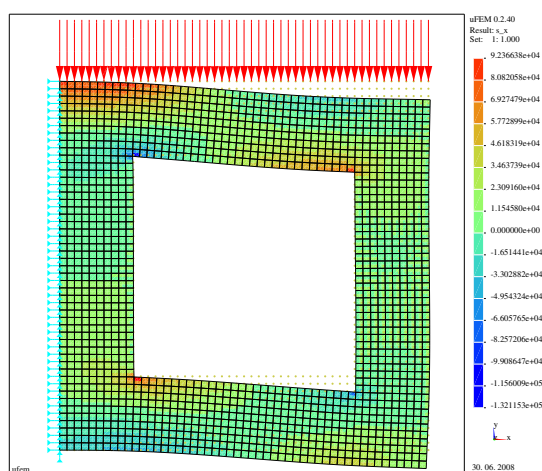


PROGRAM uFEM

Využití metody konečných prvků v mechanice kontinua

UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA

Jiří Brožovský



Ostrava, 17. ledna 2011

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Základní informace	1
1.2	Typy konečných prvků	1
1.3	Používané jednotky a konvence	2
1.4	Struktura programu	2
1.5	Interakce s dalšími programy	2
2	První kroky v programu	4
2.1	Základní orientace	4
2.1.1	Grafické okno	4
2.1.2	Další dialogová okna	5
2.1.3	Okna s výpisy	5
2.2	Umístění a pojmenování datových souborů	5
2.2.1	Jméno úlohy	5
2.2.2	Adresář pro data	6
2.2.3	Typy souborů	6
2.3	Postup tvorby modelu	6
2.4	Úvodní příklad	7
2.4.1	Příprava	7
2.4.2	Zadání příkladu	7
2.4.3	Zadání vlastností modelu	8
2.4.4	Tvorba geometrie modelu	8
2.4.5	Parametry sítě konečných prvků	9
2.4.6	Tvorba sítě konečných prvků	10
2.4.7	Zadání podpor	10
2.4.8	Zadání zatížení	10
2.4.9	Výpočet	10
2.4.10	Prohlížení výsledků	10
2.4.11	Uložení výsledků	11
2.5	Ukládání a načítání dat	12
2.5.1	Uložení dat	12
2.5.2	Načtení dat	12
2.6	Úvodní příklad zapsaný pomocí příkazů	12
3	Operace v grafickém prostředí	14
3.1	Manipulace s modelem	14
3.1.1	Posouvání modelu	14

3.1.2	Otáčení modelu kolem os x a y	14
3.1.3	Otáčení modelu kolem osy z	14
3.1.4	Zvětšování a zmenšování modelu	14
3.2	Označování objektů v grafických operacích	15
3.3	Číslování a zobrazování komponent modelu	15
3.4	Automatické překreslování modelu	15
4	Geometrický model	16
4.1	Základní možnosti	16
4.2	Principy zadávání	17
4.2.1	Body	17
4.2.2	Geometrické objekty	17
4.3	Parametry sítě konečných prvků	17
4.3.1	Výchozí vlastnosti	17
4.3.2	Oprava vlastností	18
5	Konečněprvkový model	19
5.1	Základní možnosti	19
5.2	Automatická tvorba sítě konečných prvků	19
5.3	Postupy zadávání uzlů a konečných prvků	19
5.3.1	Uzly	19
5.3.2	Konečné prvky	20
5.4	Vztah geometrických objektů a konečných prvků	20
5.5	Podpory v uzlech	20
5.6	Zatížení v uzlech	20
5.7	Zatížení vlastní tíhou konstrukce	21
6	Spuštění výpočtu	22
6.1	Lineární výpočet	22
6.2	Nelineární výpočet	22
7	Práce s výsledky	24
7.1	Textové výpisy	24
7.2	Grafické výstupy	24
7.3	Další typy výsledků	25
7.4	Ukládání obrázků	26
8	Instalace programu	27
8.1	Instalace binární verze	27
8.1.1	Úvod	27
8.1.2	Unixové operační systémy	27
8.1.3	Operační systémy typu Windows	28
8.1.4	Mac OS X	29
8.2	Instalace programu ze zdrojových kódů	29

Kapitola 1

Úvod

1.1 Základní informace

Program uFEM slouží k řešení statických úloh mechaniky kontinua pomocí metody konečných prvků. Je možné jej používat pro výpočty prutových, plošných a prostorových konstrukcí. Program obsahuje jak výpočetní jádro, tak interaktivní a neinteraktivní uživatelské nástroje pro tvorbu výpočetních modelů a pro vyhodnocování výsledků.

K výpočtům je možné několik typů konečných prvků, které pokrývají většinu běžných variant úloh mechaniky kontinua, které se vyskytují v oblasti stavební mechaniky.

1.2 Typy konečných prvků

Program uFEM umožňuje pro jednotlivé typy problémů použít několik typů konečných prvků, které se odlišují počtem uzlů a použitými aproximačními funkcemi, ale také charakterem úloh, pro které mohou být použity (například jen některé typy prvků je možné využít při fyzikálně nelineárním řešení).

V tabulce 1.2 jsou uvedeny vybrané typy konečných prvků, které jsou vhodné pro fyzikálně a geometricky lineární řešení jednotlivých problémů mechaniky kontinua.¹

Typ problému	Konečné prvky	Stupně volnosti
Rovinná příhradovina	LINK1	u_x, u_y
Rovinný rám	BEAM3	u_x, u_y, φ_z
Prostorová příhradovina	BEAM6	u_x, u_y, u_z
Prostorový rám	BEAM7	$u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$
Stěna	PLANE2, PLANE11	u_x, u_y
Deska	SLAB5	$u_y, \varphi_x, \varphi_y$
Těleso	SOLID4, SOLID9	u_x, u_y, u_z

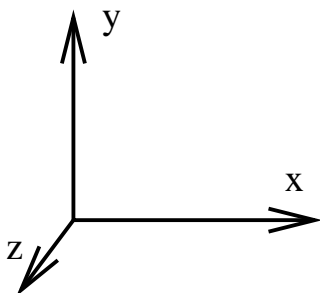
Tabulka 1.1: Základní typy konečných prvků v programu uFEM

¹Problematika řešení nelineárních úloh je obsahem samostatné příručky.

1.3 Používané jednotky a konvence

V programu nejsou činěny žádné předpoklady o používaných jednotkách a jejich volba je ponechána na uživateli. Doporučuje se pracovat v základních jednotkách soustavy SI a v jednotkách z nich odvozených (m , kg , N , Pa).

Při tvorbě modelu se předpokládá pravotočivý kartézský systém souřadnic. Hodnoty vektorových veličin (posunutí, síly) jsou kladné pokud veličiny směřují ve směru příslušné kladné poloosy systému souřadnic.



Obrázek 1.1: Pravoúhlý kartézský systém souřadnic

Při zadávání jakýchkoli číselných hodnot je potřebné nezapomínat, že se používá **výhradně desetinná tečka**.

1.4 Struktura programu

Program se skládá ze dvou samostatných součástí – výpočetního jádra, které provádí vlastní výpočty, a z integrovaného uživatelského rozhraní, které slouží k interakci s uživatelem a ke tvorbě výpočetních modelů a k vyhodnocování výsledků. Obě části mohou pracovat samostatně, například k provozu výpočetního jádra není zapotřebí uživatelské rozhraní.

Uživatelské rozhraní je možné ovládat pomocí myši a klávesnice, pro urychlení práce nebo pro automatizaci některých operací je možné používat integrovaného příkazového jazyka.

1.5 Interakce s dalšími programy

Program uFEM používá vlastní formáty datových souborů, které nejsou s jinými programy kompatibilní. V omezené míře však umožňuje načítat a ukládat formáty některých souvisejících programů.

Je možné načítat definice sítí konečných prvků z programů GMSH [2] a NetGen [3]. V obou případech je nutné použít textovou variantu datového formátu těchto programů. Oba uvedené programy generují sítě konečných prvků tvořených trojúhelníky (ve 2D) nebo čtyřstěny (ve 3D), které jsou v programu uFEM převedeny na prvky PLANE11 (pro řešení stěn) a SOLID4 (prostorový prvek pro řešení těles).

Vytvořenou síť konečných prvků je možné uložit ve formě příkazového souboru kompatibilního s programem ANSYS [1]. V tomto případě se neukládají doplňková data konečných prvků (*Real Constants* v terminologii programu ANSYS).

Kapitola 2

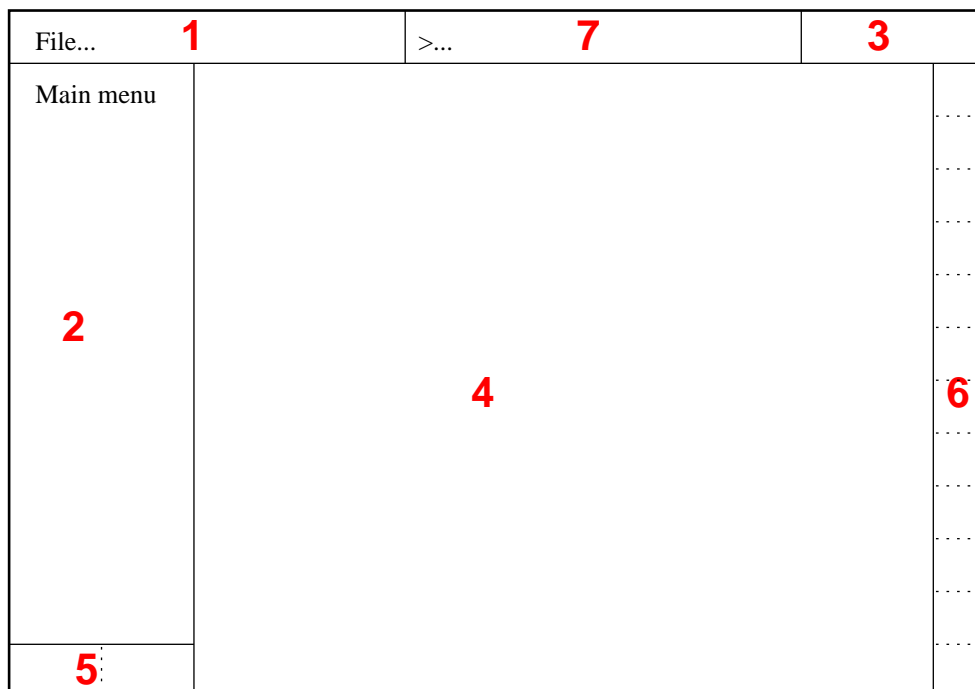
První kroky v programu

2.1 Základní orientace

Po spuštění programu se objeví dvě okna – *grafické okno* s ovládacími prvky a *okno výpisů*. *Grafické okno* slouží k samotné práci uživatele, zatímco okno výpisů obsahuje podrobnější textové informace o probíhajících operacích, zejména chybová hlášení.

Pozor: *Okno výpisů nesmí být uživatelem zavřeno, program by okamžitě a bez dalších varování skončil skončil!*

2.1.1 Grafické okno



Obrázek 2.1: Prvky *grafického okna* programu uFEM

1. *Nabídka aplikace*: obsahuje roletové nabídky zpřístupňující práci se soubory (načítání, ukládání), zobrazování a výpisy dat a práci s výběry položek.
2. *Strom příkazů*: obsahuje stromově seřazené příkazy pro tvorbu a úpravy dat, pro provádění výpočtů a pro vyhodnocování výsledků.
3. *Informační pole*: obsahuje informaci o stavu programu a o úspěšném (*OK*) nebo neúspěšném (*Error*) ukončení operace.
4. *Grafická oblast*: slouží k zobrazení grafických dat (var modelu, výsledky, ...).
5. *Potvrzovací tlačítka*: slouží k ukonečení nebo přerušení práce s myší. Tato tlačítka jsou aktivní jen během operací výběru pomocí myši.
6. *Nastavení zobrazení*: slouží k rychlému nastavení grafického zobrazení (překreslení, zvětšení, zmenšení, přesuny a otáčení).
7. *Příkazový řádek*: umožňuje zadávat příkazy. Provádění zapsaného příkazu se zahájí stiskem klávesy **Enter**.

2.1.2 Další dialogová okna

Při práci se mohou objevit další dialogová okna, která slouží k zadání požadovaných informací. Tato okna obvykle obsahují několik potvrzovacích tlačítek:

- *OK*: provede zadanou operaci (uloží nebo zpracuje vložená data) a uzavře dialogové okno.
- *Apply*: provede zadanou operaci (stejně jako *tlačítko OK*), ale znovu zobrazí totéž dialogové pro zadání dalších dat. Toto tlačítko někdy nemusí být k dispozici.
- *Cancel* (Zrušit): zruší operaci (nic se neprovede a zadaná data se nikde nepoužijí).

2.1.3 Okna s výpisy

Výchozím nastavením programu je vypisování všech textových informací do *okna výpisů*. Program však může být nakonfigurován tak, aby k provádění uživatelem vyžádaných výpisů použil předdefinovaný program (obvykle textový editor nebo prohlížeč souborů HTML).

2.2 Umístění a pojmenování datových souborů

2.2.1 Jméno úlohy

Uživatelské rozhraní programu uFEM při svém chodu vytváří celou řadu souborů. Názvy těchto souborů jsou automaticky vytvářeny tak, aby na začátku obsahovaly uživatelem definované *jméno úlohy* a na konci měly vhodnou příponu.

Výchozí jméno úlohy je „femfile“ a je možné jej změnit v nabídce **File** → **Change JobName** nebo příkazem `jobname, jméno`

2.2.2 Adresář pro data

Všechny výše uvedené soubory se ukládají do jednoho adresáře (složky). Poloha tohoto adresáře závisí na nastavení konkrétní instalace programu a uživatelem může být změněna pomocí příkazu `datadir,adresář`.¹

2.2.3 Typy souborů

V tabulce 2.2.3 jsou uvedeny základní typy souborů, které jsou programem využívány a vytvářeny. Pro archivaci práce stačí uchovávat soubory s koncovkou „db“, v případě potřeby zálohování i výsledků výpočtu navíc i soubory s koncovkou „res“.

Typ souboru	Přípony
Popis modelu	db
Textový výpis dat	txt, html
Soubor s příkazy	mac
Popis modelu pro řešič	fem
Soubor s výsledky řešení	res

Tabulka 2.1: Základní typy souborů používaných programem uFEM

2.3 Postup tvorby modelu

Při sestavování výpočetního modelu je potřeba dodržovat pořadí některých kroků. Zejména je potřebné, aby byly nejprve definovány používané typy materiálů a typy a vlastnosti konečných prvků a až poté může být zadávána geometrie modelu.

Pořadí potřebných kroků je následující:

1. Výběr typů použitých konečných prvků (*Element Type*).
2. Nastavení parametrů použitých konečných prvků (*Real Constants*).
3. Nastavení a vlastností použitých materiálů (*Materials*).
4. Zadání geometrie modelu (*Geometric Entities*).
5. Nastavení parametrů sítě konečných prvků.
6. Vytvoření sítě konečných prvků (*Neshing*).
7. Zadání podpor a zatížení (*Supports, Loads*).

Je samozřejmě možné zadat uzly konečných prvků a prvky samotné přímo, bez tvorby geometrie modelu (kroky 4-6). Tuto část je také možné nahradit načtením sítě konečných prvků z externího souboru vytvořeného jiným programem.

¹Adresář musí být specifikován plnou cestou podle konvencí používaného operačního systému, například `datadir,C:/data` pro systémy Windows nebo `datadir,/home/user/data` pro operační systémy unixového typu.

2.4 Úvodní příklad

V následujících odstavcích je na jednoduché úloze ukázána tvorba výpočetního modelu jednoduché stěnové konstrukce.

2.4.1 Příprava

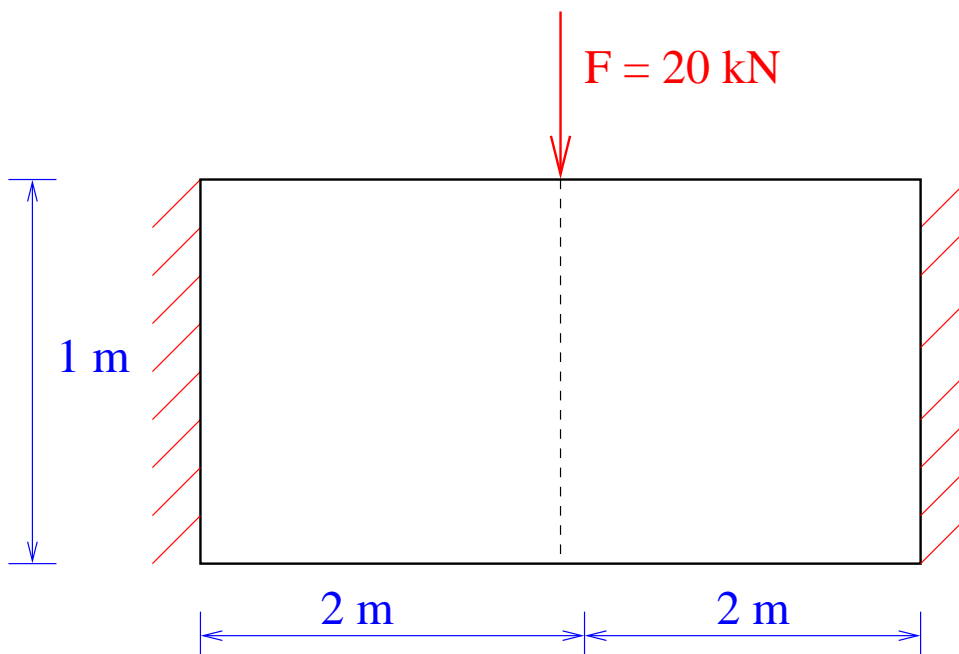
Protože nastavení programu závisí na konkrétní instalaci a na zvycích uživatele, doporučujeme pro dosažení jednotného chování nastavit následující položky (z nabídky aplikace):

- Automatické překreslování modelu: Plot → Automatic replotting
- Zobrazování bodů: Plot → Automatic replotting
- Zobrazování geometrických obehků: Plot → Automatic replotting

2.4.2 Zadání příkladu

Obdélníková stěna je z materiálu o modulu pružnosti $E = 20\text{GPa}$ a o Poissonově součiniteli $\nu = 0.2$, její tloušťka je $t = 0.1\text{m}$. Stěna je po okrajích vetknuta a je zatížena svislou osamělou silou uprostřed horní hrany podle obrázku 2.4.2.

Stěnu rozdělte na $200 = 20 \times 10$ konečných prvků.



Obrázek 2.2: Geometrie stěny

2.4.3 Zadání vlastností modelu

Výběr typu konečného prvku

Nejprve je třeba vybrat vhodný typ konečného prvku. Podle tabulky 1.2 jím bude prvek **PLANE2**. Dialog pro jeho výběr se vyvolá ze *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Element Types → Add...

Do pole *Identifier* se uvádí uživatelem zvolené číselné označení typu prvku (použijte hodnotu 1) a do pole *Type* jméno nebo číslo typu prvku (použijte *plane2* nebo jen 2).

Zadání vlastností konečného prvku

Je třeba zadat také tloušťku stěny (která je v tomto příkladu po celé stěně konstantní). V *Stromu příkazů* se zadá

Preprocessor → Real Constants → Add a v dialogu se do pole *Identifier* zadá uživatelem definované číslo prvku (zadejte 1) a do pole *Type* se uvede typ konečného prvku, pro který jsou konstanty platné (zde *plane2* nebo 2).²

Dále je potřebné zadat hodnoty těchto konstant. V *Stromu příkazů* se zadá Preprocessor → Real Constants → Set Values a v dialogu se vyplní uživatelské číslo příslušné sady konstant (zde 1, které bylo zvoleno v předchozím kroku).

V následujícím dialogu se do pole *Height* uvede hodnota tloušťky (zde 0.1).

Pozor: číselné údaje se vždy zadávají s desetinnou tečkou.

Zadání typu a vlastností materiálu

V *Stromu příkazů* se zadá

Preprocessor → Materials → Add a v dialogu se do pole *Identifier* zadá uživatelem definované číslo materiálu (zadejte 1) a do pole *Type* se uvede typ materiálu, pro který jsou konstanty platné (zde *hooke1* nebo 1, jde o lineárně pružný izotropní materiál).

Dále je potřebné zadat hodnoty materiálových parametrů. V *Stromu příkazů* se zadá

Preprocessor → Materials → Set Values a v dialogu se vyplní uživatelské číslo příslušného materiálu (zde 1, které bylo zvoleno v předchozím kroku).

V následujícím dialogu se do pole *ex* uvede hodnota modulu pružnosti (zde 27e9) a do pole *prxy* velikost Poissonova součinitele (zde 0.2).

2.4.4 Tvorba geometrie modelu

Body

Nejprve je potřebné vytvořit body, pomocí kterých budou následně definovány plochy. Ve *Stromu příkazů* se zvolí

²Pro jeden typ konečného prvku je samozřejmě možné nadefinovat více sad vlastností konečných prvků s odlišnými čísly (*Identifier*), což by se využilo například v případě stěny s proměnnou tloušťkou.

Preprocessor → Keypoints → Create/Change a v následném dialogu se vyplní čísla a souřadnice jednotlivých bodů a stisknout *OK*. Příslušné souřadnice jsou uvedeny v tabulce 2.4.4.

Bod	X	Y	Z
1	0	0	0
2	2	0	0
3	4	0	0
4	0	2	0
5	2	2	0
6	4	2	0

Tabulka 2.2: Základní typy souborů používaných programem uFEM

Zadané body je možné vykreslit pomocí nabídky *Plot → Keypoints*.

Plochy

Plochy je možné vytvořit označením bodů myší. Tato funkce se spustí ze *Stromu příkazů* volbou:

Preprocessor → Geometric Entities → Create by mouse... V následujícím dialogu je třeba nastavit typ tvořeného obrazce (*Entity type*) na *rectangle* (obdélník) a hodnoty ostatních parametrů ponechat 1. Jde o typ konečného prvku (*Element Type*), číslo sady konstant konečného prvku (*Real Set*) a číslo materiálu (*Material*) definované uživatelem – tyto hodnoty byly v předchozích krocích nastaveny právě na 1.

Poté je třeba označit myší vždy čtyři vrcholy plochy a to **ve směru proti chodu hodinových ručiček**. První plocha tedy bude mít vrcholy (v uvedeném pořadí): 1, 2, 5, 4 a druhá plocha bude mít vrcholy: 2, 3, 6, 5.

Zadávání se ukončí stiskem tlačítka *Done* v oblasti *Potvrzovacích tlačítek* (vlevo dole v grafickém okně).

Zadané plochy je možné vykreslit pomocí nabídky *Plot → Geometric Entities*.

2.4.5 Parametry sítě konečných prvků

V programu uFEM se hustota a parametry sítě konečných prvků nastavují zadáním počtu dílku dělení na hranách oblastí.

Poznámka: Program umožňuje poze tvorbu pravidelných sítí konečných prvků. Proto je třeba dbát na to, aby vzájemně protilehlé hrany měly vždy nastaven stejný počet dílků.

V zadaném případě mají být všechny hrany rozděleny na 10 dílků. To je výchozí hodnota, kterou proto není třeba měnit.³

³V případě potřeby možné to provést pomocí nabídky ze *Stromu příkazů*: *Geometric Entities → Change Divisions by Mouse*.

2.4.6 Tvorba sítě konečných prvků

Provede se ze *Stromu příkazů* volbou:

Preprocessor → Meshing → Mesh. Uvedená funkce nemá žádné nastavitelné parametry.

Pro vykreslení sítě konečných prvků bude vhodné skrýt geometrický model pomocí položek v nabídce aplikace:

Hide → Geometric Entities

Hide → Keypoints

2.4.7 Zadání podpor

Podpory (a většinu zatížení) je v programu možné zadávat jen do uzlů konečných prvků. Je možné je zadat ze *Stromu příkazů* volbou:

Preprocessor → Displacements → Create by Mouse... V následném dialogu se v položce *Type mod* uvede směr aplikované podpory (*ux* pro podporu proti posunutí ve směru *x*).

Po stisku *OK* je možné myší vybrat příslušné uzly (celé řady uzlů na levém i pravém okraji modelu). Uzly je možné vybírat buď jednotlivě, a nebo pomocí okna – to se aktivuje pohybem myši při stisknutém levém tlačítku.

Celý postup je potřebné opakovat i pro podporu ve směru *y* (*uy*).

2.4.8 Zadání zatížení

Zadanou bodovou sílu je možné zadat ze *Stromu příkazů* volbou:

Preprocessor → Nodal Loads → Create by Mouse... V následném dialogu se v položce *Type* uvede směr zadávané síly (*fx* a v položce *Size* její velikost (zde $-10e3$).

2.4.9 Výpočet

Provedení výpočtu se zahájí ze *Stromu příkazů* volbou:

Solution → Solve current data. Výpočet by měl trvat velmi krátkou dobu a výsledek je oznámen v *Informačním poli*.⁴

2.4.10 Prohlížení výsledků

Funkce pro prohlížení výsledků jsou přístupné ve *Stromu příkazů* v nabídkách:

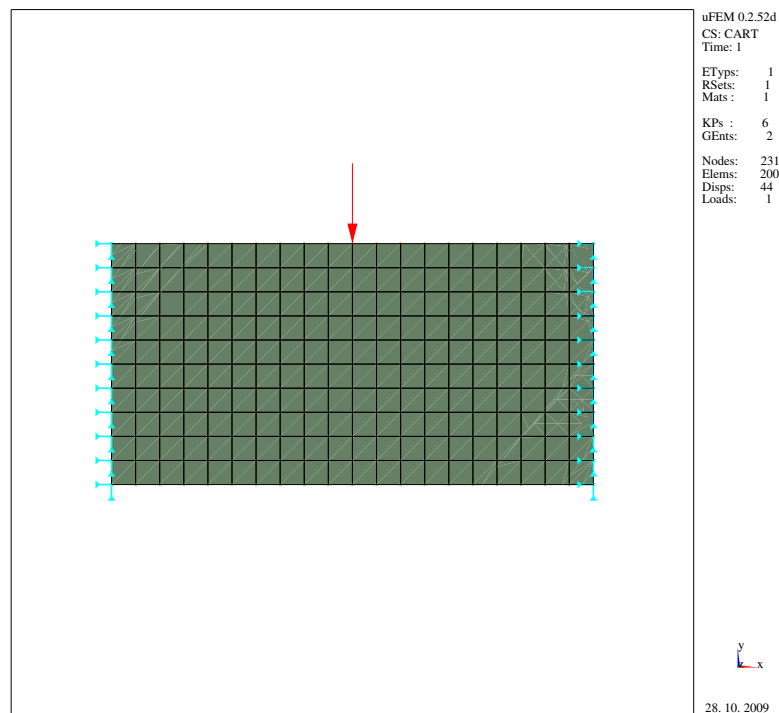
Postprocessor → List Results (textové výpisy)

Postprocessor → Plot Results (grafické výstupy).

Například napětí σ_x je možné vykreslit pomocí:

Postprocessor → Plot Results → Element Solution... a výběrem hodnoty *sx* v položce *Type* následného dialogu.

⁴Pokud se výpočet nezdaří, zkontrolujte si, prosím, nastavení a úplnost instalace svého programu. V této fázi se volá externí řešič, který musí být přítomen a správně nakonfigurován. Návod je uveden v dalších částech této příručky.



Obrázek 2.3: Výpočetní model pro úvodní příklad

2.4.11 Uložení výsledků

Textové výstupy

Textové výstupy (včetně výpisů vybraných výsledků) je možné získat pomocí *Stromu příkazů*: **Postprocessor** → **List Results**.

Tyto výsledky se otevřou v nastaveném programu (textový editor nebo prohlížeč HTML souborů) a je možné je uložit pomocí funkcí tohoto programu.⁵

Grafické výstupy

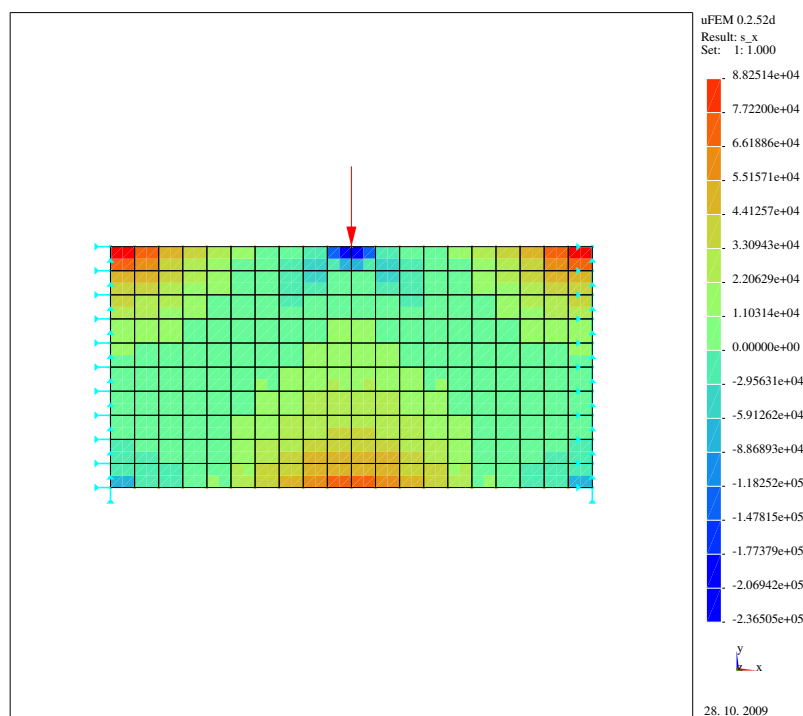
Grafické výstupy je možné uložit pomocí *Stromu příkazů* volbou: **Postprocessor** → **Save Graphics**.

Vždy je k dispozici možnost uložení aktuálního zobrazení v rastrovém formátu PBM [4].⁶

V různých instalacích programu uFEM mohou být k dispozici i další formáty souborů (rastrový formát TIFF nebo vektorový formát Encapsulated Postscript).

⁵uFEM nejprve uloží výstup do souboru v pracovním adresáři, který následně otevře v uvedeném programu. Proto jej ve skutečnosti už není třeba ukládat. Řada uživatelů ovšem asi bude chtít mít soubor uchován pod jiným jménem, než jsou výchozí názvy těchto souborů (obvykle něco jako „femfile-out129.txt“)

⁶Autor uznává, že zvolený formát může na některé uživatele působit poněkud cizokrajně. Nicméně většina serióznějších programů pro práci s obrázky ho dovede bez potíží zpracovat nebo převést na formát jiný, uživateli bližší.

Obrázek 2.4: Příklad výsledků – napětí σ_x

2.5 Ukládání a načítání dat

2.5.1 Uložení dat

Sestavený model je možné kdykoli v průběhu práce uložit. Dialog pro uložení souboru se vyvolá z nabídky aplikace: **File** → **Save to...**

2.5.2 Načtení dat

Data ze souboru je možné načíst pomocí nabídky aplikace: *File* → *Resume from...* Všechna předchozí data se nahradí daty z načítaného souboru.

Pozor: *program při startu nenačítá žádná data. Pro pokračování v práci na nějakých datech je proto vždy nutné je nejprve načíst pomocí „File → Resume from..“*

2.6 Úvodní příklad zapsaný pomocí příkazů

Bez dalšího komentáře je zde seznam příkazů, kterými je možné vytvořit a spočítat výše popsany úvodní příklad. Čtenář jej jistě využije k samostudiu poté, co se později podrobněji seznámí s příkazy programu uFEM.

!* Vlastnosti modelu:

et,1,2

!* typ konečného prvku

rs,1,2

!* typ konstant konečného prvku

2.6. ÚVODNÍ PŘÍKLAD ZAPSANÝ POMOCÍ PŘÍKAZŮ

```
r,height,1,0.1      !* tloustka prvku
mat,1,1             !* typ materialu
mp,ex,1,27e9        !* modul pružnosti
mp,prxy,1,0.2       !* poissonuv soucinitel

!* Geometrie modelu:
k,1, 0,0            !* body 1..6
k,2, 2,0
k,3, 4,0
k,4, 0,2
k,5, 2,2
k,6, 4,2
a,1, 1,2,5,4        !* plocha 1
a,2, 2,3,6,5        !* plocha 2

!* Sit konecných prvků:
mesh               !* sit konecných prvků

!* Podpory:
nsel,s,loc,x,0      !* vyber uzlu pro podpory
nsel,add,loc,x,4
d,all,ux            !* zadani podpor ve smeru x
d,all,uy            !* zadani podpor ve smeru y
nsel,all            !* opetovny vyber vseh uzlu

!* Zatizeni:
nsel,s,loc,x,2
nsel,r,loc,y,2      !* vyber uzlu pro zadani sily
f,all,fy,-10e3      !* zadani sily
nsel,all            !* opetovny vyber vseh uzlu

!* Ulozeni modelu
save               !* ulozi se do souboru "femfile.db"

!* Vypocet a vysledky:
solve              !* provedeni vypoctu
pldef              !* vykresleni deformovaneho tvaru
ples,s_x           !* vykresleni prubehu napeti sx
```


Kapitola 3

Operace v grafickém prostředí

Grafické prostředí programu umožňuje provádět řadu operací s výpočetním modelem pomocí počítačové myši. V dalších odstavcích jsou podrobněji rozebrány jednotlivé možnosti a jejich využití v programu.

Některé operace je možné rychleji nebo pohodlněji provést jiným způsobem, například stiskem některého z tlačítek v panelu *Nastavení zobrazení* (není-li vypnut, je umístěn v grafickém okně zcela vpravo).

3.1 Manipulace s modelem

3.1.1 Posouvání modelu

Provádí se tahem myši při současně stiskutém **levém tlačítku myši**.

3.1.2 Otáčení modelu kolem os x a y

Provádí se tahem myši při současně stiskutém **pravém tlačítku myši**. Otáčení je vztaženo k aktuální poloze os x a y (aktuální orientace systému souřadnic je obvykle zobrazena v pravém dolním rohu grafického okna).

3.1.3 Otáčení modelu kolem osy z

Provádí se **vodorovným** pohybem myši při současně stiskutém **prostředním tlačítku myši**.

3.1.4 Zvětšování a zmenšování modelu

Provádí se **svislým** pohybem myši při současně stiskutém **prostředním tlačítku myši**. Posunem nahoru se zvětšuje, posun dolů se zmenšuje.¹

Alternativně je možné použít kolečko myši (je-li jím vybavena).

¹K dispozici je také výběr zobrazované oblasti pomocí okna. Tato funkce je dostupná jen po zadání příkazu `gbox` a provádí se posunem myši při současně stisknutém jejím levém tlačítku. Po dokončení operace je potřeba stisknout prostřední tlačítko myši nebo *Done* v oblasti *potvrzovacích tlačítek* (v grafickém okně vlevo dole).

3.2 Označování objektů v grafických operacích

Některé příkazy vyžadují použití myši k označování zpracovávaných objektů (obvykle jde o operace mající v názvu *By Mouse*).

V takovém případě platí několik zásad:

- Objekty se označují **levým tlačítkem myši**.
- Označení je možné odvolat **pravým tlačítkem myši** (u některých operací nemusí být možné).
- Je-li potřebné vybrat více objektů současně, pohyb myši při stisknutém jejím levém tlačítku zobrazí okno výběru (funkce je dostupná jen pokud má pro daný objekt smysl).
- Grafickou operaci je možné ukončit stiskem **prostředního tlačítka myši** enbo pomocí *Done* v poli *potvrzovacích tlačítek* (v grafickém okně vlevo dole).
- Dokončení operace je možno zrušit stiskem *Cancel* v oblasti *potvrzovacích tlačítek* (v grafickém okně vlevo dole).

Poznámka: *Během uvedených operací je možné zobrazované objekty posouvat, otáčet a zvětšovat nebo zmenšovat, je třeba však dbát na to, aby při těchto operacích nedošlo k náhodnému výběru některého objektu.*

3.3 Číslování a zobrazování komponent modelu

Typy objektů (konečné prvky, uzly, symboly zatížení, . . .), které mají nebo nemají být zobrazovány je možné nastavit s nabídky aplikace v položkách *Plot* a *Hide*. V těchto položkách je možné zapnout nebo vypnout i číslování uvedených typů objektů. U zatížení a podpory je dále možné volit mezi vypisováním čísla objektu nebo velikosti příslušné veličiny (velikost síly, předepsané popuštění podpory).

Ve výchozím nastavení se zobrazují jen uzly, konečné prvky a podpory a zatížení, nikoli však komponenty geometrického modelu.

3.4 Automatické překreslování modelu

Ve výchozím nastavení není aktivní funkce automatického překreslování modelu, a proto se po řadě operací neprojeví v grafickém zobrazení žádné změny. To je možno změnit v nabídce aplikace: *Plot* → *Automatic Replotting*.

Pokud by automatické překreslování zdržovalo práci (velký model, práce na vzdáleném terminálu), je možné jej opět vypnout v nabídce: *Hide* → *Automatic Replotting*.

Kapitola 4

Geometrický model

4.1 Základní možnosti

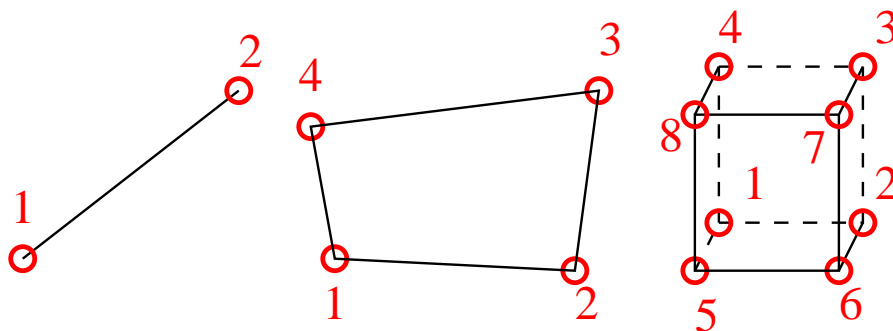
Možnosti tvorby geometrických modelů jsou v programu uFEM relativně omezené. Je možné tvořit modely z úseček (pro řešení rámců apod.), a plošné modely sestavené z čtyřúhelníkových oblastí.¹

V prostoru je možné tvořit oblasti tvaru pravidelných nebo nepravidelných kvádrů, a to i se zakřivenými stěnami (zakřivení může být popsáno kvadratickou funkcí).

Složitější tvary se sestavují pomocí kombinace jednotlivých jednodušších obrazců.

Uvedené objekty je možné přesouvat a kopírovat, v některých případech i otáčet a zrcadlit (jen linie). Při přesunech a kopírování se automaticky využívají již existující *bod*y (nové se tvoří jen tehdy, pokud v požadovaném místě ještě žádný *bod* není.)

V současné době není možné v objektech dodatečně vytvářet otvory nebo je dodatečně dělit na menší části.



Obrázek 4.1: Nejjednodušší typy geometrických objektů

Je možné měnit tvar již existujících objektů, a to pomocí změny polohy *bodů*, které definují jejich vrcholy.

¹Oblasti mohou být i trojúhelníkové, nicméně ty se tvoří degradací čtyřúhelníků a nezaručují příliš kvalitní výsledky. Je proto lepší se jim pokud možno vyhnout.

4.2 Principy zadávání

Jednotlivé liniové, plošné a prostorové objekty se obvykle zadávají pomocí jejich vrcholů. Ty musí být tvořeny již existujícími *body*.²

4.2.1 Body

Body „Keypoints“ je možné zadat pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Keypoints → Create/Change. Existující *body* je možné kopírovat, zrcadlit (bez omezení) nebo mazat v Preprocessor → Keypoints →

4.2.2 Geometrické objekty

Geometrické objekty (úsečky, plochy, objemy) je možné zadat pomocí *Stromu příkazů*: Preprocessor → Geometric Entities → Create By Mouse. V tomto případě se potřebné *body* vyberou pomocí myši.

Pokud je zadávaný objekt pravoúhelníkového tvaru (obdélník, kvádr), je možné jej snáze zadat pomocí dialog přístupného ve *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Geometric Entities → Create By Size. Zde je třeba zadat souřadnice počátečního bodu (vrchol 1 na obrázku 4.1) a pomocí jeho rozměrů ve směrech x , y a z (z je nutné jen pro kvádr).

Takto vytvořené geometrické objekty je možné libovolně kopírovat. Zrcadlení objektů se důrazně nedoporučuje kvůli riziku pozdějšího vytvoření nesprávně orientovaných konečných prvků (s výjimkou úseček, kde uvedený problém nevzniká).

4.3 Parametry sítě konečných prvků

Hlavním účelem geometrických objektů je sloužit jako podklad k vytváření sítě konečných prvků. Proto je potřebné objektům správně nastavit jednotlivé vlastnosti konečných prvků (číslo typu prvku, číslo sady konstant, číslo materiálu a počty dílků na hranách objektů).³

4.3.1 Výchozí vlastnosti

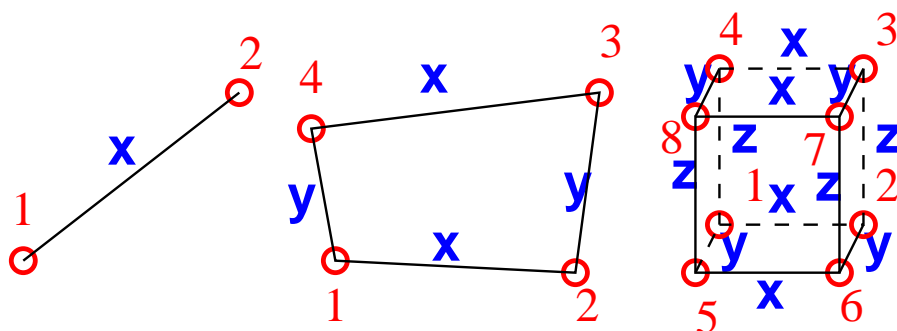
Příslušné parametry konečných prvků je možné nastavit před zadáváním jednotlivých *geometrických objektů* pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Geometric Entities → Set Default Properties. (číslo typu konečného prvku, číslo sady konstant, číslo materiálu)

a Preprocessor → Geometric Entities → Set Default Division (výchozí dělení hrano objektů na dílky). Význam parametrů (tedy polohy příslušných hran) v dialogu Set Default Division je uveden na obrázku 4.3.1.

²Vybrané typické objekty je možné zadat „rovnou“ a uzly jim vytvoří program automaticky

³Ve skutečnosti program zabrání vytvoření *geometrického objektu* určitého typu, pokud nenalezne již nastavený kompatibilní typ konečného prvku.



Obrázek 4.2: Značení hran objektů pro *Division*

4.3.2 Oprava vlastností

Zadané vlastnosti *geometrických objektů* je možné měnit i po jejich vytvoření. V tomto případě není k dispozici dialog, ale po výběru objektu myší je potřebné editovat příkaz v příkazovém řádku.

Kapitola 5

Konečněprvkový model

5.1 Základní možnosti

Konečné prvky a jejich uzly je možno zadávat buď na základě geometrického modelu (pomocí funkce automatické tvorby pravidelné sítě) nebo importem z externích souborů¹, případně přímým („ručním“) zadáním souřadnic uzlů a specifikací parametrů jednotlivých konečných prvků, tedy příslušnosti uzlů ke konečným prvkům.

5.2 Automatická tvorba sítě konečných prvků

V případě, že je korektně sestaven geometrický model (všechny *geometrické objekty*) mají přiřazena uživatelská čísla existujících typů materiálů, sad konstant konečných prvků a typů konečných prvků a nastavené dělení společných hran sousedících *geometrických objektů* si odpovídá, je možné vytvořit síť konečných prvků pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Meshing → Mesh.²

Pozor: Automatická tvorba není možná u prvků tvaru trojúhelníka (např. PLANE11) ani čtyřstěnu (například SOLID4).

5.3 Postupy zadávání uzlů a konečných prvků

Jednotlivé *konečné prvky* se zadávají specifikací jejich vlastností (tedy příslušného uživatelského čísla typu konečného prvku, sady konstant a materiálu) a seznamu příslušných *uzlů* (v pořadí odpovídajícím předepsanému pořadí uzlů na příslušném typu prvku).

5.3.1 Uzly

Uzly „Nodes“ je možné zadat pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Nodes → Create/Change. Existující *uzly* je možné kopírovat, zrcadlit (bez omezení) nebo mazat v Preprocessor → Nodes →

¹Import z externích aplikací patří k pokročilejším tématům, a proto není v tomto textu popisován.

²U větších modelů s mnoha *geometrickými objekty* může operace trvat delší dobu.

5.3.2 Konečné prvky

Před zadáváním konečných prvků je potřebné specifikovat jejich typ a vlastnosti pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Elements → Set default properties.

Konečné prvky je pak možné zadat pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Elements → Create By Mouse. V tomto případě se potřebné *uzly* vyberou pomocí myši. Je však nutné zadávat uzly v pořadí, které odpovídá číslování uzlů v dokumentaci pro jednotlivé typy konečných prvků.³

Takto vytvořené konečné prvky je možné libovolně kopírovat.

5.4 Vztah geometrických objektů a konečných prvků

Na rozdíl od jiných podobných programů slouží *geometrický model* jen k vytvoření sítě konečných prvků. Vytvořené konečné prvky nejsou s *geometrickým modelem* dále nijak svázány a další změny geometrického modelu existující konečné prvky nejak neovlivní (a změny na konečných prvcích se nijak neprojeví na *geometrickém modelu*).

5.5 Podpory v uzlech

Podpory (vazby) je v programu uFEM možné zadávat pouze do uzlů konečných prvků. Podporu je možné definovat jen pro takové typy posunutí nebo pootočení, které odpovídají použitému typu konečného prvku

Je možné použít tyto typy podpor:

- pevná podpora proti posunutí nebo pootočení,
- předepsané posunutí nebo pootočení,
- pružné podddajná podpora proti posunutí nebo pootočení.

Uvedené typy podpor je možné definovat jako jednostranné.⁴

Zadání podpor je možné provést pomocí *Stromu příkazů*:

Preprocessor → Displacements → Create By Mouse..

5.6 Zatížení v uzlech

V uzlech je možné zadávat bodové síly, případně momenty (ty jen u konečných prvků, které mají v uzlech definovány rotace).⁵

Zadání podpor je možné provést pomocí *Stromu příkazů*: Preprocessor → Node Loads → Create By Mouse..

³Pořadí uzlů je pro příslušné tvary konečných prvků shodné s pořadím *bodů* na odpovídajících geometrických objektech – viz obrázek 4.1.

⁴Jejich praktické použití je ovšem možné jen v nelineárních výpočtech, které v tomto textu nejsou podrobněji rozebírány.

⁵Program pochopitelně nebude klást odpor zadávání čehokoli kdekoli, ale fyzikálně nepřipustné typy zatížení (tedy například momenty v uzlech stěnových nebo prostorových prvků) budou ve výpočtu samozřejmě ignorovány.

5.7 Zatížení vlastní tíhou konstrukce

Zatížení tíhou konstrukce je možné zadat pomocí *Stromu příkazů*: **Preprocessor** → **Acceleration** → **Create/Change**.

V následném dialogu se zadává směr a velikost příslušného gravitačního zrychlení (směr zrychlení je vždy opačný než je žádaný směr tíhové síly). Pro správnou funkci je při zadávání vlastností materiálu potřebné definovat velikost hustoty (*Density*).

Kapitola 6

Spuštění výpočtu

6.1 Lineární výpočet

V nejjednodušším případě, kdy je potřebné provést jen lineární výpočet s právě načteným modelem stačí spustit ve *Stromu příkazů*:

`Solver → Solve Current Data .`

Spustí se řešič (běžící v *okně výpisů*) a po dobu výpočtu není možné z programem nijak pracovat.¹ Po ukončení řešení (úspěšném nebo neúspěšném) dojde k překreslení grafického okna a v *informační poli* okna se objeví zpráva o úspěšnosti výpočtu (tedy *Done* nebo *Failed*).

Při řešení se obvykle vytvoří tyto soubory:

- popis úlohy pro řešič (koncovka `.fem`)
- výsledky řešení (koncovka `.res`)

6.2 Nelineární výpočet

V případě potřeby nelineárního řešení je možné spustit výpočet pomocí

Stromu příkazů:

`Solver → Non-Linear Solution...`

V tomto případě je potřebné v následním dialogu nastavit parametry řešení. V poli *Non-linear solver type* se volí typ metody řešení nelineárních úloh:

- *NRM* ... Newtonova-Raphsonova metoda, používá se pro většinu úloh, neumožňuje však vyšetřovat chování konstrukce po dosažení maximální únosnosti.
- *ALM* ... Metoda délky oblouku, která může vyžadovat podstatně delší dobu výpočtu, ale umožní vyšetřit i chování modelu po překročení maximální únosnosti, případně řešit některé úlohy, ve kterých řešení *NRM* selhává.
- *Linear* ... klasické lineární řešení (je zde k dispozici pro kontrolní a pomocné výpočty).

¹Doba výpočtu je závislá na rozsahu řešené úlohy a pro velmi rozsáhlé úlohy může být i velmi dlouhá.

Dále je možné v poli *Number of substeps* nastavit počet výpočtových kroků. Doporučuje se používat sudé číslo, zpravidla v rozmezí 10–100. Hodnota *Number of iterations* určuje maximální možný počet iterací v každém podkroku řešení. Výchozí nastavená hodnota je zpravidla více než dostatečná.

Pole *Node to track* slouží k uložení kontrolních výsledků z vybraného uzlu. V souboru z koncovkou *.ntrack* je potom po výpočtu možné najít data o posunech tohoto uzlu na konci jednotlivých výpočtových kroků.

Pokud byly zadány jednostranné vazby, je jejich použití třeba aktivovat v poli *Iterative supports*.

Kapitola 7

Práce s výsledky

Program umožňuje vybrané výsledky vypsat v číselné podobě, zobrazit graficky, případně uložit v podobě grafických souborů.¹

7.1 Textové výpisy

V textové podobě je možné získat výpis posunutí (případně pootočení) uzlů konečných prvků, uzlové reakce a jejich výslednice a výsledky silových veličin² v integračních bodech konečných prvků.³

Výpisy výsledků jsou dostupné pomocí *Stromu příkazů*:

Postprocessor → List Results → DOF Solution (posunutí uzlů) nebo Postprocessor → List Results → Reactions (uzlové reakce), případně Postprocessor → List Results → Element Solution.. (výsledky na konečných prvcích). U výsledků na konečných prvcích je třeba ještě v následném dialogu specifikovat typy vypisovaných výsledků (až 6).

Názvy typů výsledků jsou uváděny ve formě zkratk, jejichž význam nemusí být uživateli hned zřejmý. V tabulce 7.1 jsou proto uvedeny zkratky pro nejtýpější veličiny.

7.2 Grafické výstupy

Grafické zobrazení výsledků poskytuje možnost vykreslení konstrukce v deformovaném tvaru pomocí *Stromu příkazů*:

Postprocessor → Plot Results → Deformed Shape. V tomto případě se aktuální zobrazení upraví do deformovaného tvaru, nedojde však k žádným dalším změnám (program neumožňuje barevné zobrazení deformací.)

¹Možnosti ukládání grafických souborů závisí na konkrétní verzi a sestavení programu. Vždy je k dispozici rastrový formát Portable Bitmap (PBM) [4], k dispozici může být i možnost uložení do vektorového formátu Encapsulated PostScript EPS, případně do rastrového formátu TIFF.

²Typicky jde o napětí, u desek je možné získat měrné vnitřní síly (momenty, posouvající síly), u prutových prvků pak vnitřní síly (normálová síla, posouvající síly, ohybové momenty, krouticí moment) v závislosti na typu problému.

³U prutových prvků je možné získat výsledky i z jiných bodů, například z konců prutů, více informací je uvedeno v dokumentaci jednotlivých typů konečných prvků.

Zkratka	Veličina	Jednotka ⁴
s_x	normálové napětí ve směru osy x	Pa
s_y	normálové napětí ve směru osy y	Pa
s_xz	smykové napětí ve rovině xy	Pa
e_x	poměrná deformace ve směru osy x	—
e_y	poměrná deformace ve směru osy y	—
e_xy	zkosení v rovině xy	rad
f_x	síla ve směru osy x	N
f_y	síla ve směru osy y	N
m_z	moment kolem osy z ⁵	Nm
s_mx	měrný ohybový moment otáčející kolem osy y	N
s_my	měrný ohybový moment otáčející kolem osy x	N
s_mxy	měrný krouticí moment (deskový moment)	N

Tabulka 7.1: Příklady typů výsledků v programu uFEM

Podobně je možné vykreslit reakce pomocí *Stromu příkazů*:

Postprocessor → **Plot Results** → **Reactions**. Reakce jsou zobrazovány v podobě různě velikých šipek.

Výsledky je možné graficky zobrazit barevným odlišením i integračních bodech a to pomocí *Stromu příkazů*:

Postprocessor → **Plot Results** → **Element Solution...** V následném dialogu je třeba vybrat typ zobrazovaných dat.

Zkratky typů výsledků jsou uvedeny v tabulce 7.1.

7.3 Další typy výsledků

V některých případech je vhodné mít k dispozici i některé další výsledky, například hlavní napětí nebo takzvané von Misesovo napětí. Ty nejsou v příslušných dialogích pro výpis nebo vykreslení výsledků nabízeny, nicméně program je zpracovat dovede. Je však třeba je do vstupního okna přímo napsat. Zkratky pro uvedené typy výsledků jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Zkratka	Veličina	Jednotka ⁶
s_1	hlavní tahové napětí	Pa
s_2	hlavní tlakové napětí (pro 2D problémy)	Pa
s_3	hlavní tlakové napětí (pro 3D problémy)	Pa
s_vmis	von Misesovo napětí	Pa

Tabulka 7.2: Další typy výsledků v programu uFEM

7.4 Ukládání obrázků

Aktuální grafické zobrazení je možné uložit do souboru pomocí *Stromu příkazů*:

Postprocessor → Save Graphics → To PPM...

Tatáž funkce je kdykoli během chodu programu (tedy ne jen v postprocesoru) dostupná z *Nabídky aplikace*:

Plot → Save as PPM...

Jsou-li k dispozici i další grafické formáty, je možné je najít na tomtéž místě ve *Stromu příkazů*.

Příklady grafických výstupů programu byly uvedeny například na obrázku 2.4.8 nebo na obrázku 2.4.10.

Kapitola 8

Instalace programu

8.1 Instalace binární verze

8.1.1 Úvod

Binární (sestavenou) verzi použijí všichni uživatelé, kteří se chtějí program jen nainstalovat.

Uživatelé, kteří potřebují program modifikovat nebo jej chtějí používat na nepodporovaném operačním systému, si musí stáhnout zdrojové kódy programu a provést překlad programu do binární verze samostatně.

8.1.2 Unixové operační systémy

Prerekvizity

V operačních systémech unixového typu je třeba mít nainstalovanou podporu OpenGL a knihovnu *gtkglext* (zpravidla jde o balíček *gtkglext* nebo *glext*, který by měl být k dispozici v nabídce správce programů příslušného¹ operačního systému).

Spustitelné soubory

Dodaný soubor s binárními soubory je potřebné dekomprimovat² a binární soubory *gfem* a *fem* umístit do některého adresáře, ve kterém operační systém hledá spustitelné programy³

Dokumentace

Soubory s koncovkou *.1* je potřeba umístit do adresáře s manuálovými stránkami⁴ Soubory s doplňkovou dokumentací (přípona *.pdf*) je možné umístit dle potřeby.

¹Zpravidla jde o programy jako *Synaptic* nebo *Aptitude*

²Příkazem `tar xzvf soubor.tgz`

³Obvykle `/usr/bin` nebo `/usr/local/bin`.

⁴Nejčastěji `/usr/share/man/man1` nebo `/usr/man/man1`.

Nastavení

Pro správnou funkci programu je potřebné do domácího adresáře každého uživatele umístit soubor *tgfemrc* a přejmenovat jej na *.tgfemrc* (s tečkou na začátku). V tomto souboru je také potřebné nastavit správnou cestu k řešiči (programu *fem*). Jde o řádek začínající slovem *setsolver*.⁵

Soubor *tgfemrc* je možné mít umístěn i jinde než v domácím adresáři uživatele, potom je však potřebné definovat proměnnou prostředí **FEM_SETUP_FILE** která bude obsahovat úplnou cestu k uvedenému souboru (na jeho jméně potom nezáleží). Soubor v domácím adresáři uživatele má však vždy přednost (pokud existuje).

Spouštění

Provádí se příkazem **gfem** z terminálového emulátoru neno jiného spouštěcího prostředí.

8.1.3 Operační systémy typu Windows

Prerekvizity

Podporovány jsou varianty XP a Vista. U starších (ani novějších) není funkčnost známa, není však vyloučena.⁶ V každém případě musí být k dispozici podpora OpenGL, což je však u výše uvedených *à priori* zaručeno.

Instalace

Instalační program stačí spustit a ponechat všechny volby na výchozích nastaveních. Pokud změníte místo instalace programu, je nezbytné provést nastavení popsané v dalším odstavci.

Nastavení

Pro správnou funkci programu je potřebné mít v pozici **C:/Program Files/uFEM/tgfemrc** konfigurační soubor pojmenovaný *tgfemrc*. Pokud byla při instalaci ponechána výchozí nastavení, není třeba s tím nějak manipulovat.

Poznámka: *Běžným uživatelům se důrazně doporučuje ponechat při instalaci výchozí nastavení.*

Pokud je však soubor *fem.exe* umístěn mimo adresář **C:/Program Files/uFEM**, je nezbytné v souboru *tgfemrc* potřebné nastavit správnou cestu k řešiči *fem.exe*. Jde o řádek začínající slovem *setsolver*.⁷

Současně je nutné definovat proměnnou prostředí **FEM_SETUP_FILE** která bude obsahovat úplnou cestu k uvedenému konfiguračnímu souboru *tgfemrc*.

⁵Pokud byl tento soubor umístěn do adresáře */usr/local/bin*, pak správná podoba uvedeného řádku bude **setsolver,/usr/local/bin/fem**

⁶Ovšem fungování na verzích 95, 95 a ME ní technicky možné.

⁷Pokud byl tento soubor umístěn do adresáře *D:/uFEM*, pak správná podoba uvedeného řádku bude **setsolver,D:/uFEM/fem.exe**

8.1.4 Mac OS X

Prerekvizity a instalace

Instalace a používání se neliší od operačních systémů unixového typu. Jen je nutné mít nainstalovaný a před spuštěním programu *uFEM* již běžící subsystém *X11* (je dodáván na instalačních médiích Mac OS X). Verze Mac OS nižší než 10.3 nejsou podporovány a program běží jen na počítačích s procesory PowerPC (případně na systémech s jejich emulací).

8.2 Instalace programu ze zdrojových kódů

Tato forma instalace je doporučena jen zkušeným uživatelům a programátorům. Potřebné informace najdou v souboru `INSTALL` v balíku se zdrojovými kódy.

Literatura

- [1] ANSYS Inc.: <http://www.ansys.com>
- [2] GMSH mesh generator: <http://www.geuz.org/gmsh>
- [3] NetGen mesh generator: <http://www.hpfem.jku.at/netgen>
- [4] Netpbm library and graphics formats: <http://netpbm.sourceforge.net>
- [5] <http://www.fast.vsb.cz/brozovsky/ufem.html>