# Aplicația AEF-A.1.4

## **CUVINTE CHEIE**

Analiza statică liniară, Model geometric plan, Starea axial-simetrică de tensiuni, Material liniar, Model geometric 2D (plan), Element finit 2D, Element finit neliniar (parabolic), Simetrie axială, Simetrie radială, Rediscretizare, Element de maşină, Inel de rulment

#### **CUPRINS**

A. DESCRIEREA PROBLEMEI
B. MODELUL DE AEF
C. PREPROCESAREA MODELULUI DE AEF
D. REZOLVAREA MODELULUI DE AEF
E. POSTPROCESAREA REZULTATELOR
F. ANALIZA REZULTATELOR
G. CONCLUZII

## A. DESCRIEREA PROBLEMEI

#### A.1. Introducere

Studiul elementelor sistemelor mecanice cu o *axă de simetrie comună* pentru domeniul geometric, caracteristicile de material, încărcare și condiții limită se poate realiza cu ajutorul modelelor axial-simetrice. Structurile acestora, din punct de vedere geometric, se reduc la *modele geometrice plane asociate semisecțiunilor axiale* care, din punct de vedere fizic, sintetizează stările spațiale de tensiuni și de deformații raportate la un sistem de coordonate cilindric cu axa cotelor identică cu axa de simetrie.

Cazurile de aplicare în practică a analizei cu elemente finite axial-simetrice sunt multiple, remarcându-se cu frecvență mărită problemele cu *structuri omogene de revoluție în raport cu o axă, încărcate uniform distribuit circumferențial*. Astfel, analiza structurilor elementelor tridimensionale ale mașinilor, instalațiilor și utilajelor, care respectă condițiile precizate mai sus, se realizează prin intermediul unui *model plan cu un număr de grade de libertate mult micșorat* față de modelul tridimensional.

#### A.2. Descrierea aplicației

În figura alăturată se prezintă subansamblul rulmentului radial cu bile din componenta unui sistem de lăgăruire al unui arbore al unui reductor de turație. În vederea obținerii cerintelor functionale optime (centrare bună, fixarea inelului pe arbore/carcasă) inelele rulmentului sunt asamblate presat X pe tronsonul de cap al arborelui și în alezajul carcasei. Ca urmare a asamblărilor presate (cu strângere proprie), ținând cont că arborele și carcasa au rigidități radiale mult mărite decât ale inelelor, apar deplasări radiale ale punctelor căilor de rulare în sensul micșorării jocului din rulment. Astfel, în condițiile unor strângeri mărite se poate ajunge în urma montajului la anularea jocului din rulment și, deci, la funcționarea necorespunzătoare, cu frecări mari, care conduc la supraîncălzirea și micșorarea duratei de viață a rulmentului. Din analiza ajustajelor inel interior/arbore inel şi exterior/carcasă rezultă strângeri mărite în asamblările presate de la interior.



#### A.3. Scopul aplicației

În această aplicație se prezintă, folosind analiza cu elemente finite, studiul asamblării presate dintre inelul interior al rulmentului radial cu bile și arborele unui reductor de turație. Deoarece, *arborele este* 

*cu secțiune plină* și, deci, cu *rigiditate radială mărită* se consideră, pentru studiul asamblării menționate, numai *inelul interior al rulmentului radial* cu bile (6205), executat în clasa de precizie PO

cu jocul radial normal cu valoarea cuprinsă în [0,01; 0,02] mm. Inelul interior al acestui rulment cu forma și dimensiunile prezentate în figura alăturată este executat din oțel de rulmenți, marca RUL1, cu modulul de elasticitate longitudinală E=2,1 10<sup>5</sup>MPa, coeficientul contracției transversale v = 0,3 și densitatea,  $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ .

În cadrul acestui studiu se urmărește, pentru cazul concret descris mai sus, determinarea de date privind *deplasările și tensiunile din inelul interior*, modificarea formei căii de rulare, *presiunea pe suprafața de montaj* și *forța de montare/demontare* a inelului pe arbore. Acestea se pot obține ținând cont și de faptul că inelul interior presat pe arbore este rotitor cu turația n = 4000 rot/min.



# **B. ÎNTOCMIREA MODELULUI DE AEF**

## B.1. Definirea modelului de AEF

Având în vedere că structura geometrică și de încărcare este *simetrică față de o axă* precum și față de *un plan transversal* se adoptă pentru analiză un *model plan* (2D) determinat de secțiune de semisecțiunea radială prin inelul interior. Astfel, fără a se pierde din acuratețe, problema de rezolvat se încadrează în *starea axialsimetrică de tensiuni* și se adoptă cel mai simplificat model posibil, care presupune:

- forma geometrică plană,
- discretizare cu elemente finite 2D neliniare (parabolice),
- comportare liniară a materialului,
- adoptarea constrângerilor asociate proprietăților de simetrie,
- încărcare exterioară prin deplasare impusă.

## B.2. Descrierea modelului de AEF

În figura alăturată se prezintă modelul de AEF asociat *modelului geometric plan al semisecțiunii axiale* considerat în planul XY cu axa Y axa de simetrie (axială) a structurii de analizat. În plus, se observă că domeniul plan considerat precum și starea deformată a acestuia sunt simetrice în raport cu planul XZ perpendicular pa axa de rotație (Y) și este identic cu planul de simetrie al căii de rulare.

*Condițiile de frontieră (limită) impuse*, în concordanță cu simetriile considerate, implică deplasări libere în direcție radială a punctelor modelului de pe axa X și anulează deplasările după axa Y.

*Încărcarea structurii* se realizează prin deplasarea impusă a muchiei interioare cu valoarea strângerii radiale maxime, 0,02 mm, calculată pentru ajustajul  $H7\binom{+0,021}{0}/r6\binom{+0,041}{+0,026}$ ; în consecință apare forța F<sub>r</sub> care urmează să fie determinată.



În plus, structura de analizat se consideră că se *rotește în jurul axei Y cu viteza unghiulară*  $\omega = \pi n/30 = 418,88 \text{ rad/s}.$ 

## B.3. Caracteristicile materialului și mediului

- Pentru analiza statică liniare se consideră următoarele caracteristici de rezistență ale materialului RUL1:
  modulul de elasticitate longitudinală, E = 210000 N/mm<sup>2</sup>;
  - coeficientul contracției transversale (Poisson), v = 0.3.

## A. PREPROCESAREA MODELULUI DE ANALIZĂ

C 1 Activorop, satarop și selverea proiestului
Activarea projectului
$\wedge$ Toobox $\cdot$ IF Analysis Systems $\rightarrow$ I Im Static Structural (anare automat fereastra subprojectului): $\rightarrow$ [se poate
schimba denumirea Static Structural].
Setarea tipului problemei (2D)
A Geometry 😨 🖌 🛶 Properties Around Schematic A3: Geometry E Advanced Geometry Options
Analysis Type [se selectează din listă cu $\downarrow \checkmark$ , $\downarrow 2D$ ] $\rightarrow$ [se închide fereastra $\downarrow \checkmark$ ].
Salvarea proiectului
$\downarrow$ Save As $\rightarrow$ $\bigwedge$ Save As, File name: [se introduce denumirea, AEF-A] $\rightarrow$ $\downarrow$ Save As
C.2 Modelarea caracteristicilor materialului și mediului
N, Project Schematic: L, Section Edit $\rightarrow$ Dutline of Schematic A2: Engineering Data
🔟 🗞 Structural Steel Properties of Outline Row 3: Structural Steel 🖂 🗁 Isotropic Elasticity 🛶 Young's Modulus , Young's Modulus ,
[se selectează în lista din coloana C (Unit) cu العام, [se introduce în caseta din coloana B (Unit)
valoarea, 210000] $\rightarrow \downarrow \checkmark \checkmark \checkmark \lor \Box \overset{}{\bigcirc} \overset{}{} \overset{\end{array}{}} \overset{\end{array}{}} \overset{\end{array}{}} \overset{}{} \overset{}{}} \overset{}{} \overset{}{}} \overset{}{} \overset{}{} \overset{}{}} \overset{}{} \overset{}{} \overset{}{}} \overset{}{} \overset{}{} }{} \overset{}{} }{}{} }{} }{}{} }{}} }{} }{}{}} }{} }{}} }{} }{}{}} }{}} }{}} }{}{}} }{}}{}{}} }{}} }{}} }{}} }{}}{}} }{}}{}{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}} }{}}{}} }{}} }{}{}} }{}} }{}} }{}}{}}{}}{}}{}$
C.3 Modelarea geometrică
C.S.1 Incarcarea moaututut Designificaeter (DM)
(2.2) Concentrate politici
Vizualizarea planului implicit (XY)
$\mathbf{M}  \mathbf{F}_{\mathbf{M}} = \mathbf{M}  \mathbf{S}_{\mathbf{M}}  $
XY];
Generare linie dreptunghiulară
$\rightarrow$ $\rightarrow$ $\rightarrow$ $\rightarrow$ [se va trasa linia dreptunghiulară în cadranul I marcând cu $\rightarrow$ vârful de pe axa
X (apare simbolul de coincidență C) și eliberarea 🚽 în colțul opus, fig. a].
Generare linie circulară
$\downarrow$ S Circle $\rightarrow$ [se generează linia circulară prin marcarea cu $\downarrow$ a centrului pe axa X (apare simbolul de
coincidență C), deplasarea în direcție radială și eliberarea ↓ pe contur, fig. b].
<u>Iaiere linii la margine</u>
$\downarrow$ modify $\rightarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$ $\rightarrow$ [se activezà cu $\downarrow$ opțiunea $\downarrow$ opțiunea $(\square / \square)$ $\rightarrow$ [se marcheazà cu $\downarrow$ partea are sa va tăia (fig. h.a)]
a. b. c.
<u>Contre</u>
Sketching roomoves: $\Box$ $\rightarrow$ $\Box$ $\rightarrow$ $\Box$ $\rightarrow$ [se selectează cu $\Box$ cate două entități (punct, linii, axă)
si apare automat cota (fig. a)] $\rightarrow$ because view, billetisons $\mathbf{r} : \square \cap \rightarrow$ [se introduce valoarea cotel (fig. a)].
$\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ ] $\rightarrow$ [se selectedza cu $\rightarrow$ ] \rightarrow ]
apare automat cota (fig. a)] $\rightarrow$ [se introduce valoarea cotel (IIg.a)]. $\rightarrow$ [se selecteaza cu $\rightarrow$ arcul de cerc §1]
aparc automat cota (fig. a)] $\rightarrow$ $\rightarrow$ [se introduce valuatea fazer (fig. a)]. Generare racordare
$\downarrow^{\text{Modify}} \rightarrow \downarrow^{\text{Fillet}} \rightarrow [\text{se introduce în caseta Radius: valoarea razei, 1]} \rightarrow [\text{se selectează cu} \downarrow] liniile care se$
racordează (fig.b)].





$\Box$ $\Box$ $\Box$ $\Box$ Static Structural (A5) $\rightarrow$ $\Box$ $\Box$ Supports $\neg$ $\rightarrow$ $\Box$ $\Box$ Displacement $\Box$ Details of "Displacement", $\Box$ Scope $\Box$
Geometry $\rightarrow \downarrow$ (se activează filtrul de selecție a muchiei) $\rightarrow$ [se selectează cu $\downarrow$ muchia (fig. b)] $\rightarrow$
$ \square $ Apply $ \rightarrow \square $ Definition : $ \square $ Define By, [se selectează din listă cu $ \square $ , $ \square $ Components ], $ \square $ X Component, $ \square $ Free , [se
selectează din listă ,, Constant ], [se introduce valoarea deplasării, 0,02] (fig. b).
<i>a. b.</i>
C.4.4 Modelarea încărcării cu forță centrifugă (dependentă de viteza de rotație)
$\mathbf{M}$ , Outline : $\mathbf{M} \oplus \mathbf{M}$ Static Structural (A5) $\rightarrow \mathbf{M}$ Inertial $\mathbf{T} \rightarrow \mathbf{M}$ Rotational Velocity $\rightarrow \mathbf{M}$
Details of "Rotational Velocity": $\Box \Box$ Scope : $\Box$ Geometry $\rightarrow \Box$ (se activează filtrul de selecție a feței) $\rightarrow$ [se
selectează cu 🚽 suprafața]; 🗉 Definition : JDefine By, [se selectează din listă cu JI, JComponents];
<mark>ار Y Component</mark> , [se introduce valoarea vitezei unghiulare (rad/s), 418.18].
C.4.5 Salvarea proiectului
$\Theta$ : File $\rightarrow$ Bave Project

# D. REZOLVAREA MODELULUI CU ELEMENTE FINITE

D.1. Setarea rezultatelor
<u>Setarea deplasării unidirecționale după axa X</u>
$\mathbf{M}_{\mathbf{A}}$ , Outline : $\mathbf{A}$ $\mathbf{B}$ <b>Solution (A6)</b> $\mathbf{A}$ , $\mathbf{M}_{\mathbf{A}}$ Deformation $\mathbf{A}$ , $\mathbf{M}_{\mathbf{A}}$ Deformation $\mathbf{A}$ , $\mathbf{M}_{\mathbf{A}}$ Deformation $\mathbf{A}$ , $\mathbf{M}_{\mathbf{A}}$ Deformation $\mathbf{A}$ , $\mathbf{A}$
الے Definition : Orientation , [se selectează din listă cu العنا, الا Axis].
<u>Setarea tensiunii echivalente</u>
$\operatorname{Im}_{\mathcal{O}}$ $\operatorname{Solution}(A6) \to \operatorname{Im}_{\mathcal{O}}$ Stress $\operatorname{Im}_{\mathcal{O}}$ Equivalent (von-Mises)
<u>Setarea tensiuni normale după axa X</u>
$\Box \oplus \neg \odot$ Solution (A6) $\rightarrow \Box \odot$ Stress $\checkmark \rightarrow \Box \odot$ Normal $\rightarrow$ Details of "Normal Stress", $\Box$ Definition $\Box$ Orientation, [se
selectează din listă 🗸 🔽 , 🗸 Axis].
<u>Setarea tensiuni normale după axa Y</u>
$ \square \xrightarrow{\sim} \sqrt{2} Solution (A6) \rightarrow \square \otimes Stress \checkmark \rightarrow \square \otimes Normal \rightarrow Details of "Normal Stress 2", \Box Definition : \square Orientation, [se$
selectează din listă جات , جا Y Axis ].
<u>Setarea tensiuni normale după axa Z</u>
$ = \frac{1}{2} \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} Solution (A6) \rightarrow 1 \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} Stress \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} \rightarrow 1 \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} Stress \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} \xrightarrow{\mathbb{R}^{2}} Details of "Normal Stress 3", = Definition : 1 Orientation, [se$
selectează din listă 🗸 🔽 🗛 🕹 J.
<u>Setarea forței de reacțiune corespunzătoare deplasării impuse</u>
$ \square = 4$ Solution (A6) $ \rightarrow \square $ $ ( Probe - ) \square $ $ ( Probe - ) \square $ $ ( Probe - ) \square $
Boundary Condition, [se selectează din listă cu , Displacement].
D.1.3 Lansarea modulului de rezolvare a modelului
$\mathbf{M}_{\mathbf{M}}$ , $\mathbf{H}_{\mathbf{M}}$ Solution (A6) $\rightarrow$ , $\mathbf{J}$ Solve

# E. POSTPROCESAREA REZULTATELOR

E.1. Setarea modului de vizualizare în secțiune/spațial
<u>Setarea vizualizării secționale/spațiale</u>
$\downarrow \Lambda \rightarrow \downarrow^{\text{Tools}} \rightarrow \downarrow^{\text{Options}} \rightarrow \Lambda^{\text{Options}}$ : $\downarrow^{Appearance}$ , [se activează (fig. c)/dezactivează (fig. a, b) din
lista cu 🗸 🚬 , 🚽 Beta Options ].
<u>Setarea numărului de sectoare unghiulare</u>
ا ب الله عنه المعامي (Beta) عنه المعامي منه المعامي منه منه المعامي منه منه المعامي منه المعامي منه المحافي الم
selectează din listă cu , L <sup>2D</sup> AxiSymmetric]; L Num Repeat [se introduce numărul de sectoare unghiulare, 19]
(fig. c).





### F. ANALIZA REZULTATELOR

În urma analizei rezultatelor obținute (subcap. E) ca urmare a modelării și rezolvării se evidențiază următoarele:

- Deplasarea radială (în direcția axei X) în zona ajustajului inelului cu arborele are valoarea impusă 0,02 mm (subcap. E.2).
- Deplasarea radială la nivelul căii de rulare cu valoarea 0,0184 mm conduce la micșorarea jocului din rulment (subcap. E.2,b); se va urmări ca această deplasare să fie mai mică decât jocul radial al rulmentului.
- Tensiunea echivalentă (von Mises), utilă pentru proiectarea ajustajului arbore-rulment, are valori mărite la interior cu maximul 445,09 MPa în zonele de început a racordărilor de la interior (subcap. E.3).
- Tensiunea radială (în direcția axei X) este de compresiune cu valoarea maximă -331,45 MPa, de asemenea, în zonele de început a racordărilor de la interior (subcap. E.4).
- Tensiunea axială (în direcția axei X) are valoarea maximă -162,56 MPa, de asemenea, în zonele de început a racordărilor de la interior (subcap. E.5).
- Tensiunea circumferențială (în direcția axei Z) are valoarea maximă 338,68 MPa de asemenea, în zonele de început a racordărilor de la interior (subcap. E.6).
- Reacțiunea care apare în zona alezajului ca urmare a deplasării radiale impuse are component radială mult mărită (48197 N), componenta axială mult redusă (22,627 N) și componenta circumferențială nulă.

Urmărind câmpurile deplasărilor și valorile maxime ale acestora se observă influența mărită a deplasărilor radiale asupra deplasărilor punctelor de pe calea de rulare.

Convențional, se definește *rigiditatea radială* a inelului rulmentului ca fiind raportul dintre forța radială de reacțiune și deplasarea radială impusă,

$$k_r = \frac{F_r}{u_r}$$

care după evaluare cu valorile din modelul de mai sus devine  $k_r = 2409850$  N/mm. Ținând cont de comportarea liniară a structurii și de raportul dintre deplasarea radială a punctelor din zona alezajului și cea a punctelor de pe calea de rulare,  $a = u_r/u_c = 0.02/0.0184 = 1.09$  se poate calcula în funcție de jocul radial minim strângerea efectivă din ajustajul arbore-alezaj inel interior.

*Forța de montare/demontare*, considerând coeficientul de frecare  $\mu = 0,2$  se poate calcula cu relația,  $F_{m/d} = \mu F_f = 0,2$ . 48197 = 9639,4 N.

*Presiunea pe suprafața de contact* se determină cu relația p = $F/\pi D(b-2r) = 48197/\pi 25 13 = 47,2$  MPa.