



HIDRAVLICNI CILINDRI

Preračun po teoriji II. reda

Aleksander HERCOG
© 2018

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

1

1



CILINDRI



- Majhno število delov
- Dva glavna sklopa
- Nekaj umetne snovi
- Nosilni deli I. reda
- Premikanje nosilnih delov stroja
- Premagovanje teže bremen
- Premikanje, nagibanje rok žerjavov



Pa vendar, kaj pa je že na tem ...
Pa še teorija II. reda ...

K tej strani se bomo še vrnili!



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

2

2



OSNOVE PRERAČUNA

DEBELINA STENE CEVI CILINDRA – notranji tlak – kotlovska enačba

$$s = \frac{R_z * p}{\sigma_{dop}} = \frac{D_z * p}{2 * \sigma_{dop}}$$

Za izračun potrebne debeline stene cevi **s[mm]** v osnovni obliki izhaja iz zunanjega premera cevi **Dz[mm]**, tlaka **p[N/mm²]** in dopustne napetosti **σ_{dop}[N/mm²]**.

$$s = \frac{p * \Psi * D_n}{200 * \sigma_{dop} - \chi * p * \Psi} + c$$

Smiselno je enačbo izraziti z notranjim premerom **D_n[mm]**, tlakom **p [bar]**, dopustno napetostjo **σ_{dop}[kN/cm²]**, dinamičnim faktorjem **Ψ**, vplivnostnim faktorjem tlaka **χ** in dodatkom za korozijo **c[mm]**.

Pri tem je $p * \Psi = p_{max}$, tlak, pri katerem učinkuje protiprebremenilna naprava, ki varuje žerjav ali stroj.

Faktor tlaka χ zahtevajo n. pr. DIN 2413 ter ameriška ABS in API 2C. DIN 2413 zahteva tudi preverjanje na časovno trdnost.

3



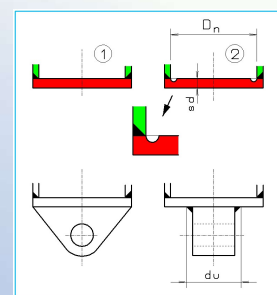
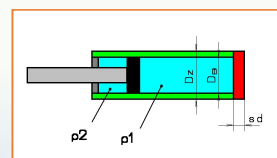
$$s = \frac{1.7 * D_n * p * \Psi}{200 * f_{yr} - 1.7 * p * \Psi} + c$$

Upoštevati moramo tudi posebnosti posameznih predpisov. GL zahteva, da podobno kot pri trdnostnih preračunih, obremenitve faktoriramo, v tem primeru s faktorjem 1.7, zato pa dopustno napetost nadomesti z računsko mejo plastičnosti ($< 0.83 * f_m$).

Izračun DEBELINE DNA sodi k preračunu debeline stene cevi

$$s_d = 0.4 * D_n * \sqrt{\frac{\psi * p}{f_y} * \left(1 - \frac{d_u}{D_n}\right)} + c$$

- D_n [mm] notr. premer cevi (premer bata)
- ψ [-] dinamičen faktor tlaka za dno
- p [bar] statičen delovni tlak na dno
- f_y meja plastičnosti gradiva dna
- d_u [mm] debelina ušesa cilindra
- c [mm] korozijski dodatek



4



TRDNOST – napetosti, uklon

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{W}$$

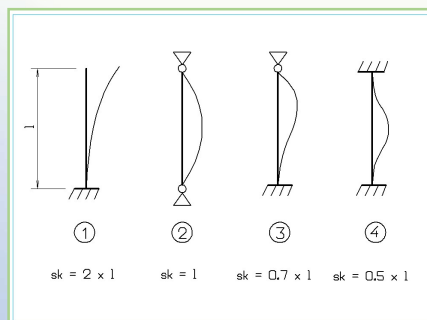
Oсна in upogibna napetost.
Ali moment M v cilindru, obremenjenem z osno silo in vpetem s sornikoma, sploh obstaja?

$$F_k = \frac{\pi^2 * E * I}{sk^2}$$

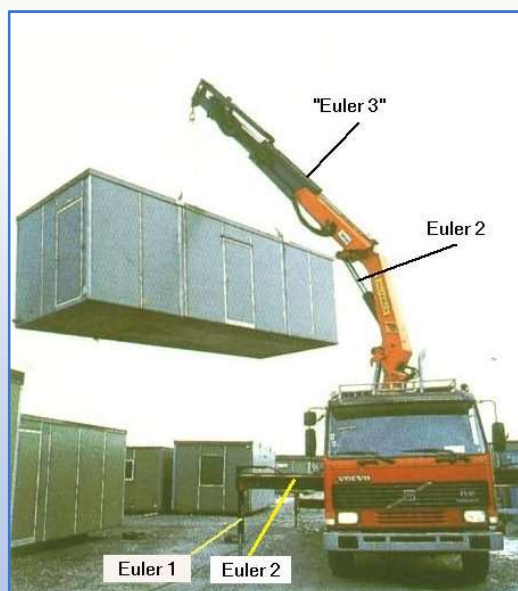
Kritična uklonska sila

E modul elastičnosti
I vztrajnostni moment
sk uklonska dolžina

Skica prikazuje uklonske dolžine znanih 4. EULERJEVIH uklonskih primerov.




5



Cilindri in pripadajoči Eulerjevi primeri pri avtožerjavu in nakladalnem žerjavu

6


Kaže, da imamo s tem vse potrebne elemente in enačbe za preračun cilindrov. 


Tako enostavno vendarle ni.

Že vprašanje, katero vrednost naj vstavimo za vztrajnostni moment v Eulerjevo enačbo, je neugodno.

Kako zajeti vpliv prekritja batnice s cevjo cilindra, je še bolj.

$$F_k = \frac{\pi^2 * E * I}{s k^2}$$







Kritična uklonska sila F_k še zdaleka ni dovoljena obratovalna sila.

$$F_{dop} = \frac{F_k}{S} = \frac{F_k}{5 \dots 6}$$


To vrednost in varnost proti uklonu najdemo v znanih priročnikih. Toda ...?



Vendar tudi standardi in predpisi želijo dodati še svoje zahteve. 

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018 7

7


Standardi in predpisi na svoj način zahtevajo, da je obratovalna sila na zadostni oddaljenosti od kritične uklonske. 

Vse zahteve temeljijo na iskanju tehniško upravičenih argumentov, ki bodo doprinesli varnosti obratovalne sile glede na kritično.

Obstaja vrsta standardov (Eurocode EN 1993, EN 13001, DIN 18800, ...) in predpisov (GL, LR, DNV, API 2C, ...), ki predpisujejo, kaj moramo upoštevati v preračunu uklona cilindra. Med tistimi, ki navaja največ takšnih zahtev, je predpis GL.

Germanski Lloyd – GL

- Uporabiti je treba **metodo delnih varnosti** – obremenitve je treba v naprej množiti s koeficientom obremenitve $\gamma_p = 1.35$ (običajno)
- Odpornostne vrednosti gradiva delimo z **varnostjo gradiva** $\gamma_m = 1.10$
- Tudi **modul elastičnosti** E je odpornostna vrednost (!), zato je treba njegovo vrednost prav tako deliti z γ_m !! ($E = 21000 / 1.10 = 19090 \text{ kN/cm}^2$)
- Upoštevanje **imperfekcij** zahtevajo vsi predpisi in sicer kot faktor dolžine cilindra. Običajno znašajo $L / 450 \dots L / 400$, GL zahteva $L / 300$.
- Upoštevati je treba **momente vpetja** zaradi trenja in histereze v ležajih in sornikih vpetja cilindra.



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018 8

8

UKLONSKA SILA F_k – kritična sila sistema



$$E * I * v^{IV} + F * v'' = 0$$

Poostrena Eulerjeva uklonska enačba, da lahko zadostimo več robnim pogojem.

$$\omega^2 = \frac{F}{E * I}$$

Po delitvi enačbe s silo F uvedemo zapis

$$v^{IV} + \omega^2 * v'' = 0$$

Dokončna oblika diferencialne enačbe uklona

$$v'' + \omega^2 * v = C_1 * x + C_2$$

Ker obstajajo samo sodi odvodi pomikov, lahko enačbo 2x integriramo

Za homogeni del $v'' + \omega^2 * v = 0$ obstaja rešitev v nastavku $v_1 = A * \cos \omega x + B * \sin \omega x$

Partikularna rešitev, vstavljena v diferencialno enačbo, pa mora kar se da natančno popisati nehomogeni del, torej se ponuja kar nastavek v obliki izraza desne strani. Ker je 2. odvod tega izraza enak 0, dobimo:

$$\omega^2 * v = C_1 * x + C_2 \text{ in po ureditvi izraz } v_2 = \frac{C_1 * x + C_2}{\omega^2} = C * x + D$$

Splošna rešitev diferencialne enačbe je $v = v_1 + v_2$ in tako dobimo končno:

$$v = A * \cos \omega x + B * \sin \omega x + C * x + D$$

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

9

9

Za obravnavan, na obeh koncih členkasto vpet cilinder, lahko zapišemo naslednje robne pogoje:

$$x_1 = 0 \quad \begin{array}{l} v_1 = 0 \text{ (1)} \\ v_1'' = 0 \text{ (2) (členek, moment je 0, saj } M = -EIv'' \text{)} \end{array}$$

$$x_2 = L_2 \quad \begin{array}{l} v_2 = 0 \text{ (3)} \\ v_2'' = 0 \text{ (4)} \end{array}$$

$$x_1 = L_1; x_2 = 0 \quad \begin{array}{l} v_1 = v_2 \text{ (5)} \\ v_1' = v_2' \text{ (6) (tangenta na upogibnico je skupna)} \\ I_1 v_1'' = I_2 v_2'' \text{ (7) (} M_1 = M_2 \text{)} \\ I_1 v_1''' = I_2 v_2''' \text{ (8) (} T_1 = T_2 \text{)} \end{array}$$

Glede na nastavek in robne pogoje dobimo:

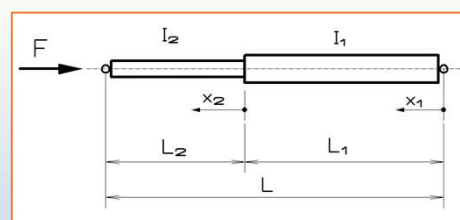
- (1): $D_1 = -A_1$ in z (2): $A_1 = D_1 = 0$
- (2): $A_1 = 0$
- (3): $A_2 \cos \omega_2 L_2 + B_2 \sin \omega_2 L_2 + C_2 L_2 + D_2 = 0$
- (4): $-A_2 \omega_2^2 \cos \omega_2 L_2 - B_2 \omega_2^2 \sin \omega_2 L_2 = 0$
- (5): $B_1 \sin \omega_1 L_1 + C_1 L_1 - A_2 - D_2 = 0$
- (6): $B_1 \omega_1 \cos \omega_1 L_1 + C_1 - B_2 \omega_2 - C_2 = 0$
- (7): $-I_1 B_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 L_1 + I_2 A_2 \omega_2^2 = 0$
- (8): $-I_1 B_1 \omega_1^3 \cos \omega_1 L_1 + I_2 B_2 \omega_2^3 = 0$

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

10

10

Rešitev za 2. Eulerjev primer



$$v = A * \cos \omega x + B * \sin \omega x + C * x + D$$

$$v' = -A * \omega * \sin \omega x + B * \omega * \cos \omega x + C$$

$$v'' = -A * \omega^2 * \cos \omega x - B * \omega^2 * \sin \omega x$$

$$v''' = A * \omega^3 * \sin \omega x - B * \omega^3 * \cos \omega x$$



Izraze uredimo po koeficientih.

Sistem homogenih enačb ima enolično rešitev, če je njegova determinanta enaka 0.

$$\begin{array}{cccccc}
 A_2 & B_1 & B_2 & C_1 & C_2 & D_2 \\
 \hline
 \cos \omega_2 L_2 & 0 & \sin \omega_2 L_2 & 0 & L_2 & 1 \\
 -\omega_2^2 \cos \omega_2 L_2 & 0 & \omega_2^2 \sin \omega_2 L_2 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & \sin \omega_1 L_1 & 0 & L_1 & 0 & -1 \\
 0 & \omega_1 \cos \omega_1 L_1 & -\omega_2 & 1 & -1 & 0 \\
 I_2 \omega_2^2 & -I_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -I_1 \omega_1^3 \cos \omega_1 L_1 & I_2 \omega_2^3 & 0 & 0 & 0
 \end{array} = 0$$

S transformiranjem preuredimo determinanto v format 3 x 3:

Prvo vrstico prištejemo tretji

Determinanto razvijemo po zadnjem elementu prve vrstice (1)

Predzadnji stolpec prištejemo zadnjemu

Determinanto razvijemo po zadnjem elementu druge vrstice

Enako ponovimo še enkrat

Člen pred dobljeno determinanto reda 3 x 3 ne more biti 0, zato lahko enačbo z njim delimo

Preostalo determinanto 3 x 3 rešimo brez težav

11



$$\begin{vmatrix}
 -\cos \omega_2 L_2 & 0 & -\sin \omega_2 L_2 \\
 I_2 & -\sin \omega_1 L_1 & 0 \\
 0 & -\omega_1 \cos \omega_1 L_1 & I_2 \omega_2
 \end{vmatrix} = 0$$

Po izračunu produktov in ureditvi dobimo končno pogojno enačbo uklona obojestransko členkasto vpetega cilindra

$$\frac{\omega_1}{\operatorname{tg}(\omega_1 L_1)} + \frac{\omega_2}{\operatorname{tg}(\omega_2 L_2)} = 0$$

Ne pozabimo, da pomeni $\omega_i = \sqrt{\frac{F_k}{E * I_i}}$ in predstavlja lastno vrednost uklonskega sistema.

Najnižja lastna vrednost definira kritično uklonsko silo F_k .

12

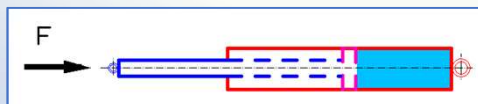


Transcendentno enačbo lahko rešimo samo s poskušanjem, seveda pa računalniška obdelava nudi hitre in natančnejše rešitve.

Za vpetja višjega reda (več prostostnih stopenj zadržanih) je postopek enak, seveda so drugačni robni pogoji, težavnejše pa je tudi matematično reševanje izrazov.*)

Tudi izrazi rezultatov so daljši, bolj zapleteni.

Za stopničast potek vztrajnostnega momenta imamo za 4 Eulerjeve primere torej pogojne enačbe uklonske sile.



Te enačbe pa ne bodo primarne enačbe preračuna, jih pa lahko uporabimo za odlično validiranje rezultatov.

*) Za izpeljave glej A. Hercog, univ. dipl. ing.: Uklon hidravličnih cilindrov

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

13

13

IMPERFEKCIJE



Imperfekcije upoštevajo odstopanje cilindra od idealno ravne palice. Povzročajo jih:

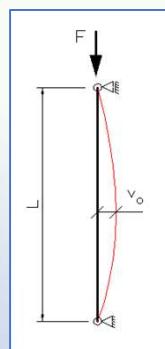
- Tolerance in napake pri izdelavi
- Odstopanja pri montaži
- Zračnosti med sklopi cilindra
- Podajanje tesnil in vodil

Predstavljajo deformacijo palice, ki je prisotna še pred obremenitvijo te. Velikost v_0 podajamo v odvisnosti od dolžine palice L

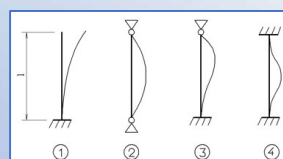
$$v_0 = \frac{L}{x_{imp}}$$

Velikost faktorja x_{imp} predpisujejo standardi in predpisi in običajno znaša od 300 do 450.

Linija imperfekcij mora imeti obliko in usmeritev osnovne deformacijske linije palice. Za 4 Eulerjeve primere so to znane skice:



Prikaz imperfekcij za 2. Eulerjev primer



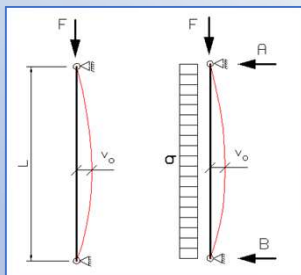
A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

14

14



Načelno lahko vpliv imperfekcij upoštevamo tudi z dodatno obremenitvijo. Tako lahko za 2. Eulerjev primer uporabimo kontinuirno obremenitev in za uravnoteženje te virtualne obremenitve tudi obe reakciji:



Vrednost kontinuirne obremenitve q mora biti tolikšna, da povzroči deformacijo v_0 in znaša

$$f = \frac{5 * q * L^4}{384 * E * I}$$

$$f = v_0$$

$$q = \frac{384 * v_0 * E * I}{5 * L^4}$$

Za uravnoteženje obremenitve q , ki je dejansko ni, moramo upoštevati še reakciji v podporah

$$A = B = \frac{q * L}{2}$$

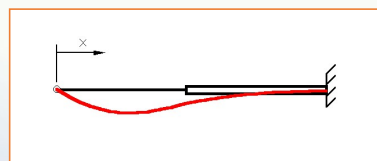
V programu pa sem upošteval krivulje imperfekcij, ki so izpeljane na osnovi dejanskih robnih pogojev vpetja cilindra.



Ni težko ugotoviti, da bo izpeljava funkcij, ki popisujejo potek imperfekcij zopet odvisna od Eulerjevega primera. Torej, za vsak Eulerjev primer je potrebno izpeljati ustrezno funkcijo. *)
Da ne bo prelahko, si v sklopu teh izvajanj oglejmo postopek pri izpeljavi funkcije imperfekcij za 3. Eulerjev primer. Ker iščemo potek deformacije, ne bo velike napake, če upoštevamo konstanten vztrajnostni moment I .

Splošna enačba upogibnice omogoča 2x integracijo, torej največ zadostitev 2. robnim pogojem.

$$v'' = -\frac{M}{E * I}$$



Podobno kot pri izpeljavi pogojne enačbe za kritično silo, uporabimo zato poostreno enačbo

$$v^{IV} = \frac{q}{E * I}$$

S štirikratno integracijo dobimo deformacijsko funkcijo

$$v = \frac{q}{24 * E * I} * x^4 + C_1 * \frac{x^3}{6} + C_2 * \frac{x^2}{2} + C_3 * x + C_4$$

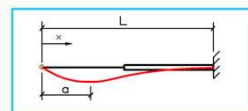
Vpliv lastne teže cilindra lahko brez večje napake zanemarimo ($q = 0$)

$$v = C_1 * \frac{x^3}{6} + C_2 * \frac{x^2}{2} + C_3 * x + C_4$$

*) Izpeljave za posamezne Eulerjeve primere glej A. Hercog, univ. dipl. ing.: FEMCI: Sistem, imperfekcije in napetosti

Robni pogoji pa so naslednji:

- (1) $x = 0$: $v = 0 \Rightarrow C_4 = 0$
 (2) $x = 0$: $v'' = -M / EI$ (M, ki bi v tej točki povzročil deformacijo)
 Glej tudi diferencialno enačbo upogiba s prejšnje strani
 (3) $x = L$: $v = 0$
 (4) $x = L$: $v' = 0$ (tangenta na upogibnico v tej točki je vodoravna)



$$v = C_1 * \frac{x^3}{6} + C_2 * \frac{x^2}{2} + C_3 * x + C_4$$

Pojasnila

(2): 2. odvod upogibnice

Ker je pogoj pri $x = 0$, odpade člen C_4

$$v'' = C_1 * x + C_2 = -\frac{M}{E * I} \rightarrow C_2 = -\frac{M}{E * I}$$

(3): že znani vrednosti za C_2 in C_4 vstavimo v enačbo upogibnice in lahko izrazimo C_3 s pomočjo C_1 .

$$C_1 * \frac{L^3}{6} - \frac{M}{E * I} * \frac{L^2}{2} + C_3 * L = 0$$

$$C_3 = \frac{1}{L} * \left(\frac{M * L^2}{2E * I} - C_1 * \frac{L^3}{6} \right)$$

Končno vstavimo še izraz za C_3 v enačbo pogoja (4)

$$C_1 * \frac{L^2}{2} - \frac{M}{E * I} * L + \frac{1}{L} * \left(\frac{M * L^2}{2E * I} - C_1 * \frac{L^3}{6} \right) = 0$$

$$C_1 = \frac{M * L}{2E * I * \left(\frac{L^2}{2} - \frac{L^2}{3} \right)} = \frac{M * L}{E * I * \left(L^2 - \frac{L^2}{3} \right)} = \frac{3 * M}{2E * I * L}$$

Dobljen C_1 vstavimo v izraz za C_3 in dobimo tudi samostojen izraz za C_3

$$C_3 = \frac{1}{L} * \left(\frac{M * L^2}{2E * I} - \frac{3 * M}{2E * I * L} * \frac{L^3}{6} \right) = \frac{1}{L} * \left(\frac{M * L^2}{2E * I} - \frac{M * L^2}{4E * I} \right) = \frac{M * L}{4E * I}$$

Enačba upogibnice – iskan potek imperfekcij – je s tem definirana

$$v = \frac{3 * M}{2E * I * L} * \frac{x^3}{6} - \frac{M}{E * I} * \frac{x^2}{2} + \frac{M * L}{4E * I} * x$$

$$v = \frac{M}{4E * I * L} * x^3 - \frac{M}{2E * I} * x^2 + \frac{M * L}{4E * I} * x$$



Vendar še nismo na cilju. Ugotoviti moramo, kje leži točka največje vrednosti povesa in kolikšen je poves. Razmerje predpisane imperfekcije in vrednosti povesa bo služilo za izračun vpliva imperfekcije v vseh ostalih vozliščnih sistema metode končnih elementov (FEM, MKE).

Pogoja za iskanje ekstrema:

$$v' = 0 \quad \text{in} \quad v'' < 0$$

$$v' = \frac{3M}{4E * I * L} * x^2 - \frac{M}{E * I} * x + \frac{M * L}{4E * I} = 0$$

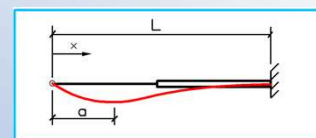
Kvadratno enačbo po x rešimo z znano formulo za iskanje ničel, pri čemer so a, b in c koeficienti pri potencah x.

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 * a * c}}{2 * a} = \frac{\frac{M}{E * I} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{E * I}\right)^2 - 4 * \frac{3 * M * M * L}{4E * I * L * 4E * I}}}{2 * \frac{3 * M}{4E * I * L}} = \frac{\frac{M}{E * I} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{E * I}\right)^2 - \frac{3}{4} * \left(\frac{M}{E * I}\right)^2}}{\frac{3 * M}{2E * I * L}}$$

$$x_{1,2} = \frac{\frac{M}{E * I} \pm \frac{1}{2} * \frac{M}{E * I}}{\frac{3 * M}{2E * I * L}}$$

$$x_1 = L$$

$$x_2 = \frac{L}{3} \rightarrow a = \frac{L}{3}$$



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

19

19



Vrednost deformacije pri $x = L / 3$:

$$v = \frac{M}{4E * I * L} * x^3 - \frac{M}{2E * I} * x^2 + \frac{M * L}{4E * I} * x$$

$$v_{(x=L/3)} = \frac{M}{4E * I * L} * \frac{L^3}{27} - \frac{M}{2E * I} * \frac{L^2}{9} + \frac{M * L}{4E * I} * \frac{L}{3} = \dots = \frac{M * L^2}{27E * I}$$

Predpisi zahtevajo, da mora znašati imeperfekcija na tem mestu

$$v = \frac{L}{x_{imp}} \quad \text{zato lahko iz obeh izrazov izračunamo velikost momenta M} \quad M = \frac{27E * I}{x_{imp} * L}$$

Dobljeno vrednost za M vstavimo v enačbo upogibnice. V programu FEMcil je pozitivna deformacija usmerjena navzdol, zato še spremenimo predznak vrednosti:

$$v = -\frac{27 * x}{2 * x_{imp}} * \left(\frac{x^2}{2 * L^2} - \frac{x}{L} + \frac{1}{2} \right) = -\frac{27}{4} * \frac{x}{x_{imp}} * \frac{(L - x)^2}{L^2}$$

Za vrednost $v(x)$ moramo v y smeri premakniti vsako vozlišče modela FEM / MKE.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

20

20

POSTOPEK ZA NESTANDARDNE CILINDRE

VPETJE in OBREMITVE



Nestandardne imenujem cilindre, ki jih ne moremo uvrstiti v nobenega od 4. Eulerjevih primerov in take, ki niso obremenjeni samo z osno silo.

Program FEMCil je nastal prav s poudarkom, da z njim lahko preračunamo tudi nestandardne cilindre. Seveda je po metodi za nestandardne moč preračunati tudi standardne – gre za prehod od splošnega k posebnemu. **Motilna sila** za sprožanje učinkov teorije II. reda je vselej lastna teža cilindra.

Najprej algoritem razdeli cylinder v polja. Polje je razdalja med dvema sosednjima podporama z onemogočenim pomikom prečno na os cilindra, ki torej podpirata cylinder v smislu delovanja lastne teže.

Z upoštevanjem dejanskih zunanjih obremenitev in lastnih tež opravi program trdnostni preračun **po teoriji I. reda**.

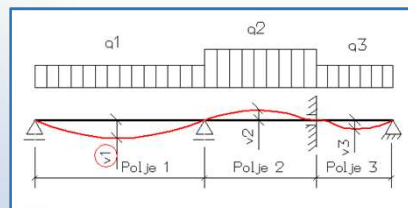
Dobljen potek deformacij je **oblika deformacijske krivulje** cilindra.

Največja deformacija, ki se pojavi v poljih, je merodajna za izpolnjevanje pogoja o velikosti imperfekcij.

To deformacijo v_{1d} mora algoritem postaviti na predpisano vrednost v_{1d} .

$$v_{1d} = \frac{L}{x_{imp}}$$

Z razmerjem $\frac{v_{1d}}{v_1}$ mora pomnožiti izračunano deformacijo v_i vsakega vozlišča i in tako dobimo **potek imperfekcij vzdolž cilindra**.



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

21

21

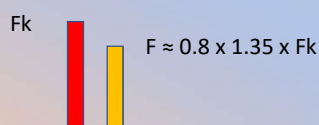
Po opravljenem preračunu po teoriji II. reda pa je poznan potek deformacij **prve lastne vrednosti** cilindra.

Kljub izračunu imperfekcij s FEM / MKE programom pa rezultat ni nujno pravilen.

Imperfekcije morajo kar najbolje ponazoriti prvo lastno deformacijsko krivuljo, ne dejanskih deformacij sistema.

Po izračunu po teoriji II. reda si moramo ogledati deformiran cylinder. Če se ta oblika ne ujema dovolj dobro s sliko deformacij po teoriji I. reda, vsebuje preračun naslednje korake:

- Osnovni preračun po teoriji II. reda s samodejno izbranimi imperfekcijami, a s predpisano $v = L / x_{imp}$
- S tem dobimo vrednost kritične sile F_k
- Nov preračun izvedemo z dovolj veliko silo F , ki skupaj s faktorjem obremenitve $kQ = 1.35$ znaša $\approx 80\% F_k$
- Dobimo prave deformacije po teoriji II. reda, ki prevladajo nad teorijo I. reda in vozliščne imperfekcije shranimo v datoteko
- Izvedemo preračun s pričakovano obratovalno silo F in včitamo imperfekcije iz datoteke
- Zadnji korak ponavljamo tako dolgo, dokler ne dosežemo dovoljene limitne napetosti bodisi v cevi ali v batnici cilindra.
- Če so deformacije po teoriji II. reda obratne glede tiste po teoriji I. reda, je **kritična sila presežena**.

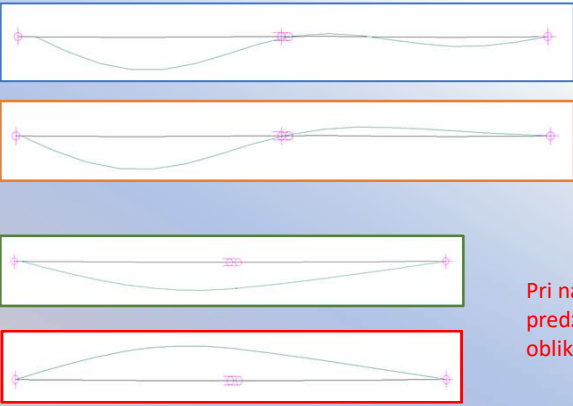


Računska osna sila F mora biti manjša od kritične F_k . Potek deformacij je pri tem gotovo ustrezen poteku deformacij 1. lastne vrednosti. Glede na $v = L / x_{imp}$ jih program prilagodi vozliščnim pomikom v prečni smeri cilindra.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

22

22



Deformacije po teoriji I. reda

Deformacije po teoriji II. reda

Paziti je treba na pravilne predznake!

Pri nadkritični sili $F > F_k$ deformacije spremenijo predznak, oziroma preskočijo v deformacijsko obliko 2. lastne vrednosti (primer: Euler 2)

Na osnovi deformacij zapis imperfekcij v datoteko

F_k $F < F_k$

F_{obr} + $\sigma \leq \sigma_{lim}$

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

23

MOMENTI VPETJA

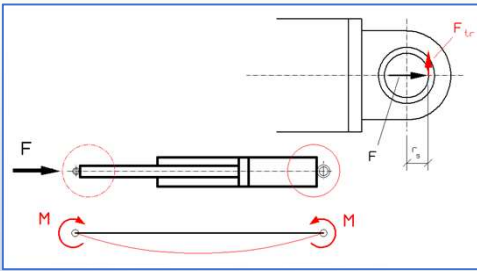
Kadar cilindar spreminja nagibni kot dela stroja, na primer nagib roke žerjava, pride do relativnega zasuka med sornikom in ušesom cilindra (ležajem).

Velika sila v cilindru F in trenje μ v ležaju povzročata silo trenja F_{tr} , ki na polmeru sornika r_s povzroči moment v točkah vpetja cilindra.

$$M = F * \mu * r_s$$

GL predpisuje, da upoštevani koeficient trenja ne sme biti manjši od $\mu = 0.08$

Usmerjenost momenta M v vozliščih vpetja cilindra mora biti seveda usmerjen v smislu dodatne obremenitve cilindra, torej v smislu povečevanja njegovih deformacij.



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

24

PRERAČUNSKI MODEL CILINDRA

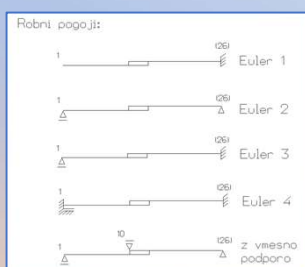


FEM / MKE MODEL CILINDRA

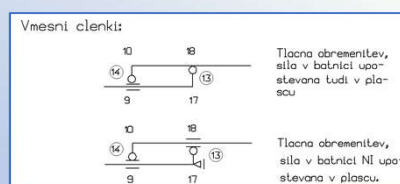
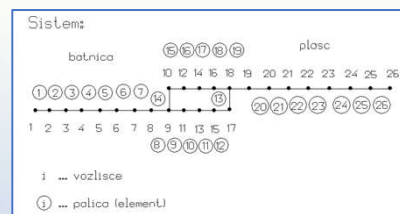
Sistem - shema modela cilindra - je v programu stalna. Vozlišča in podprta vozlišča se postavijo samodejno na ustrezna mesta glede na zahteve uporabnika in geometrijo cilindra.

Palici 13 in 14 imata predoločeno dolžino 1 mm in omogočata upoštevati prekritje med cevjo in batnico.

Za preračun standardnih Eulerjevih uklonskih problemov uporablja program naslednja podprtja:



Oсна sila se običajno upošteva tudi v cevi. Če tega ne želimo, je v algoritmu vgrajena možnost sprostitev vozlišča 18 v smeri osi cilindra.



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

25

25

- Program izračuna in upošteva vztrajnostne momente cevi in batnice
- Lastne teže gradnikov pretvori v kontinuirne obremenitve q_i .
- Lastne teže so uporabljene tudi kot motilne sile za teorijo II. reda. Za cilindar po Eulerjevem 1. primeru lahko vpišemo še dodatno motilno silo na vrhu batnice.

Za **nestandardna podprtja** cilindra:

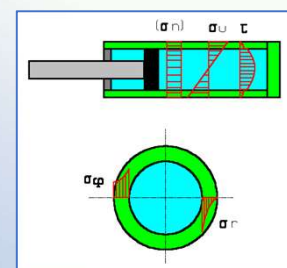
- Program premakne vozlišča, da obremenitve in tudi podpore delujejo na pravih mestih.
- Možnih je do 6 obremenitev (sile, momenti)
- Do 5 podpor (z vsemi komponentami)

NAPETOSTI V CILINDRU

Napetosti v cilindru so prostorske.

Normalna in upogibna se superponirata, poleg tega pa delujeta radialna in cirkularna napetost


1. σ_r – radialna napetost zaradi tlaka olja
2. σ_φ – cirkularna napetost zaradi tlaka olja
3. σ_N – normalna napetost zaradi osne sile
4. σ_u – upogibna napetost
5. τ – strižna napetost
6. σ_p – primerjalna napetost



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

26

26



Radialna napetost

$$\sigma_r(r = r_n) = 0.01 * p \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_r(r = r_z) = 0$$

Cirkularna napetost

$$\sigma_\varphi(r = r_n) = p * \frac{r_z^2 + r_n^2}{r_z^2 - r_n^2} * 0.01 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_\varphi(r = r_z) = 2 * \frac{p * r_n^2}{r_z^2 - r_n^2} * 0.01 \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$$

Za katera mesta izračunava program napetosti


1. napetosti na zunanjem premeru cevi
2. napetosti na notranjem premeru cevi
3. napetosti v prekritju cevi z batnico
4. napetosti v batnici
5. napetosti v batnici v prekritju s cevjo

Za mesti 1 in 2 izračuna še primerjalno napetost

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\varphi^2 + (\sigma_N + \sigma_u)^2 - \sigma_r * \sigma_\varphi - \sigma_r * (\sigma_N + \sigma_u) - \sigma_\varphi * (\sigma_N + \sigma_u) + 3 * \tau^2}$$

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018 27

27



TEORIJA II. REDA

Euler je nastavil ravnotežje na izseku dx deformiranega sistema. Momentna enačba za točko na vrhu se glasi

$$-M + M + \frac{\partial M}{\partial x} dx - N dx * \sin \varphi - T dx * \cos \varphi + n(x) \frac{dx^2}{2} * \sin \varphi + t(x) \frac{dx^2}{2} * \cos \varphi = 0$$

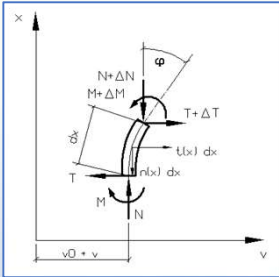
Teorija II. reda obravnava majhne deformacije, zato

- Kvadratna člena sta zanemarljivo majhna
- $\sin \varphi \approx tg \varphi = \frac{d(v_0 + v)}{dx} = v'_0 + v'$
- $\cos \varphi \approx 1$
- Po upoštevanju navedenih substitucij delimo enačbo z dx

$$\frac{dM}{dx} - N(v'_0 + v') - T = 0$$

- Dobljeno enačbo še enkrat odvajamo po x
- Upoštevamo enačbo upogibnice $M = -E * I * v''$ in $\frac{dT}{dx} = -t(x)$
- Enačbo množimo z (-1)

$$(EIv''')' + N(v'_0 + v'') + N'(v'_0 + v') = t(x)$$



Horizontalno ravnotežje:
 $-T + T + \Delta T + t(x)dx = 0$
 $\partial T / \partial x * dx = -t(x) dx$
 $\rightarrow dT/dx = -t(x)$

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018 28

28



- Upoštevamo konservativno delujočo, konstantno vzdolžno silo N
- Konstanten vztrajnostni moment I
- V okviru izpeljave ne upoštevamo prečne kontinuirne obremenitve (jo kasneje upoštevamo posebej)

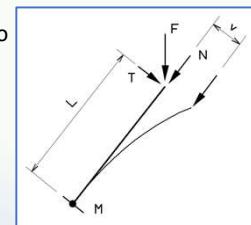
$$EIv^{iv} + Nv'' = 0 \quad \text{V tem zapisu je } v \text{ skupna deformacija } v_0 + v$$

To enačbo lahko sedaj 2x integriramo in dobimo po skrajšano prikazanem postopku enačbo

$$EIv'' + N * v = 0 \rightarrow -M + N * v = 0 \rightarrow M = N * v$$

Če je nosilec že obremenjen z momentom (po teoriji I. reda), velja torej

$$M_{II} = M_I + N * v$$

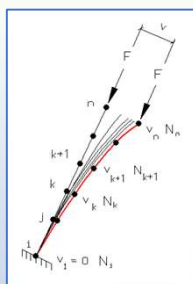


Ta preprost zapis je osnova teorije II. reda. Da ozadje ni tako enostavno, je pokazala izpeljava že samo glavnih korakov.

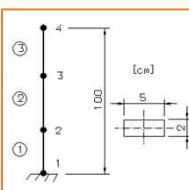
Algoritem za uporabo v FEM / MKE programih je izpeljal prof. dr. Christian Petersen, v obliki podprogramov pa jih je zapisal dr. Bernhard Falter. Postopek za klasičen preračun teleskopske roke avtožerjava je prikazan v Strojniškem vestniku 7-8 / 1982, A. Hercog: Izračun upogibnih momentov v teleskopski ročici avtožerjava po teoriji II. reda z računalnikom HP-41 C.

Izračun po teoriji II. reda je iterativen

- Postopek izračuna je iterativen
- Kriterij zaključka iteracij: $\Delta v \leq \epsilon$

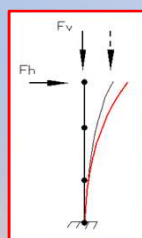


Kako lahko ugotovimo ali program podpira teorijo II. reda?



Model

Podatki:
 A = 10 cm²
 I = 20.8 cm⁴
 E = 2.1 * 10⁴ kN/cm²
 Fv = 50 kN
 Fh = 1 kN



Stoječa palica

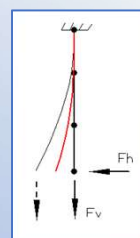
Teorija I. reda

Pomik vx vozlišča 4	0.0756
Oсна sila N v vozlišču 1	-50.0
Moment Mz v vozlišču 1	-10.0

Teorija II. reda

Pomik vx vozlišča 4	0.1390
Oсна sila N v vozlišču 1	-50.0
Moment Mz v vozlišču 1	-16.95

Enote: [kN], [dm]



Viseča palica

Teorija I. reda

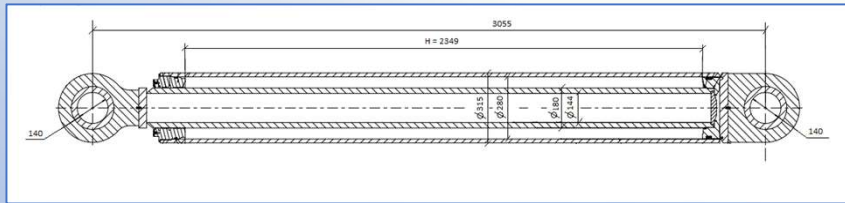
Pomik vx vozlišča 4	-0.0756
Oсна sila N v vozlišču 1	+50.0
Moment Mz v vozlišču 1	-10.0

Teorija II. reda

Pomik vx vozlišča 4	-0.0521
Oсна sila N v vozlišču 1	+50.0
Moment Mz v vozlišču 1	-7.396

Ni napaka, če so vrednosti po teoriji II. reda enake onim po teoriji I. reda.

Primer izračuna za cilindar po 2. EULERJEVEM PRIMERU



Lcil = 3055 + 2349 = 5404 mm
 Cev 315 / 280 mm
 Batnica 180 / 144 mm

```

PRERACUN CILINDROV
Datum : 29. Jun. 2014 A. Hercog
Projekt: Poseben zerjav
Poz. : Cilinder UP3189

Dolzine [dm]   sila [kN]

Cilinder:
Lcil, Lvpetja, Euler      : 54.04 54.04 | 2
Batnica L, dz, dn, Sigpl  : 28.08 / 1.8 1.444 | 46
Plasc L, dz, dn, Sigpl    : 27.07 / 3.15 2.8 | 64
Pretočna odprtina [dm]   : 0.000
Modul elastičnosti [kN/cm2]: 21000

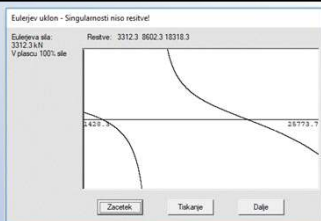
Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA
    
```



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

31

31



Graf Eulerjeve pogojne enačbe

Oblika upogibnice - deformacije



F < 3299 kN



F > 3299 kN

Dovoljena limitna napetost:

Cev - plašč $\sigma_{lim} = \frac{f_y}{\gamma_m} = \frac{64}{1.1} = 58.1 \text{ kN/cm}^2$

Batnica $\sigma_{lim} = \frac{f_y}{\gamma_m} = \frac{46}{1.1} = 41.8 \text{ kN/cm}^2$



```

FemCylinder
V6.0 (C) 1991/14.AHSoR 18.54

Projekt: Poseben zerjav / Cilinder UP3189 / 29. Jun. 2014 A. Hercog
Teorija II. reda IT = 2
NAPETOSTI [kN/cm2] Dolzina cilindra [dm] 54.04
***** Dolzina vpetja [dm] 54.04
Batnica [dm],[kN/cm2] 28.08 - 1.800 / 1.444 | 46.0
Euler 2 Plasc [dm],[kN/cm2] 27.07 - 3.150 / 2.800 | 64.0
Modul elast. [kN/cm2] 21000
Imperfekcije: L / 450

Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA

Faktor lastne teze: G * 1
Sila [kN]: na bat in plasc: -1350.0 * 1.35
Sig-r Sig-fi Sig-n Sig-u Tau Sig-p
-----
PLASC:
0.0 22.3 -11.1 -4.7 -0.0 33.2 zunanji premer
-3.0 25.2 -11.1 -4.2 -0.0 36.0 notranji premer
0.0 0.0 -0.0 -4.7 6.0 11.3 v prekritju

BATNICA:
0.0 0.0 -20.1 -17.0 0.1 37.1
0.0 0.0 -20.1 -16.7 -10.7 41.2 v prekritju

Tlak v cilindru 296.0 [bar] delovni tlak 219.2 [bar]
Povecanje notr. premera 0.348 [mm] 0.258 [mm]
Max. deformacija 17.4 [mm]
Max. povec 17.3 [mm] vklj. imperf. 29.1 [mm]
Eulerjeva uklonska sila 3312.3 [kN] (v plascu 100%)
Uklonska sila (teor. II. reda) 3299.4 [kN] (v plascu 100%)
    
```

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

32

32

VARNOST glede na KRITIČNO UKLONSKO SILO F_k

Kritično uklonsko silo torej natančno poznamo in njeno vrednost lahko smatramo za validirano, saj sta rezultata Eulerjeve enačbe in teorije II. reda zares skoraj identična.

Toda to še ni dovoljena obratovalna sila cilindra. Ta znaša

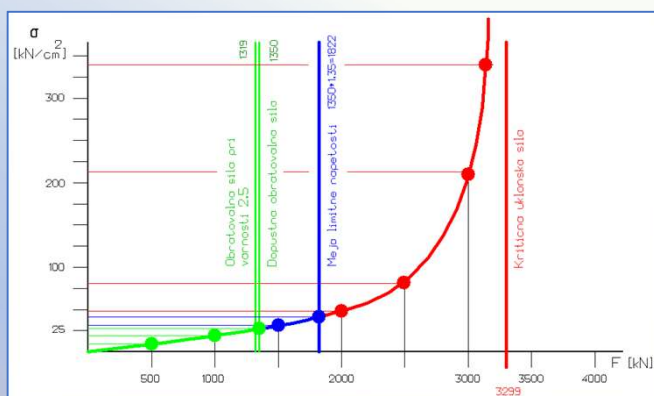
$$F_{obr} = \frac{F_k}{S}$$

- Da je napetost v delih cilindra manjša od dopustne limitne, je potreben, a ne zadosten pogoj
- Obnesla se je varnost 2.5
- Za presojo je merodajna vrednost:

$$\frac{d\sigma}{dF} = ?$$

Vse pogostejša uporaba visoko trdnih jekel za konstrukcije in tudi cilindre še povečuje vpliv elastičnosti, zato je treba trdnostne analize opraviti še dosledneje.

33



Z dopustno obratovalno silo po metodi limitnih napetosti 1350 kN se dobro ujema obratovalna sila 1319 kN, ki jo dobimo z varnostjo $S = 2.5$ glede na kritično uklonsko silo F_k .

$$S = 2.5$$

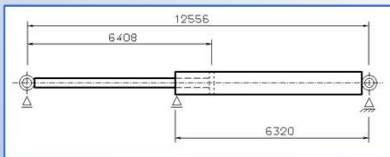
34

Dibrocje	F	σ	$\Delta \sigma$	$\Delta \sigma / kN$
	[kN]	[kN/cm ²]	[kN/cm ²]	[cm ²]
●	3250	1180		
●	3000	208.2	971.8	3.6872
●	2500	80.7	127.5	0.2550
●	2000	46.2	32.5	0.0650
●	1500	31.1	17.1	0.0342
●	1000	19.3	11.8	0.0236
●	500	9.4	9.9	0.0198

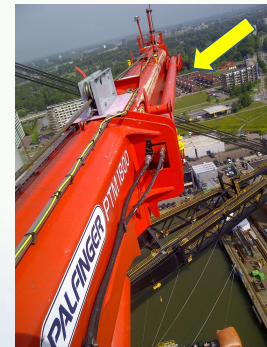
Posebne vrednosti

Dibrocje	F	σ	Pomen
	[kN]	[kN/cm ²]	
●	1822	41.2	Faktorirana sila dopustne obratovalne 1350*1.35
●	1350	27.2	Dopustna obratovalna sila po limitnih napetostih
●	1319	26.4	Dopustna obratovalna sila pri uklonski varnosti 2.5

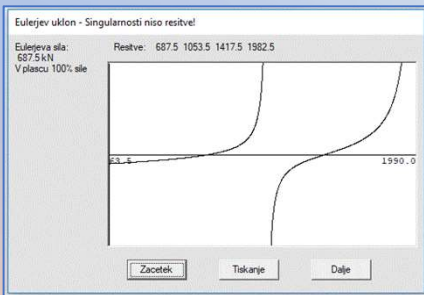
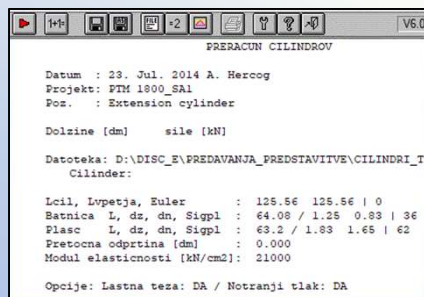
Primer izračuna cilindra za teleskopiranje – NESTANDARDEN cilindar



L cil = 12556 mm (izvlečen)
 H = 6000 mm
 Batnica $\varnothing 125 / \varnothing 83$ mm
 Plašč – cev $\varnothing 183 / \varnothing 165$ mm



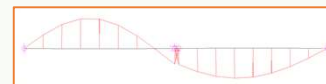
Program FEMCylinder podpira sicer tudi cilindar, ki je na koncu cevi še dodatno podprt.
 Cilinder bo preračunan na oba načina, torej tudi kot NESTANDARDEN cilindar. Primerjava obeh preračunov bo pokazala še nekaj pasti.



Deformacije in potek momenta



Cilinder z vmesno podporo



Podatki

Rezultati

```

Projekt: P1M 1800_SAl / Extension cylinder / 23. Jul. 2014 A. Hercog
Teorija II. reda IT = 2
NAPETOSTI [kN/cm2] Dolzina cilindra [dm] 125.56
***** Dolzina vpetja [dm] 125.56
Batnica [dm], [kN/cm2] 64.08 - 1.250 / 0.830 | 36.0
Plasc [dm], [kN/cm2] 63.20 - 1.830 / 1.650 | 62.0
Modul elast. [kN/cm2] 21000
Imperfekcije: L / 450
Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA
Faktor lastne teze: C * 1
Sila [kN]: na bat in plasc: -406.0 * 1.35 / na plasc: 0.0 * 1.35
Sig-r Sig-fi Sig-n Sig-u Tau Sig-p
PLASC:
0.0 22.2 -11.1 -18.6 0.1 45.1 zunanji premer
-2.6 24.8 -11.1 -16.8 0.1 45.6 notranji premer
0.0 0.0 0.0 10.0 -4.8 13.1 v prekritju
BATNICA:
0.0 0.0 -8.0 -24.4 -0.1 32.3
0.0 0.0 -8.0 -12.8 3.4 21.6 v prekritju
Tlak v cilindru 255.7 [bar] delovni tlak 189.4 [bar]
Povečanje notr. premera 0.201 [mm] 0.149 [mm]
Max. deformacija 68.0 [mm]
Max. povz. Eulerjeva uklonska sila 637.5 [kN] (v plascu 100%)
Uklonska sila (teor. II. reda) 702.2 [kN] (v plascu 100%)
    
```

Graf pogojne funkcije

PRERACUN CILINDROV

Datum : 23. Jul. 2014 A. Hercog
 Projekt: PTH 1800_SAI
 Poz. : Extension cylinder

Dolzine [dm] sila [kN]

Datoteka: D:\DISC_E\PREDAVANJA_PREDSTAVITVE\CILINDRI_T2R_2018\Cilinder:

Lcil, Lvpetja, Euler : 125.56 125.56 (Nestandarden
 Batnica L, dz, dn, Sigpl : 64.08 / 1.25 0.83 | 36
 Flasc L, dz, dn, Sigpl : 63.2 / 1.83 1.65 | 62
 Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 62.36 :Y 125.56 :XY
 Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:-405
 Pretocna odprtina [dm] : 0.000
 Modul elastičnosti [kN/cm²] : 21000

Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA

T1r

T2r

Projekt: PTH 1800_SAI / Extension cylinder / 23. Jul. 2014 A. Hercog
 D:\Disc_E\Predavanja_Predstavitev\Cilindri_T2r_2018\Datoteke_FEMCil\CPUP009

Teorija II. reda II = 2

NAPOSTI [kN/cm²] Dolzina cilindra [dm] 125.56
 ***** Dolzina vpetja [dm] 125.56
 Batnica [dm],[kN/cm²] 64.08 - 1.250 / 0.830 | 36.0
 Euler 10 Flasc [dm],[kN/cm²] 63.20 - 1.830 / 1.650 | 62.0
 Modul elast. [kN/cm²] 21000

Imperfekcije: L / 450

Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 62.36 :Y 125.56 :XY
 Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA

Faktor lastne teze: G * 1 Faktor obremenitve: F * 1.35
 Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:-405

Sig-r	Sig-fi	Sig-n	Sig-u	Tau	Sig-p
0.0	22.2	-11.1	-10.3	0.0	37.8 zunanji premer
-2.6	24.8	-11.1	-9.2	0.0	45.6 notranji premer
0.0	0.0	0.0	9.2	-4.4	12.0 v prekritju

FLASC:

0.0	22.2	-11.1	-10.3	0.0	37.8 zunanji premer
-2.6	24.8	-11.1	-9.2	0.0	45.6 notranji premer
0.0	0.0	0.0	9.2	-4.4	12.0 v prekritju

BATNICA:

0.0	0.0	-8.0	-15.9	-0.1	23.9
0.0	0.0	-8.0	-11.4	3.1	20.1 v prekritju

Tlak v cilindru 255.7 [bar] delovni tlak 189.4 [bar]
 Povečanje notr. premera 0.201 [mm] 0.149 [mm]
 Max. deformacija 39.6 [mm]
 Max. povses 39.3 [mm] vklj. imperf. 53.2 [mm]
 Eulerjeva uklonska sila ni racunana
 Uklonska sila (teor. II. reda) 701.3 [kN] (v plascu 100%)

45.1 zunanji premer
 45.6 notranji premer
 13.1 v prekritju

32.3
 21.6 v prekritju

37

Enak cilinder, a preračunan kot NESTANDARDEN

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

37

IMPERFEKCIJE

PTH 1800_SAI / Extension cylinder / 24. Jul. 2014 A. Hercog
 D:\Disc_E\Predavanja_Predstavitev\Cilindri_T2r_2018\Datoteke

Imperf.: 450

Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 62.36 :Y 125.56 :XY
 Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA
 Faktor lastne teze: 1 Faktor obremenitve: 1.35
 Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:-405

Enota dolzine [mm]

Teorija I. reda

Imperfekcije v vnosilicah (navzadol negativne):

Vnosl. i	Imperf.	Vnosl. i	Imperf.
1	0.0	14	0.7
2	-5.8	15	1.1
3	-10.5	16	1.1
4	-13.3	17	1.5
5	-13.9	18	1.5
6	-12.1	19	7.4
7	-9.6	20	11.6
8	-4.2	21	13.8
9	0.0	22	14.0
10	0.0	23	12.4
11	0.4	24	9.2
12	0.4	25	4.5
13	0.7	26	0.0

T1r

T2r

Projekt: PTH 1800_SAI / Extension cylinder / 24. Jul. 2014 A. Hercog
 D:\Disc_E\Predavanja_Predstavitev\Cilindri_T2r_2018\Datoteke_FEMCil\CPUP009

Teorija II. reda II = 2

NAPOSTI [kN/cm²] Dolzina cilindra [dm] 125.56
 ***** Dolzina vpetja [dm] 125.56
 Batnica [dm],[kN/cm²] 64.08 - 1.250 / 0.830 | 36.0
 Euler 10 Flasc [dm],[kN/cm²] 63.20 - 1.830 / 1.650 | 62.0
 Modul elast. [kN/cm²] 21000

Imperfekcije: L / 450 vpisane

Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 62.36 :Y 125.56 :XY
 Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA

Faktor lastne teze: G * 1 Faktor obremenitve: F * 1.35
 Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:-405

Sig-r	Sig-fi	Sig-n	Sig-u	Tau	Sig-p
0.0	22.2	-11.1	-10.3	0.1	44.9 zunanji premer
-2.6	24.9	-11.1	-16.5	0.1	45.4 notranji premer
0.0	0.0	0.0	9.7	-4.7	12.7 v prekritju

BATNICA:

0.0	0.0	-8.0	-24.5	-0.0	32.4
0.0	0.0	-8.0	-12.4	3.3	21.2 v prekritju

Tlak v cilindru 255.7 [bar] delovni tlak 189.4 [bar]
 Povečanje notr. premera 0.201 [mm] 0.149 [mm]
 Max. deformacija 67.4 [mm]
 Max. povses 67.2 [mm] vklj. imperf. 81.1 [mm]
 Eulerjeva uklonska sila ni racunana
 Uklonska sila (teor. II. reda) 701.3 [kN] (v plascu 100%)

45.1 zunanji premer
 45.6 notranji premer
 13.1 v prekritju

32.3
 21.6 v prekritju

38

Nestandarden cilinder s POPRAVLJENIMI IMPERFEKCIJAMI

Vrednost imperfekcij

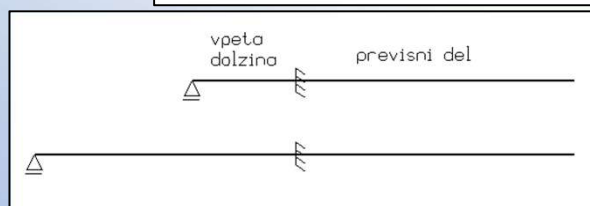
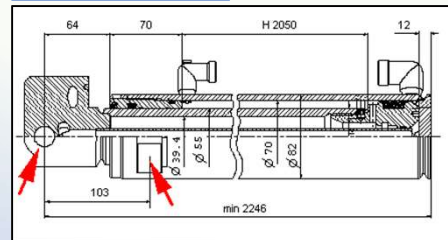
Pravilen potek imperfekcij je torej predpogoj.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

38

Cilinder, obravnavan kot 3. Eulerjev primer

- Batnica vpeta členkasto na teleskop
- Cev vpeta „nevrtiljivo“ na svojem sprednjem koncu
- Zadnji del cevi je prevesen in samo naslonjen na konstrukcijo



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

PRERACUN CILINDROV

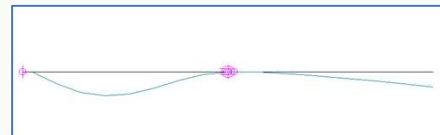
Datum : 30. Jun. 2014 A. Hercog
 Projekt: Roka žerjava
 Poz. : Cilinder

Dolzine [dm] sila [kN]

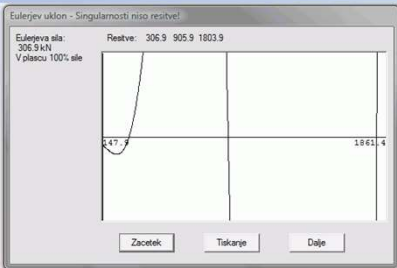
Cilinder:

Lcil, Lvpetja, Euler : 42.96 21.53 | 3
 Batnica L, dz, dn, Sigpl : 22.14 / 0.55 0.394 | 46
 Plasc L, dz, dn, Sigpl : 21.62 / 0.82 0.7 | 52
 Pretocna odprtina [dm] : 0.000
 Modul elastičnosti [kN/cm²] : 21000

Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA



Podatki
 in preračun za
 3. Eulerjev primer



Projekt: Roka žerjava / Cilinder / 30. Jun. 2014 A. Hercog
 C:\Disc_E\Predavanja_Predstavitve\Cilindri\Euler3.CIL
 Teorija II. reda II = 2
 NAPETOSTI [kN/cm²] Dolzina cilindra [dm] 42.96
 ***** Dolzina vpetja [dm] 21.53

Euler 3 Batnica [dm], [kN/cm²] 22.14 - 0.550 / 0.394 | 46.0
 Plasc [dm], [kN/cm²] 21.62 - 0.820 / 0.700 | 52.0
 Modul elast. [kN/cm²] 21000
 Imperfekcije: L / 450

Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA

Faktor lastne teze: G = 1
 Sila [kN]: na bat in plasc: -92.0 * 1.35

Sig-z	Sig-fi	Sig-n	Sig-u	Tau	Sig-p
0.0	17.3	0.0	1.0	0.0	17.8 zunanji premer
-3.2	20.6	0.0	0.8	0.0	22.7 notranji premer
0.0	0.0	8.7	1.6	-1.5	10.6 v prekritju

BATNICA:

0.0	0.0	-10.7	-6.7	-0.1	17.4
0.0	0.0	-10.7	-6.3	1.9	17.4 v prekritju

Tlak v cilindru 322.7 [bar] delovni tlak 239.1 [bar]
 Povečanje notr. premera 0.072 [mm] 0.053 [mm]
 Max. deformacija 3.7 [mm]
 Max. poveč 3.6 [mm] vklj. imperf. 8.4 [mm]
 Eulerjeva uklonska sila 306.9 [kN] (v plascu 100%)
 Uklonska sila (teor. II. reda) 239.6 [kN] (v plascu 100%)

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018



Cilindri za teleskopiranje roke žerjava pa so izpostavljeni še prisilnim deformacijam. Upoštevajmo, da se točka vpetja batnice premakne za 100 mm, kar ni pretirana vrednost.

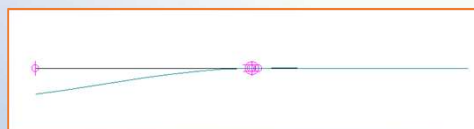
V6.0 © 1991/14 AHSoft 21:21						
Projekt: Roka žerjava / Cylinder / 30. Jun. 2014 A. Hercog						
C:\Disc_F\Predavanja_Predstavitve\Cilindri\Euler3.CIL						
Teorija II. reda IT = 2						
NAPEKOSTI [kN/cm ²]	Dolžina cilindra [dm]	42.96				
----- Dolžina vpetja [dm] 21.53						
Euler 3	Batnica [dm]	22.14	-	0.850 / 0.394	46.0	
	Plascu [dm]	21.62	-	0.820 / 0.700	82.0	
	Modul elast. [kN/cm ²]	21000				
	Imperfekcije: L / 480					
Opcije: Lastna teža: DA / Notranji tlak: DA						
Prisilne def.: v 1 : 0.000, 1.000, 0.000						
Faktor lastne teže: C + 1						
Sile [kN]: na bat in plascu: -92.0 * 1.35						
Sig-r	Sig-fi	Sig-n	Sig-u	Tau	Sig-p	

PLASC:	0.0	17.3	0.0	1.0	0.0	17.8 zunanj
	-3.1	20.6	0.0	0.8	0.0	22.7 notranj
	0.0	0.0	8.7	5.1	-3.5	15.1 v prek

BATNICA:	0.0	0.0	-10.7	-31.0	0.7	41.8
	0.0	0.0	-10.7	-15.9	4.4	27.7 v prekritju

Tlak v cilindru	322.7 [bar]	delovni tlak	299.1 [bar]			
Povečanje notr. premera	0.072 [mm]	0.059 [mm]				
Max. deformacija	100.0 [mm]					
Max. poves	100.0 [mm]	vklj. imperf.	100.0 [mm]			
Eulerjeva uklonska sila	396.5 [kN]	(v plascu 100%)				
Uklonska sila (teor. II. reda)	299.6 [kN]	(v plascu 100%)				

PRISILNE DEFORMACIJE



Napetosti v batnici so tudi do 2.5 x višje!

Cilinder po 2. Eulerjevem primeru se zaradi sproščenege zasuka vpetja lahko celo lažje prilagodi prisilnim deformacijam. Tak cilinder se postavi v tetivno lego med dvema zamaknjenima točkama.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

41

41

Vrste vleženja sornikov cilindra ali cilinder, obremenjen s prečnim momentom M_y

Vleženje v prečni smeri:

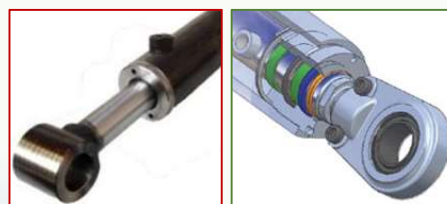
- Togo, preprosteje, nižja cena
- Z nagibnim ležajem, nekoliko dražje, tehniško upravičeno

Primer teleskopskega offshore žerjava PTM 600

Znatne horizontalne obremenitve:

- Nagibi plovila / ploščadi kamor je žerjav montiran
- Dinamika zaradi offshore vplivov (valovanje $H_{sig} = 2$ m)
- Horizontalni pospeški zaradi vpliva morja
- Vzdolžen in stranski vlek bremena

Za takšne obratovalne pogoje ne bi smelo biti dvoma o izboru načina vleženja cilindrov!



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

42

42



Preračun cilindra brez prečnega momenta My

```

Projekt: Cilinder z momentom My / CPUP0201 / 21. Jul. 2017 A. Hercog
D:\Disc_F\Test_Datoteke\FEMCil_zMy\CPUP0201_zMomentom.CIL
Teorija II, reda IT = 2
NAPETOSTI [kN/cm2] Dolzina cilindra [dm] 40.80
***** Dolzina vpetja [dm] 40.80
Batnica [dm],[kN/cm2] 21.12 - 1.250 / 0.980 | 45.0
Euler 10 Plasc [dm],[kN/cm2] 20.67 - 1.900 / 1.650 | 62.0
Modul elast. [kN/cm2] 21000
Imperfekcije: L / 400
Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 40.8 :XY
Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA
Faktor lastne teze: G * 1 Faktor obremenitve: F * 1.35
Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:614 0 :

```

Sig-r	Sig-fi	Sig-n	Sig-u	Sig-v	Sig-p
FLASC:					
0.0	23.8	-11.9	-7.6	-0.1	37.5 zunanji premer
-3.9	27.7	-11.9	-6.6	-0.1	40.9 notranji premer
0.0	0.0	-0.0	-7.6	6.4	13.5 v prekritju
BATNICA:					
0.0	0.0	-17.5	-20.3	0.0	37.8
0.0	0.0	-17.5	-19.5	-9.5	40.5 v prekritju

```

Tlak v cilindru 387.7 [bar] delovni tlak 287.2 [bar]
Povecanje notr. premera 0.226 [mm] 0.168 [mm]
Max. deformacija 17.7 [mm]
Max. povec 17.6 [mm] vklj. imperf. 27.8 [mm]
Eulerjeva uklonska sila ni racunana
Uklonska sila (teor. II. reda) 1372.9 [kN] (v plascu 100%)

```

Trdnostna analiza dovoljuje obratovalno silo **614 kN**.

$$\sigma_{lim} = \frac{f_y}{\gamma_m} = \frac{45}{1.10} = 40.9 \text{ kN/cm}^2$$

Zahteva po zadostni varnosti proti kritični uklonski sili pa

$$F_{dop} = \frac{F_k}{S} = \frac{1372.9}{2.5} = 549 \text{ kN}$$

Uklonski problem torej narekuje obratovalno silo **549 kN**

Celoten preračun in analiza sta prikazana v A. Hercog: Cilinder obremenjen z momentom

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

43

43



Preračun cilindra s prečnim momentom My

```

*****
PHENIX
PTM600_11 21. Jul. 2017 A. Hercog Trd Limit. nap Izb EN 13001
XY: teor. II, reda XZ: teor. II, reda Cent Str nag 4.2
kG = 1.220 kG = 1.340 kH = 1.220 kHc = 1.220 kW = 1.000
Vmax = 40 [m/min] Pmax = 50 [kN] Ddrv = 18 [mm] EN13852-1 H1/3 = 2 Vd 1.2 Vc .5
Psi min = neom. Psi max = neom. Fx Fz
Preobremenitve: Trd: 1.05 Izb: 1.05 SorT: 1.05 SorP: 1.05 Tol: 0.010 m Qo: 5 kN
L [m]: 2.739 17.600 Hmin [m]: 4 / dH [m]: 2 dVKO
*****
Sile ravnine XZ: Element: 1 pal.: 8 ( Glob. pal. 14 ) [kN], [m]

```

Fi	F10 = 90.0													
Fil [o]	Dd [m]	Q [kN]	Psi	Tzz	Tzk	Mtz	Mtk	Myz	Myk					
80.0	4.2	14.3	3.497	-9.182	-9.182	0.035	0.035	-0.350	-12.813					
70.0	7.2	16.4	2.804	-8.960	-8.960	0.047	0.047	-1.674	-10.983					
60.0	10.0	17.1	2.424	-8.032	-8.032	0.057	0.057	-3.828	-9.413					
50.0	12.3	17.1	2.204	-6.861	-6.861	0.068	0.068	-6.646	-7.899					
40.0	14.3	15.8	2.103	-4.903	-4.903	0.077	0.077	-10.012	-5.986					
30.0	15.8	14.9	2.039	-2.613	-2.613	0.090	0.090	-14.542	-3.755					
20.0	16.9	14.7	1.986	0.700	0.700	0.110	0.110	-21.696	-0.721					
10.0	17.4	9.4	2.196	6.324	6.324	0.105	0.105	-25.754	2.895					
0.0	17.5	5.6	2.542	11.593	11.593	0.091	0.091	-27.901	6.187					

Enak žerjav s togim prečnim vleženjem cilindra povzroča v cilindru prečne momente My.

- V strmih legah roke (cilinder iztegnjen) znaša prečni moment My 12.8 kNm v ušesu na batnici
- V položnih legah roke do 27.9 kNm v ušesu na cevi cilindra

Pojav momenta na batnico bo prav gotovo vplival na uklon in obremenitev, še znatnejši moment pa dodatno obremenjuje vleženje cilindra na steber žerjava → močnejši ležaj, sornik, izpostavljenost nastanka zračnosti

Omejimo se na vpliv momenta na batnico cilindra.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

44

44



```

Projekt: Cilinder z momentom My / CPUP0201 / 21. Jul. 2017 A. Hercog
D:\disc_FVTest_Datoteke\FEMG11_zMy\CPUP0201_zMomentom.CIL
Teorija II. reda IT = 2
NAPESTOSTI [kN/cm2] Dolzina cilindra [dm] 40.80
***** Dolzina vpetja [dm] 40.80
Batnica [dm], [kN/cm2] 21.12 - 1.250 / 0.980 | 45.0
Euler 10 Plasc [dm], [kN/cm2] 20.67 - 1.900 / 1.650 | 62.0
Modul elast. [kN/cm2] 21000
Imperfekcije: L / 400
Podpore: mesto:vrsta 0 :Y 40.8 :XY
Opcije: Lastna teza: DA / Notranji tlak: DA
Faktor lastne teze: G * 1 Faktor obremenitve: 1.35
Netto sile: mesto:vrsta:velikost 0 :X:412 0 :M:128.1
-----
Sig-r Sig-fi Sig-n Sig-u Sig-v Sig-n
-----
PLASC:
0.0 16.0 -8.0 -9.2 -0.2 28.7 zunanji premer
-2.6 18.6 -8.0 -8.0 -0.2 30.2 notranji premer
0.0 0.0 -0.0 -9.2 7.8 16.3 v prekritju
BATNICA:
0.0 0.0 -11.8 -26.3 -0.1 38.1
0.0 0.0 -11.7 -23.4 -11.7 40.6 v prekritju
Tlak v cilindru 260.1 [bar] delovni tlak 192.7 [bar]
Povecanje notr. premera 0.152 [mm] 0.113 [mm]
Max. deformacija 24.7 [mm]
Max. poves 24.6 [mm] vklj. imperf. 34.8 [mm]
Eulerjeva uklonska sila ni racunana
Uklonska sila (teor. II. reda) 1372.9 [kN] (v plascu 100%)

```

Dovoljena limitna napetost znaša kot v prejšnjem primeru 40.9 kN/cm².

Z ozirom na trdnost cilindra znaša dovoljena obratovalna sila le še **412 kN!**

Ker se razmere uklonsko niso spremenile (osna sila je ostala enaka), ta s svojimi 549 kN dopustne sile ni več merodajen pogoj.

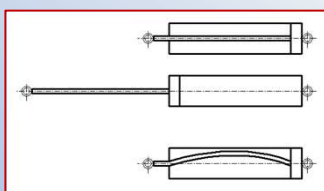
Zgolj po trdnostnem kriteriju znaša upad obratovalne sile od **614 kN na 412 kN** **- 33%**

Obratovalna sila se momentno obremenjenemu cilindru zmanjša od **549 kN na 412 kN**, torej za:

-25 %

45

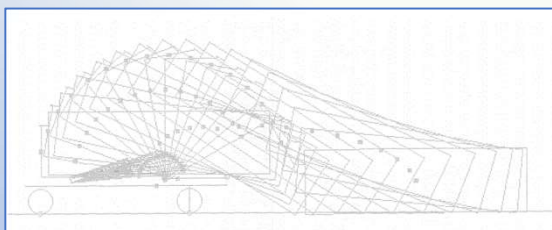
Nič ni nemogoče, vendar ...



Nakladalnik kontejnerjev

Tip PLT ima 2 nagibna cilindra.

- Pri nagibanju (praznjenje kontejnerja) je tlačno obremenjen, predvsem v prvi fazi nagibanja, a tedaj je cilindri praktično uvlečen
- Pri odlaganju in predvsem pri nakladanju kontejnerja pa je cilindri vlečni element.



PLT 22 naj bi pokrival tudi nosilnost 26 t. Trdnostno bi se za daljše kontejnerje izšlo, cilindri ni bil primeren. Kupljen od francoske firme je uklonil – uvlečen!

Razlogi ...

46



Ne samo računsko, tudi dejansko ...



Cilindri so dober in pregleden primer smotrne uporabe **teorije II. reda**.

V enaki meri velja metoda za tlačno obremenjene elastične nosilne konstrukcije. S tem seveda tudi za roke žerjavov, predvsem dolge in teleskopske.



Roka dolžine 45 m
jo dobesedno
zahteva



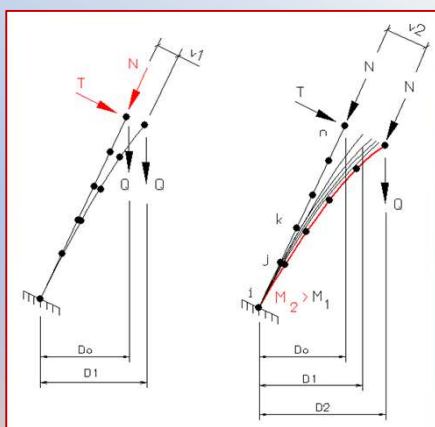
Tudi krajše pokažejo, da
si jo želijo. Moramo pa
razumeti, kaj nam
sporočajo.

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

47

47

Zelo poenostavljen model roke žerjava



- Silo bremena Q razstavimo v osno N in prečno silo T
- Prečna sila T povzroča v roki moment M , upogibno deformacijo in je motilna sila, ki sproži učinek teorije II. reda
- V deformiranem sistemu visi breme na večjem dosegu D_1
- Razumljivo, da je zaradi tega povečan moment v roki
- A to še ni vpliv teorije II. reda

- Zaradi deformacije dobi osna sila N momentno ročico in s tem dodatno znatno poveča upogibni moment
- Večji moment povzroči večjo deformacijo
- Izračun mora zato biti iterativen
- Določiti je treba kriterij zadostnosti natančnosti rezultata ϵ
- Končni moment po teoriji II. reda je običajno znatno višji od momenta po teoriji I. reda

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

48

48



Žerjavovodja ni imel nobene možnosti, žerjav pa tudi ne ...

Če si zatiskamo oči, naredi teorija II. reda iz žerjava formo vivo

Vir: YouTube, Bill Mechanic, Bending and failure of a crane

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

49

49



CILINDRI



- Majhno število delov
- Dva glavna sklopa
- Nekaj umetne snovi



Obljubil sem, da se k tej strani še vrnemo.

Morda pa je na cilindrih le nekaj več kot samo dva glavna sklopa iz jekla in nekaj umetne snovi??...



A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

50

50



HVALA ZA VAŠO POZORNOST

Aleksander Hercog

A. Hercog: Cilindri T2r, 2018

51