalog z dialogu

V dialogu pro zadání submodelu do schématu v grafické nebo textové podobě vložte do pole Parameters from a catalog text:

katalog.součástka

katalog je název souboru typu *.CAT bez cesty a přípony

součástka je jméno součástky v katalogu

Odkaz na katalog pomocí textového editoru

V tomto případě má příkaz pro vložení submodelu tvar

část > @*submodel rozhraní* /
&*katalog.součástka*[, *parametr* = *hodnota*, *parametr* = *hodnota* ...];

Submodel je tedy zadán běžným způsobem, seznam parametrů však začíná příkazem &katalog.součástka. Hodnoty parametrů zadaných v katalogu lze změnit na hodnoty jednotlivě zadané za uvedeným příkazem.

Příklad. Příkaz

T1 > @npn1 b,e,c / &PARAMS.N1n20,Re=10,Rc=2;

se odkazuje na data pro součástku N1n20 z katalogu uloženého v souboru PARAMS.CAT. Hodnoty parametrů R_e a R_c se však upraví na hodnoty $R_e = 10$ a $R_c = 2$.

Kapitola 10

Nelineární analýza

Obsah kapitoly

Nelineární analýza slouží k numerickému výpočtu přechodných a ustálených dějů v nelineárních dynamických i statických soustavách. Modely soustav mohou být zadány rovnicemi v textové podobě (kapitola 4) nebo fyzikálním (kapitola 6) či blokovým (kapitola 7) schématem. Nelineární analýza může sloužit i k výpočtu statických charakteristik soustav. Tuto analýzu lze rovněž využít k nalezení klidového pracovního bodu nelineárních soustav, k linearizaci soustav v tomto bodě a k analýze odezev soustav na malé i velké signály. Pro ustálené periodické děje lze v rámci nelineární analýzy analyzovat i jejich kmitočtové spektrum.

10.1 Možnosti nelineární analýzy

Při **analýze přechodných dějů** v nelineárních dynamických soustavách DYNAST řeší systém algebro-diferenciálních rovnic

$$\mathbf{f}\left(\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), t\right) = \mathbf{0} \tag{10.1}$$

v zadaném intervalu $t_0 \leq t \leq t_f$ pro počáteční podmínky $\mathbf{x}(t_0)$, kde $\mathbf{f}(.)$ je obecně vektorová funkce, $\mathbf{x}(t)$ je vektor řešení představující přechodné odezvy a $\dot{\mathbf{x}}(t)$ je vektor $\mathbf{x}(t)$ derivovaný vzhledem k nezávisle proměnné t.

Cílem **analýzy ustáleného stavu** je výpočet hodnot ustálených odezev $\mathbf{x}(\infty)$, tj. výpočet odezev $\mathbf{x}(t)$ pro $t \to \infty$ po zániku přechodných složek. DYNAST určí ustálené odezvy, pokud jsou konstantní. Jsou-li periodické, DYNAST je může podrobit **Fourierově analýze** a nalézt jejich kmitočtové spektrum.

DYNAST pro výpočet ustáleného stavu soustavy položí $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ v rovnicích (10.1). Je-li tedy předmětem analýzy dynamický model soustavy, DYNAST automaticky provede jeho **konverzi na statický model**.

DYNAST přitom

- ignoruje všechny fyzikální prvky typu C
- nahradí všechny fyzikální prvky typu L ideálními spoji
- položí proměnnou s Laplaceovy transformace v přenosových blocích typu TR rovnu nule
- položí výstupní proměnné všech derivačních bloků typu BD rovnými nule
- ignoruje všechny integrátory typu BI

Statická analýza, tj. analýza statických soustav, stejně jako analýza ustáleného stavu dynamických soustav vede na řešení rovnic (10.1) v nichž $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$.

Při obou těchto analýzách můžete využít **rozmítání parametru**. To vám dovolí určit statickou charakteristiku soustav v závislosti na některém jejich parametru, případně celou rodinu takovýchto charakteristik. Je-li rozmítaným parametrem proměnná t, jedná se o **kvazistatickou analýzu** dynamické soustavy.

Ustálený stav dynamické soustavy je charakterizován jejím **klidovým pracovním bodem** $\mathbf{x}(\infty)$. DYNAST může toto řešení využít např. jako vektor počátečních podmínek $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}(\infty)$ pro následnou **analýzu odezev na velké signály** v okolí nalezeného klidového pracovního bodu soustavy.

Numerická metoda použitá v DYNASTu pro řešení nelineárních algebro-differenciálních rovnic (10.1) je založena na iterativní linearizaci těchto rovnic pro diskrétní hodnoty proměnné t v intervalu řešení $t_0 \leq t \leq t_f$ (kapitola **??**). Poslední **linearizované rovnice** formulované během tohoto postupu jsou ve tvaru

$$\left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\right)_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_f} \cdot \Delta\mathbf{x}(t) + \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \dot{\mathbf{x}}}\right)_{\dot{\mathbf{x}}=\dot{\mathbf{x}}_f} \cdot \Delta\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_f, \dot{\mathbf{x}}_f, t_f) = \mathbf{0} \tag{10.2}$$

kde $\mathbf{x}_f = \mathbf{x}(t_f)$ je vektor představující **poslední řešení** soustavy a $\dot{\mathbf{x}}_f = \dot{\mathbf{x}}(t_f)$.

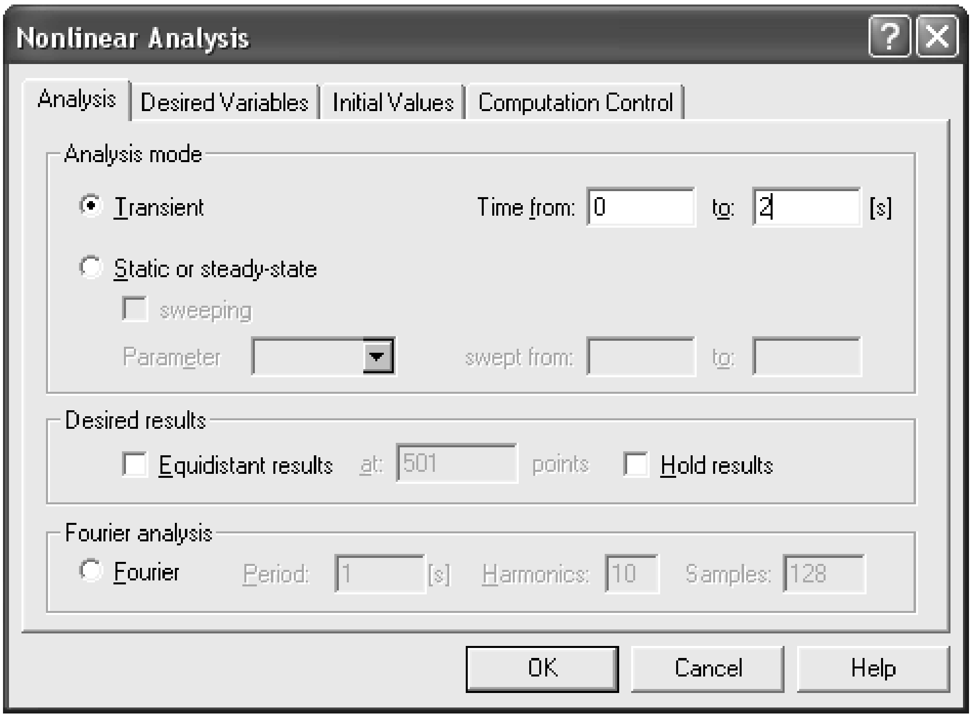
DYNAST vektor $\mathbf{x}_f$ dočasně ukládá do operační paměti, aby mohl být využit jako vektor počátečních podmínek $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_f$ při případné další nelineární analýze během téhož svého běhu. DYNAST rovněž umožňuje trvalé uložení vektoru $\mathbf{x}_f$ do souboru, který pak lze využít i při dalších bězích programu (viz příkazy `SAVE` a `LOAD` v posledním odstavci této kapitoly).

Pokud vektor $\mathbf{x}_f$ představuje ustálené statické řešení, tj. pokud $\mathbf{x}_f = \mathbf{x}(\infty)$, lze jej považovat za klidový pracovní bod analyzované nelineární soustavy pro její následnou **analýzu odezev na malé signály** v okolí tohoto bodu. K tomu lze využít numerickou kmitočtovou analýzu (kapitola 11), nebo analýzu semisymbolickou (kapitola 12). **Linearizovaný model** nelineární soustavy v okolí $\mathbf{x}_f$ je charakterizován jakobiány vystupujícími v (10.2).

10.2 Zadávání nelineární analýzy

10.2.1 Analýza přechodných dějů

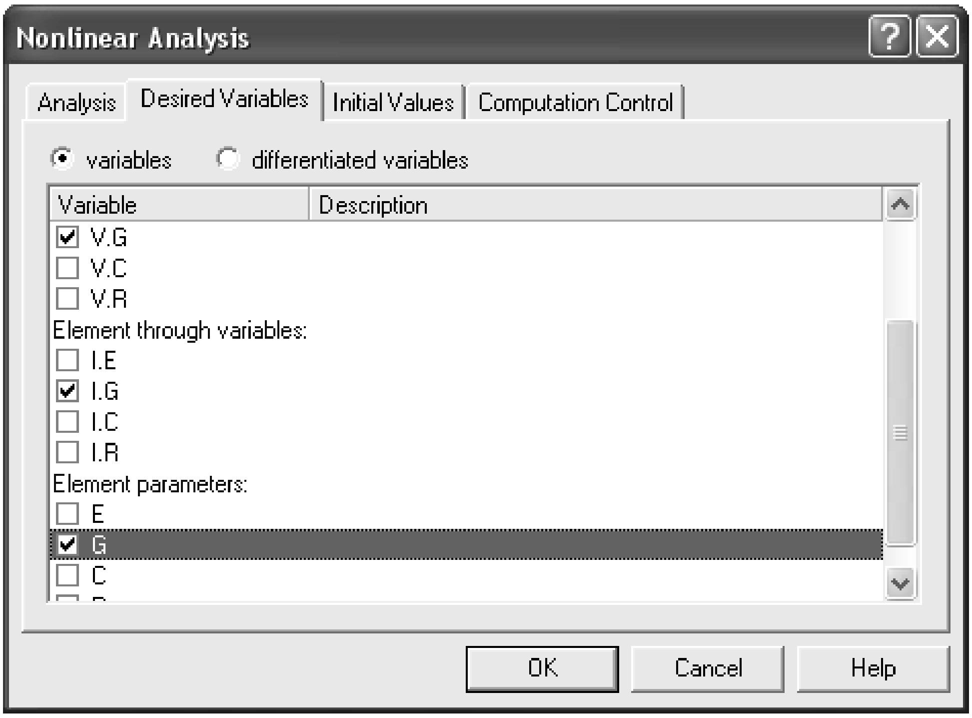
Nelineární analýzu lze uplatnit na soustavu zadanou schématem v aktivním souboru *.DIA nebo textem v souboru *.PRB. Chcete-li zadat přechodnou analýzu, pak v menu Analysis (Analýza) zvolte Nonlinear (Nelineární), čímž se vám otevře následující dialog. Zde si vyberte Analysis mode: Transient (Způsob analýzy: přechodový). V polích from: a to: pak zadejte hodnotu dolní a horní meze t_0 a t_f nezávisle proměnné t.



Zadávání způsobů nelineární analýzy.

10.2.2 Požadované proměnné nelineární analýzy

Po kliknutí na záložku Desired Variables (Požadované proměnné) se otevře následující dialog s nabídkou proměnných, které je DYNAST připraven pro zadanou úlohu vyhodnotit. Proměnné jsou zde označeny identifikátory, jejichž přehled uvádí tabulka **??**.

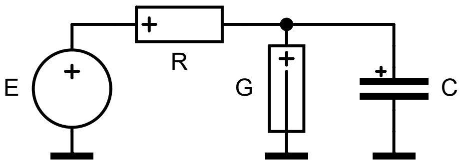


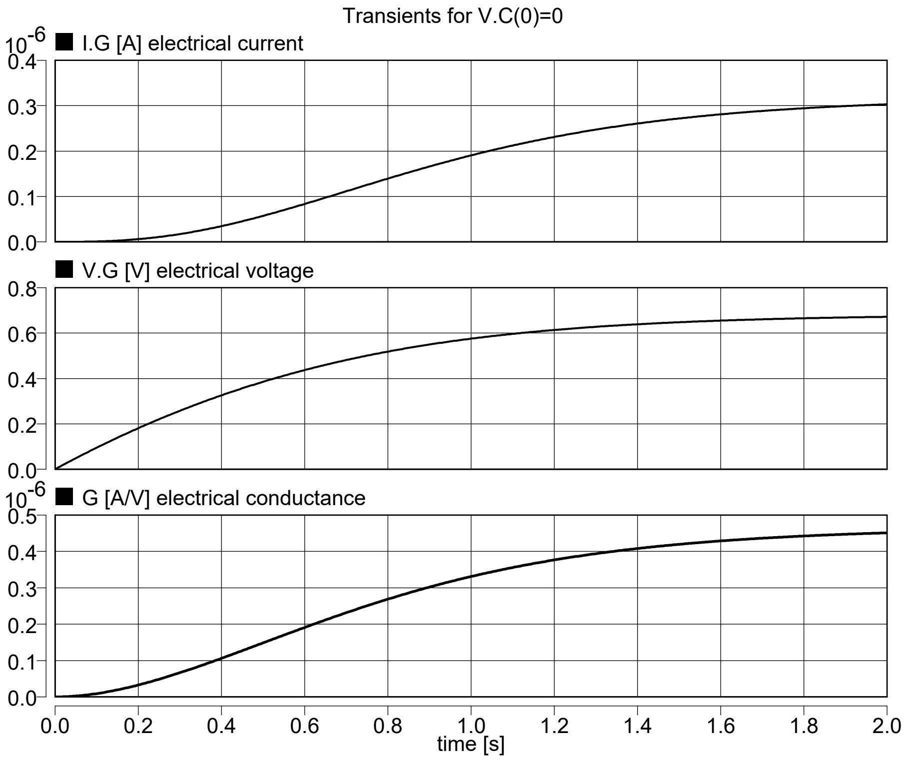
Zadávání žádaných proměnných nelineární analýzy.

DYNAST uloží po svém spuštění časové průběhy zatržených požadovaných proměnných do souboru typu *.O s textem výsledků v tabelární podobě, odkud je pak může vynášet do grafů (kapitola 13). Zvolíte-li si Differentiated variables (Derivované proměnné), budete si moci zatrhnout i derivace řešených proměnných dané soustavy.

Po zadání požadovaných veličin klikněte na OK a spusťte výpočet tak, že v menu Run (Spustit) vyberete příkaz Run Analysis nebo Run Analysis & Plot, případně klikněte na ikonu  nebo  v hlavním okně.

Příklad. Uvažujme elektrický obvod s nelineárním konduktorem o vodivosti $G = kv_G^2$ S, kde $k = 10^{-6}$. Parametry ostatních prvků v obvodu jsou: $E = 1$ V, $R = 1$ MΩ a $C = 1$ μF. Výše uvedené dialogy ukazují zadání analýzy přechodných odezev elektrického proudu i_G, napětí v_G a vodivosti G tohoto obvodu pro $0 \le t \le 2$ s. Výsledné průběhy znázorňují následující grafy.





10.2.3 Četnost bodů v průběhu proměnných

DYNAST vypočítává hodnoty proměnných v bodech nerovnoměrně rozložených na ose nezávisle proměnné ve snaze minimalizovat dobu výpočtu při respektování požadované přesnosti. Body vypočítaných průběhů jsou při jejich vynášení do grafu spojovány úsečkami. DYNAST však může hodnoty proměnných počítat i v bodech, které jsou rovnoměrně rozloženy podél osy nezávisle proměnné.

Chcete-li využít tuto možnost, potom v sekci Desired results (Požadované výsledky) v dialogu Nonlinear Analysis zatrhněte políčko Equidistant results (Rovnoměrné výsledky). Současně v přilehlém textovém poli specifikujte celkový počet požadovaných bodů v zadaném intervalu nezávisle proměnné t.

10.2.4 Statická analýza a analýza ustálených dějů

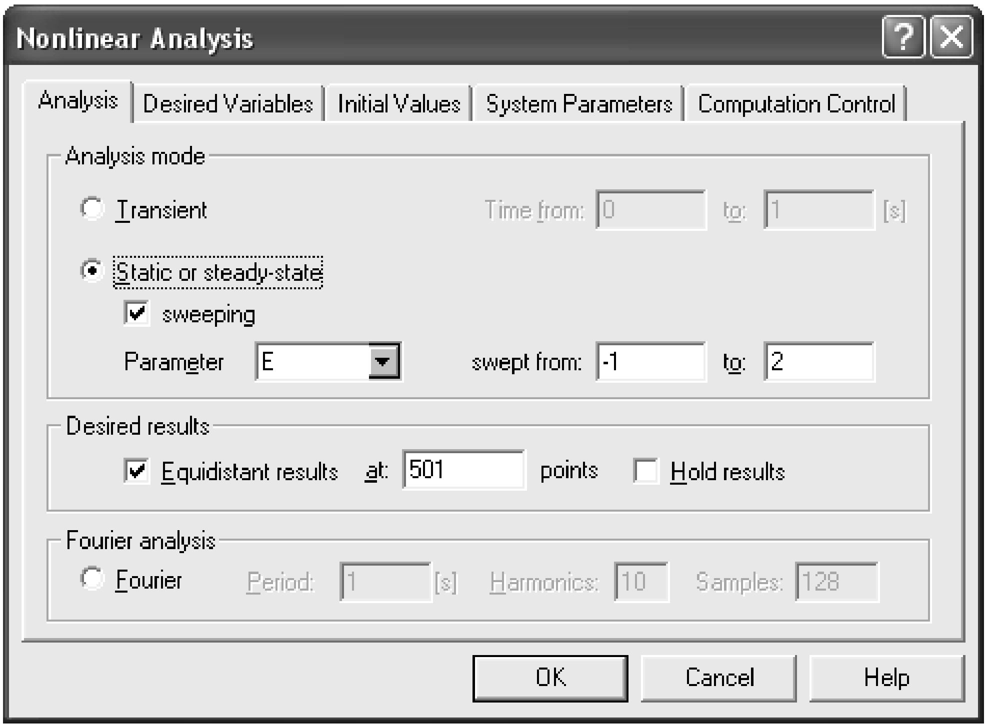
Při zadávání statické analýzy nebo analýzy ustálených dějů v dialogu Nonlinear Analysis zvolte v sekci Analysis mode: (Způsob analýzy) Static or steady-state (Statický nebo ustálený).

Příklad. Výsledkem statické analýzy obvodu je $i_G = 0.3177$ mA, $v_G = 0.6823$ V, 0.4657 mS. (Všimněte si, že k těmto hodnotám konvergují pro $t \to \infty$ průběhy v předchozích grafech.) Pro schéma obvodu v souboru QUADR.DIA výsledky budou v souboru QUADR.O ve tvaru:

```
 Steady-state solution
1 ...    I.G
2 ...    V.G
3 ...    G
      1              2              3
3.176703e-007  6.823264e-001  4.655694e-007
```

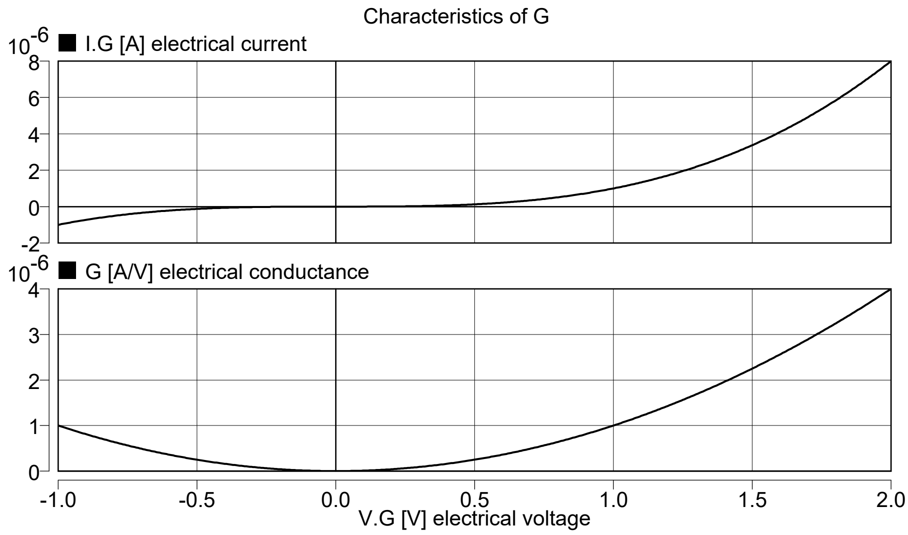
10.2.5 Analýza s rozmítnutým parameterem

Chcete-li vyšetřit závislost proměnných soustavy v ustáleném stavu na některém z jejích parametrů, postupujte následovně. V dialogu Nonlinear Analysis zatrhněte políčko Sweeping (Rozmítání), v rolovacím seznamu vyberte parametr, který má být rozmítnut a současně v textových políčkách from: a to: zadejte dolní i horní mez rozmítnutí parametru.



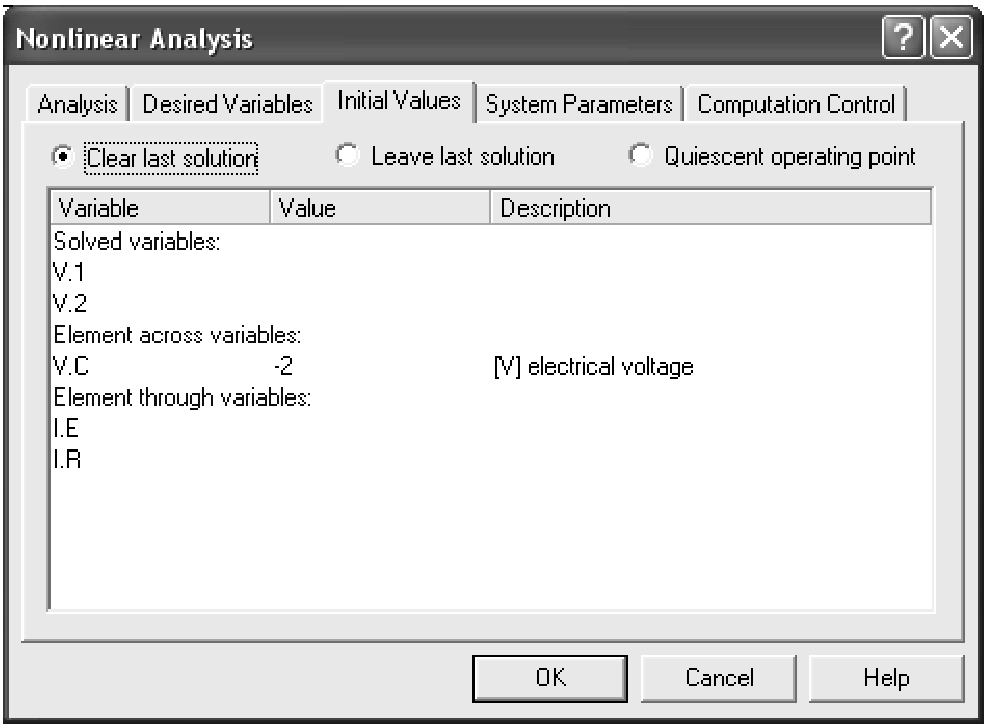
Zadání rozmítnutí parametru.

Příklad. Položme v našem obvodu $R = 0$. Zadáme-li v souhlase s dialogem rozmítnutí parametru E v intervalu $-1 \leq E \leq 2$ V, získáme následující charakteristiky $i_G = f(v_G)$ a $G = f(v_G)$ konduktoru G:



10.2.6 Počáteční podmínky analýzy přechodných dějů

V DYNASTu jsou počáteční podmínky $\mathbf{x}(t_0)$ soustav (10.1) implicitně považovány za nulové. Nenulové počáteční podmínky lze zadat několika způsoby. Slouží k tomu záložka Initial Values (Počáteční hodnoty) v dialogu Nonlinear Analysis.



Zadávání počátečních podmínek nelineární analýzy.

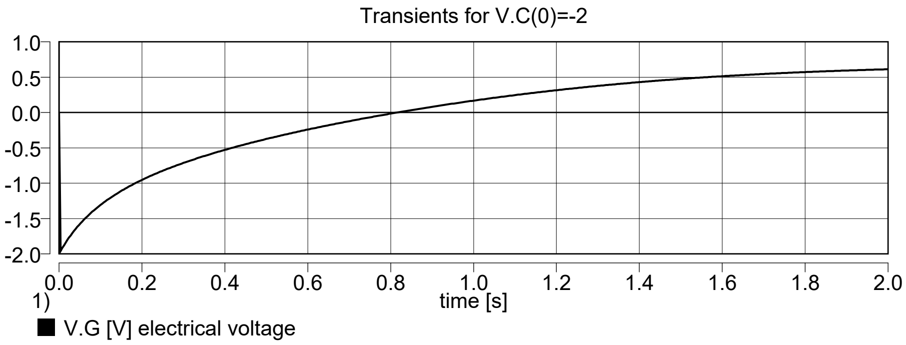
Chcete-li zadat vámi zvolené počáteční hodnoty proměnných, vyberte Clear last solution (Odstranit poslední řešení) a zadejte vaše hodnoty. Všimněte si, že počáteční podmínky se zadávají jen pro proměnné řešené v rovnicích formulovaných DYNASTem pro danou soustavu.

Chcete-li analyzovat fyzikální model, zadejte počáteční hodnoty

- spádových veličin fyzikálních prvků typu C, tj. kapacitorů a inertorů
- průtokové veličiny fyzikálních prvků typu L, tj. induktorů a pružin
- výstupní veličiny bloků typu BI, tj. integrátorů

DYNAST si určí počáteční hodnoty ostatních veličin sám tak, aby byly navzájem konzistentní.

Příklad. Jestliže s použitím uvedeného dialogu zadáme počáteční napětí kapacitoru v původním elektrickém obvodu jako $v_C = -2$ V, odezva napětí v_G bude ve tvaru



Někdy je žádoucí, aby počáteční hodnoty proměnných zadávané přechodné analýzy se shodovaly s hodnotami proměnných dosaženými na konci intervalu předchozí analýzy. V tom případě na záložce Initial Values (Počáteční hodnoty) v dialogu Nonlinear Analysis vyberte Leave last solution (Ponechat poslední řešení).

10.2.7 Počáteční odhad řešení

Záložku Initial Values (Počáteční hodnoty) v dialogu Nonlinear Analysis můžete využít i při statické analýze nebo analýze ustálených dějů, a to k zadání počátečního odhadu řešení. Tímto způsobem můžete urychlit konvergenci výpočtu a v případě nelineárních úloh s více řešeními i určit, které z řešení má být nalezeno.

Příklad. Algebraická rovnice

$$x^3 - 3x + 1 = 0$$

má řešení pro tři různé hodnoty x: ${}^1x = 0.3473, {}^2x = -1.879$ a ${}^3x = 1.532$. Všechna tato řešení lze nalézt opakováním statické analýzy pro tři různé počáteční odhady řešení, např. pro:
${}^1x^0 = 0, {}^2x^0 = -3$ a ${}^3x^0 = 3$.

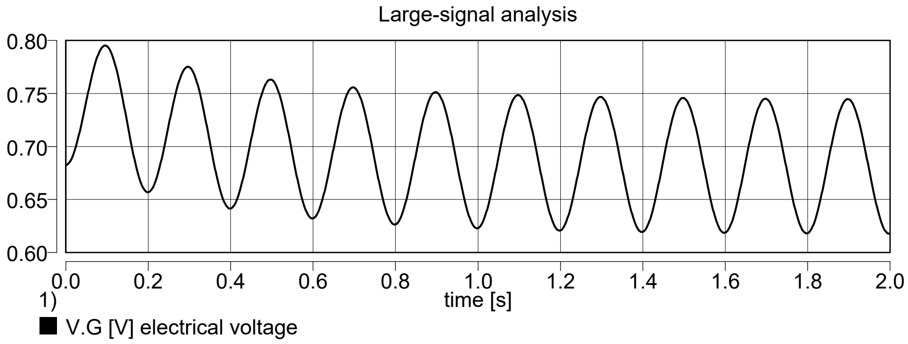
10.2.8 Analýza odezev na velké signály

Může se stát, že budete potřebovat vyšetřit přechodné odezvy nelineární soustavy na relativně velké externí buzení v okolí klidového pracovního bodu soustavy. Potom analýzu takovýchto odezev zadáte ve dvou krocích:

1. v dialogu Nonlinear Analysis zvolíte Transient (Přechodná) a zadáte meze intervalu přechodné analýzy

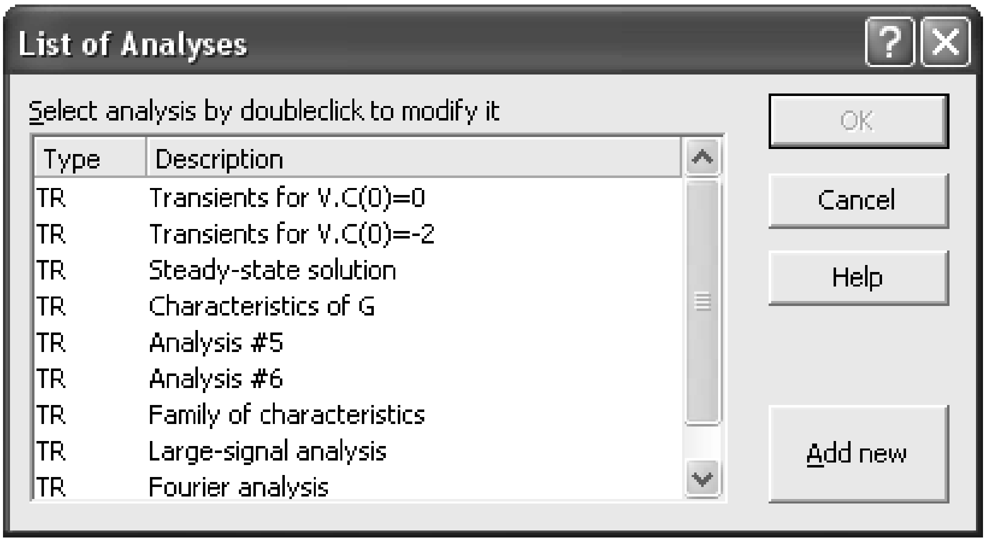
2. na záložce Initial Values (Počáteční hodnoty) vyberte položku Quiescent operating point (Klidový pracovní bod)

Příklad. V našem obvodu zvolme $E = 1 + 2\sin 10\pi t$ V. Výsledný průběh napětí v_G na takto velký signál v okolí klidového pracovního bodu je na následujícím grafu. Všimněte si, že vychází z klidového pracovního bodu shodného s bodem vypočítaným již dříve pomocí analýzy ustáleného stavu.



10.2.9 Obměna nebo přidání nelineární analýzy

Předpokládejme, že chcete obměnit nelineární analýzu, kterou jste v dané úloze již zadali. Pokud jste zadali jen jednu analýzu, otevřete znovu dialog Nonlinear Analysis v menu Analysis. Pokud jste však již zadali více analýz, otevřete v menu Analysis dialog List of Analyses:



Obměna nebo přidání analýzy.

Chcete-li některou z již zadaných analýz obměnit, vyberte ji v seznamu tohoto dialogu a klikněte na OK. Tím se vám otevře druhý dialog, který vám umožní provést požadované změny.

Potřebujete-li přidat další analýzu do zadání dané úlohy, zvolte opět List of Analyses (Seznam analýz) v menu Analysis. Tentokrát zde ale klikněte na Add new a pak si vyberte způsob té analýzy, kterou chcete přidat.

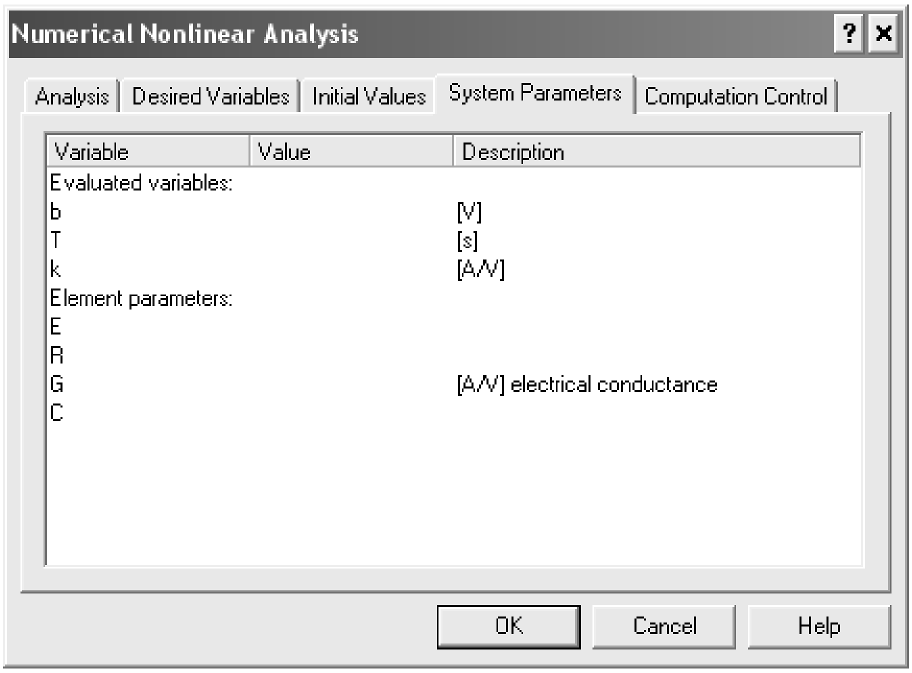
10.2.10 Výpočet rodiny odezev nebo charakteristik

DYNAST vám rovněž umožní přechodnou analýzu proměnné, která je v seznamu požadovaných proměnných uvedena jako první, automaticky opakovat pro různé hodnoty parametrů soustavy a výsledky zapsat do společné tabulky v souboru typu *.O s textem výsledků:

1. První přechodnou odezvu zadejte způsobem popsaným výše s tím rozdílem, že před kliknutím na OK v dialogu Nonlinear analysis zatrhněte HOLD results (Zadržet výsledky).

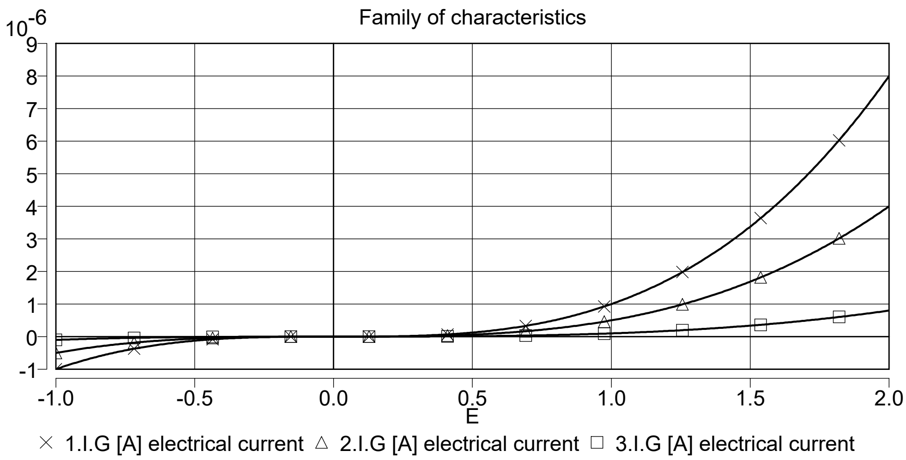
2. V každém dalším kroku proveďte potřebnou modifikaci hodnot parametrů soustavy v dialogu Nonlinear analysis pomocí záložky System Parameters uvedené níže. Nezapomeňte přitom vždy znovu zadat požadované počáteční podmínky (i když jsou nulové). Současně zatrhněte políčko HOLD, pokud se nejedná o poslední analýzu.

3. Při poslední analýze ponechte HOLD nezatržené.



Modifikace parametrů systému.

Obdobný postup lze uplatnit při výpočtu statických charakteristik soustav pro postupně modifikované hodnoty některých jejich parametrů opět pomocí záložky System Parameters. V tomto případě úlohu nezávisle proměnné převezme rozmítnutý parametr.



Příklad. Položme v původním elektrickém obvodu opět $R = 0$. To nám umožní vypočítat předcházející rodinu statických charakteristik $i_G = i_G(V_E)$ nelineárního konduktoru G pro tři různé hodnoty parametru k. Při prvních dvou statických analýzách s parametrem E rozmítnutým v intervalu $-1 \leq E \leq 2$ V políčko HOLD zatrhneme, při třetí analýze nikoliv. Přitom s využitím záložky System Parameters parametr k postupně specifikujeme jako $k = 1,\ 0.5$ a $0.1\ \mu$S.

10.3 Zadávání Fourierovy analýzy

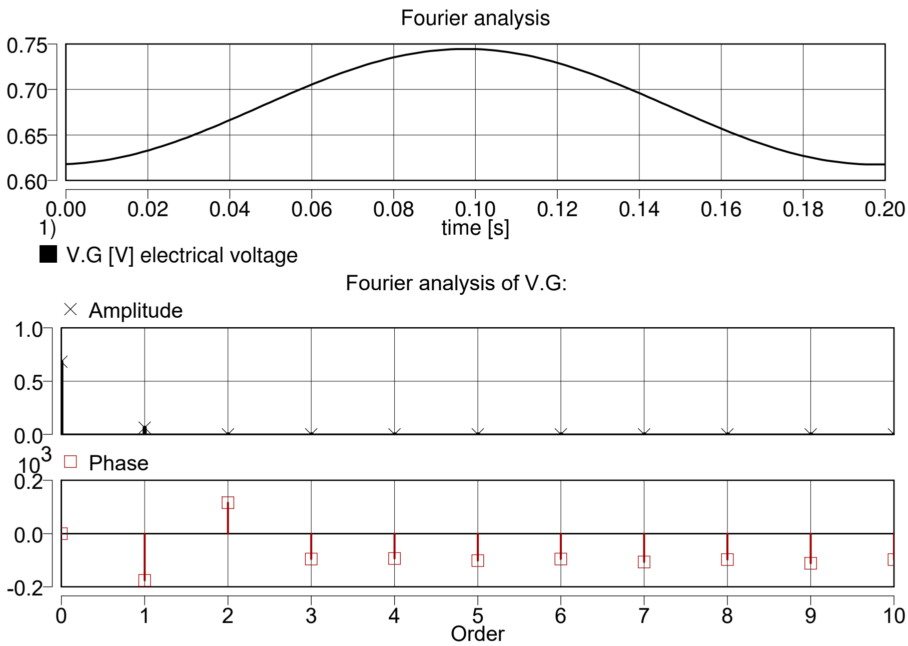
Je-li $f(t)$ ustálená periodická odezva s periodou T, DYNAST nalezne n prvních členů Fourierovy řady aproximujících odezvu $f(t)$ jako

$$f(t) \cong \sum_{k=0}^{n} A_k \cos(2\pi kt/T + \phi_k)$$

kde A_k je amplituda a ϕ_k fáze k-té harmonické v kmitočtovém spektru odezvy.

Při zadávání Fourierovy analýzy vyberte Fourier v dialogu Nonlinear Analysis. Potom v textovém políčku Period specifikujte číselnou konstantou periodu T analyzovaných odezev. V textovém políčku Harmonics můžete zadat počet harmonických n, které chcete určit (implicitně $n = 10$). Textové políčko Samples (Vzorky) vám dovoluje zadat počet vzorků analyzovaných odezev, které DYNAST využije při výpočtu jejich spektra v jedné periodě (implicitně 128).

Příklad. Podrobme Fourierově analýze výsledné napětí v_G z příkladu analýzy odezev elektrického obvodu na velký signál. Zadáme-li periodu buzení $T = 0.2$ s, dospějeme k výsledkům, které následují. V prvním grafu je průběh napětí v_G v jedné periodě použitý pro Fourierovu analýzu. DYNAST jej vypočítá automaticky v intervalu $t_f \le t \le t_f + T$, kde t_f je hodnota t na konci předcházející nelineární analýzy přechodných odezev obvodu. Průběh může posloužit ke kontrole, s jakou přesností byla splněna podmínka periodicity odezvy $v_G(t_f + T) = v_G(t_f)$. Druhý graf ukazuje amplitudy a fáze prvních deseti harmonických výsledného kmitočtového spektra. Pro větší názornost jsou koncové body histogramu označeny značkami.



10.4 Text nelineární analýzy

Data se zapisují do sekce TR uvozené příkazem `*TR;` v textovém souboru úlohy *.PRB. Této sekci musí předcházet sekce SYSTEM se zadáním analyzované soustavy.

Analýza přechodných dějů

$$\texttt{TR[TIME]} \quad t_0 \quad t_f\texttt{;}$$

$\boldsymbol{t_0}$ a $\boldsymbol{t_f}$ jsou numerické konstanty nebo symbolické výrazy určující dolní a horní mez intervalu nezávisle proměnné t

`TIME` je identifikátor nezávisle proměnné t, který lze vypustit

Statická analýza nebo analýza ustáleného stavu

$$\texttt{DC;}$$

Statická analýza s rozmítnutým parametrem

$$\texttt{DC}\,[\mathit{parametr}] \quad \mathit{min} \quad \mathit{max}\texttt{;}$$

parametr je identifikátor některého parametru analyzované soustavy. Není-li uveden, implicitně je uvažován identifikátor nezávisle proměnné `TIME`.

min a ***max*** jsou numerické konstanty nebo symbolické výrazy určující dolní a horní mez rozmítaného parametru

Analýza odezev z klidového stavu

$$\texttt{DCTR[TIME]} \quad t_0 \quad t_f\texttt{;}$$

Požadované proměnné

$$\texttt{PRINT}\ \Big[[\texttt{(}\mathit{bodů}\texttt{)}]\,[\texttt{!XALL,}]\,\mathit{proměnná}\,[\texttt{,}\ \mathit{proměnná}\ldots]\Big]\texttt{;}$$

`!XALL` způsobí, že za požadované proměnné budou považovány všechny řešené proměnné

proměnná je identifikátor požadované proměnné nebo parametru soustavy. Přehled identifikátorů najdete v tab. **??**.

bodů je celočíselná konstanta určující počet bodů rovnoměrně rozložených podél osy nezávisle proměnné v intervalu analýzy, v nichž DYNAST uloží hodnoty požadovaných proměnných do výsledného souboru typu *.O. Je-li řetězec (*bodů*) vynechán, hodnoty proměnných se uloží v nerovnoměrně rozložených bodech v závislosti na průběhu výpočtu.

Počáteční podmínky nebo počáteční odhad

`INIT` *proměnná* = *hodnota* `[,` *proměnná* = *hodnota*. . . `];`

proměnná označuje

- identifikátor řešené proměnné rovnic
- identifikátor spádové veličiny fyzikálního prvku typu C
- identifikátor průtokové veličiny fyzikálního prvku typu L
- identifikátor výstupní proměnné integračního bloku BI
- `!XALL`, což je příkaz pro zadání shodné hodnoty pro všechny počáteční podmínky
- `!XMAX`, příkaz pro řízení výpočtu

hodnota je číselná konstanta nebo symbolický výraz. Při první nelineární analýze po spuštění programu je to implicitně nula. V dalších nelineárních analýzách DYNAST může tyto hodnoty převzít z posledního řešení předcházející nelineární analýzy, pokud nebyly vynulovány příkazem `RESET`.

Uložení posledního řešení do souboru

`SAVE` *jméno*[`.INIT`]`;`

jméno je název souboru, do kterého se má uložit vektor posledního řešení z nelineární analýzy spuštěné bezprostředně předcházejícím příkazem `RUN`

Načtení počátečních podmínek ze souboru

`LOAD` *jméno*[`.INIT`]`;`

jméno je název souboru, ze kterého se má načíst vektor posledního řešení z některé předcházející analýzy, aby mohl být využit jako vektor počátečních podmínek v zadávané analýze spuštěné následujícím příkazem `RUN`

Zrušení příkazů a vynulování předchozího řešení

`RESET;`

Modifikace parametrů soustavy

`MODIFY` *parametr* = *hodnota* `[,` *parameter* = *hodnota*. . . `];`

parametr je identifikátor některého parametru soustavy

hodnota je číselná konstanta nebo symbolický výraz

Fourierova analýza

`FOUR` *perioda* [`,` *harmonické* [`,` *vzorků*]]`;`

perioda je číselná konstanta udávající dobu periody analyzovaného ustáleného periodického průběhu proměnných

harmonické je celočíselná konstanta udávající počet požadovaných harmonických výsledného kmitočtového spektra proměnných (implicitní hodnota je 10)

vzorků je celočíselná konstanta udávající počet vzorků v jedné periodě, které jsou uvažovány při výpočtu kmitočtového spektra proměnných (mplicitní hodnota je 128)

Spuštění analýzy

`RUN` [`HOLD`] [*řízení* = *hodnota* [`,` *řízení* = *hodnota*. . .]]`;`

`HOLD` způsobí, že se výpočet spustí, ale výsledek zůstane neuložen do souboru *.O až do prvního příkazu `RUN` bez příkazu `HOLD` v zadání dané analýzy

řízení je identifikátor parametru pro řízení výpočtu

hodnota je konstanta udávající hodnotu parametru

Příklad. Soubor vstupních dat vygenerovaných DYNASTem pro předchozí příklady analýzy elektrického obvodu.

```
*: Circuit with quadratic conductor
*SYSTEM;
b = 0;   ::[V]
T = .2;  ::[s]
k = 1u;  ::[A/V]
E 1 = 1 + b*sin(2pi/T*time);
R 1-2 = 1me;
G 2 = k*v.G**2;
C 2 = 1u;
*TR;
TR 0 2;
PRINT(501) I.G, V.G, G;
RUN; ::Transients for V.C(0)=0
TR 0 2;
RESET;
INIT V.C=-2;
PRINT(501) I.G, V.G, G;
RUN; ::Transients for V.C(0)=-2
DC;
RUN; ::Steady-state solution
MODIFY R = 0;
DC E -1 2;
RUN; ::Characteristics of G
```

```
RUN HOLD;
MODIFY k=.5u;
RUN HOLD;
MODIFY k=.1u;
RUN; ::Family of characteristics
MODIFY R=1me, b=5, k=100m;
DCTR 0 2;
PRINT (1001) I.G, V.G, G;
RUN; ::Large-signal analysis
FOUR T;
RUN; ::Fourier analysis
*END;
::I.G [A] electrical current
::V.G [V] electrical voltage
::G [A/V] electrical conductance
::V.C [V] electrical voltage
```

Příklad. Soubor vstupních dat pro výpočet všech kořenů polynomu třetího stupně pomocí různých počátečních odhadů řešení.

```
*: Polynomial roots
*SYSTEM;
SYSVAR x;
0 = x**3 - 3*x + 1;
*TR;
DC;
PRINT !XALL;
RUN;
INIT x=-3; :initial estimate of solution
RUN;
INIT x=+3; :initial estimate of solution
RUN;
*END;
```

Kapitola 11

Numerická kmitočtová analýza

Obsah kapitoly

Numerickou kmitočtovou analýzu můžete aplikovat na lineární modely dynamických soustav modelovaných schématy kombinovanými případně s rovnicemi. Můžete ji použít rovněž pro kmitočtovou analýzu odezev nelineárních soustav na malé signály po linearizaci soustav v okolí jejich klidového pracovního bodu nalezeného při předcházející nelineární analýze (kapitola 10). Numerickou kmitočtovou analýzu lze uplatnit i na soustavy s kmitočtově závislými parametry. Může být tedy použita i pro lineární nebo linearizované modely s rozloženými parametry. Tím se liší od semisymbolické analýzy (kapitola 12) umožňující výpočet kmitočtových charakteristik přenosových funkcí s konstantními koeficienty.

11.1 Možnosti numerické kmitočtové analýzy

Cílem této analýzy je výpočet závislosti odezev lineárních dynamických soustav v ustáleném stavu na kmitočtu harmonického (sinusového) buzení. Pro zadané schéma (kombinované případně s rovnicemi) DYNAST v každém kmitočtovém bodě ω formuluje a numericky řeší soustavu komplexních algebraických rovnic

$$\mathbf{A}(j\omega) \cdot \mathbf{X}(j\omega) = \mathbf{B}(j\omega) \tag{11.1}$$

kde matice $\mathbf{A}(j\omega)$ charakterizuje danou analyzovanou soustavu a vektor $\mathbf{B}(j\omega)$ její buzení, $\mathbf{X}(j\omega)$ je vektor řešení rovnic (11.1) a ω [rad/s] je kruhový kmitočet. Přitom $\omega = 2\pi f$, kde f [Hz] je kmitočet.

Uvažujme harmonické buzení lineární dynamické soustavy ve tvaru $u(t) = U \sin(\omega t - \varphi)$. Odezvu i-té proměnné soustavy na toto buzení pak můžeme předpokládat rovněž v harmonickém tvaru, a to $x_i(t) = |X_i(j\omega)| \sin(\omega_i t - \varphi_i)$. Kmitočty buzení a odezvy budou sice shodné, tj. $\omega_i = \omega$, amplitudy a fáze budou ale obecně různé, tj. $|X_i(j\omega)| \neq U$ a $\varphi_i(\omega) \neq \varphi$.

Harmonické odezvy jednotlivých proměnných dynamické soustavy $X_i(j\omega)$ jsou obecně komplexními funkcemi. Aby jejich závislost na kmitočtu mohla být znázorněna v rovině, musí být rozloženy do dvou komplementárních složek, jaké představuje amplituda $|X_i(j\omega)|$ a fáze $\varphi_i(\omega)$ nebo reálná část $Re X_i(j\omega)$ a imaginární část $Im X_i(j\omega)$. Průběhy těchto složek v závislosti na kmitočtu se během výpočtu ukládají do textového souboru typu *.O s výsledky, odkud pak mohou být vyneseny do různých grafů (kapitola 13).

Jelikož závislost parametrů analyzovaných soustav na kmitočtu může být zadána velmi obecnými symbolickými výrazy, numerická kmitočtová analýza může být použita mj. i pro soustavy s rozloženými parametry.

11.2 Zdroje buzení pro numerickou kmitočtovou analýzu

Pro harmonické buzení soustav se při numerické kmitočtové analýze používají speciální fyzikální prvky. Jsou to **harmonické zdroje** uvedené v tab. 11.1, kterých může ve schématu působit několik současně. Hodnota parametru p se zde pro buzení $U\sin(\omega t - \varphi)$ zadává ve tvaru

$$p = U@\varphi$$

kde U udává velikost amplitudy buzení a φ jeho fázi, znak `@` odděluje tyto dva údaje (`@0` lze vynechat). Kmitočet buzení je určován výpočetním algoritmem numerické kmitočtové analýzy.

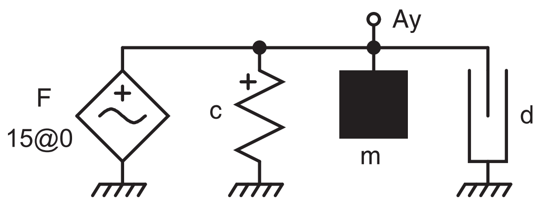
Tabulka 11.1: Zdroje pro numerickou kmitočtovou analýzu.

TYP	FJ	FE
Vícedoménové prvky	zdroj průtokové veličiny	zdroj spádové veličiny
Konstituční vztah	$I(j\omega) = p$	$E(j\omega) = p$

Při numerické kmitočtové analýze DYNAST s ostatními zdroji ve schématu naloží tak, že

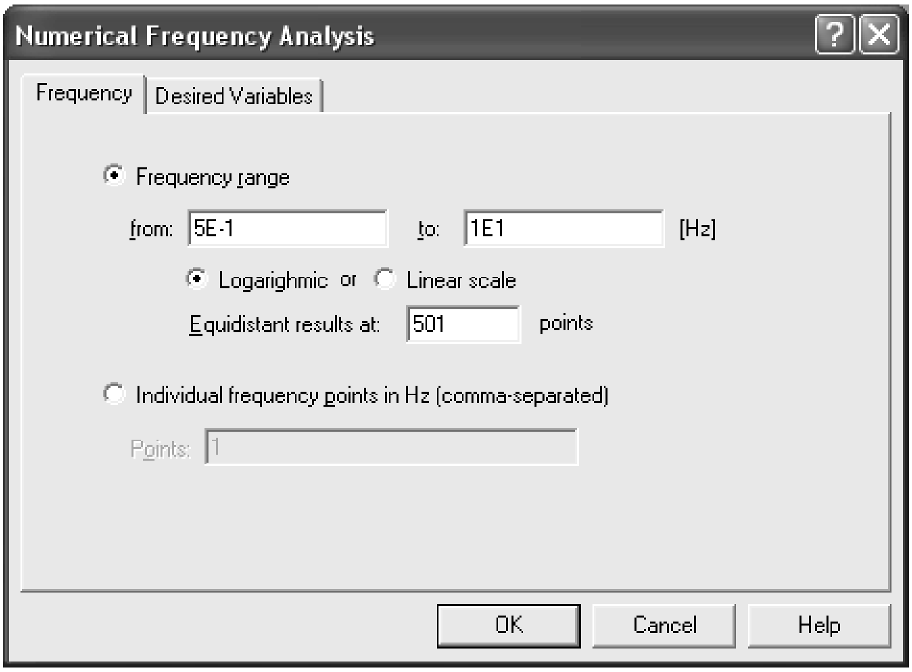
- nezávislé zdroje spádových veličin typu E se chovají jako ideální spoje
- zdroje průtokových veličin typu J se chovají jako kdyby neexistovaly
- nezávislé explicitní bloky typu BS působí jako zdroje nulových proměnných

Příklad. Následuje schéma pro numerickou kmitočtovou analýzu dynamického modelu pružně uloženého stroje, na který působí harmonická síla $F = 15\sin\omega t$ N. Hmotnost stroje $m = 18$ kg, poddajnost uložení $c = 0.3$ mm/N a jeho tlumení $d = 200$ N.s/m.



11.3 Zadávání numerické kmitočtové analýzy

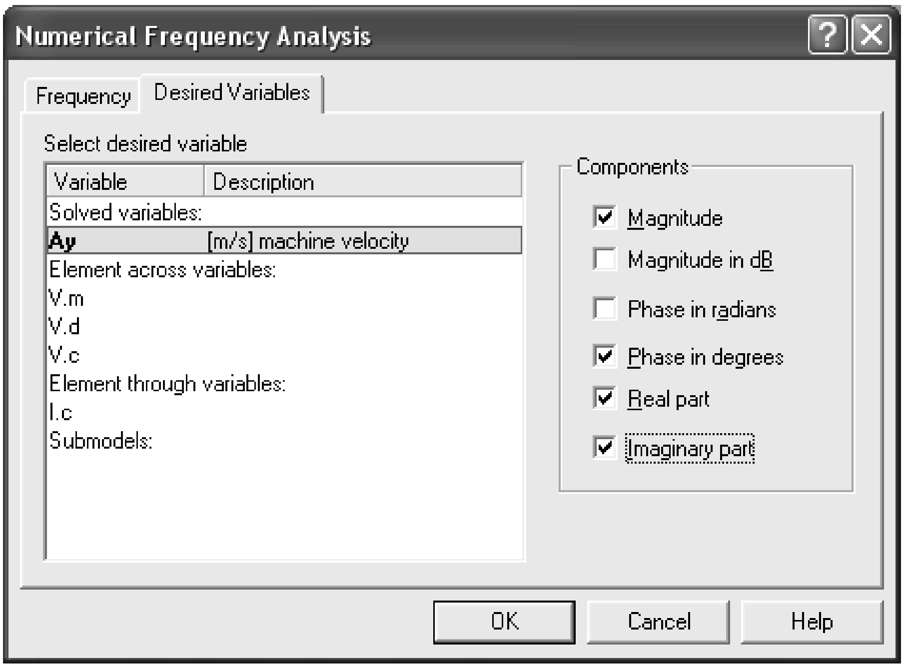
Aktivujte okno se schématem modelu analyzované soustavy. V menu Analysis si zvolte Numerical Frequency Analysis (Numerická kmitočtová analýza).



Zadávání kmitočtů.

V otevřeném dialog máte dvě možnosti volby kmitočtů, pro které bude provedena analýza:

- Zvolíte-li Frequency range (Kmitočtový rozsah), můžete zadat dolní a horní kmitočet rozsahu, logaritmické nebo lineární měřítko na kmitočtové ose a počet kmitočtů rovnoměrně rozložených bodů ve zvoleném intervalu.
- Pokud zvolíte Frequency points (Kmitočtové body), v textovém poli Points si zadejte vzestupnou posloupnost jednotlivých kmitočtů oddělených čárkami.

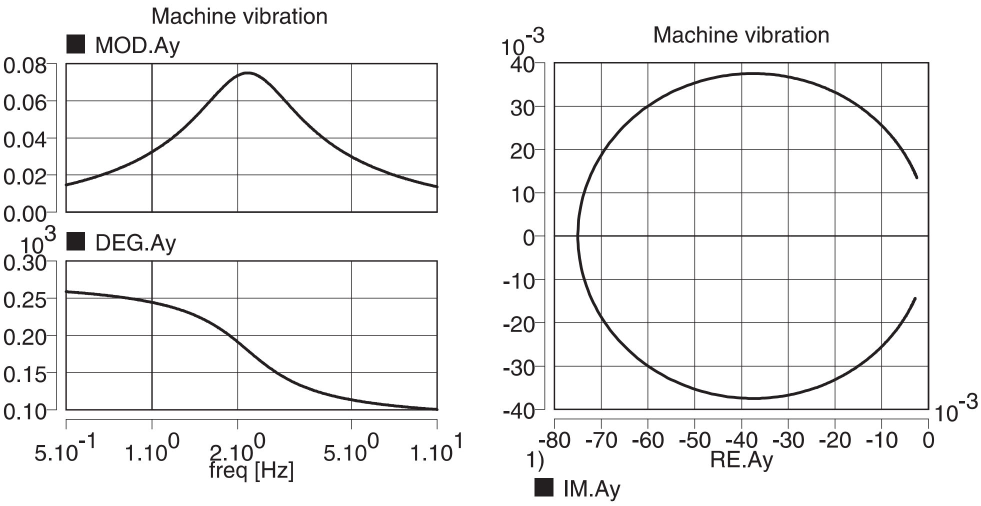


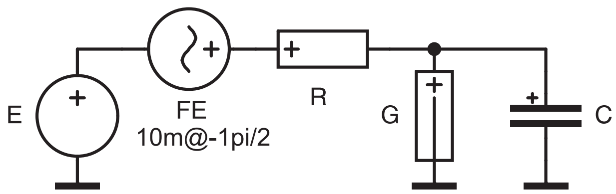
Zadávání požadovaných proměnných.

V dalším kroku otevřete v dialogu Numerical Frequency Analysis záložku Desired Variables (Požadované proměnné). Zde si vyberte proměnné soustavy, jejichž kmitočtové odezvy chcete počítat. Současně si u každé vybrané proměnné v poli Components (Složky) určete, které její složky chcete uložit do textového souboru typu *.O s výsledky.

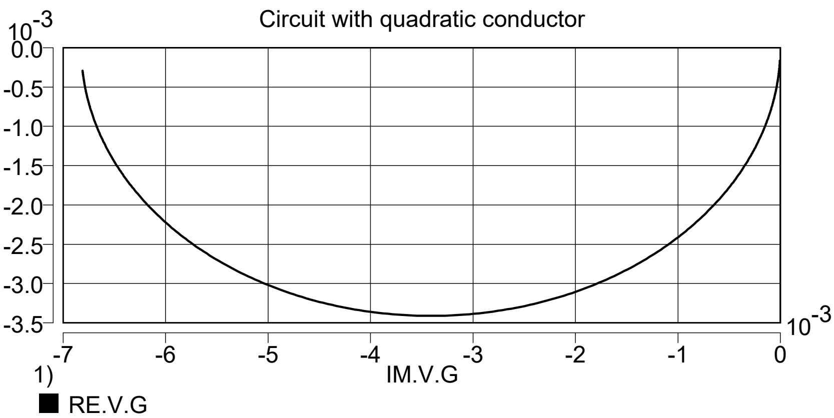
Po zadání kmitočtů a požadovaných veličin klikněte na OK a spusťte výpočet tím, že v menu Run (Spusť) vyberete příkaz Run Analysis nebo Run Analysis & Plot, příp. klikněte na ikonu nebo v hlavním okně.

Příklad. Kmitočtové odezvy svislé rychlosti pružně uloženého stroje modelovaného předchozím schématem, jejichž výpočet byl zadán v uvedených dialozích:





Příklad. Pro **výpočet kmitočtové odezvy nelineární soustavy na malé signály** schéma soustavy doplníme o zdroj harmonického buzení, jako jsme to učinili v případě elektrického obvodu z kapitoly 10. Pomocí nelineární analýzy nejprve nalezneme klidový pracovní bod soustavy a bezprostředně potom zadáme kmitočtovou analýzu. Zatímco se při první analýze ze zdrojů uplatní pouze první, tj. zdroj $E = 1$ V, při druhé se uplatní jen harmonický zdroj $u = 10\cos\omega t = 10\sin(\omega t - 1\pi/2)$ mV. Výslednou odezvu napětí v_G lze zobrazit např. takto:



11.4 Text numerické kmitočtové analýzy

Data se zapisují v textovém souboru *.PRB do sekce vstupních dat AC uvozené příkazem `*AC;`. Této sekci musí předcházet sekce SYSTEM se zadáním analyzované soustavy a s alespoň jedním zdrojem harmonického buzení.

Zdroje harmonického buzení

$$\textit{zdroj}\ [\texttt{>}\ \textit{typ}]\ +\textit{uzel}\ [\texttt{-}\ -\textit{uzel}]\ \left[\texttt{=}\ \textit{amplituda}\ [\texttt{@}\ \textit{fáze}]\right]\texttt{;}$$

nebo

$$\textit{zdroj}\ [\texttt{> FE}]\ \texttt{-}\ \textit{série}\ \left[\texttt{=}\ \textit{amplituda}\ [\texttt{@}\ \textit{fáze}]\right]\texttt{;}$$

zdroj je uživatelský identifikátor zadávaného prvku

typ je řetězec určující typ zadávaného prvku, tj. buď `FE` nebo `FJ`

+uzel a ***-uzel*** jsou identifikátory uzlů schématu, mezi kterými je zadávaný zdroj umístěn

série je identifikátor sériové kombinace prvků, do které je zadávaný zdroj zapojen

amplituda je číselná konstanta nebo symbolický výraz udávající amplitudu harmonického zdroje

fáze je číselná konstanta nebo symbolický výraz udávající fázi harmonického zdroje v radiánech. Pokud $\varphi = 0$, řetězec `@0` lze vynechat.

Numerická kmitočtová analýza

$$\texttt{FREQ}\ \left[\texttt{/LIN}\right]\ [\textit{min max}]\texttt{;}$$

nebo

$$\texttt{FREQ =}\ f_1\texttt{,}\ f_2\texttt{,}\ldots\texttt{;}$$

min a ***max*** jsou číselné konstanty určující dolní a horní mez intervalu kmitočtů

f_1, f_2,... jsou číselné konstanty udávající individuální kmitočtové body

`/LIN` je řetězec vyžadující lineární měřítko na kmitočtové ose. Implicitně je toto měřítko logaritmické.

Pokud příkaz `FREQ` v zadání zcela chybí, DYNAST provede analýzu v kmitočtovém intervalu od 10^{-1} do 10^{1} Hz.

Požadované proměnné

$$\texttt{PRINT}\ [\texttt{(}\textit{bodů}\texttt{)}]\ \textit{složka}\texttt{.}\textit{proměnná}\ [\texttt{,}\ \textit{složka}\texttt{.}\textit{proměnná}\ldots]\texttt{;}$$

bodů je celočíselná konstanta udávající počet kmitočtů, pro které bude kmitočtová charakteristika vypočítána, implicitně 501

proměnná je identifikátor označující požadovanou proměnnou

složka je identifikátor některé ze složek požadované proměnné podle tab. 12.3

Výpočet numerické kmitočtové analýzy se spouští příkazem `RUN;`. Výsledky se ukládají do souboru typu *.O.

Tabulka 11.2: Složky proměnných při numerické kmitočtové analýze.

TYP	SLOŽKA	TYP	SLOŽKA
`MOD`	modul	`DB`	modul v dB
`RAD`	fáze v radiánech	`RE`	reálná část
`DEG`	fáze ve stupních	`IM`	imaginární část

Příklad.

```
*:Machine vibration
*SYSTEM;
m > C Ay = 18;     ::[kg] machine mass
d > G Ay = 0.2k;   ::[N.s/m] damping
c > L Ay = 0.3m;   ::[m/N] spring compliance
FJ > FJ Ay = 15@0;  ::[N] excitation force
*AC;
FREQ 5E-1 1E1;
PRINT MOD.Ay, DEG.Ay, RE.Ay, IM.Ay;
RUN;
*END;
::Ay [m/s] machine velocity
```

Příklad.

```
*: Circuit with quadratic conductor
*SYSTEM;
k = 1u;               ::[A/V]
E 1 = 1;              ::[V]
FE 2-1 = 10m@-1pi/2; ::[V]
R 2-3 = 1me;          ::[ohm]
G 3 = k*v.G**2;       ::[S]
C 3 = 1u;             ::[F]
*TR;
DC;
RUN;
*AC;
FREQ 1E-2 1E1; PRINT RE.V.G, IM.V.G;
RUN;
*END;
```

Kapitola 12

Semisymbolická analýza

Obsah kapitoly

Semisymbolickou analýzu lze aplikovat na lineární časově nezávislé modely soustav se soustředěnými parametry v podobě schémat kombinovaných případně s rovnicemi. DYNAST umožňuje i semisymbolickou analýzu odezev nelineárních soustav na malé signály za předpokladu, že jejich klidový pracovní bod byl určen pomocí nelineární analýzy (kapitola 10). DYNAST dokáže pro uvedené modely nalézt jejich přenosové funkce a Laplaceovy obrazy odezev na počáteční podmínky v semisymbolickém tvaru. V tomto tvaru dokáže vypočítat i příslušné časové odezvy pomocí symbolické zpětné transformace. Tyto odezvy a kmitočtové charakteristiky vyhodnocuje i numericky a vynáší je do různých grafů.

12.1 Možnosti semisymbolické analýzy

12.1.1 Odezvy blokových schémat

Obrázek znázorňuje blokové schéma dynamické soustavy buzené zdrojem signálu $u(t)$ v podobě autonomního bloku typu BS. Za předpokladu, že toto schéma představuje lineární dynamický model soustavy s konstantními parametry, **Laplaceův obraz odezvy** jeho výstupní proměnné $y(t)$ lze vyjádřit jako

$$Y(s) = Y_0(s) + Y_u(s)$$

$Y_0(s)$ je obraz odezvy soustavy na její počáteční stav při nulovém buzení $u(t) = 0$ a $Y_u(s)$ je obraz odezvy soustavy na buzení zdrojem signálu $u(t)$ při jejím nulovém počátečním stavu. Počáteční stav blokového schématu je určen počátečními stavy jeho integrátorů.

Je-li ve schématu více zdrojů buzení, potom

$$Y(s) = Y_0(s) + Y_{u1}(s) + Y_{u2}(s) + \ldots + Y_{un}(s)$$

kde $Y_{ui}(s)$ je obraz odezvy na i-tý zdroj buzení $u_i(t)$, $i = 1, 2, \ldots$, při nulovém počátečním stavu soustavy přičemž všechny budící zdroje kromě i-tého jsou považovány za zdroje nulového signálu.

Obrazy odezev $Y_{ui}(s)$ na jednotlivé zdroje buzení $u_i(t)$ lze vyjádřit jako

$$Y_{ui}(s) = H_i(s) \cdot U_i(s)$$

kde $H_i(s) = Y_{ui}(s)/U_i(s)$ je i-tá **přenosová funkce** soustavy a $U_i(s)$ je obraz buzení $u_i(t)$.

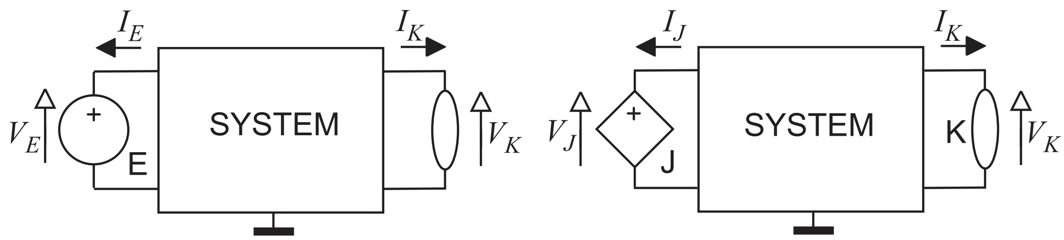
Jelikož v případě buzení jednotkovým (Diracovým) impulzem je obraz buzení $U_i(s) = 1$ a tudíž výraz pro obraz tohoto buzení se shoduje s výrazem pro příslušnou přenosovou funkci, tj. $H_i(s) = Y_{ui}(s)$. (Jednotkový impulz má nekonečně velkou amplitudu, ale přitom tak malou šířku, že jeho plocha je jednotková.)

12.1.2 Odezvy fyzikálních schémat

Vztahy pro obrazy odezev a jejich souvislost s přenosovými funkcemi uvedené v předchozím odstavci zůstávají v platnosti i pro modely dynamických soustav v podobě fyzikálních schémat. Rozdíl je však ve fyzikální podstatě proměnných, které v těchto vztazích vystupují.

Buzení ve fyzikálních schématech zajišťují nezávislé zdroje spádových nebo průtokových veličin. DYNAST připouští v těchto schématech rovněž buzení nezávislými bloky typu BS. Tyto bloky se pak chovají jako "uzemněné"nezávislé zdroje spádové veličiny.

Odezvu $y(t)$ ve fyzikálních schématech představuje spádová nebo průtoková proměnná některého fyzikálního prvku. V příkladech na obr. a a b je to prvek K, který může v krajních případech představovat buď ideální spoj, když $V_K = 0$, nebo naopak ideální rozpojení, když $I_K = 0$. Prvek K lze pak nahradit ideálním indikátorem průtoku nebo spádu.



(a) (b)

Počáteční stav fyzikálního schématu je při výpočtu $Y_0(s)$ dán počáteční hodnotou

- spádových veličin jeho fyzikálních prvků typu C
- průtokových veličin jeho prvků typu L
- výstupních proměnných jeho integrátorů

V tab. 12.1 je přehled přenosových funkcí fyzikálních schémat vyjádřených prostřednictvím spádových a průtokových veličin. Ve jmenovateli každé z funkcí je uvedena nezávislá proměnná příslušného budícího zdroje. Při výpočtu jednotlivých složek $Y_{ui}(s)$ obrazu odezvy $Y_u(s)$ pomocí přenosových funkcí $H_i(s)$ DYNAST považuje všechny ostatní

- nezávislé zdroje typu E za "zkratované"
- nezávislé zdroje typu J za "odpojené"
- nezávislé bloky typu BS za zdroje nulového signálu

Tabulka 12.1: Přenosové funkce mnohopólových modelů.

Přenosová funkce	Obr. *a*	Přenosová funkce	Obr. *b*
admitance	$-\dfrac{I_E(s)}{V_E(s)}$	impedance	$-\dfrac{V_J(s)}{I_J(s)}$
přenosová admitance	$-\dfrac{I_K(s)}{V_E(s)}$	přenosová impedance	$-\dfrac{V_K(s)}{I_J(s)}$
přenos spádové veličiny	$\dfrac{V_K(s)}{V_E(s)}$	přenos průtokové veličiny	$-\dfrac{I_K(s)}{I_J(s)}$

12.1.3 Semisymbolické charakteristiky a odezvy

Laplaceovy obrazy odezev jsou v případě lineárních modelů s konstantními parametry funkce v racionálním lomeném tvaru

$$F(s) = k\frac{(s-z_1)(s-z_2)\dots}{(s-p_1)(s-p_2)\dots} = k\frac{a_0+a_1s+a_2s+\dots}{b_0+b_1s+b_2s+\dots}$$

DYNAST dokáže vyjádřit obrazy odezev $F(s)$ semisymbolickým výrazem, v němž proměnná Laplaceovy transformace s vystupuje jako symbol. Násobný činitel k, kořeny polynomů z_1, z_2,..., p_1, $p_2,\dots$ (tj. nuly a póly obrazů odezev) i koeficienty polynomů a_0, a_1, a_2, ..., b_0, b_1, $b_2\dots$ jsou vyjádřeny čísly.

Díky semisymbolickému tvaru obrazů odezev DYNAST může semisymbolicky vyjádřit rovněž časové průběhy odezev. Pomocí symbolické zpětné Laplaceovy transformace DYNAST tak dokáže vypočítat

- **odezvy na jednotkový impulz**, neboli **impulzní charakteristiky** jednotlivých přenosových funkcí $H_i(s)$ jako $y_{ui}(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H_i(s)\}$
- **odezvy na jednotkový skok** přenosových funkcí $H_i(s)$ jako $y_{ui}(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H_i(s)/s\}$
- **odezvu na počáteční stav** jako $y_0(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Y_0(s)\}$
- **odezvu na počáteční stav a současně na buzení** více zdroji jednotkových impulzů nebo skoků jako $y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Y_0(s)+Y_{u1}(s)+Y_{u2}(s)+\dots\}$

DYNAST však může vypočítat i odezvy na buzení $u(t)$, jehož Laplaceův obraz $\mathcal{L}\{u(t)\}$ je ve tvaru racionální lomené funkce. Některé z těchto funkcí jsou uvedeny v tabulce 12.2. Jako zdroj takového buzení lze užít blok typu BT s přenosem odpovídajícím zvolené funkci.

Všechny uvedené **časové odezvy** DYNAST vyjádří v semisymbolickém tvaru

$$y(t) = \sum_i k_i \,\mathrm{e}^{\alpha_i t}\cos(\omega_i t - \varphi_i),\ \ 0 \le t \le t_f$$

kde t a stejně tak i exponenciální a kosinová funkce vystupují jako symboly, zatímco k_i, α_i, ω_i a φ_i jako číselné konstanty.

Kmitočtová charakteristika přenosové funkce $H(s)$ se získá dosazením vztahu $s = j\omega$ do této funkce. Aby průběh komplexní funkce komplexní proměnné $H(j\omega)$ mohl být znázorněn v závislosti na kmitočtu v rovině, musí být rozložen do dvou komplementárních složek jaké představuje amplitudová a fázová charakteristika nebo reálná a imaginární část této funkce.

Tabulka 12.2: Obrazy Laplaceovy transformace elementárních funkcí.

Funkce	$f(t) = 0,\ t < 0$	$\mathcal{L}\{f(t)\}$
Jednotkový impulz	$f(t) = \delta(t)$	1
Jednotkový skok	$f(t) = 1,\ t > 0$	$\frac{1}{s}$
Rampová funkce	$f(t) = t,\ t > 0$	$\frac{1}{s^2}$
Exponencielní funkce	$f(t) = e^{-\alpha t},\ t > 0$	$\frac{1}{s+\alpha}$
Kosinusovka	$f(t) = \cos\omega t,\ t > 0$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$
Sinusovka	$f(t) = \sin\omega t,\ t > 0$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
Tlumená kosinusovka	$f(t) = e^{-\alpha t}\cos\omega t,\ t > 0$	$\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$
Tlumená sinusovka	$f(t) = e^{-\alpha t}\sin\omega t,\ t > 0$	$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$

Vedle semisymbolického tvaru DYNAST časové a kmitočtové odezvy vyhodnocuje rovněž číselně. Průběhy proměnných ukládá v tabelární podobě do výsledného souboru typu *.O, takže pak mohou být různým způsobem graficky zobrazovány (kapitola 13).

12.2 Zadávání semisymbolické analýzy

12.2.1 Zadávání obrazů odezev

Aktivujte okno se schématem analyzovaného systému a v menu Analysis zvolte Semisymbolic Linear. Tím se vám otevře dialog, ve kterém můžete zadat požadované obrazy odezev:

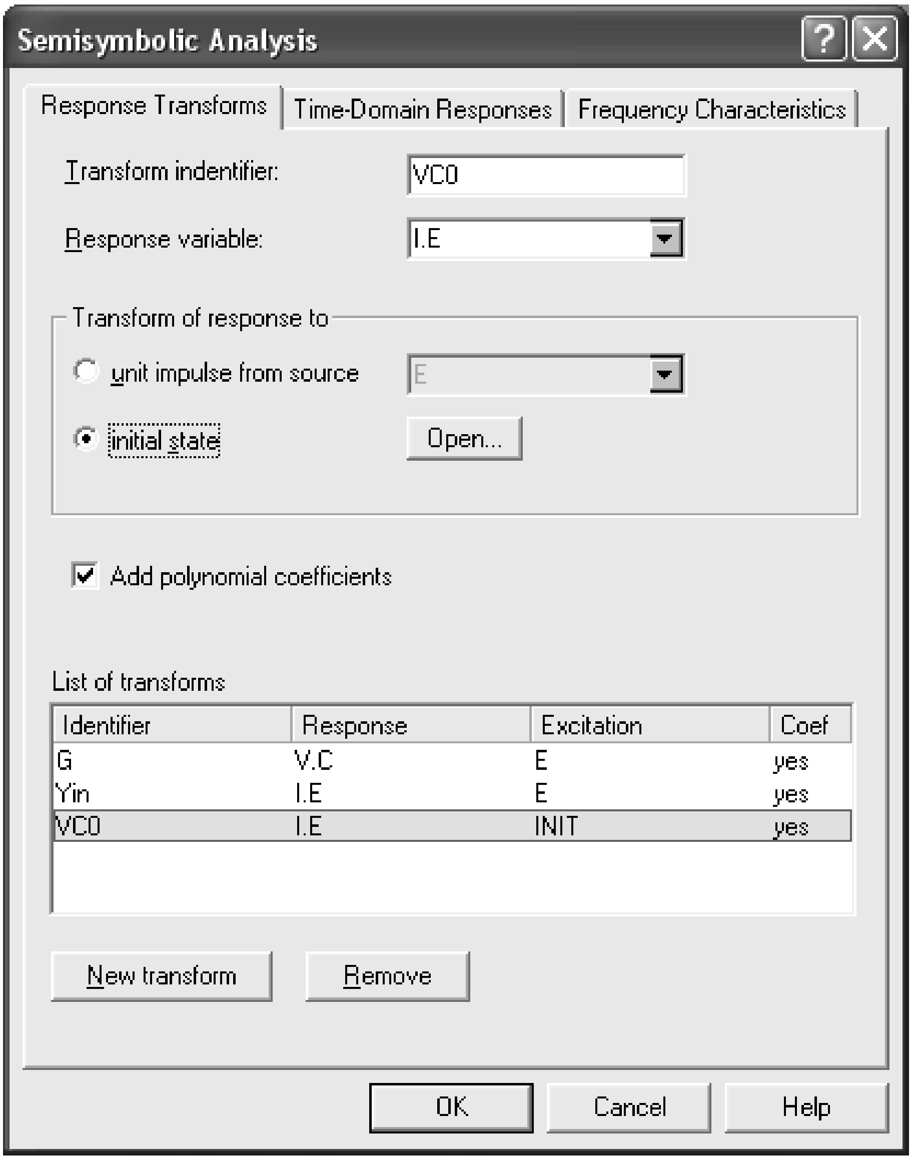
1. Do textového pole Transform identifier zapište zvolené jméno zadávaného obrazu odezvy.

2. V rolovacím seznamu Response variable vyberte výstupní veličinu představující uvažovanou odezvu.

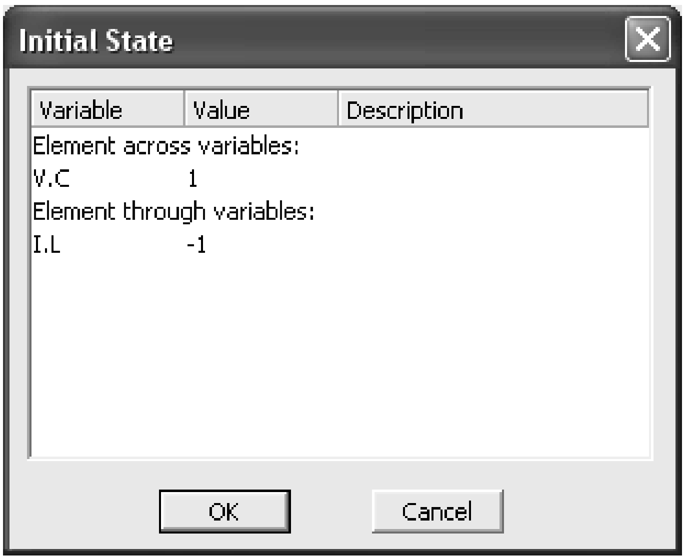
   - Pro **obraz odezvy na jednotkový impulz**, tj. **přenosovou funkci**, zvolte unit impulse from source a v rolovacím seznamu vyberte jméno budícího zdroje.
   - Pro **obraz odezvy na počáteční stav**, zvolte initial state, klikněte na tlačítko Open a v seznamu, který se otevře, zadejte počáteční hodnoty proměnných.

3. Zatrhněte okénko Polynomial coefficients přejete-li si, aby DYNAST určil vedle kořenů i koeficienty polynomů obrazu zadávané odezvy.

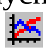
4. Klikněte na tlačítko New function a zadejte obraz další odezvy, nebo klikněte na OK.



Zadávání obrazů odezev.



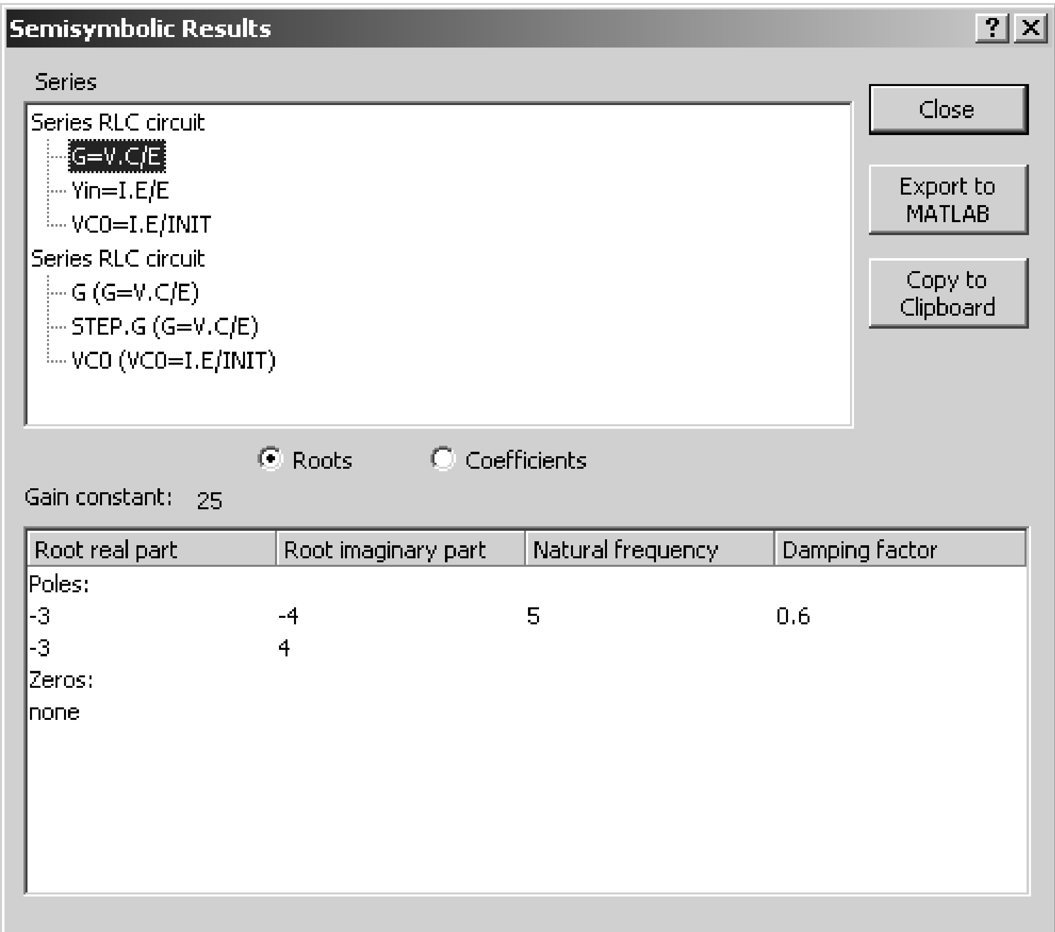
Zadávání počátečního stavu pro semisymbolickou analýzu.

Výpočet zadaných obrazů odezev se spustí volbou Run Analysis v menu Run, příp. kliknutím na ikonu  či  v hlavním okně.

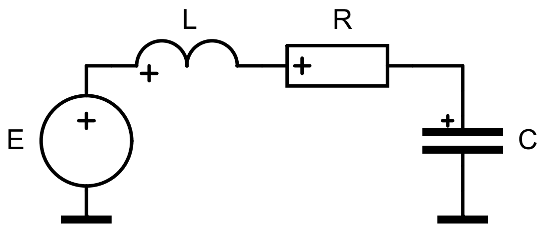
Výsledné obrazy odezev si pak zobrazíte následovně:

1. V menu View zvolte nejprve Result Text a potom Semisymbolic Analysis Results (Výsledky semisymbolické analýzy).
2. Vyberte některý z obrazů odezev.
3. Zvolte bud' zobrazení Roots (Kořenů), tj. pólů a nul, nebo Coefficients (Koeficientů).

V případě dvojice komplexně sdružených kořenů $\mathrm{Re}\,r \pm j\,\mathrm{Im}\,r$ DYNAST kromě reálné a imaginární části vypočítá i příslušný **přirozený kmitočet** $|r|$ a **činitel tlumení** $-\mathrm{Re}/|r|$.



Příklad. Pro demonstraci zadání a výpočtu obrazů odezev uvažme sériový obvod RLC s těmito parametry: $E = 20 \sin 50t$ V, $R = 6\ \Omega$, $L = 1$ H a $C = 0.04$ F.



Dva dialogy uvedené výše ukazují zadání přenosu napětí $G = V_C/E$, vstupní admitance $Yin = I_E/E$ a obrazu V_{C0} odezvy na počáteční podmínky $v_C(0) = 1$ V, $i_L(0) = -1$ A.

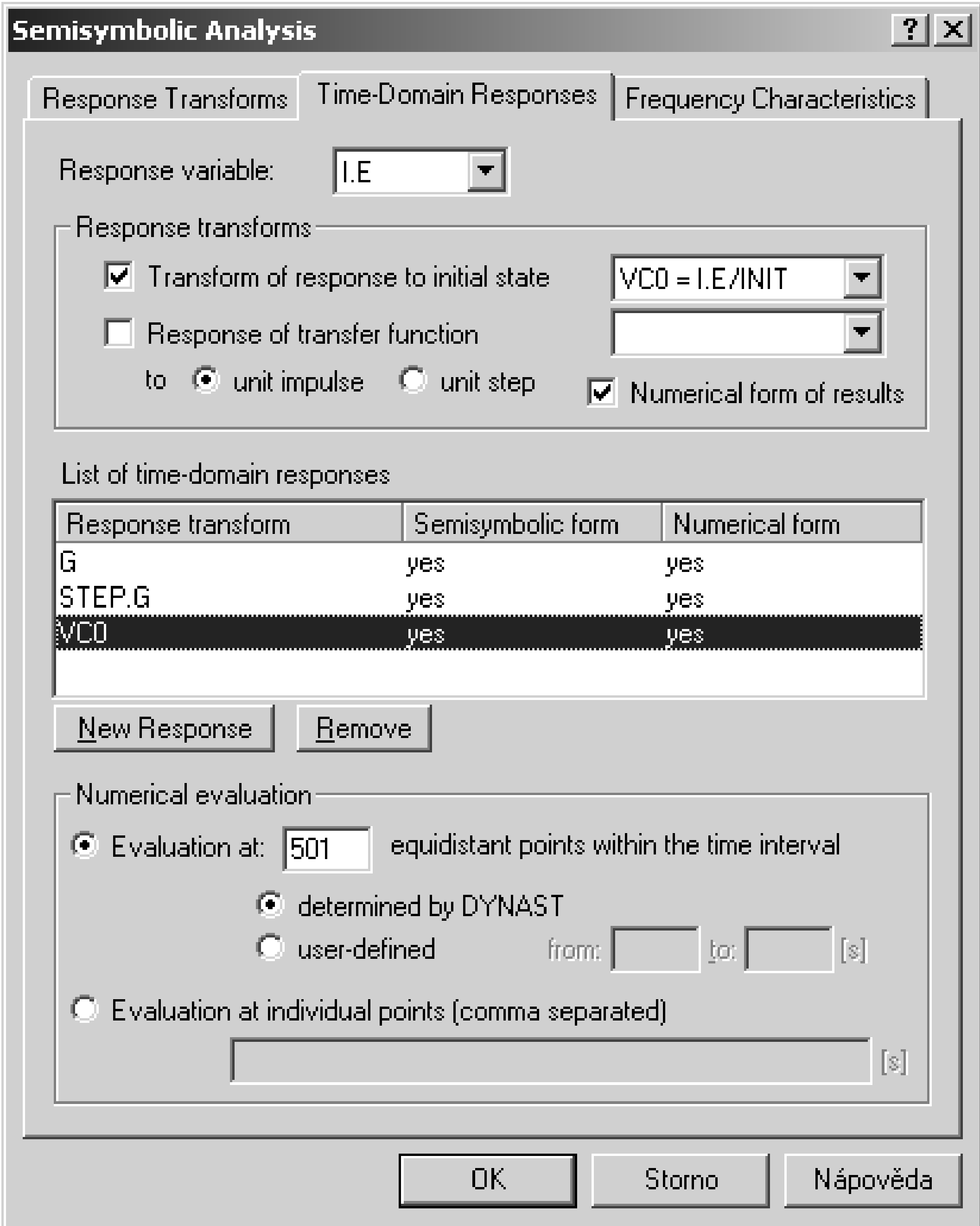
Výsledky výpočtu zobrazené v předchozím okně lze přepsat do podoby

$$G = 25\frac{1}{(s+3+j4)(s+3-j4)} = 25\frac{1}{s^2+6s+25}$$

$$Y_{in} = \frac{-s}{(s+3+j4)(s+3-j4)} = \frac{-s}{s^2+6s+25}$$

$$V_{C0} = \frac{s+1}{(s+3+j4)(s+3-j4)} = \frac{s+1}{s^2+6s+25}$$

12.2.2 Zadávání časových odezev



Zadávání časových odezev.

1. Otevřete záložku Time-Domain Responses a ze seznamu vyberte Response variable (Proměnou odezvy).

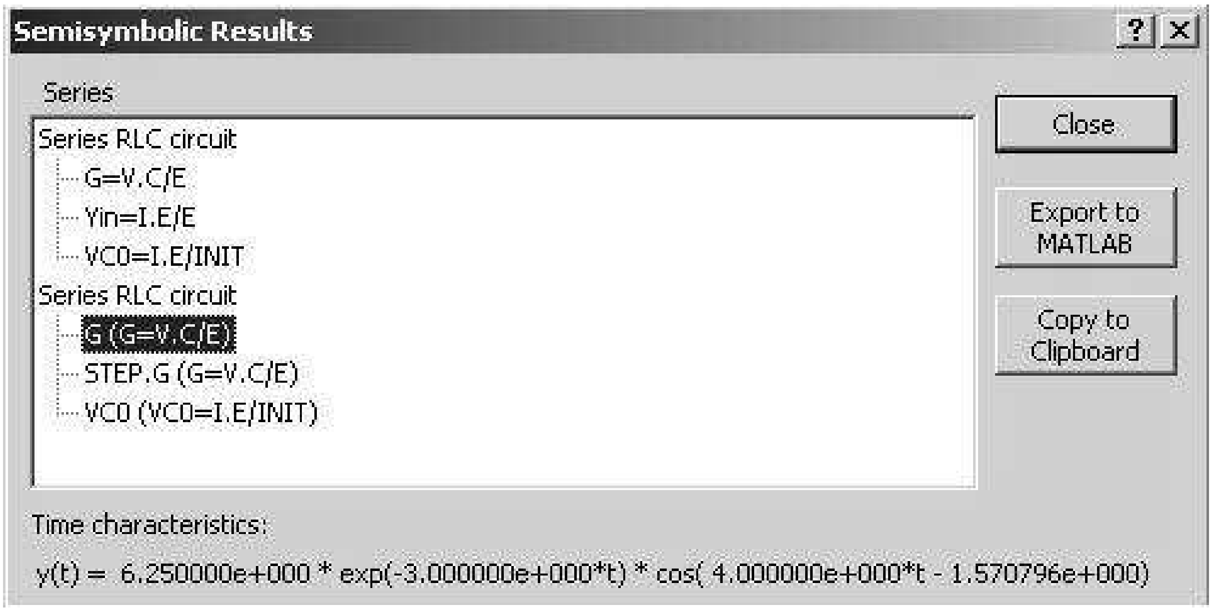
    - Pro výpočet **odezvy soustavy na počáteční stav** zatrhněte Transform of response to initial state a v seznamu vyberte obraz požadované odezvy.
    - Pro **odezvu přenosové funkce** zatrhněte Response of transfer function a přenosovou funkci vyberte v seznamu. Potom zvolte buď' unit impulse nebo unit step pro odezvu buď' na jednotkový impulz nebo na jednotkový skok.
    - Pro výpočet **úplné odezvy** soustavy zadejte odezvu na její počáteční stav a potom odezvu požadované přenosové funkce na jednotkový impulz či skok.
    - Máte-li zájem o některou odezvu jak v semisymbolickém, tak i v numerickém tvaru pro pozdější grafické znázornění jejího průběhu, zatrhněte Numerical form of results.

2. Pokud jste u některé odezvy požadovali numerický tvar, v poli Numerical evaluation jej můžete blíže určit:

    - Při výběru první položky můžete určit počet bodů, ve kterých odezvy budou vyhodnoceny. Pokud nechcete počátek a konec časového intervalu odezvy nechat určit DYNAST, zvolte user-defined a určete jej sami.
    - Volba druhé položky vám umožní jednotlivé body odezvy na časové ose zadat individuelně čísly oddělenými čárkami.

3. Klikněte na OK nebo na New Response, pokud chcete zadat další odezvu.

Časové průběhy obrazů odezev v semisymbolickém tvaru naleznete ve stejném okně jako kořeny a koeficienty těchto obrazů.

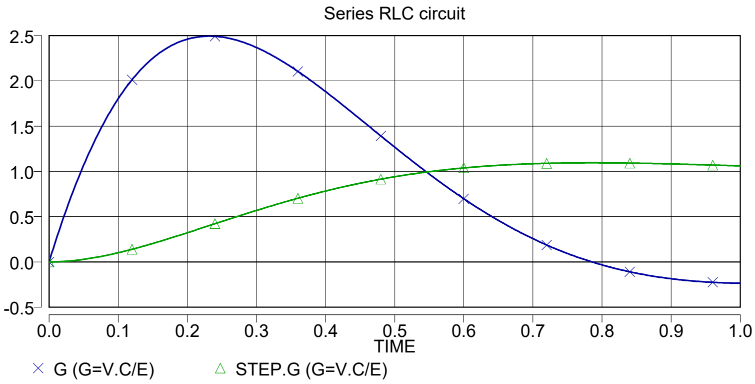


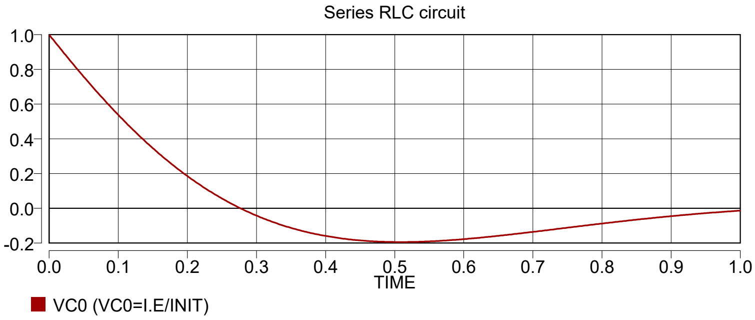
Příklad. Postupným kliknutím na identifikátory časových odezev v dolní části výše uvedeného okna postupně získáte následující časové odezvy sériového obvodu RLC:

Impulzní charakteristika přenosové funkce G: $$g(t) = 6.250e^{-3t}\cos(4t - 1.571)$$

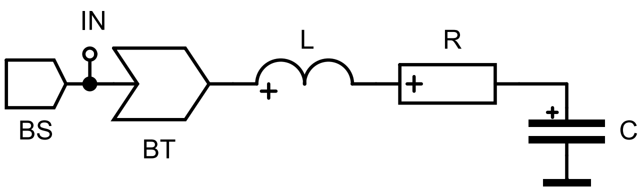
Odezva přenosové funkce G na jednotkový skok: $$g_{STEP}(t) = 1 + 1.250e^{-3t}\cos(4t + 2.498)$$

Odezva na počáteční podmínky $v_C(0) = 1$ V, $i_L(0) = -1$ A: $$v_{C0}(t) = 1.118e^{-3t}\cos(4t + 0.4636)$$



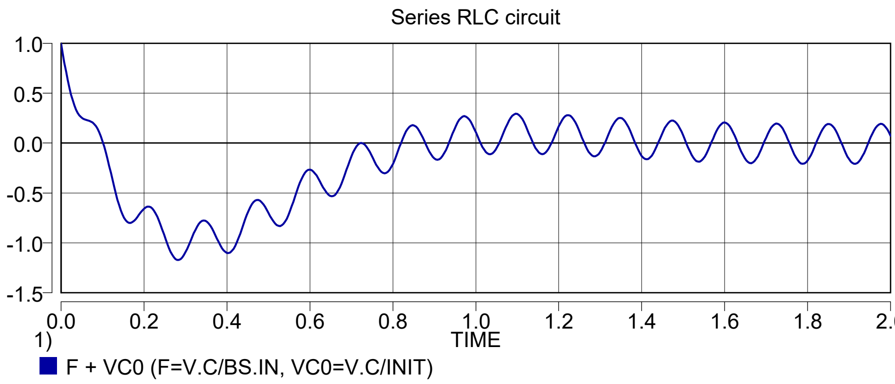


Příklad. Vypočítejme úplnou odezvu napětí v_C sériového obvodu RLC na zdroj sinusového napětí E a současně na počáteční stav $V_C = 1$ V a $I_L = -1$ A. S odkazem na Tab. 12.2 můžeme buzení obvodu zdrojem $E = 20\sin 50t$ nahradit blokem BT s přenosovou funkcí $\mathcal{L}\{20\sin 50t)\} = 20 \cdot 50/(s^2 + 50^2)$ buzený jednotkovým impulzem z bloku BS jak ukazuje obrázek.

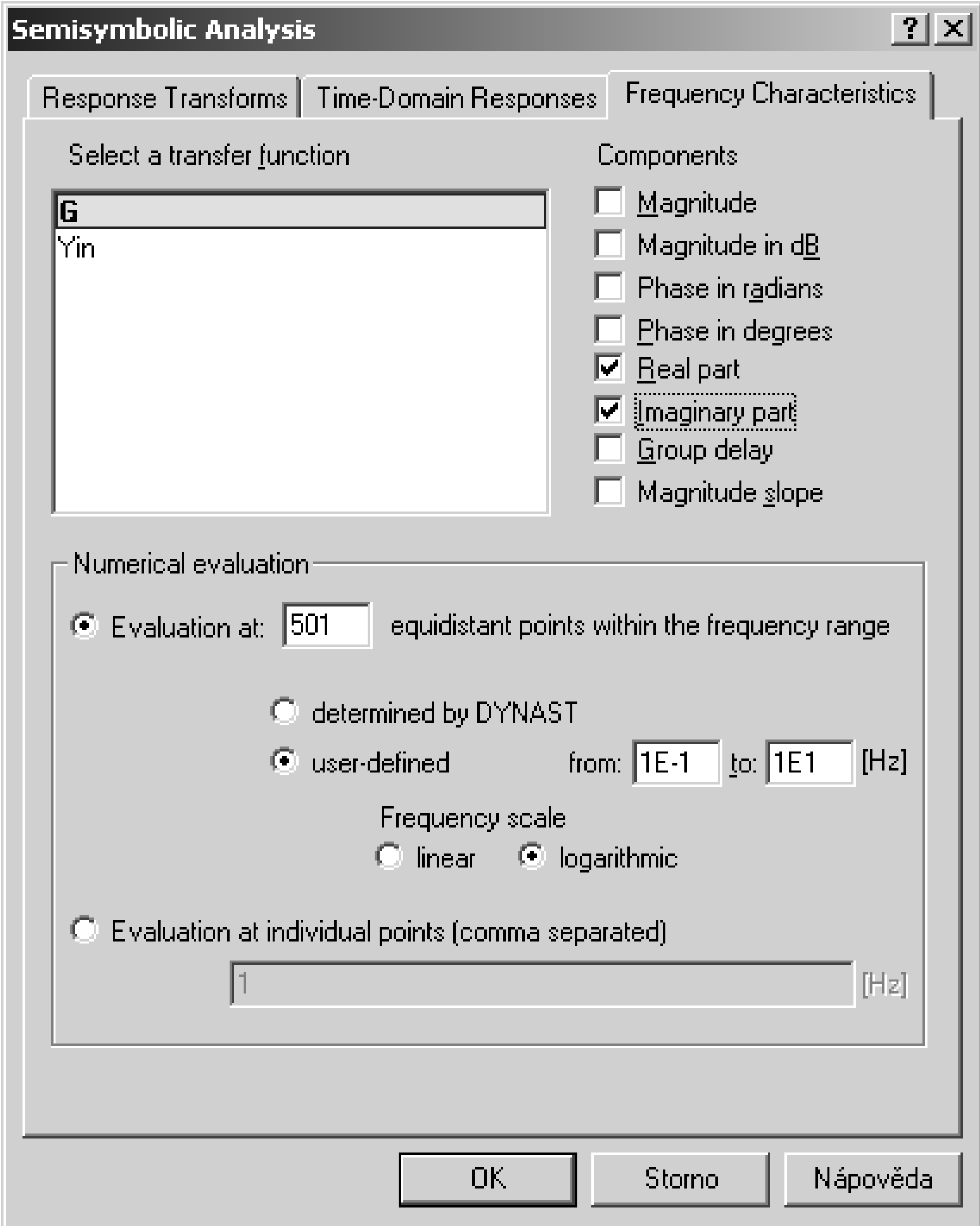


Výsledkem semisymbolické analýzy je úplná časová odezva

$$v_C(t) = 0.2005\cos(50t + 1.691) + 3.163e^{-3t}\cos(4t + 1.241)$$



12.2.3 Zadávání kmitočtových charakteristik



Zadávání kmitočtových charakteristik.

1. V dialogu Semisymbolic Analysis otevřete záložku Frequency Characteristics a v seznamu postupně vyberte některé z již dříve zadaných přenosových funkcí.

2. U každé přenosové funkce zatrhněte jednu nebo několik složek její kmitočtové charakteristiky.

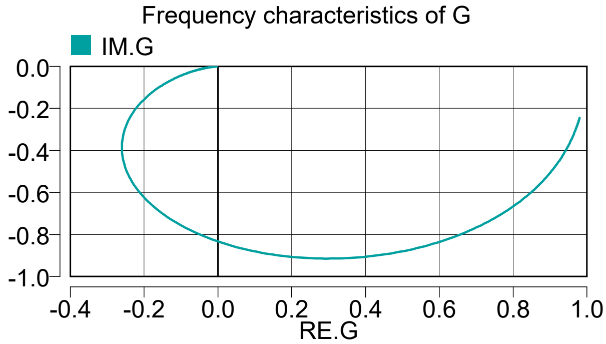
3. V dalším kroku zvolte kmitočty zadávané charakteristiky:

   - Výběr první položky vám umožní určit celkový počet bodů kmitočtové charakteristiky. Dolní a horní mez kmitočtové charakteristiky DYNAST určí automaticky sám na základě kořenů přenosové funkce. Pokud si chcete dolní a horní mez určit sami, zvolte user-defined. V obou případech se můžete rozhodnout mezi lineárním a logaritmickým měřítkem kmitočtové osy.

- Volba druhé položky vám umožní jednotlivé body na kmitočtové ose zadat individuálně čísly oddělenými čárkami.

4. Pro uložení zadaných požadavků klikněte na OK.

Příklad. Následující graf zobrazuje kmitočtovou charakteristiku imaginární části přenosové funkce G sériového obvodu RLC v závislosti na reálné části G v intervalu od 0.1 do 10 Hz s logaritmickým měřítkem kmitočtů.



12.3 Text semisymbolické analýzy

Obrazy odezev

se zadávají v sekci PZ textového souboru *.PRB otevřené řetězcem `*PZ;` za sekcí SYSTEM se zadáním modelu analyzované soustavy. Obrazy odezev se zadávají příkazem

`TRAN` *obraz* `[,` *obraz* ... `];`

kde *obraz* je ve tvaru: *jméno* = *odezva* / *buzení* `[COEF]`

jméno je uživatelem zvolené jméno požadovaného obrazu odezvy

odezva může představovat

- `V.`*uzel*, tj. spádovou proměnnou uzlu
- `V.`*prvek*, tj. spádovou proměnnou fyzikálního prvku
- `I.`*prvek*, tj. průtokovou proměnnou fyzikálního prvku typu E, R, L.

buzení, odděleno od položky *odezva* znakem `/`, může představovat

- jméno prvku typu J nebo E či autonomního bloku typu BS za předpokladu, že *obraz* je přenosová funkce
- řetězec znaků `INIT` za předpokladu, že je zadáván obraz odezvy na počáteční stav

`COEF` udává požadavek výpočtu polynomiálních koeficientů obrazu odezvy

Je-li požadován obraz odezvy na počáteční stav, počáteční stav se zadá příkazem

`INIT` *proměnná* = *hodnota* `[,` *proměnná* = *hodnota*... `];`

proměnná může být:

- `V.`*prvek*, což je spádová proměnná prvku typu C
- `I.`*prvek*, což je průtoková proměnná prvku typu L

hodnota je číselná konstanta

Časové charakteristiky obrazů odezev

definovaných v sekci PZ se zadávají v sekci TRA otevřené řetězcem `*TRA;`. V semisymbolické podobě se časové charakteristiky zadávají příkazem

`SYMB` *obraz* [`,` *obraz* ...]`;`

kde *obraz* je buď ve tvaru: [*buzení*]*přenos* [`+` *stav*] nebo jen ve tvaru: *stav*

buzení zadané řetězcem `STEP.` značí buzení jednotkovým skokem, implicitně jde o buzení jednotkovým impulzem

přenos je jméno přenosové funkce zadané již v sekci PZ

stav je jméno obrazu odezvy na počáteční stav zadaného již v sekci PZ

Časové charakteristiky lze vyhodnotit numericky příkazem

`PRINT` [(*bodů*)] *obraz* [`,` *obraz* ...]`;`

bodů je počet bodů charakteristik zadaný číselnou konstantou, implicitně 501

obraz je obraz odezvy požadovaný současně v semisymbolické podobě

DYNAST provede numerické vyhodnocení v bodech časové osy zadaných
buď jako: `TIME` *min max*`;` nebo jako: `TIME =` t_1, t_2, ...`;`

min a ***max*** jsou číselné konstanty udávající dolní a horní mez časového intervalu, zatím co

t_1, t_2, ... jsou číselné konstanty udávající individuální časové body

Pokud poslední příkaz není uveden, DYNAST si časový interval určí automaticky sám.

Kmitočtové charakteristiky přenosových funkcí

definovaných v sekci PZ se zadávají v sekci FRE otevřené řetězcem `*TRA;`. Požadované složky charakteristik se zadávají příkazem

`PRINT` [`(`*bodů*`)`] *složka*`.`*přenos* [`,` *složka*`.`*přenos*...]`;`

bodů je počet bodů charakteristik zadaný číselnou konstantou, implicitně 501

složka je typ požadované složky charakteristiky v souladu s Tab. 12.3

přenos je jméno některé přenosové funkce zadané v sekci PZ

Kmitočet se zadává

buď jako `FREQ` $\left[\texttt{/[LIN]}\right]$ [*min max*]`;` nebo jako `FREQ =` f_1, f_2, ...;

min a ***max*** jsou číselné konstanty určující dolní a horní mez kmitočtového intervalu

f_1, f_2,... jsou číselné konstanty specifikující jednotlivé kmitočty

`/LIN` je řetězec požadující lineární kmitočtovou stupnici. Implicitně je logaritmická.

Pokud příkaz s `FREQ` v zadání chybí, DYNAST si rozsah kmitočtů určí automaticky sám.

Tabulka 12.3: Složky kmitočtových charakteristik.

TYP	SLOŽKA	TYP	SLOŽKA
`MOD`	modul	`DEL`	skupinové zpoždění
`DB`	modul v dB	`SLO`	strmost modulu
`RAD`	fáze v radiánech	`RE`	reálná část
`DEG`	fáze ve stupních	`IM`	imaginární část

Výpočet se v každé sekci semisymbolické analýzy spouští příkazem `RUN;`. Výsledky se postupně ukládají do téhož textového souboru typu *.O.

Příklad.

```
*: Series RLC circuit
*SYSTEM;
omega = 50;
A = 20;
E 1 = A*sin(omega*time);
L 1-2 = 1;
R 2-3 = 6;
C 3 = 0.04;
*PZ;
TRAN G=V.C/E COEF, Yin=I.E/E COEF, VC0=I.E/INIT COEF;
INIT V.C=1, I.L=-1;
RUN;
*TRA;
PRINT(5001) G, STEP.G, VC0;
SYMB G, STEP.G, VC0;
RUN;
*FRE;
FREQ 1E-1 1E1;
RUN;
*END;
```

Příklad.

```
*: Series RLC circuit
*SYSTEM;
BS IN = 1;
omega = 50;
denom /POLY/ omega**2,0,1;
numer /POLY/ omega;
BT 3 = 20*numer/denom * IN;
L 3-1 = 1;
R 1-2 = 6;
C 2 = 0.04;
*PZ;
TRAN F=V.C/BS.IN, VC0=V.C/INIT;
INIT V.C=1, I.L=-1;
RUN;
*TRA;
TIME 0 2;
PRINT F + VC0;
SYMB F + VC0;
RUN;
*END;
::V.C [V] voltage of electrical capacitor
::I.L [A] current of electrical inductor
```

Kapitola 13

Grafické zobrazení výsledků

Obsah kapitoly

*Výsledky vašich výpočtů z jednotlivých analýz, které DYNAST ukládá do výsledného textového souboru *.O v tabulkové podobě, si můžete různými způsoby graficky zobrazit. DYNAST vám umožní grafy podle potřeby dále upravovat, exportovat pro tisk, doplňovat a porovnávat s grafy importovanými z jiných zdrojů, např. z měřících přístrojů.*

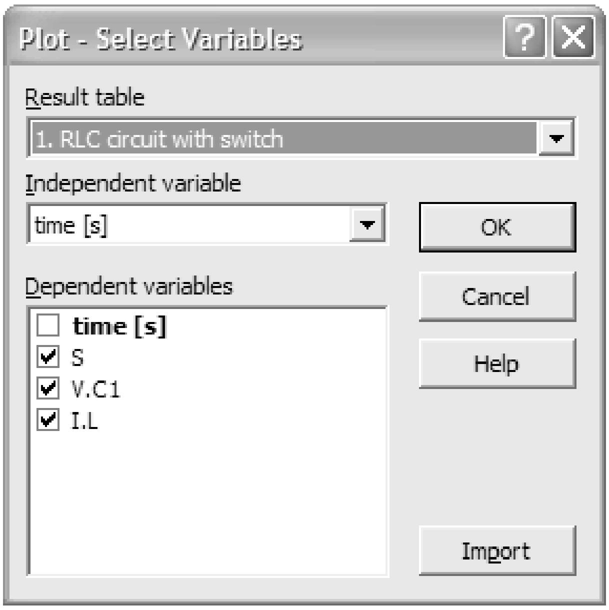
13.1 Způsoby zobrazování proměnných

13.1.1 Výběr proměnných

Chcete-li si graficky zobrazit průběhy proměnných, jež jsou výsledkem některé analýzy, která už proběhla, aktivujte si okno DYNASTu se zadáním analyzované soustavy buď v grafické nebo textové podobě, případně si aktivujte okno s výsledky analýzy v textové podobě. Potom si v menu View (Zobrazení) zvolte Result plot (Výsledný graf).

Pokud se teprve chystáte spustit výpočet analýzy a přejete-li si, aby se výsledky graficky zobrazily bezprostředně po výpočtu, pro spuštění výpočtu v menu Run (Spustit) vyberte příkaz Run Analysis & Plot nebo klikněte na odpovídající ikonu v hlavním okně.

V obou případech se vám otevře okno s grafem, jehož vodorovná osa náleží nezávisle proměnné první analýzy uložené v příslušném výsledném textovém souboru *.O. Zobrazený průběh bude odpovídat první závisle proměnné této analýzy. Pro výběr jiných proměnných užijte příkaz Set variables (Volba proměnných) v menu Plot (nebo klikněte pravým tlačítkem myši na zobrazený graf). Tím se vám otevře následující dialog.



Výběr proměnných pro grafické znázornění.

1. V seznamu Result table (Výsledná tabulka) si vyberte jednu z tabulek, které jsou k dispozici ve zvoleném výstupním souboru *.O.
2. V seznamu Independent variable (Nezávisle proměnná) si vyberte tu proměnnou, která má být vynesena na vodorovnou osu jako nezávisle proměnná zadávaného grafu (může se lišit od nezávisle proměnné analýzy).
3. V seznamu Dependent variables (Závisle proměnné) si vyberte ty proměnné, které chcete v grafu současně zobrazit v závislosti na zvolené nezávislé proměnné.

13.1.2 Grafy z jednoho souboru ve více oknech

Potřebujete-li výsledky z určitého souboru *.O zobrazit v dalším okně v jiném uspořádání než v tom, ve kterém jsou již zobrazeny, vyberte příkaz New Window v menu Window (nebo klikněte pravým tlačítkem myši na zobrazený graf). Tím se vám otevře duplikát předchozího grafu v novém okně. Při volbě proměnných pak již můžete postupovat podle návodu v předchozím odstavci.

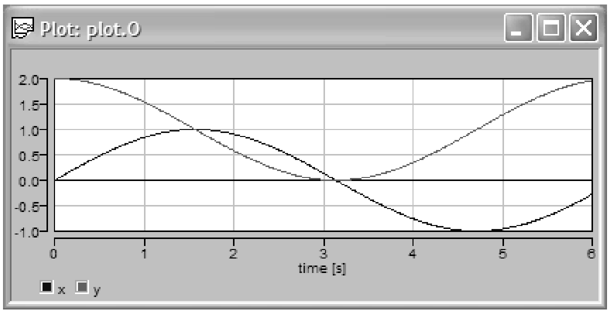
13.2 Měřítka grafů

13.2.1 Automatická volba měřítek

Pokud vyberete více závislých proměnných současně, zobrazí se všechny se společným měřítkem na vodorovné ose, obvykle ale s různými měřítky na ose svislé. DYNAST automaticky nastaví pro každou proměnnou měřítko svislé osy tak, aby byla co nejlépe využita plocha grafu pro její průběh. Pokud vám takto zobrazený průběh nevyhovuje, můžete využít nabídku různých způsobů automatického nastavení vzájemného vztahu měřítek závislých proměnných na svislé ose. K jejich volbě jsou vám k dispozici následující příkazy v menu Axes (Osy) a ikony na liště hlavního okna.

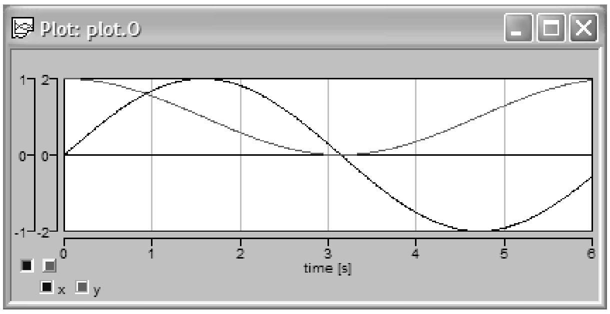
Common Y

Zobrazení všech vybraných proměnných se společným měřítkem na svislé ose.



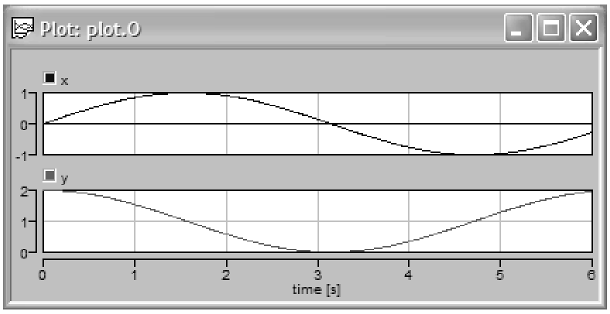
Zero offset Y

Zobrazení všech vybraných proměnných se společným počátkem měřítka na svislé ose.



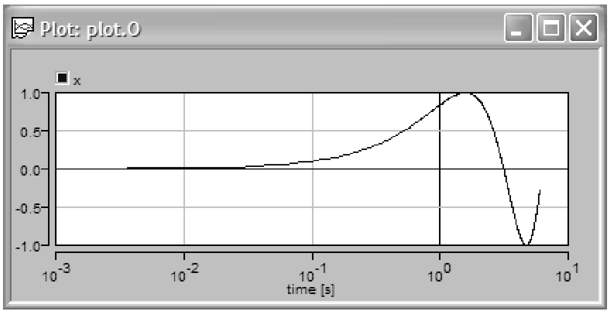
Multiple Y

Zobrazení každé vybrané proměnné v samostatném grafu.



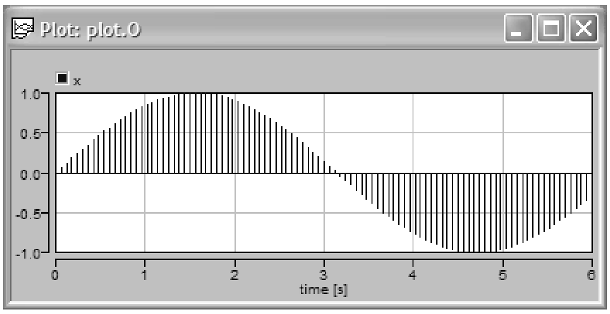
Log X

Zobrazení vybraných proměnných s logaritmickým měřítkem na vodorovné ose.



Discrete X

Zobrazení vybraných proměnných v podobě histogramu.



13.2.2 Nastavování měřítek uživatelem

Implicitně jsou měřítka grafů automaticky volena tak, aby plocha grafů byla co nejlépe využita pro znázornění průběhů zadaných proměnných. Detailnější zobrazení některé oblasti grafu můžete dosáhnout dvěma způsoby:

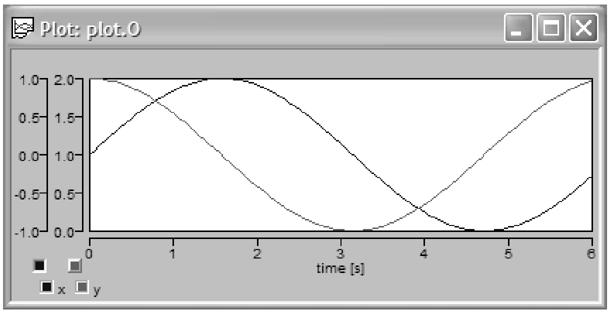
- Myš se stisknutým levým tlačítkem táhněte úhlopříčně přes požadovanou oblast. Výběr oblasti lze zrušit příkazem Undo zoom (Zrušit detail) v menu Axis. K detailnímu zobrazení se můžete opět vrátit příkazem Redo zoom (Obnovit detail).

- V menu Axes vyberte příkaz Custom Range (Uživatelský rozsah). Otevře se dialog pro individuální nastavení rozsahů proměnných. Rozsah měřítek se vrátí do původního stavu příkazem Full View (Úplný náhled).

13.3 Úpravy zobrazených grafů

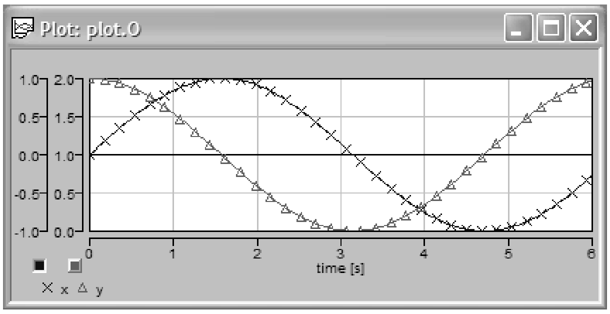
13.3.1 Síť grafu a značky průběhů

V menu Plot (Graf) naleznete následující dva příkazy pro úpravu grafů.



Show Grid

Odstranění nebo obnovení pravoúhlé sítě v zobrazeném grafu.



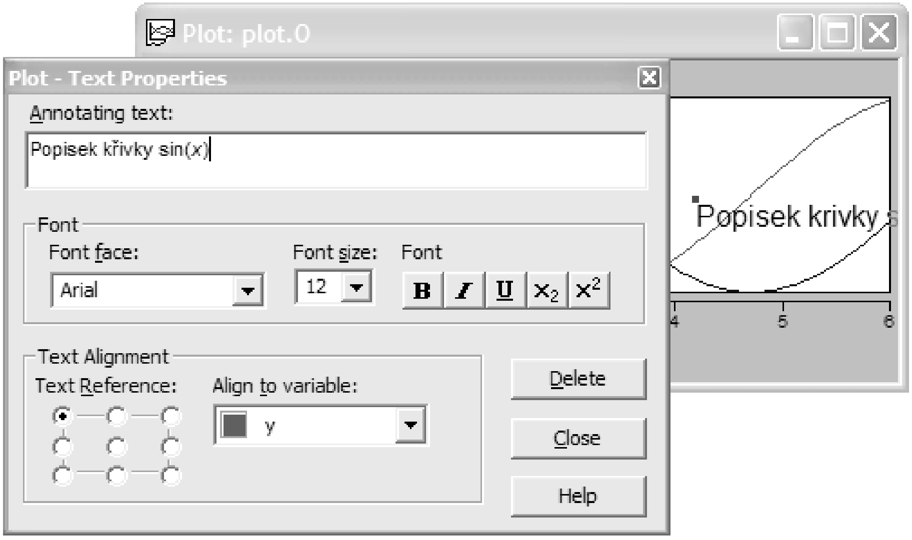
Point Marks

Zobrazení značek pro rozlišení průběhů.

Značky jsou užitečné zejména k rozlišení průběhů proměnných při černobílém tisku. Hustotu značek lze měnit volbou násobku četnosti jejich výskytu na pravém konci lišty hlavního okna.

13.3.2 Poznámky v grafu

Zobrazené průběhy proměnných můžete opatřit poznámkami. Poslouží vám k tomu následují dialog Text properties (Vlastnosti textu), který si otevřete v menu Plot výběrem příkazu Text.



Vlastnosti textové poznámky zobrazené v grafu

Text poznámky si zapíšete do pole Annotating text (Text poznámky). Vybráním části textu a stisknutím příslušného tlačítka si zde můžete zvolit formátování (tučné písmo, kurziva, podtržené písmo, indexy), typ a velikost písma však musí být pro celou poznámku zvoleny shodně.

Chcete-li, aby text při transformacích grafu sledoval průběh určité proměnné, využijte v dialogu pole Text Alignment (Zarovnání textu):

1. V seznamu Align to variable (Zarovnat k proměnné) zvolte jednu ze zobrazených proměnných.
2. Vztažný bod, který se v grafu současně s textem objeví, přesuňte myší do vhodného místa na křivce průběhu proměnné.
3. Výběrem jednoho z tlačítek v poli Text Reference si zvolte polohu poznámky ke vztažnému bodu.

Po vložení každé poznámky dialog zavřete tlačítkem Close. Polohu poznámek můžete myší měnit i po uzavření dialogu. Kliknutím na některou z poznámek si můžete dialog znovu otevřít abyste poznámku případně mohli opravit nebo zrušit (tlačítkem Delete).

13.4 Odečítání souřadnic průběhů

Souřadnice průběhů zobrazených v grafech můžete odečítat následujícím postupem:

1. V menu Plot vyberte příkaz Reference Cursor (Referenční kurzor) aby se vám otevřelo okénko pro zobrazení souřadnic.
2. Kurzor myši přesuňte bez kliknutí na bod v grafu, jehož souřadnice chcete odečíst. Souřadnice se zobrazí v okénku, které se automaticky otevře.
3. Implicitně jsou souřadnice vyhodnocovány vzhledem k počátku měřítek na osách grafu. Jiný vztažný souřadný systém si můžete zvolit tak, že kliknete na to místo v grafu, kde chcete mít jeho počátek. V grafu se zobrazí příslušný osový kříž.
4. Jsou-li v grafu zobrazeny průběhy více proměnných s různými měřítky na svislé ose, vyberte si v seznamu umístěném na liště hlavního okna vpravo tu proměnnou, jejíž měřítko chcete při odečítání souřadnic použít, nebo klikněte na její svislou osu.

5. Osový kříž a tím i vámi zvolený vztažný souřadný systém zrušíte kliknutím pravým tlačítkem myši. Dalším kliknutím pravého tlačítka zrušíte celý režim odečítání souřadnic.

Příkaz Curve Tracing (Sledování křivky) z menu Plot má podobnou funkci jako Reference Cursor (Referenční kurzor). Navíc ale umožňuje automatické sledování průběhu křivky, kterou si zvolíte tím, že na ni kliknete. Pak již jen stačí myš bez kliknutí posouvat v horizontálním směru. Odečítání se zpřesní, pokud současně budete tisknout Shift. Pro volbu jiné křivky stiskněte nejprve pravé tlačítko myši a pak klikněte na novou křivku. Opětovným kliknutím pravého tlačítka opustíte režim sledování křivky.

13.5 Import, export a tisk grafů

13.5.1 Společné zobrazení různých grafů

Importování průběhů proměnných do aktuálního grafu z jiného souboru *.O, nebo z jiné tabulky téhož souboru *.O, vám umožní následující postup:

1. V menu Plot vyberte příkaz Set Variables a zde pak klikněte na tlačítko Import.

2. Vyberte soubor *.O, z něhož míníte průběh proměnných importovat (výběr souboru odpadne, jsou-li importované proměnné uloženy v některé tabulce výchozího souboru). Pak klikněte na tlačítko Open.

3. Po otevření dialogu Plot - Select to Import v seznamu Result tables vyberte importovanou tabulku. Potom v seznamu Independent variable vyberte ze zvolené tabulky proměnnou, v závislosti na které mají být ostatní proměnné tabulky v grafu zobrazeny. Volbu potvrďte kliknutím na OK.

4. V dialogu Plot - Select Variables na konec seznamu Dependent variables vám přibudou proměnné z importované tabulky. Zvolená nezávisle proměnná bude označena tučně. Volbu nezávisle proměnné importované tabulky můžete dodatečně změnit kliknutím na jinou proměnnou pravým tlačítkem myši a zvolením Independent (Nezávislá).

5. Proměnné z importované tabulky můžete v případě potřeby odstranit kliknutím pravým tlačítkem na některou z nich a zvolením Remove Plot (Odstranit graf).

Měřítka na osách proměnných ve výsledném grafu budou automaticky nastavena tak, aby průběhy všech proměnných včetně importovaných se zobrazily v plném rozsahu. Přitom se nezávisle proměnné v obou tabulkách mohou lišit jak svými rozsahy, tak i počtem a rozmístěním bodů, v nichž jdou zadány hodnoty závisle proměnných.

13.5.2 Zobrazení dat z jiného zdroje

Graficky zobrazovaná data uložená v souborech *.O mohou pocházet nejen z DYNASTu, ale i z jiných zdrojů, např. z experimentálních měření. Společně zobrazené průběhy z různých zdrojů pak můžete navzájem porovnávat.

Data, která chcete graficky zobrazit

1. zobrazte v textové podobě tím, že v menu File zvolíte příkaz Open, ve Files of type: vyberete DYNAST Result Text Files (*.O) a zadáte cestu ke zvolenému souboru

2. zobrazte v podobě grafu příkazem Result Plot z menu View

Pro správné zobrazení dat je nutné jejich přizpůsobení formátu používaném v DYNASTu. Soubor s daty udávajícími průběh čtyř proměnných s průběhem zadaným třemi hodnotami může být uspořádán např. takto:

```
#  Imported data

  X ...    variable_1
  1 ...    variable_2
  2 ...    variable_3
  3 ...    variable_4

  0.000000e+000  0.000000e+000  0.000000e+000
                 0.000000e+000
  6.531626e-001  8.866773e+000  1.133227e-003
                 4.354418e+000
  1.019687e+000  9.033002e+000 -9.033002e-003
                 6.666610e+000
#
```

Pro správné načtení musí mít každá tabulka v souboru *.O následující formát:

1. řádek začínající znakem #, za kterým následuje název tabulky
2. prázdný řádek
3. řádek s popisem nezávisle proměnné ve tvaru `X ...` *název proměnné*
4. řádky s popisem závisle proměnných ve tvaru *i* `...` *název proměnné*, kde *i* je pořadové číslo proměnné
5. prázdný řádek
6. seznam číselných hodnot proměnných ve tvaru *mantisa*[`e`*exponent*], kde mantisa musí obsahovat desetinnou tečku
7. řádek začínající znakem #

Je-li celkový počet proměnných n a průběh každé proměnné je udán r čísly, celkový počet čísel udávajících hodnoty proměnných má být $r \times n$. Pokud tomu tak není, čísla tvořící poslední neúplný řádek jsou ignorována.

13.5.3 Tisk a export grafů pro další zpracování

Pro tisk grafu na tiskárně vyberte příkaz Print nebo Print Preview v menu File. Implicitně se graf vytiskne na výšku a zabere celou plochu stránky. Pro volbu procentuální šířky okrajů stránky a tím pro úpravu velikosti obrázku můžete použít příkaz Print Scaling v menu File.

Zpracování grafů v dalších programech vám umožní následující postupy:

Uložení do schránky (např. pro MS Paint nebo MS Word) je možné příkazem Copy z menu Edit. Velikost obrázku je dána aktuální velikostí okna s grafem.

Export ve formátu BMP (Bitmap) příkazem Export to Bitmap z menu File. Velikost obrázku je dána aktuální velikostí okna s grafem.

Export ve formátu EPS (Encapsulated Postscript) příkazem Export to PostScript v menu File. Velikost, tloušťka i barva čar a další se nastaví v dialogu.

Uložení do schránky v podobě textu (např. pro další zpracování v MS Excelu) příkazem Copy as Text z menu Edit.

13.5.4 Uložení uspořádání zobrazených grafů do souboru

Zvolené uspořádání grafů i ostatních oken na obrazovce si můžete před jejich uzavřením uložit do souboru. V menu File k tomu máte k dispozici příkaz Save Screen Layout (Uložit rozvržení obrazovky). Uloží se celkové uspořádání všech otevřených oken v hlavním okně, volby proměnných a jejich měřítek i všechny úpravy grafů včetně vložených textových poznámek. Zarovnávání oken si před jejich uložením usnadníte budete-li přitom tisknout současně Ctrl a Shift.

Všechna okna i s jejich původním rozvržením a obsahem můžete na obrazovce kdykoliv obnovit příkazem Load Screen Layout v menu File.

Kapitola 14

Vytváření submodelů

Obsah kapitoly

Pracovní prostředí DYNAST Shell vám umožňuje doplňovat sortiment submodelů o vaše vlastní dynamické modely nejrůznějších částí reálných soustav nebo o vaše vlastní bloky včetně jejich grafických značek. Dynamické chování submodelů může být charakterizováno schématy sestávajícími z fyzikálních prvků, bloků i submodelů nebo rovnicemi.

14.1 Schémata a rovnice submodelů

14.1.1 Zadávání schémat submodelů

Chcete-li dynamiku submodelu charakterizovat schématem, potom postupujte následovně:

1. V menu File vyberte New a v rolovacím menu File type zvolte Diagram.
2. V poli File name zadejte jméno submodelu zvolené tak, aby odpovídalo vašemu označení typu submodelu. Současně zatrhněte políčko Submodel.
3. V poli Title uveďte název modelované reálné části.
4. Přepínačem v Template (šablona) případně zvolte Documentation template, což vám usnadní vytvoření dokumentu s popisem zadávaného submodelu.
5. Klikněte na OK.

Při kreslení schématu submodelu v okně, které se vám pro tento účel nyní otevřelo, postupujte obdobně jako při kreslení schématu celé soustavy až na následující odchylky:

- Ty uzly submodelu, které mají sloužit pro jeho interakci s jinými částmi soustavy, označte zvláštními grafickými značkami. Získáte je volbou příkazu Pole label (Jmenovka pólu) v menu Place (Umístit), nebo klikněte na ikonu na nástrojové liště. Pólům pak zadejte jména jejichž prvním znakem je písmeno. Referenční uzly se ve schématu submodelu označují shodnými značkami jako ve schématech soustav.

- Hodnoty externích parametrů submodelu, které mohou být specifikovány z vně submodelu, zadejte jako symbolickou proměnnou, jejímž prvním znakem je písmeno. Současně pomocí explicitní rovnice pro tuto proměnnou zadejte její číselnou hodnotu. Ta bude představovat implicitní hodnotu daného externího parametru, která bude platit, nebude-li pro něj z vně submodelu zadána jiná číselná hodnota nebo symbolická hodnota.

Příklad. Následující schéma submodelu bylo uloženo do souboru BOB.DIA s názvem "Teleso ve svisle rovine". Pohyb tělesa v souřadnicích x (vodorovná) a y (svislá) je zde modelován jako pohyb hmotného bodu A bez uvažování vlivu jakéhokoliv odporu proti pohybu.

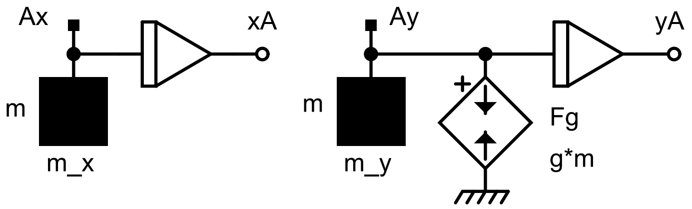
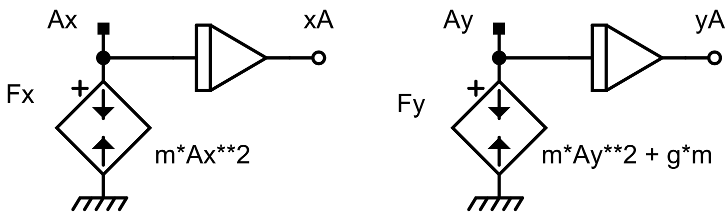


Schéma submodelu můžete rovněž vytvořit vybráním určité partie ve schématu vhodné soustavy a okopírováním této partie do okna pro kreslení schémat submodelů, které bylo otevřeno způsobem uvedeným výše.

14.1.2 Zadávání rovnic submodelů

Dynamické chování submodelu můžete popsat i soustavou nelineárních algebro-diferenciálních rovnic. V tomto případě jsou póly submodelu tvořeny póly pomocných fyzikálních prvků řízených rovnicemi. Funkci pólů mohou zastávat rovněž vstupy a výstupy bloků.

Příklad. Pohyb hmotného bodu uvažovaného v předchozím příkladu lze popsat rovnicemi $F_x = mA_x^2$ a $F_y = mA_y^2 + mg$. V následujícím schématu submodelu BOBEQ jsou těmito rovnicemi řízeny zdroje síly, jejichž póly tvoří póly submodelu.



14.2 Textové soubory submodelů

14.2.1 Uspořádání textových souborů submodelů

DYNAST při výpočetní analýze dynamických soustav nepracuje přímo se schématy submodelů, ale s jejich textovými soubory typu *.MOD. Pro schéma submodelu uložené v souboru *submodel*.DIA vygeneruje DYNAST textový soubor *submodel* *.MOD. Zobrazí se, když vyberete v menu View položku View Problem or Submodel (zobrazit text úlohy nebo submodelu).

Příklad. Pro schéma submodelu z prvního příkladu DYNAST vygeneruje levý datový soubor:

```
:: Teleso ve svisle rovine
BOB
Ax,
Ay;
m = 1;
g = 9.81;
I1 > @INT Ax,xA;
I2 > @INT Ay,yA;
m_x > C Ax = m;
m_y > C Ay = m;
Fg > J Ay = g*m;
EO@;
```

```
:: Teleso ve svisle rovine
BOB :: hmotny bod bez odporu
Ax,      :: [m/s] rychlost x
Ay/      :: [m/s] rychlost y
m = 1,   ::[kg] hmotnost bodu
g = 9.81;::[m/s] zrychleni g
I1 > @INT Ax,xA;
I2 > @INT Ay,yA;
m_x > C Ax = m;
m_y > C Ay = m;
Fg > J Ay = g*m;
EO@;
::xA [m] poloha x bodu A
::yA [m] poloha y bodu A
```

Soubor *.MOD vygenerovaný ze schématu je potřeba textovým editorem upravit, aby odpovídal uspořádání, jehož specifikace následuje. Upravený soubor je uveden v pravém sloupci příkladu.

`::`popis modelované reálné části	
submodel	`::`popis typu submodelu
pól `-`	`::`popis pólu
. . .	
pól	`::`popis pólu
[`/`	
parametr [= *hodnota*],	`::`[jednotka] popis parametru
parametr [= *hodnota*],	`::`[jednotka] popis parametru
. . .	
parametr [= *hodnota*];	`::`[jednotka] popis parametru]
. . .	
dynamika	
. . .	
`EO@;`	
`::` *proměnná*	[jednotka] popis proměnné
. . .	

submodel je jméno textového souboru daného submodelu a zároveň uživatelské označení jeho typu

pól je uživatelské jméno pólu submodelu shodné se jménem některého z jeho uzlů (s vyjímkou referenčních uzlů). Jména pólů jsou navzájem oddělena buď čárkou `,` nebo pomlčkou `-`.

parametr je uživatelské jméno externího parametru jehož hodnotu lze specifikovat z vně submodelu. Seznam těchto parametrů je oddělen od seznamu pólů lomítkem `/`.

hodnota je číselná konstanta nebo symbolický výraz specifikující implicitní hodnotu parametru, která platí, není-li ze vně submodelu tato hodnota modifikována. Pokud řetězec = *hodnota* chybí, implicitní hodnotou je nula.

dynamika zahrnuje příkazy specifikující schéma, příp. i rovnice, charakterizující chování submodelu

`EO@` je řetězec uzavírající zadání submodelu

V textovém souboru submodelu lze rovněž zadat hodnoty počátečních podmínek pro nelinární analýzu, které dojdou k uplatnění, pokud v zadání analýzy v sekci TR pro ně nejsou uvedeny hodnoty odlišné. V souborech *.MOD se počáteční podmínky zadávají ve tvaru

`INIT` *proměnná* = *výraz* [, *proměnná* = *výraz* ...];

proměnná je jméno řešené proměnné

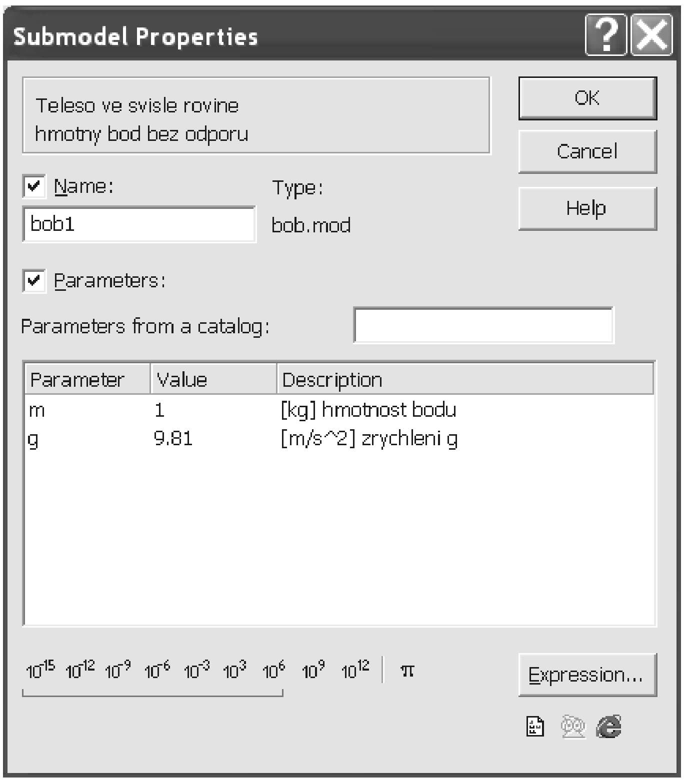
výraz je číselná konstanta nebo symbolický výraz

14.2.2 Vytvoření dialogu submodelu

Komentáře uvedené ve výše uvedeném uspořádání textových souborů submodelů *.MOD za dvojími dvojtečkami :: se používá k automatickému generování dialogů pro zadávání vlastností nebo proměnných submodelů. Některé z nich se zobrazují i ve výsledných tabulkách a grafech. Všimněte si umístění těchto komentářů v souborech *.MOD:

`::`popis modelované reálné části	na prvním řádku
`::`popis typu submodelu	vedle identifikátoru typu submodelu
`::`popis pólu	vedle identifikátoru pólu
`::`[jednotka] popis externího parametru	v popisu rozhraní submodelu
`::`proměnná [jednotka] popis proměnné	za řetězcem `EO@;`

Příklad. Dialog automaticky vygenerovaný pro submodel BLOB má podobu



Příklad dialogu submodelu

14.2.3 Vytvoření submodelu textovým editorem

Textový soubor *.MOD daného submodelu ve výše uvedeném uspořádání můžete samozřejmě vytvořit rovnou pomocí textového editoru, aniž byste museli předem vytvořit jeho schéma v grafické podobě.

1. V menu File vyberte New.
2. V rolovacím menu File type zvolte Submodel text.
3. Zadejte File name (Jméno souboru) zvolené tak, aby označovalo typ submodelu.
4. V políčku Title uveďte základní charakteristiku submodelu, která jej odlišuje od jiných submodelů téže reálné části.
5. Přepínačem v Template (Šablona) zvolte Documentation template pro pozdějši vytvoření dokumentu s popisem submodelu.
6. Klikněte na OK.

14.2.4 Vytvoření submodelu z textu úlohy

Výhodné je odlaďování submodelů současně s textovým souborem úplné úlohy (nelze využít při použití řešiče na serveru). Texty odlaďovaných submodelů *.MOD se umisťují hned na začátek souboru *.PRB za `*SYSTEM;`, přičemž každému z nich předchází příkaz `DEFMAC`:

`*SYSTEM;`
`DEFMAC` *zadání dynamiky submodelu*
`EO@;`
zadání zbytku soustavy
zadání analýzy soustavy
END;

Příklad. Text submodelu BOBEQ může být tímto způsobem odlaďován např. v tomto souboru *PRB:

```
*SYSTEM; :: Teleso ve svisle rovine
DEFMAC bobeq Ax, Ay/ m = 1, g = 9.81;
I1 > @INT Ax,xA; I2 > @INT Ay,yA;
m_x > C Ax = m; m_y > C Ay = m;
Fg > J Ay = g*m; EO@;
bobeq1 > @bobeq 1,2;
*TR; TR 0 .2; PRINT (501) bobeq1.xA, bobeq1.yA;
INIT bobeq1.Ax=1, bobeq1.Ay=1; RUN; *END;
```

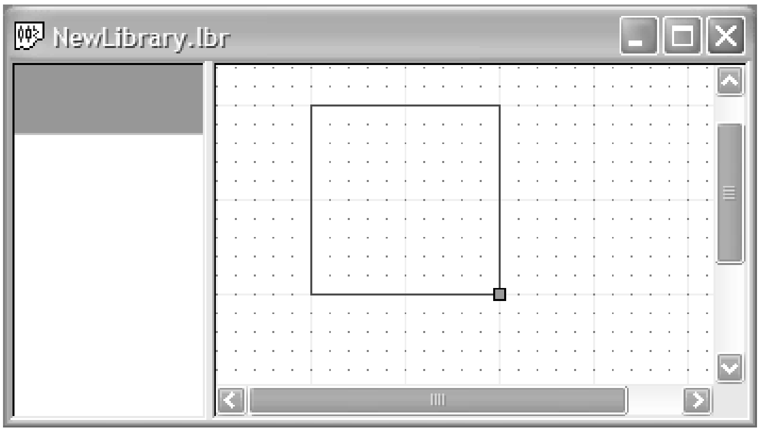
14.3 Knihovny značek submodelů

14.3.1 Vytvoření nové knihovny značek

Grafické značky submodelů se ukládají po skupinách do knihoven značek v podobě souborů typu *.LBR. Novou knihovnu značek vytvoříte následovně:

1. V menu File vyberte New.
2. V rolovacím menu File type zvolte Symbol library (knihovna značek).
3. V poli File name (jméno souboru) zadejte jméno knihovny značek.
4. V seznamu Create in (vytvořit ve) lze vybrat složku, ve které se má soubor vytvořit. Implicitně se vytvoří v hlavní složce submodelů.
5. Klikněte na OK.

Nová prázdná knihovna značek se vám otevře v okně grafického editoru značek. V levé části okna je místo pro seznam značek uložených v knihovně. Po vybrání značky z tohoto seznamu se značka zobrazí v pravé části okna. V okně s prázdnou knihovnou je zde zobrazen pouze obdélník (bounding box) ohraničující obrazec budoucí značky.

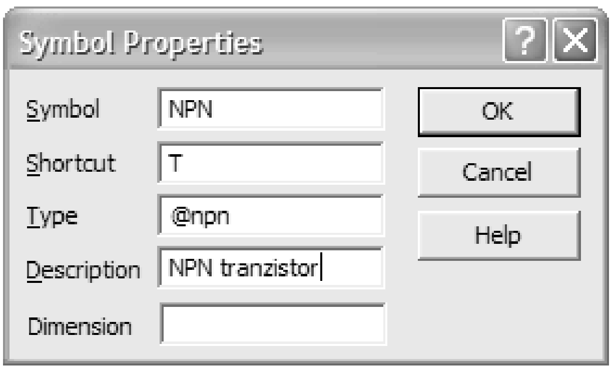


Nová knihovna značek

14.3.2 Základní vlastnosti značky

Při vytváření nové značky je nejprve třeba nejprve zadat její základní vlastnosti. Slouží k tomu dialog Symbol Properties, který lze otevřít z menu Edit nebo dvojím kliknutím do levé části okna knihovny.

1. V poli Symbol dialogu Symbol Properties zadejte jméno značky.
2. V poli Shortcut definujte zkratku, která bude použita jako implicitní jméno otisků této značky do schémat zadávaných soustav.
3. V poli Type zadejte jméno textového souboru *.MOD příslušného submodelu uvozené znakem @.
4. V poli Description uveďte heslovitý popis značky.

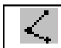
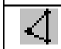
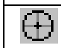
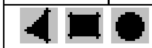
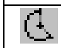
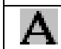


Zadávání vlastností značky

14.3.3 Vytvoření obrazce značky

Nejprve nastavte rozměry obdélníku ohraničujícího vytvářený obrazec značky. Myší uchopte zelený bod v pravém dolním rohu obdélníku a přetáhněte jej do požadovaného průsečíku přímek sítě (nikoliv na některou tečku). Pro kreslení obrazce značky máte k dispozici nástroje uvedené v tab. 14.1, které jsou přístupné z menu Place (Umístit) i z nástrojové lišty. Kreslení začněte kliknutím na pravou část knihovny značek otevřené v okně grafického editoru.

Tabulka 14.1: Nástroje pro grafické editování značek.

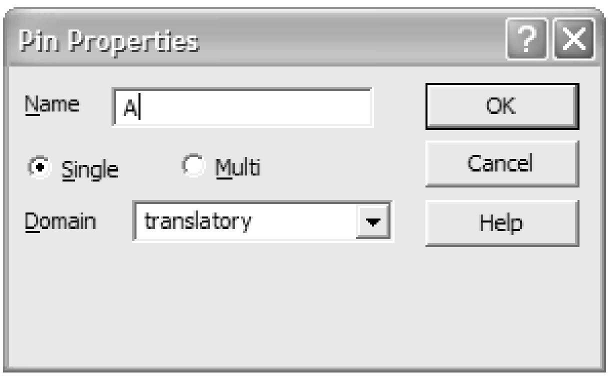
Ikona	*Příkaz v menu Place*	*Popis*
	Polyline	Lomená čára určená kliknutím v místech jejích zlomů.
	Polygon	Lomená čára se shodným počátečním a koncovým bodem.
	Rectangle	Obdélník určený kliknutím v jeho dvou protilehlých rozích.
	Circle	Kružnice určená prvním kliknutím v jejím středu a druhým na jejím obvodu.
		Vyplněné varianty objektů uvedených výše.
	Arc	Oblouk určený prvním kliknutím v jeho středu, druhým v jeho počátečním bodě a třetím v koncovém bodě. Body se propojí obloukem ve směru hodinových ručiček.
	Text	Text značky umístitelný do místa kliknutí.

Každý z kreslících nástrojů zůstane aktivní tak dlouho, dokud nestisknete klávesu Esc nebo pravé tlačítko myši, či nevyberete jiný nástroj.

Text značky můžete upravit kliknete-li na něj dvakrát, pokud žádný z kreslících nástrojů není aktivní. V dialogu, který se otevře, přepínačem určíte, zda se text bude otáčet současně se značkou (Text rotates with the symbol), nebo zda vždy zůstane ve vodorovné poloze (Text keeps its orientation).

14.3.4 Zadání vývodů značky

Vývody značky slouží k jejímu propojení s vývody ostatních značek ve schématu. Umisťují se do sítě přímek v grafickém editoru tak, aby vycházely z ohraničujícího obdélníku značky.

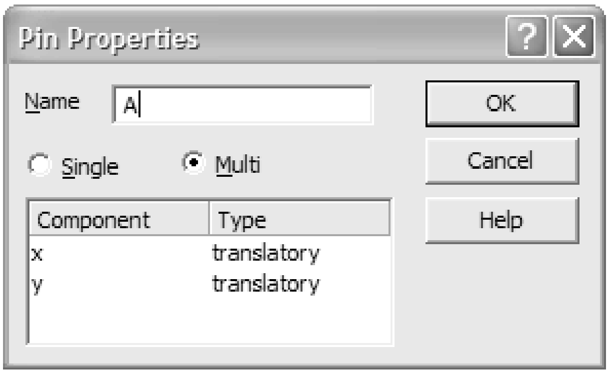


Zadávání vlastností jednoduchého vývodu

Nový vývod ke značce připojíte pomocí příkazu Pin (vývod) v menu Place. Pohybem myší určíte polohu vývodu na ohraničujícím obdélníku a potvrdíte ji kliknutím. Vzápětí se otevře dialog Pin Properties (vlastnosti vývodu). V případě potřeby můžete nastavit nulovou délku vývodu, jeho funkce se tím nezmění.

V dialogu zadejte do pole Name jméno vývodu shodné se jménem odpovídajícího pólu submodelu, který přísluší vytvářené značce. Dále určete, zda je vývod jednoduchý (Single) či složený (Multi). U jednoduchého vývodu se zadává pouze doména energetické interakce, kterou vývod představuje: generic (univerzální), electric, magnetic, thermal, fluid (tekutinová), rectilinear (mechanická přímočará) a rotary (mechanická rotační). Informaci o doméně vývodů využívá editor schémat při kontrole slučitelnosti propojovaných vývodů (nelze propojovat vývody různých domén kromě domény univerzální).

Pokud zadáte vývod jako složený, určete rovněž jména a domény jeho složek podobně jako u jednoduchého vývodu. I v tomto případě musí jméno vývodu a jeho složek odpovídat jménům příslušných pólů submodelu. Jméno pólu vznikne spojením jména vývodu se jmény jednotlivých složek vývodu.



Zadávání vlastností složeného vývodu

Příklad. V dialogu je příklad složeného vývodu, který vznikne sloučením dvou jednoduchých pólů Ax a Ay dříve diskutovaného submodelu BLOB. Zatímco jméno složeného vývodu je A, jména jeho dvou složek reprezentujících přímočaré mechanické interakce jsou x a y.

14.3.5 Úpravy značek

Objekty definující obrazec značky můžete měnit po stisku klávesy Esc nebo pravého tlačítka myši, případně kliknutím na ikonu na nástrojové liště. Všechny úpravy lze zrušit a dodatečně obnovit příkazy Undo a Redo v menu Edit.

Výběr objektů provedete kliknutím mimo jakýkoli objekt a pak objekty tažením myši obdélníkově ohraničíte, nebo na ně postupně kliknete za současného držení klávesy Ctrl.

Kopírování objektů provedete jejich tažením za současného držení Ctrl, případně pomocí příkazů Copy a Paste (Kopírovat a vložit) v menu Edit. Takto lze kopírovat objekty i do jiných značek nebo knihoven.

Úpravu grafického objektu lze provést po jeho výběru, kdy se zobrazí jeho ovládací prvky.

Úpravu dialogu poznámky nebo vlastností vývodu vám umožní dvojklik na příslušný objekt.

14.3.6 Úpravy knihoven značek

Po kliknutí na levou stranu knihovny značek otevřené v grafickém editoru lze provádět následující operace:

Přidání nové značky příkazem New Symbol v menu Edit.

Okopírování značky příkazem Duplicate Symbol v menu Edit.

Změnu pořadí značek provedete tažením značek pomocí myši.

Odstranění značky z knihovny umožní stisk klávesy Delete.

Okopírování značky z jedné knihovny do druhé lze provést textovým editorem přenesením textu značky z textového souboru *.LBR jedné knihovny do souboru *.LBR druhé knihovny.

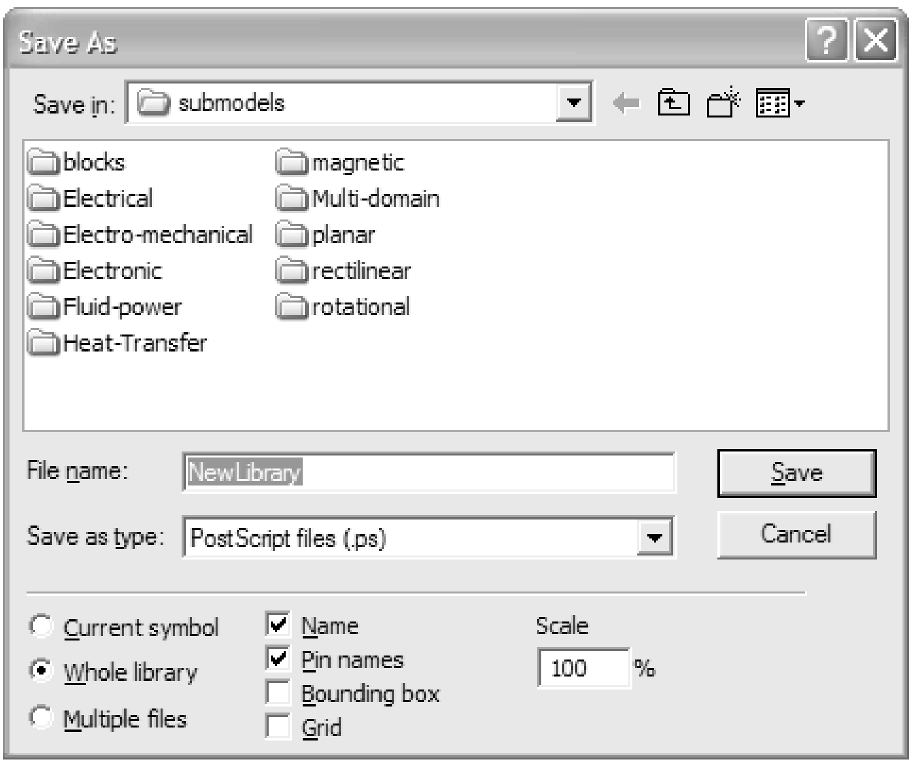
Pokud chcete při zadávání schématu použít knihovnu značek, ve které došlo ke změně aniž byste DYNAST mezi tím zavřeli, nezapomeňte použít příkaz Refresh Libraries v menu Edit.

14.3.7 Export knihovny značek

Pro export knihovny značek do formátu PostScript je určen dialog, který se otevře pomocí příkazu Export to PostScript v menu File.

Přepínačem zde můžete vybrat export

- obrazce vybrané značky do souboru *.EPS volbou Current symbol
- celé knihovny se všemi značkami do jediného souboru *.PS po volbě Whole library
- všech značek knihovny do samostatných souborů *.EPS, zvolíte-li Multiple files



Export knihovny značek do PostScriptu

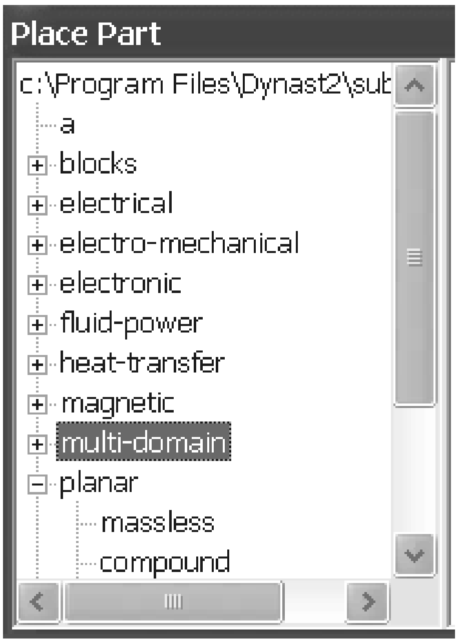
Pomocí ovládacích prvků dialogu Name (Jméno značky), Pin names, (Jména vývodů), Bounding box (Ohraničující obdélník) a Grid (Síť) lze povolit nebo zakázat tisk určitých prvků značky. V poli Scale můžete nastavit měřítko zobrazení značek. V základním měřítku 100% je rozpětí sítě přímek (rozteč vývodů) 5 mm.

14.4 Organizace souborů submodelů

V instalaci uživatelského prostředí DYNAST Shell soubory obsahující informace o jednotlivých submodelech najdete v podsložkách složky SUBMODELS. Každá z těchto podsložek je určena pro určitou třídu submodelů (Electric, Electronic, apod.). Názvy těchto podsložek se zobrazují v dialogu Place Part, který lze otevřít v menu Place při aktivovaném oknu pro kreslení schémat.

V podsložce každé třídy submodelů jsou v souborech *.LBR umístěny knihovny značek z nichž každá obsahuje značky určité skupiny submodelů. Do této skupiny vždy patří textové soubory *.MOD submodelů příslušejících jednotlivým značkám dané knihovny značek. Pro lepší přehlednost jsou soubory každé takové skupiny submodelů uloženy v samostatné složce DYNAST Shellu. V této složce jsou i příslušné soubory *.DIA se schématy submodelů a soubory *.PDF s popisy submodelů (pokud tyto soubory existují). Pokud se v souboru *.LBR s textem úlohy nachází odkaz na určitý submodel, DYNAST Shell hledá příslušný soubor *.MOD nejprve v podsložkách složky SUBMODELS ve své instalaci. Pokud jej tam nenajde, hledá jej ve složkách zadaných v konfiguraci programu (viz Preferences / Options / Folders).

V následujícím dialogu Place Part je ukázka uspořádání podsložek složky SUBMODELS. Podsložka pro submodely třídy Planar je zde zobrazena jako otevřená, takže je patrné, že obsahuje tři knihovny značek pro tři skupiny submodelů: Massless (Nehmotné), Compound (Hmotné) a Multi-pin (Se složenými vývody). Abecední pořadí podsložek a knihoven značek i názvy skupin submodelů jsou zde modifikovány pomocí souborů INDEX umístěným ve složkách.



Organizace submodelů

Kapitola 15

Modelovací toolbox pro MATLAB

Obsah kapitoly

Zde se dozvíte, jak můžete současně využít přednosti DYNASTu a MATLABu při návrhu a ověřování automatického řízení dynamických soustav. Semisymbolické přenosové funkce realistických modelů soustav snadno sestavených v DYNASTu lze vyexportovat pro další zpracování do MATLABu. Model dynamické soustavy implementovaný v DYNASTu může být rovněž vložen do blokového schématu implementovaného v Simulinku a průběžně 'řízen' online. Podobný přístup lze uplatnit např. při řízení soustav v reálném čase. Přitom DYNAST a Simulink nemusí být ani nainstalovány na společném počítači, mohou spolu komunikovat přes Internet.

15.1 Export přenosových funkcí do MATLABu

Koeficienty přenosových funkcí dynamických soustav vypočítané pomocí semisymbolické analýzy v DYNASTu můžete velmi snadno přenést do MATLABu nebo jiného programu. Export do MATLABu provedete následujícím způsobem:

1. Podle návodu v kapitole 12 otevřete okno Semisymbolic Results s výsledky semisymbolické analýzy uvažované dynamické soustavy.

2. V okně vyberte přenosovou funkci, kterou chcete exportovat (případně můžete exportovat všechny funkce vybráním jejich nadřazené složky) a klikněte na tlačítko Copy to Clipboard (Kopírovat do schránky).

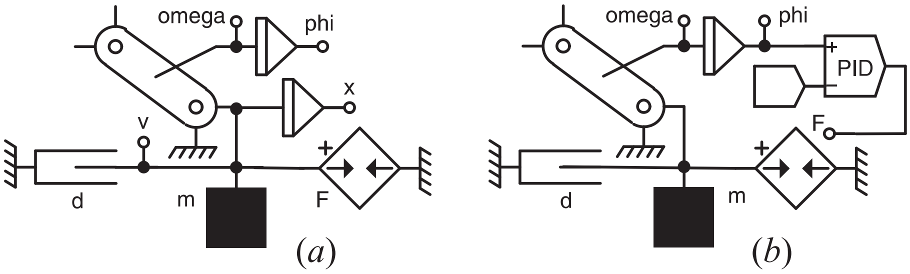
3. V menu MATLABu Edit zvolte příkaz Paste.

4. Úspěšnost exportu si můžete ověřit zapsáním identifikátorů proměnných do příkazové řádky MATLABu a stisknutím klávesy Enter.

Příklad. Předpokládejme, že naším cílem je navrhnout analogové řízení pohonu vozíku s inverzním kyvadlem tak, aby kyvadlo zůstalo trvale ve svislé 'převrácené' poloze. Na obr. *a* je model této dynamické soustavy. Setrvačnost a odpor vozíku proti pohybu podél přímé vodorovné dráhy reprezentuje inertor m a tlumič d. Pohon vozíku je modelován zdrojem síly F.

K modelování pohybu kyvadla ve svislé rovině kolem závěsu připevněného k vozíku je použit submodel ROD z instalace DYNASTu. Polohu vozíku x z jeho rychlosti v a úhlovou výchylku kyvadla φ z jeho úhlové rychlosti ω vyhodnocují integrační bloky.

Rozhodneme-li se pro regulaci PID, v DYNASTu vypočítáme koeficienty přenosové funkce $H(s) = \varphi(s)/F(s)$ a vyexportujeme je do MATLABu. Po návrhu koeficientů regulátoru PID v prostředí MATLABu model inverzního kyvadla doplníme o zpětnou vazbu naznačenou na obr. b, která řídí zdroj síly F.



(a) (b)

V případě nelineárních soustav, které mají být řízeny, DYNAST podstatně usnadňuje vyšetřování jejich detailního chování bez zpětné vazby. Umožňuje nalézt jejich klidový pracovní bod pomocí nelineární statické analýzy, v tomto bodě je linearizovat a určit jejich přenosové funkce i odezvy na počáteční stav. Po dokončení návrhu řízení DYNAST dovoluje důkladné ověření celé zpětnovazební soustavy při respektování nelinearit a dalších neideálních vlastností jak řízeného objektu, tak i řídících prvků.

15.2 Řízení modelu v DYNASTu ze Simulinku

15.2.1 Úprava modelu řízené soustavy v DYNASTu

Aby model soustavy implementovaný v DYNASTu mohl být ‘řízen’ Simulinkem nainstalovaným na společném počítači je potřeba jej následujícím způsobem upravit:

- První analýza specifikovaná ve vstupním souboru musí být nelineární přechodová analýza.
- Časový interval analýzy musí být alespoň tak dlouhý, jak dlouhý je předpokládaný časový interval analýzy v Simulinku.
- Vstupní soubor musí na svém konci za příkazem `*END;` obsahovat specifikaci rozhraní řízené soustavy ve formě komentáře, jehož formát je následující:

  `: MATLAB interface spec: '`*vstup*`,`*vstup*`, ...';'`*výstup*`,`*výstup*`, ...'`

vstup je identifikátor parametru zdroje E či J, autonomního bloku BS, nebo některého parametru soustavy rovnic

výstup je identifikátor požadované proměnné analyzované soustavy

Pozor: celá specifikace rozhraní musí být na jediném řádku.

Příklad. V předchozím příkladu bychom takovéto rozhraní zadali jako

```
: MATLAB interface spec: 'F';'phi,omega,x,v'
```

15.2.2 Konfigurace MATLABu

Konfiguraci MATLABu pro souběžnou simulaci DYNASTu se Simulinkem si proveďte v následujících krocích:

1. Spusťte program MATLAB.
2. Použijte příkaz Set path z menu File.
3. Klikněte na Add Folder (Přidat složku).
4. Nalistujte složku uvedenou níže.
5. Klikněte na tlačítko Save pro uložení nastavení.
6. Zavřete okno kliknutím na tlačítko Close.

Nalistovaná složka má podobu

složka`\matlab\`*toolbox*`\DYNAST`

složka je název složky v níž je na vašem počítači uložen DYNAST a jeho prostředí (obvykle `C:\Program Files\DYNAST`)

toolbox je řetězec `toolbox6` pro MATLAB verze 6 nebo `toolbox7` pro MATLAB verze 7

15.2.3 Příprava řídící struktury v Simulinku

V Simulinku je potřeba vytvořit blokové schéma řídící struktury s blokem S-Function představujícím model řízené soustavy implementovaný v DYNASTu. Uvedený blok si zadáte tímto postupem:

1. V Simulinku vyberte blok typu S-Function (v knihovně Nonlinear nebo User-Defined Functions).
2. Jako jméno tohoto bloku do pole S-function name zadejte řetězec `dynPlantL`
3. Do pole S-function parameters zadejte text

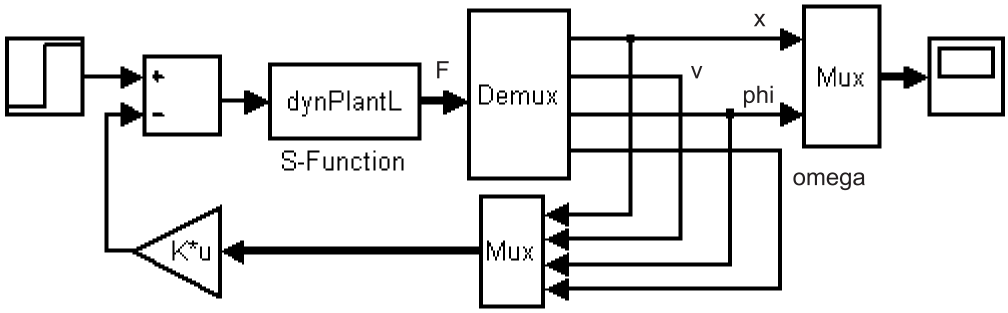
   `'`*cesta*`',` *vzorkování*

cesta je úplná cesta ke vstupnímu souboru *.PRB v DYNASTu s modelem řízené soustavy. Při specifikaci této cesty můžete použít řetězec `%DYNAST%` pro označení složky s prostředím DYNAST Shell.

vzorkování udává, v jakých časových intervalech (v sekundách) bude docházet k výměně dat mezi DYNASTem a Simulinkem během společné simulace

Po spuštění simulace ze Simulinku je automaticky spuštěn řešič DYNASTu s modelem řízené soustavy. Simulink a DYNAST pak běží současně a společně se podílí na odvození chování celé soustavy.

Příklad. Na následujícím obrázku je blokové schéma vytvořené v prostředí Simulinku pro číslicové stavové řízení inverzního kyvadla z obr. *a*. Model vozíku s kyvadlem, implemenentovaný v DYNASTu, je v blokovém schématu reprezentován blokem S-Function. (viz D. Tilbury a B. Messner: *Control Tutorials for Matlab*, http://www.engin.umich.edu/group/ctm/).



Literatura

[1] Rubner-Petersen, T.: *Nonlinear Analysis Program NAP3* (an unfinished project). DTH, Lyngby 1980

[2] Mann, H.: *Computer applications in electrical engineering design* (in Czech). SNTL Publishing House, Prague 1984

[3] Oliva Z.: *Some algorithms for electronic circuit analysis* (in Czech). PhD. thesis, Czech Technical University, Prague 1986

[4] Mann, H.: *Multipoles, multiports and operational blocks*. Proc. European Conf. Circuit Theory and Design, London 1974

[5] Mann, H.: *Analysis of combined circuit-block diagrams*. Proc. Int. Symp. on Circuits and Systems ISCAS IEEE, Rome 1982, 639-642

[6] Rubner-Petersen, T.: *ALGDIF – a FORTRAN IV subroutine for solution and perturbated solutions of algebraic-differential equations*. Research Report, DTH, Lyngby 1979

[7] Gear, C.W: *Numerical initial value problems in ordinary differential equations.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1971

[8] Skelboe, S.: *Time-domain steady-state analysis of nonlinear electrical systems*. Proc. IEEE 70 (1982), 1210-1228

[9] Brigham, E.O.: *The Fast Fourier Transform*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1974

[10] Mann, H.: *An algorithm for the formulation of state-space equations*. Proc. 1979 Int. Symp. on Circuits and Systems ISCAS IEEE, Tokyo 1979, 161-162

[11] Rubner-Petersen,T.: *SFORM1 and SFORM2 – two FORTRAN IV subroutines for sparse matrix transformation of the general eigenproblem to standard form*. Research Report IT-41, DTH, Lyngby 1979

[12] Mann, H. et al.: *Computer-aided design of dynamic systems*. CSVTS House of Engineering, Prague 1986

[13] Mann, H.: *Theory of mechanical systems II.* Textbook, Technical University, Brno 1990