

Teplotní pole v programu ANSYS

Předmluva

Tato příručka je chápána jako úvod do řešení teplotních polí v programu ANSYS. Předpokladem pro její využití jsou již základní znalosti programu – orientace v *Menu* programu, tvorba modelu a sítě konečných prvků, tvorba funkcí a postprocessor.

Náplní příručky je teoretický úvod do teplotních polí, potřebné materiálové vlastnosti, soubor a popis nejčastějších elementů a také aplikace zatížení (*Loads*). Součástí je i ukázkový příklad.

Nejsou zde řešeny složité teplotní analýzy ke kterým se řadí pohyb tepelné hmoty či změny skupenství látek.

OBSAH

1 Úvod	3
1.1 Rovnice teplotních polí.....	4
1.2 Materiálové vlastnosti.....	5
1.3 Elementy	6
1.4 Definování zátěže	10
1.5 Typy analýz	12
1.5.1 Statická analýza	12
1.5.2 Transientní analýza.....	13
1.6 Postprocessor	14
2 Příklad.....	15

1 Úvod

Teplotní pole je prostor kde v každém jeho místě a čase můžeme určit termodynamickou teplotu. Pomocí programu ANSYS lze v teplotním poli analyzovat:

- rozložení teplot v objektech a prostoru,
- teplotní gradienty,
- velikost a směr teplotních toků,
- tepelné ztráty, výkony vyzařované a pohlcované objekty.

Při řešení problému můžeme analyzovat v teplotním poli

- ustálený stav (*Steady-State Analysis*) kde je teplotní pole časově neměnné nebo
- přechodový děj (*Transient Analysis*) kde se teplotní pole mění v čase.

Řešené úlohy mohou být také:

- lineární (*Linear Solution*) – jejichž počáteční a okrajové podmínky jsou nezávislé na teplotě
- nelineární (*Nonlinear Solution*) – které obsahují teplotně závislé vstupní veličiny (např. materiálové konstanty, koeficient přestupu tepla, teplotně závislé zdroje tepla atd.), radiační prvky (pro řešení radiace z objektů) a nebo se jedná o sdruženou úlohu (prvky s více stupni volnosti)

Jako každá jiná analýza v programu ANSYS má několik základních částí:

- **Tvorba modelu** – definování elementů a materiálů, kreslení geometrie modelu případně import geometrie ze souboru, vytvoření sítě konečných prvků
- **Aplikace zatížení a vlastní řešení** – definování počátečních a okrajových podmínek, aplikace zatížení, které působí na model, výběr a nastavení typu analýzy, spuštění výpočtu
- **Vyhodnocení výsledků** – grafická zobrazení geometrického rozložení požadovaných hodnot, grafy vzájemných závislostí veličin a jejich časové průběhy, výpočty dalších fyzikálních veličin ze získaných výsledků

1.1 Rovnice teplotních polí

Vodivostní teplotní rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho \cdot c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

kde K je tepelná vodivost [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], T teplota [K], ρ hustota [kgm^{-3}], c měrná tepelná kapacita [$\text{Wskg}^{-1}\text{K}^{-1}$], v je rychlost pohybujícího se média [ms^{-1}] a q označuje objemový zdroj tepla [Wm^{-3}].

Koeficienty ρ a c jsou v rovnici důležité jen pokud uvažujeme v analýze s transportem hmoty. Pokud ne, můžeme výraz na pravé straně vypustit. Pro zjednodušení dostaneme rovnici:

$$[K] \cdot \{T\} = \{Q\} \quad (2)$$

kde $[K]$ je vodivostní matice, $\{T\}$ teplota ($=f(x,y,z,t)$) a $\{Q\}$ je vektor teplotních toků.

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Koeficienty K_{xx} , K_{yy} a K_{zz} určují vodivost ve směru jednotlivých materiálů. U izotropního materiálu platí $K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}$.

Rovnice (2) je pro řešení lineárních ustálených stavů. Pro řešení nelineárních a transienčních úloh musíme použít rovnice (4), (5) nebo (6).

$$[K(T)] \cdot \{T\} = \{Q(T)\} \quad \text{- nelineární ustálený stav} \quad (4)$$

$$[K] \cdot \{T\} = \{Q(t)\} \quad \text{- lineární přechodový děj} \quad (5)$$

$$[K(T)] \cdot \{T\} = \{Q(t,T)\} \quad \text{- nelineární přechodový děj} \quad (6)$$

Rovnice pro radiaci:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_i} - F_{ij} \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \right) \cdot \frac{1}{S_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \cdot \sigma \cdot T_i^4 \quad (7)$$

kde N je počet zářících ploch, S její plocha [m^2], T teplota [K], ε emisivita, Q_{ij} je výkon vycházející z plochy. F_{ij} je tzv. tvarový faktor. Tvarový faktor je koeficient vzájemné viditelnosti ploch a určuje poměr dopadající energie na plochu j a vyzářené energie plochou i . F_{ij} má hodnoty v intervalu $\langle 0;1 \rangle$. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Kronecker delta: $\delta_{ij} = 1$ když $i = j$

$\delta_{ij} = 0$ když $i \neq j$

Pro případ dvou ploch, které jsou přímo proti sobě, nebo plochy, která vyzářuje energii do nekonečného okolí platí: $\delta_{ij} = 0$, $F_{ij} = 1$.

1.2 Materiálové vlastnosti

Přehled všech možných materiálových vlastností, které je možné přidělit elementům pro teplotní pole je v tabulce 1.

Tab. 1 Seznam materiálových vlastností

Název (anglicky)	Název (česky)	Označení	Jednotka
Thermal Conductivity	Tepelná vodivost	K	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Density	Hustota	DNES	kg m^{-3}
Specific Heat	Měrná tepelná kapacita	C	$\text{W s kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Film Coefficient	Koeficient přestupu tepla	HF	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Emissivity	Emisivita	EMIS	-
Enthalpy	Entalpie	ENTH *	W s m^{-3}
Heat Generation Rate	Tepelný výkon	QRATE **	W

* - entalpie je zde počítána vztahem:

$$ENTH = \int \rho \cdot c \cdot dT \quad (8)$$

Je tedy možné místo entalpie zadat hodnoty hustoty a měrné tepelné kapacity. Pro řešení fázových změn v látce je nutné zadat entalpii jako funkci teploty.

** - pouze pro element MASS71

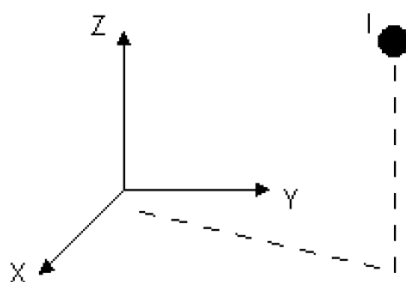
1.3 Elementy

Elementy použitelné pro výpočet teplotních analýz mají jako základní stupeň volnosti (DOF) teplotu (TEMP). Ty, které mají jediný stupeň volnosti TEMP jsou použitelné pouze pro teplotní analýzy. Prvky s více stupni volnosti se používají pro sdružené úlohy nebo mají jiné specifické užití. Dále jsou stručně popsány některé vybrané elementy.

MASS71

DOF – TEMP; Počet uzlů - 1

- bodový teplotní prvek
- vhodný pro modelování objemů u nichž nezáleží na tvaru
- např. pro teplotně závislé zdroje tepla

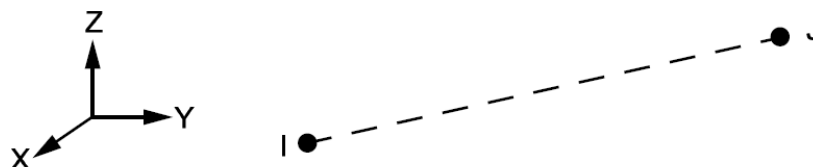


Obr. 1 Element MASS71

LINK31, LINK32, LINK34

DOF – TEMP; Počet uzlů - 2

- prutové prvky používané pro šíření tepla radiací (LINK31), kondukcí (LINK32) a konvekcí (LINK34) mezi dvěma body I a J

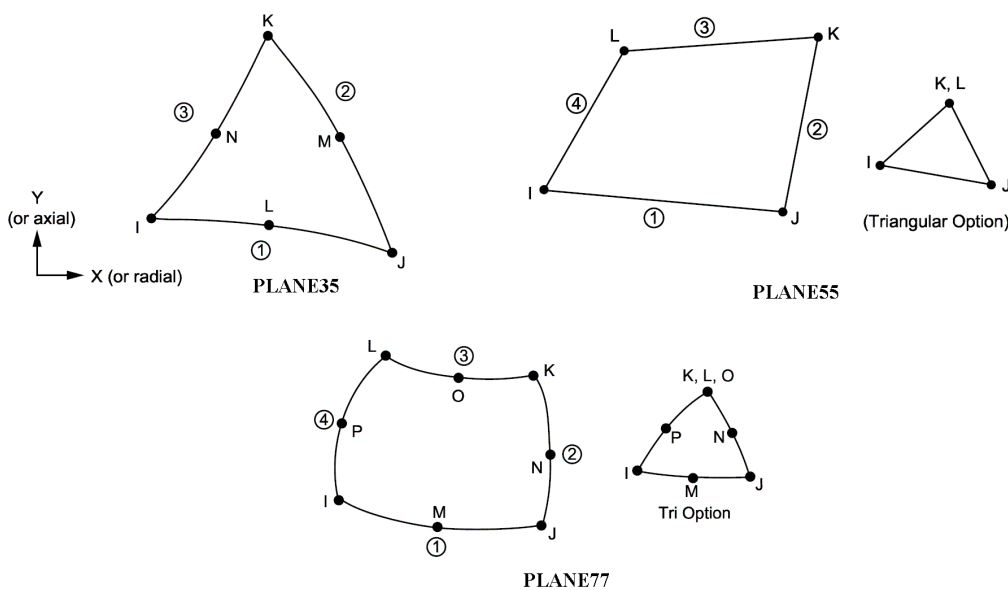


Obr. 2 Elementy LINK31 a LINK34

PLANE35, PLANE55, PLANE77

DOF – TEMP; Počet uzlů – 6/4/8

- rovinné prvky pro 2D modely
- volba vhodného prvku zde závisí na geometrii modelu, případných symetriích a požadavcích na přesnost výsledků (čím více uzlů, tím více hodnot zjišťované veličiny v rámci jednoho prvku a s tím také odpovídající časová náročnost výpočtu)
- PLANE55 je možné použít pro úlohy s transportem hmoty

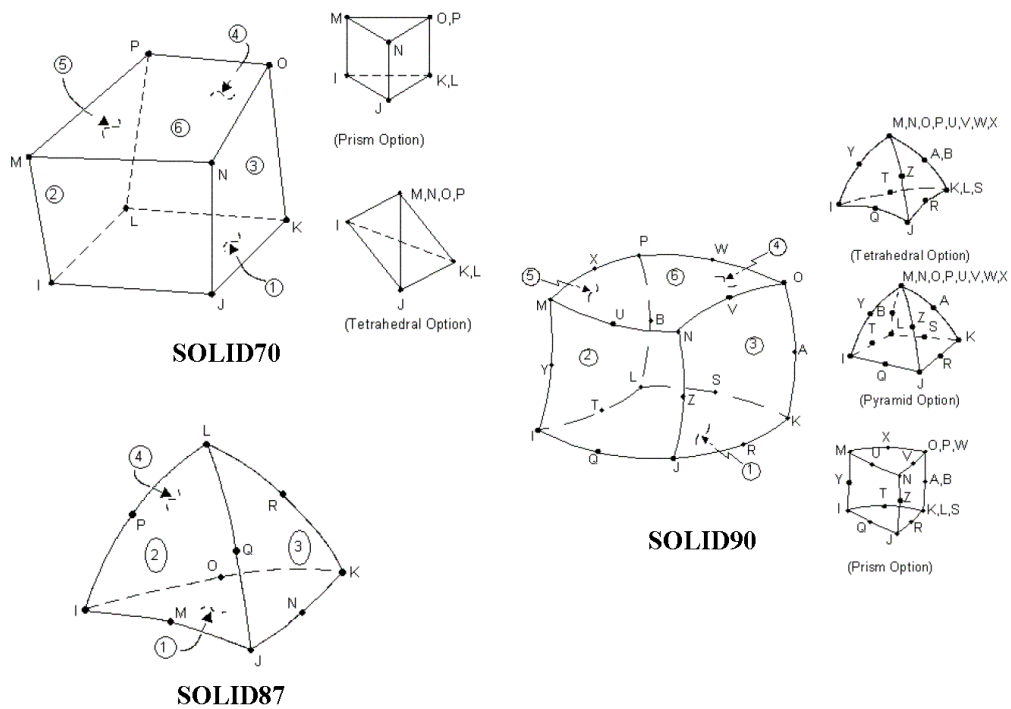


Obr. 3 Rovinné elementy

SOLID70, SOLID87, SOLID90

DOF – TEMP; Počet uzlů – 8/10/20

- prostorové prvky pro 3D modely
- stejně jako u rovinných prvků i zde je výběr do jisté míry daný požadavky na přesnost výpočtu a geometrii tělesa
- SOLID70 je možné použít pro úlohy s transportem hmoty

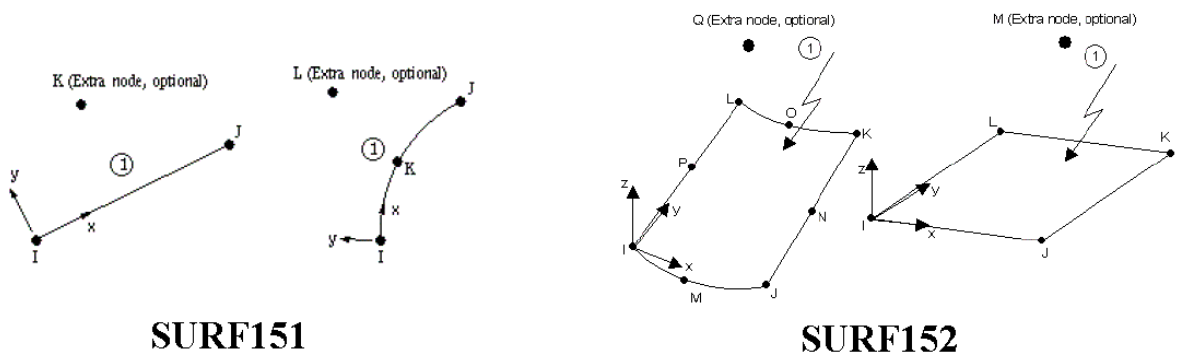


Obr. 4 Prostorové elementy

SURF151, SURF152

DOF – TEMP

- 2D a 3D pomocné povrchové elementy
- používají se k zadávání a vícenásobných okrajových podmínek (konvekce, hustota tepelného toku, radiace atd.) na povrchy (čáry ve 2D a plochy ve 3D modelech)
- SURF prvky překryjí povrch již vytvořené sítě konečných prvků z ostatních elementů
- extra uzel se používá pro zadání teploty okolí povrchů

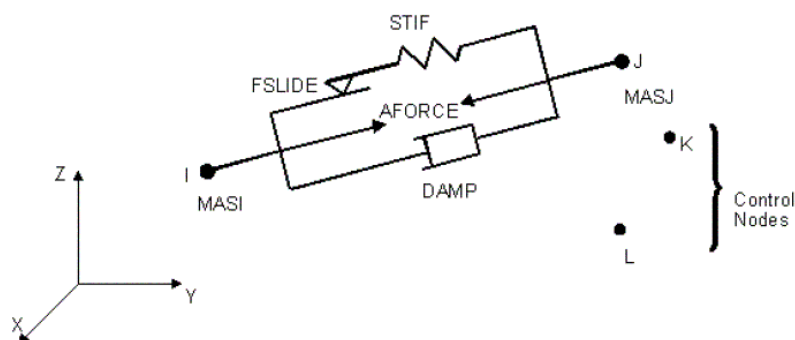


Obr. 5 Pomocné SURF elementy

COMBIN37

DOF - UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ, PRESS, nebo TEMP; Počet uzlů - 4

- kontrolní teplotní prvek se schopností se vypínat a zapínat v průběhu analýzy
- v teplotních analýzách se používá např. pro vypínání a zapínání tepelného zdroje (termostat)

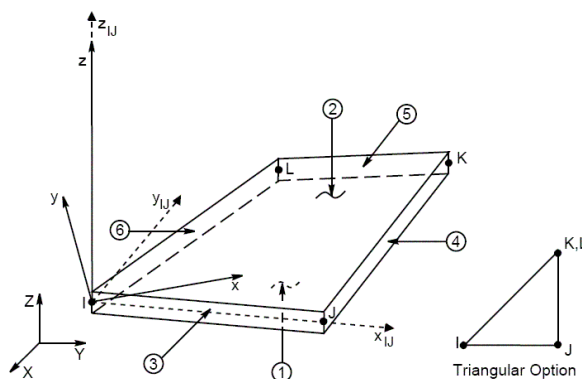


Obr. 6 Kontrolní prvek COMBIN37

SHELL157

DOF – TEMP, VOLT; Počet uzlů – 4

- skořepinový prvek pro 3D modely
- má dva stupně volnosti – teplotu a elektrické napětí
- používá se pro vyšetřování termo-elektrických analýz
- konkrétní aplikací může být modelování tlustých či tenkých vrstev případně plošných spojů – tedy technologií, kde je aktivní vrstva tenčí o několik řádů než podložka (keramika, deska plošných spojů)



Obr. 7 Element SHELL157

Jednotlivé prvky se dají různě nastavit a blíže specifikovat jejich chování pomocí hodnot *KEYOPT*. Seznam všech *KEYOPT* je u každého elementu. Jejich nastavením lze chování prvků přiblížit našemu konkrétnímu řešení. Detailní informace o každém elementu jsou v manuálu programu ANSYS.

1.4 Definování zátěže

Při řešení každého problému aplikujeme na vytvořený model zatížení (*Loads*), které chceme simulovat. Zatížení můžeme aplikovat na vytvořený model – body (*Keypoints*), čáry (*Lines*), plochy (*Areas*) a objemy (*Volumes*) nebo přímo na vytvořenou síť konečných prvků (*Elements, Nodes*). Při spuštění analýzy (příkaz *Solve*) se zatížení automaticky přesunou z modelu na síť. Jde to i manuálně příkazy *SBCTRAN* a *SFTRAN*. Aplikace na model má však několik výhod:

- zátěž je nezávislá na síti konečných prvků – tzn. při tvorbě nové sítě nebo její změně není nutné znovu zadávat zatížení
- je jednodušší zadávat zatížení na model než na jednotlivé uzly sítě, zvláště pak při grafickém výběru objektů

Pokud není na objektech (*Lines* a *Areas*) žádné zatížení definováno, považují se za dokonalý tepelný izolant, případně jako osa případně rovina souměrnosti geometrie modelu.

Teplotní pole zná tyto druhy zatížení:

- *Temperature*
- *Heat Flow Rates*
- *Convections*
- *Heat Fluxes*
- *Heat Generation Rates*
- *Radiation*

Temperature (TEMP)

- i když je teplota stupněm volnosti v teplotních analýzách jde ji zadat na požadované objekty i jako fixní hodnotu
- hodnota *Uniform Temperature* je hodnota výchozí teploty pro všechny uzly sítě; používá se zpravidla jako počáteční teplota modelu při transientních analýzách

Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature

Heat Flow Rates (HEAT)

- neboli bodové zatížení tepelným tokem
- jedná se o obdobu síly (F [N]) pro tepelné pole
- používá se hlavně pro zatížení na prutové prvky, kde není možné použít k aplikaci zátěže konvekci nebo hustotu tepelného toku

Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Heat Flow

Convections (CONV)

- konvekce je povrchové zatížení okrajových ploch
- složí ke zjišťování tepla unikajícího (přicházejícího) ochlazováním (ohříváním) vlivem okolí
- k aplikaci konvekce je potřeba zadat koeficient přestupu tepla (*Film Coefficient*) a teplotu okolí povrchu (*Bulk Temperature*)

Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Convection

Heat Fluxes (HEAT)

- hustota tepelného toku je také povrchové zatížení
- aplikuje se v případě, že tuto hodnotu známe - víme, kolik tepla projde plochou [Wm^{-2}]
- pokud se aplikuje na jednu plochu zatížení konvekcí (CONV) a zároveň hustota tepelného toku (HEAT) tak se pro analýzu bere v úvahu pouze zatížení, které bylo aplikováno jako poslední

Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Heat Flux

Heat Generation Rates (HGEN)

- HGEN je objemová zátěž a reprezentuje výkon generovaný v objektu
- výkon na jednotku objemu [Wm^{-3}]
- uplatní se např. při analýzách elektrických součástí a jejich tepelného ovlivňování okolí

Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Heat Generat

Radiation

- tedy řešení problému vyzařování elektromagnetických vln z objektů

Metod pro řešení radiačních problémů je několik:

- *Surface Effect Elements* – využívá SURF prvky a řeší záření mezi povrchem a bodem, nebo mezi povrchem a nekonečným okolím; neuvažuje se vzájemná viditelnost
- *Radiation Link Element* – řeší záření mezi dvěma body
- *Radiation Matrix* – se používá pro řešení problémů, kde se vzájemně ozařují dvě nebo i více ploch i když neznáme tvarový faktor; velmi složitá metoda, která ale nepodporuje teplotní závislost emisivity
- *Radiosity Solver Method* – jednoduchá často používaná metoda pro vzájemné ozařování dvou ploch; podporuje teplotně závislou emisivitu ploch

1.5 Typy analýz

1.5.1 Statická analýza

Podle rozdělení v kapitole 1. se jedná o řešení ustáleného stavu systému – *Steady-state analysis*. Tedy tepelný tok, teplota ani aplikované zatížení systému není závislé na čase. Výsledkem řešení je konečný rovnovážný stav systému a není možné zjistit průběh dějů, které k němu vedly. Podle prvního termodynamického zákona platí:

$$Vstupní energie - Výstupní energie = 0$$

Analýza je vhodná například pro zjišťování rozložení teplot, tepelných gradientů a toků v modelu při konstantním tepelném zatížení. Pro výpočet ustáleného stavu stačí jediná materiálová konstanta – tepelná vodivost.

Solution > Analysis Type > New Analysis > Steady-State

1.5.2 Transientní analýza

Řeší přechodové děje, ke kterým v systému dochází a jejich časové průběhy. Zatížení a okrajové podmínky analýz mohou být časově závislé. Pro přechodové děje musíme zadat materiálům hodnoty tepelné vodivosti, hustoty a měrné tepelné kapacity (nebo tepelnou vodivost a entalpii).

Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient

Základní nastavení transientní analýzy je zde:

Solution > Analysis Type > New Analysis > Sol'n Controls > Basic

Time at end of loadstep – celková doba výpočtu přechodového děje

Number of substeps – počet výpočetních kroků během analýzy

Time increment > Time stepsize – doba mezi jednotlivými časovými kroky

Frequency – určuje, které časové kroky se budou ukládat do výsledkových souborů; při nastavení *Write every substep* se uloží všechny časové kroky a můžeme s nimi při vyhodnocování jednotlivě pracovat

Časová integrace se dá při výpočtu podle potřeby vypnout nebo zapnout. Je tedy možné nejprve nechat vypočítat průběh děje v daném čase a poté zjistit ještě ustálený stav.

Solution > Load Step Opts > Time Frequenc > Time Integration

TIMINT, ON (OFF)

S tím souvisí i nastavení *Open Control*, které tuto proceduru provede automaticky. V případě, že změna teploty (TEMP) během určitého počtu po sobě jdoucích výpočetních kroků (*Number of substeps*) je menší než nastavená hodnota (*Threshold open value*), časová

integrace se zastaví a dopočítá se ustálený stav. Toto nastavení je výhodné pokud neznáme délku přechodového stavu, který postupně konverguje ke stavu ustálenému.

Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Open Control

Při přechodových dějích je také důležité počáteční teplota systému se kterou do děje vstupuje. Pro homogenní počáteční teplotu se využívá *Uniform Temperature* (viz kap. 4.4).

V případě nehomogenních podmínek se definují potřebné hodnoty zde:

Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n

1.6 Postprocessor

Pro zobrazování a vyhodnocování výsledků jsou v programu ANSYS dva nástroje - *General Postprocessor* a *Time History Postprocessor*.

General Postprocessor

Tato část slouží k zobrazování výsledků na celém modelu nebo jeho vybrané části. Jedná se o výsledky modelu v ustáleném stavu nebo v přesně stanoveném čase. Ten je odvozen od časového kroku transientních analýz.

Zobrazení výsledků přímo na geometrii modelu, kde

General Postproc > Plot Results

Time History Postprocessor

Tento nástroj umožňuje zobrazovat jak se jednotlivé hodnoty mění v čase. Nadefinujeme si požadovanou veličinu a sledujeme její průběh v čase. Jedná se tedy o graf (tabulku), kde základní osou x je čas. Výsledky můžeme různě kombinovat a doplňovat a matematické funkce.

TimeHist Postpro > Variable Viewer

2 Příklad

x=8.382e-3

y=8.382e-3

z=0.8e-3

rozměry senzoru

V=x*y*z

Objem senzoru

P=0.5

Výkon senzoru

Spuštění preprocessoru:

/PREP7

Definování materiálů:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

MPTEMP, 1, 0

MPDATA, KXX, 1, , 30

MPTEMP, 1, 20

MPTEMP, 2, 300

MPDATA, C, 1, , 880

MPDATA, C, 1, , 1285

MPTEMP, 1, 0

MPDATA, DENS, 1, , 3800

Definování elementů:

Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete

ET, 1, SOLID70

3D teplotní element

ET, 2, SURF152, , , 1, 1

povrchový SURf element

KEYOPT, 2, 9, 1

Element bude použit i pro radiaci

KEYOPT, 2, 8, 2

Nastavení teploty pro výpočet koeficientu přestupu tepla

R, 1, 1, 5.67e-8

Definice Steffan-Boltzmanovy konstanty

Tvorba modelu:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions

BLOCK, 0, x, 0, y, 0, -z

Tvorba kvádrů

Meshování:

Main Menu>Preprocessor>Meshing

LESIZE, ALL, , , 2

Každá čára (line) bude rozdělena na 2 elementy

MSHAPE, 0, 3D

Meshování 3D tělesa
MSHKEY, 1
Nastavení mapped mesh

VMESH, ALL
Tvorba meshe na všech objemech

N, 100, 10e-3, 10e-3, 0
Vytvoření speciálního uzlu pro SURF elementy

TYPE, 2
Použití elementu typu 2

REAL, 1
Použití reálné konstanty č.1

MAT, 1
Použití materiálu č.1

ESURF, 100
Vytvoření SURF elementů se extra uzlem číslo 100

Počáteční podmínky:

Main Menu>Preprocessor>Loads>Define loads>Apply>Thermal

TUNI F, 20
Počáteční teplota objektů pro analýzu

BFV, ALL, HGEN, P/V

D, 100, TEMP, 20
Teplota okolí 20 °C definována do extra uzku

ESEL, S, TYPE, , 2
Výběr SURF elementů

SFE, ALL, , CONV, , 20
Aplikace konvekce na SURF prvky

ALLSEL

Radiace:

Main Menu>Preprocessor>Radiations Opts>Solution Opt

STEF, 5. 67e-8
Steffan-Boltzmanova konstanta

TOFFST, 273
Rozdíl mezi absolutní teplotou (K) a použitou teplotní škálou (°C)

RADOPT, 0. 1, 0. 0001, 0, 1000, 0. 1, 0. 1

SPCTEMP, 1, 0

FI NI SH
Ukončení preprocessoru

Řešení analýzy:

/SOLU
Spuštění řešiče

SOLVE
Spuštění výpočtu