

DK 621.822.8

Izbira kotalnih ležajev

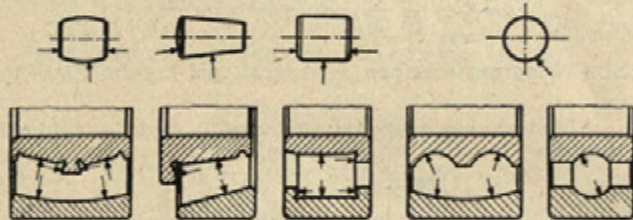
FRANCI STARIHA

I. Uvod

Glede na to, da skoraj vsaka strojniška in tehnična konstrukcija nasploh vsebuje različne strojne elemente, med drugimi tudi različne vrste kotalnih ležajev, je pravilna izbira in določitev funkcionalnih karakteristik kotalnih ležajev, namenjenih za določen ležajni sklop, zelo pomembna in dostikrat odločilna konstruktorjeva naloga.

Posebno vrednost dobiva pravilna izbira kotalnih ležajev v dandanašnjih časih, ko je zaradi relativno visokih cen ležajev največkrat vprašanje cene in ekonomičnosti konstrukcije najvažnejše pri odločitvi za določeno varianto oziroma izvedbo konstruktivne rešitve ležajnega sklopa.

V naši tehnični literaturi (slovenski in ostali jugoslovanski) ter standardih še nimamo uvedenega enotnega postopka za obravnavo izbire, proračuna in kontrole kotalnih ležajev različnih vrst in dimenzij. Naši konstruktorji pri delu uporabljajo tehnične podatke in navodila različnih tvrdk za proizvodnjo kotalnih ležajev, ki v obliki raznih komercialnih in tehničnih katalogov ter kratkih informacij posredujejo teoretične in praktične napotke.



Sl. 1. Delovne ploskve različnih vrst in delov kotalnih ležajev

Ni treba poudarjati, da se ti napotki precej razlikujejo med seboj in prevladuje glede tega precejšnja zmeda, ki sicer vselej ne povzroča škodljivih posledic, vendar precej onemogoča enotno in sistematično izbiro ter kontrolo kotalnih ležajev. Pri tem je omembe vredno, da se po različnih metodah dobljeni rezultati pogostoma toliko razlikujejo med seboj, da je dvomljiva celo uporabnost določenega ležaja za ležajni sklop, bodisi po tehničnih zmožnostih ali glede na njegovo ceno.

Pri mednarodni organizaciji za standardizacijo (ISO) se poseben komite, tako imenovani komite TC 4, ukvarja s problematiko kotalnih ležajev. Iz tega komiteja je bilo priobčenega že precej gradiva v obliki mednarodnih priporočil, ki rabijo kot temelji za izdelavo nacionalnih standardov na področju kotalnih ležajev.

Mednarodno priporočilo za proračun in izbiro kotalnih ležajev je izdelano po tehničnih normah in predpisih ozir. skušnjah znane švedske tovarne SKF. Omembe vredno je tudi, da je eden najbolj znanih strokovnjakov za tehniko kotalnih ležajev, slovit švedski inženir in dr. techn. A. Palmgren, najbolj zaslužen za sedanjí način in vsebino izbire in proračuna kotalnih ležajev.

Jugoslovanska komisija za standardizacijo (podkomisija za ležaje) je v zadnjih letih že izdala nekatere standarde za kotalne ležaje, ki v glavnem obsegajo najvažnejše definicije in razlage osnovnih pojmov ter funkcionalnih karakteristik.

Za izbiro in proračun kotalnih ležajev v praksi so najvažnejše naslednje funkcionalne karakteristike:

- trajnost ležaja v obratovalnih urah (t) ali skupnem številu vrtljajev (N),
- dinamična nosilnost v kp (C),
- statična nosilnost v kp (C₀),
- ekvivalentna obremenitev v kp (F) in
- vrtilna hitrost rotirajočega obroča v vrt./min (n).

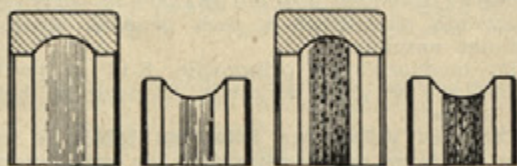
Za omenjene funkcionalne karakteristike veljajo naslednje razlage in definicije.

II. Funkcionalne karakteristike

Trajnost ležaja

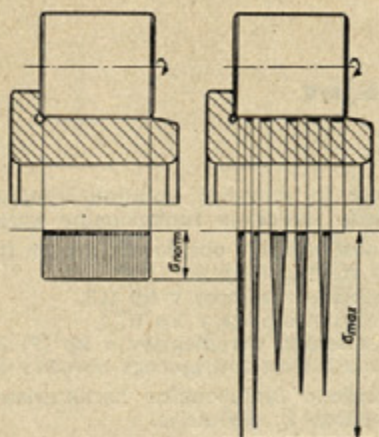
Trajnost kotalnih ležajev je omejena — kakor pri drugih strojnih elementih — z odpornostjo osnovnega materiala v sestavnih delih ležaja, obeh obročih ali kolutih in kotalnih telescih.

Trajnost ležaja se v principu konča, ko se na delovnih ploskvah (kotalnih in drsnih progah, sl. 1) pojavijo prva znamenja utrujenosti materiala. Znamenj normalne utrujenosti materiala ne smemo zamenjavati z znamenji prezgodnjega uničenja delovnih ploskev, ki je posledica nepravilne uporabe in slabega vzdrževanja posameznega kotalnega ležaja. Nepravilna uporaba in slabo vzdrževanje kotalnih ležajev karakterizirajo stanje in okoliščine obratovanja, ki so že ali pa bodo privedle do mehaničnih poškodb delovnih ploskev ležajev v tolikšnem obsegu, da niso več sposobne in primerne za normalno obratovanje ozir. opravljanje naloge med kinematičnimi in dinamičnimi procesi kotaljenja (sem spadajo: korozija, tuja telesa, slabo mazanje, slaba zaščita pred zunanjimi vplivi, nepravilna montaža ležaja in tudi ležajnega sklopa, poškodbe na najvažnejših ploskvah, visoka obratovalna temperatura, preobremenitve ipd.).



Sl. 2. Karakteristična znamenja za konec trajnosti

Normalno utrujanje materiala sestavnih delov ležaja je posledica notranjih procesov v njegovi kristalni strukturi. Odločilno vlogo imajo pri tem medsebojne napetosti v posameznih kristalih in med posameznimi sosednjimi kristali. V notranjosti kristalov so namreč kohezijske sile razmeroma večje kakor med posameznimi sosednjimi kristali. Če se v določenem področju materiala, zlasti blizu delovnih ploskev, zaradi različne kvalitete termične obdelave (kaljenja in popuščanja), pojavlja večje število neenakih kristalov, sistem ni več uravnotežen. Pri slučajnem pojavu razmeroma velikih krajevnih obremenitev na takem nestabilnem področju, začne razpadati vrhni sloji delovnih ploskev (sl. 2). Največje krajevne obremenitve se pojavljajo pri prehodu kotalnih teles (kroglic ali valjčkov) skozi ravno obremenitve (ravnina A—A, sl. 9). Posledica teh procesov, tj. razpadanja delovnih ploskev, je odpadanje mikroskopsko majhnih delčkov materiala. V začetku je ta proces zaznaven po



Sl. 3. Normalna in nenormalna razporeditev napetosti na kotalnih ploskvah ležaja

zelo tankih, komaj vidnih risih na kotalnih ploskvah, pozneje in med nadaljnjim obratovanjem ležaja pa proces razpadanja zaradi zmanjšanja nosilnosti ploskev (sl. 3) in povečanja specifičnih pritiskov, teče intenzivneje, dokler naposled ni poškodovan večji del kotalnih ploskev. To se nazorno vidi, ko se začne s kotalnih ploskev luščiti kovinske luske.

Ker so te neenakomernosti v kristalni strukturi materiala v glavnem nastajale med termično obdelavo sestavnih delov ležajev in dokončno formacijo oziroma stabilizacijo strukture, je razumljivo, da se procesi utrujanja materiala med obratovanjem obremenjenega ležaja razvijajo z različnim tempom pri različnih materialih, različnih sestavnih delih in različnih režimih termične obdelave.

Nesorazmernost med različnimi trajnostmi kotalnih ležajev se povzpne celo do razmerij 1:40 do 1:20, tako da je zasnova za proračun kotalnih ležajev še vedno precej nezanesljiva in problematična. Sedanji postopki so izdelani na podlagi verjetnostnega računa, potrjenega z dolgoletnimi skušnjami v laboratorijih in dosežki v praksi z uporabo kotalnih ležajev v najrazličnejših izvedbah ležajnih sklopov in raznovrstnih obratovalnih okoliščinah v vseh panogah strojništva in tehnike nasploh.

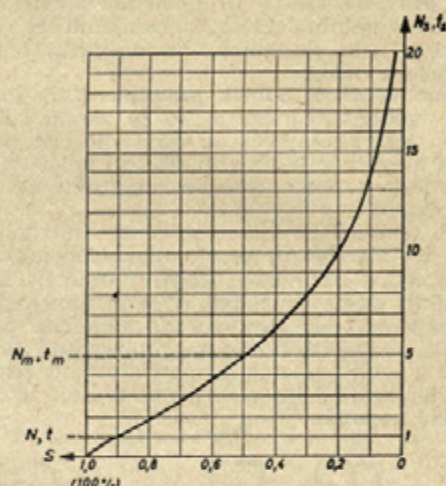
Po mednarodnem priporočilu R15 in predlogu JUS M.C.3.852 se glasi definicija trajnosti za kotalne ležaje takole:

»Trajnost določenega kotalnega ležaja je enaka številu vrtljajev (ali obratovalnih ur pri konstantni vrtilni hitrosti), kolikor jih vzdrži ležaj, preden se pokažejo prvi znaki utrujenosti materiala na delovnih ploskvah obročev in kotalnih telesih.«

Povrh te teoretične definicije pa je pojem trajnosti dopolnjen še z naslednjim:

N — računski trajnost ali tako imenovana »nominalna« trajnost kotalnega ležaja je enaka številu vrtljajev (ali obratovalnih ur t pri konstantni vrtilni hitrosti), kolikor jih vzdrži 90 % testiranih ležajev, preden se pokažejo prva znamenja utrujenosti materiala (sl. 4).

N_m — srednja trajnost kotalnih ležajev je enaka številu vrtljajev (ali obratovalnih ur t_m pri konstantni vrtilni hitrosti), kolikor jih vzdrži 50 % testiranih ležajev, preden se pokažejo prva znamenja utrujenosti materiala (sl. 4).



Sl. 4. Diagram razsipanja trajnosti pri kotalnih ležajih

Medsebojno razmerje računski in srednje trajnosti je enako:

$$N_m = 5 N \quad t_m = 5 t \quad (1)$$

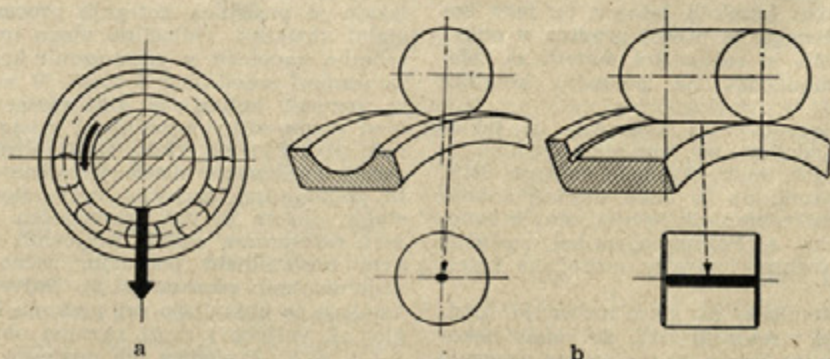
N_s — resnična trajnost kotalnih ležajev je enaka številu vrtljajev (ali obratovalnih ur t_s pri konstantni vrtilni hitrosti), kolikor jih vzdrže testirani ležaji, preden se na njihovih delovnih ploskvah pokažejo prva znamenja utrujenosti materiala (sl. 4).

Resnična trajnost v praksi zelo variira in je lahko celo do 20-krat večja od računski oziroma štirikrat večja od srednje:

$$N_s = 20 N = 4 N_m \quad t_s = 20 t = 4 t_m \quad (2)$$

Medsebojno razmerje resnične ter računski trajnosti je enako:

$$\frac{N_s}{N} = \frac{t_s}{t} \quad (3)$$



Sl. 5. Obratovalne okoliščine: a — obodna obremenitev, b — vrste dotika

Pri testiranju kotalnih ležajev morajo biti vsi preizkušanci obremenjeni v enakih okoliščinah glede obremenitve in vzdrževanja.

Glede na način obremenitve so vsi testirani ležaji obremenjeni s tako imenovano »obodno obremenitvijo« notranjega obroča, kar pomeni, da je zunanji obroč fiksen, notranji pa rotira oziroma da rezultanta zunanjih sil deluje na zunanjem obroču na eno samo točko (pri krogličnih) ali linijo (pri valjčnih ležajih), notranji obroč pa je zaradi rotacije obremenjen po celotnem obodu kontaktnega področja (sl. 5). Takšen način obremenitve za kotalne ležaje ni najbolj neugoden, pač pa je najpogostejši v praksi.

Dinamična nosilnost kotalnih ležajev

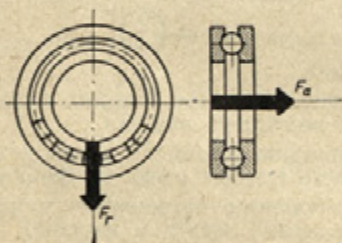
Dinamična nosilnost kotalnih ležajev je najvažnejša funkcionalna karakteristika, ki pove, kakšno obremenitev prenaša izbrani kotalni ležaj v določenih obratovalnih okoliščinah.

Predvsem je treba poudariti, da naziv »dinamična« pomeni, da ležaj obratuje (drugačna je statična) in ne, kakor pogosto razlagajo napačno, da je obremenjen z dinamičnimi udarci itd.

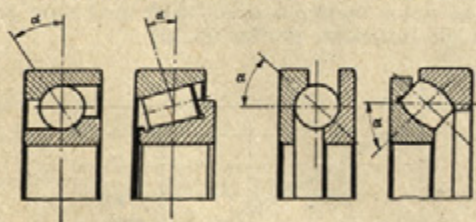
Mednarodno priporočilo R 15 oziroma JUS M.C.3.852 vsebuje naslednjo definicijo za dinamično nosilnost kotalnih ležajev:

»Dinamična nosilnost kotalnih ležajev je enaka obremenitvi konstantne jakosti in smeri, ki jo prenaša skupina identičnih ležajev in pri tem vzdrži trajnost enega milijona vrtljajev notranjega obroča pri fiksnem zunanjem obroču.«

Pri radialnih kotalnih ležajih je smer obremenitve radialna, pri aksialnih pa aksialna (sl. 6).



Sl. 6. Radialne in aksialne sile na kotalnih ležajih



Sl. 7. Sheme poševnega dotika pri radialnih in aksialnih kotalnih ležajih

Pri kotalnih ležajih s poševnim dotikom (sl. 7), predstavlja dinamično nosilnost radialna komponenta obremenitve, tj. tista, ki teži za tem, da približa notranji obroč zunanemu, in to v radialni smeri. Analogno je pri aksialnih ležajih s poševnim dotikom.

Dinamična nosilnost, označena s črko C, se meri s kp. Nominalna dinamična nosilnost za standardne kotalne ležaje je navadno navedena v komercialno-tehničnih katalogih, in sicer za vsak ležaj posebej.

Pri konstrukciji in izdelavi posameznega kotalnega ležaja se nominalna dinamična nosilnost določa po enotnih empiričnih obrazcih in je ponajveč odvisna od notranjih geometrijskih razmerij ležaja ter kvalitete osnovnega materiala njegovih sestavnih delov.

Statična nosilnost kotalnih ležajev

Statična nosilnost kotalnih ležajev je najvažnejša funkcionalna karakteristika, ki pove, kakšno obremenitev prenaša izbrani ležaj v mirujočem stanju.

Mirujoče stanje kotalnega ležaja je tisto, pri katerem vrtilna hitrost enega od obrocev ali kolutov ni večja od 10 vrt/min. Statične obremenitve kotalnih ležajev povzročajo elastične in plastične deformacije na mestih dotika delovnih ploskev njihovih sestavnih delov. Zato pojem statična nosilnost pomaga pri določanju obremenitve, s kakršno lahko obremenjujemo izbrani ležaj brez nevarnosti za posledice pri mirovanju ali pri rotaciji enega od obrocev ali kolutov.

Po mednarodnem priporočilu R 76 in JUS M.C.3.851 velja za statično nosilnost naslednja definicija:

»Statična nosilnost kotalnih ležajev je enaka obremenitvi, ki povzroča na najbolj obremenjenem kotalnem telesu celotno plastično deformacijo v velikosti ene desetisočinke premera kotalnega telesa.«

Pri radialnih ležajih je smer obremenitve radialna, pri aksialnih aksialna. Pri kotalnih ležajih s poševnim dotikom (sl. 7) predstavlja statična nosilnost radialno komponento obremenitve, tj. tisto, ki teži za tem, da približa notranji obroč zunanemu, in to v radialni smeri. Analogno je pri aksialnih ležajih s poševnim dotikom.

Statična nosilnost se označuje z znakom C_0 in se meri s kp. Nominalna statična nosilnost je navadno navedena v komercialno-tehničnih katalogih — za vsak ležaj posebej.

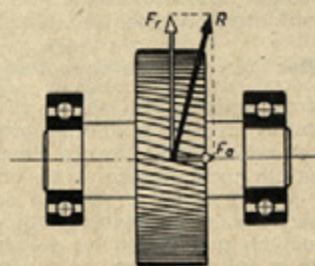
Nominalna statična nosilnost se pri konstrukciji in izdelavi posameznih kotalnih ležajev določa po enotnih empiričnih obrazcih.

Ekvivalentna obremenitev kotalnih ležajev

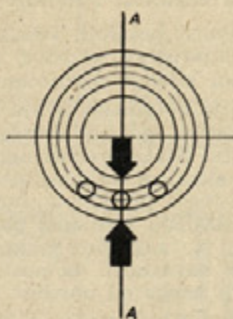
Pri konstrukciji določenega ležajnega sklopa je najpomembnejša in najbolj odgovorna konstruktorjeva naloga določitev in pravilna ocena obremenitve kotalnega ležaja za vgraditev v predmetni ležajni sklop. Nerealne ocene obremenitve imajo za posledico premočno ali preslabo dimenzioniranje ležaja. V prvem primeru gre za nepotrebno podražitev konstrukcije, v drugem pa se izpostavlja nevarnosti za uničenje ležaja, združeno pogosto z znatno gmotno škodo na sosednjih strojnih elementih ali celotnem ležajnem sklopu.

Zunanje obremenitve, ki najpogosteje delujejo na kotalne ležaje, so zelo redko radialne ali aksialne (sl. 8). Največkrat so rezultante zunanjih sil usmerjene poljubno, razen tega pa menjajo smer, jakost in frekvenco ponavljanja. Pogosto se te spremembe pojavljajo brez vsake zakonitosti, tako da je zelo težko določiti pravo vrednost obremenitve ležaja. V takih primerih se pri konstrukciji določenega ležajnega sklopa zadovoljujemo s čimbolj približno oceno.

V skladu s splošno tendenco po upoštevanju enotnih pogojev za primerjavo pri oceni in izbiri funkcionalnih in tehničnih karakteristik kotalnih ležajev je po med-



Sl. 8. Kombinirana obremenitev kotalnih ležajev



Sl. 9. Ravnina obremenitve (A-A)

narodnih priporočil R 15 in R 76 ter v skladu z JUS M.C3.851 in 852 itd. definicija tako imenovane ekvivalentne obremenitve, ki pri praktični konstrukciji ležajev sklopov kompenzira resnične zunanje obremenitve določenega ležaja, takale:

»Ekvivalentna obremenitev kotalnega ležaja med obratovanjem je enaka tisti radialni (pri radialnih ležajih) ali aksialni (pri aksialnih ležajih) obremenitvi konstantne smeri in jakosti, ki v pogojih, če je zunanji obroč fiksen oziroma če rotira notranji, dopušča trajnost, enako veliko, kakršno bi določeni ležaj dosegel pri resnični obremenitvi s spremenljivo smerjo in jakostjo v resničnih obratovalnih okoliščinah.«

»Ekvivalentna obremenitev kotalnega ležaja v mirujočem stanju je enaka tisti radialni (pri radialnih ležajih) ali aksialni (pri aksialnih ležajih) obremenitvi konstantne smeri in jakosti, ki povzroča enako celotno plastično deformacijo na najbolj obremenjenem kotalnem telesu na mestih dotika, kakor resnična obremenitev s spremenljivo smerjo in jakostjo, ki resnično deluje na ležaj.«

Kakor je razvidno iz gornjih definicij, je ekvivalentna obremenitev pravzaprav fiktivna obremenitev, ki naj bi na ležaju povzročila prav takšne posledice, kakor resnična obremenitev v resničnih obratovalnih okoliščinah.

Za približno določanje vrednosti ekvivalentne obremenitve glede na resnične obratovalne okoliščine je dandanes na voljo vrsta empiričnih obrazcev (drugi del), ki popolnoma izpolnjujejo zahteve normalnih in standardnih konstrukcijskih nalog. Vsekakor pa je potrebno pri ugotavljanju narave ekvivalentne obremenitve analizirati naslednje:

- jakost zunanjih sil in notranjih reakcij,
- smer delovanja zunanjih sil in notranjih reakcij,
- spremenljivost jakosti in smeri zunanjih sil in notranjih reakcij v določenem časovnem obdobju,
- frekvenco ponavljanja gornjih sprememb,
- korekcije jakosti nastajajočih sil za specialne primere obremenitev.

Zaključki analiz po omenjenih točkah omogočajo izbiro enega izmed navadnih računskih sistemov za določanje ekvivalentne obremenitve.

Vrtilna hitrost kotalnega ležaja

Vrtilna hitrost rotirajočega obroča ali kolata vpliva na trajnost obratno proporcionalno, se pravi čim večja je vrtilna hitrost rotirajočega obroča, tem krajšo trajnost v obratovalnih urah doseže — in obratno. To je tako zato, ker je pač trajnost odvisna od utrujenosti materiala, ta pa od števila pojavljajočih se obremenitev, ki se periodično ponavljajo na delovnih ploskvah ležaja, zlasti pa v ravnini obremenitve (sl. 9). To pomeni, da vsak ležaj vzdrži določeno število vrtljajev, ko pa se to doseže, postane ležaj neuporaben.

III. Medsebojno razmerje trajnosti, dinamične nosilnosti in ekvivalentne obremenitve

Za praktično kontrolo in vsklajanje funkcionalnih karakteristik izbranega ležaja je potrebno določiti pravilno medsebojno razmerje trajnosti N , dinamične nosilnosti C in ekvivalentne obremenitve F .

Če predpostavimo, da skupina enakih kotalnih ležajev pod obremenitvijo F_1 doseže trajnost N_1 , tedaj ista skupina kotalnih ležajev pod drugačno obremenitvijo F_2 doseže trajnost N_2 , pri čemer velja razmerje:

$$N_1/N_2 = F_2/F_1 = \text{konst.} \quad (4)$$

če je $F_2 > F_1$ oziroma je trajnost $N_2 < N_1$.

Medtem pa je iz prakse dokazano, da zgornje razmerje ni čisto obratno proporcionalno, temveč odvisno od eksponenta dotika p , in sicer takole:

$$N_1/N_2 = (F_2/F_1)^p = \text{konst.} \quad (5)$$

Če tu zamenjamo F_1 s fiksnim pojmom dinamične nosilnosti C , ki omogoča trajnost N_1 enako enemu milijonu vrtljajev, dobi obrazec 5 obliko:

$$10^6/N_2 = (F_2/C)^p = \text{konst.} \quad (6)$$

oziroma v urejeni obliki:

$$N_2 = \left(\frac{C}{F_2}\right)^p \cdot 10^6 \quad (7)$$

Taka je pot do osnovne oblike medsebojnega razmerja funkcionalnih karakteristik. Indeks »2« tudi ni več potreben, ker trajnost N_2 iščemo ravno za resnično obremenitev F_2 . Če še merimo N z 10^6 vrtljaji, dobi obrazec 7 obliko:

$$N = \left(\frac{C}{F}\right)^p \quad (8)$$

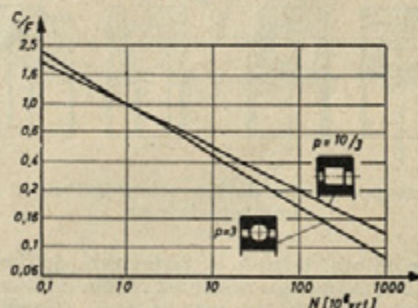
kjer pomenijo:

N — računsko trajnost kotalnih ležajev v milijonih vrtljajev notranjega obroča,

C — nominalno dinamično nosilnost v kp, pri kateri ležaj doseže trajnost enega milijona vrtljajev.

F — ekvivalentno obremenitev v kp, ki ustreza resnični obremenitvi ležaja v resničnih obratovalnih okoliščinah,

p — eksponent trajnosti (odvisen od vrste dotika), ki obsega vpliv različnih specifičnih pritiskov pri točkovnem ali linijskem dotiku (sl. 10):

Sl. 10. Medsebojno razmerje relativne nosilnosti $\bar{C}/F$ in trajnosti kotalnih ležajev s točkovnim in linijskim dotikom

$p = 3$ za točkovni dotik (kroglični ležaji),

$p = 4$ za linijski dotik.

Če obravnavamo dva dimenzionalno enaka kotalna ležaja, od katerih je eden kroglični, drugi pa valjčni, je logično, da doseže pri enaki obremenitvi valjčni ležaj daljšo trajnost, in to zato, ker je speci-

fični pritisk na dotikalnih ploskvah manjši kakor pa pri krogličnih (sl. 5).

V praksi kotalnih ležajev pa je idealni linijski dotik teže doseči kakor točkovnega. Vzrok so razne geometrične nepravilnosti, ki nastajajo na valjčkih, konusih in sodčkih med dokončno obdelavo (koničnost, ovalnost, perpendikularnost itd.).

Zategadelj je ugotovljeno v praksi, da je eksponent trajnosti za valjčne ležaje $p = 10/3$.

IV. Določanje trajnosti

Osnovni obrazec za določanje trajnosti izbranega kotalnega ležaja je:

$$N = \left(\frac{C}{F}\right)^p [10^6 \text{ vrtljajev}] \quad (9)$$

Če izbrani kotalni ležaj obratuje s konstantno vrtilno hitrostjo, lahko določimo trajnost (v obratovalnih urah), in sicer po obrazcu:

$$t = \frac{10^6 N}{60 n} \quad (10)$$

kjer pomenijo:

t — trajnost ležaja v obratovalnih urah,
 N — trajnost ležaja v milijonih vrtljajev,
 n — konstantno vrtilno hitrost v vrtljajih na minuto.

Iz obrazca 10 izhaja trajnost N (v 10^6 vrtljajev):

$$N = \frac{60 n t}{10^6} \quad (11)$$

Z izenačenjem obrazcev 9 in 11 dobimo razmerje

$$\left(\frac{C}{F}\right)^p = \frac{60 n t}{10^6} \quad (12)$$

Iz tega izhaja trajnost ležaja, izražena v obratovalnih urah:

$$t = \frac{10^6}{60 n} \left(\frac{C}{F}\right)^p \quad (13)$$

ali

$$t = \frac{16\,667}{n} \left(\frac{C}{F}\right)^p \quad (14)$$

Iz obrazca 13 dobimo *relativno nosilnost*, tj. razmerje C/F kotalnih ležajev:

$$C/F = \sqrt[p]{\frac{60 n t}{10^6}} \quad (15)$$

oziroma za

— kroglične ležaje:

$$C/F = \sqrt[3]{\frac{60 n t}{10^6}} \quad (16)$$

— valjčne ležaje:

$$C/F = \sqrt[10/3]{\frac{60 n t}{10^6}} \quad (17)$$

Obrazci 13 do 17 rabijo kot osnova za izdelavo priročnih logaritmskih diagramov (sl. 11 in 12) za praktično reševanje problematike pri izbiri kotalnih ležajev.

Če izbiramo kotalne ležaje za obratovanje pri konstantni vrtilni hitrosti, tedaj v ta namen jemljemo v pošteb tabeli 1 in 2, ki vsebujeta trajnosti krogličnih (tab. 1) in valjčnih (tab. 2) ležajev v obratovalnih urah.

Osnovna parametra za iskanje trajnosti v omenjenih tabelah sta:

relativna nosilnost C/F in
 vrtilna hitrost n .

Osnovni primerjalni vrednosti za trajnost t_0 in vrtilno hitrost n_0 sta določeni z obrazcem 15 pri relativni nosilnosti $C/F = 1$:

$$C/F = \sqrt[p]{\frac{60 n_0 t_0}{10^6}} = 1, \quad (18)$$

kjer pomenita

t_0 — osnovno trajnost ležaja v obratovalnih urah:
 $t_0 = 500 \text{ h}$,

n_0 — osnovno vrtilno hitrost: $n_0 = 33,33 \text{ vrt./min.}$

Pri razmerju $C/F = 1$ in pri vrtilni hitrosti $n_0 = 33,33 \text{ vrt./min}$ doseže določeni kotalni ležaj trajnost $t_0 = 500 \text{ h}$.

IV. Tehnika pri določanju trajnosti kotalnih ležajev

Pri izbiri in kontroli določenega kotalnega ležaja uporabljamo po navadi funkcionalne karakteristike N , C , F in n . Izmed omenjenih podatkov je treba pred izbiro ležaja poznati vsaj dva, da bi lahko približno določili ležaj. Če ni znan niti eden omenjenih podatkov, moramo pač predpostaviti določene obratovalne okoliščine, ki pripomorejo, da po večkratnem približanju slednjič izberemo pravi ležaj.

Primer: Če iščemo trajnost, moramo vedeti, v kakšnih obratovalnih okoliščinah (F in n) naj bi obratoval poljubno izbrani ležaj. Po prejšnjih obrazcih izračunamo ustrežajočo dinamično nosilnost C itd. ter tako skombiniramo splošno znane tehniške norme ter dimenzionalne podatke, ki jih narekuje os ali okrov (d in D), dokler se ne približamo ležaju, ki je najbolj prikladen za namen in zahteve ležajnega sklopa. To delo redkokdaj uspe prvič, marveč je navadno treba račun večkrat ponoviti, da pridemo do pravega rezultata.

1. Računski postopek pri izbiri kotalnih ležajev.

a) Znano: F — ekvivalentna obremenitev v kp,
 n — vrtilna hitrost v vrt./min,
 C — nominalna dinamična nosilnost za poljuben ležaj.

Iščemo: t — trajnost v obratovalnih urah.

Rešitev:

$$t = \frac{16\,667}{n} \left(\frac{C}{F}\right)^p$$

Če tako dobljena trajnost t ni v skladu s predpisi oziroma ne izpolnjuje zahteve ležajnega sklopa (predolga—prekratka), tedaj spreminjamo dinamično nosilnost C (manjšo—večjo), dokler ni ustrezno pogoj za trajnost.

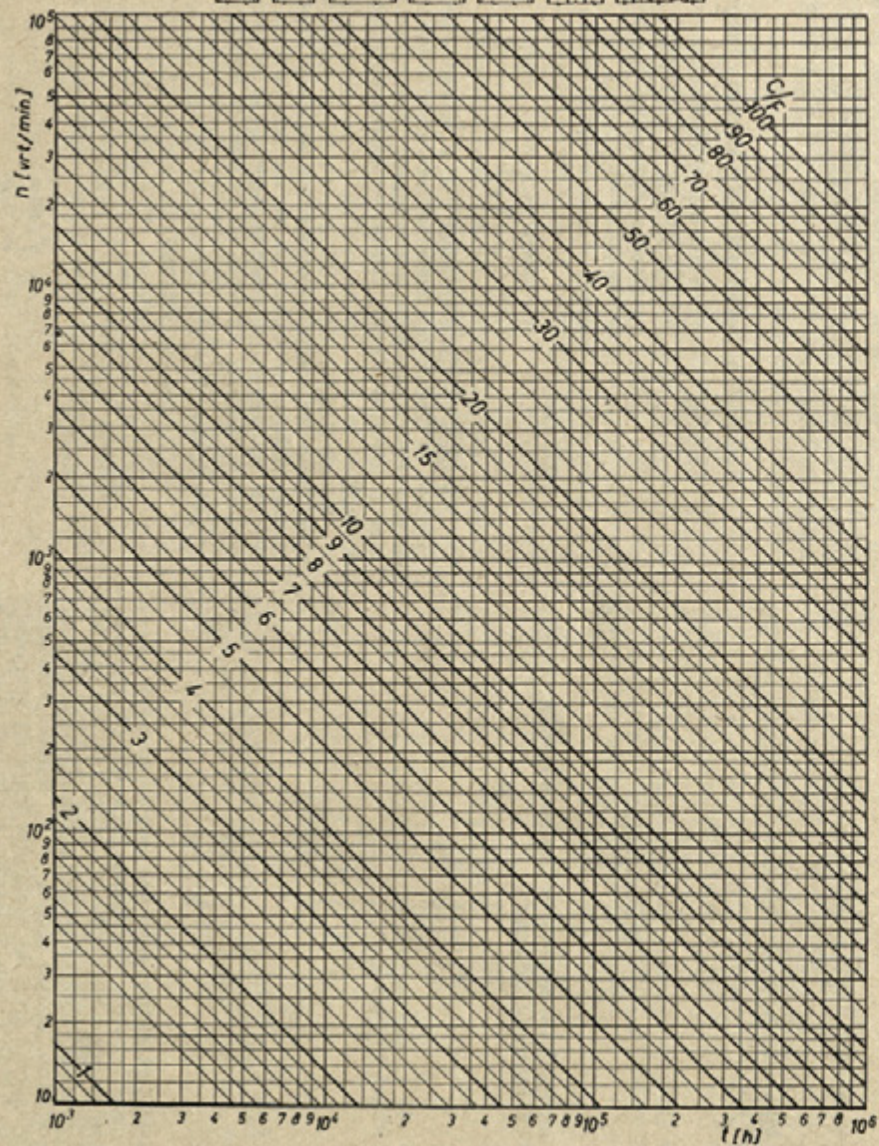
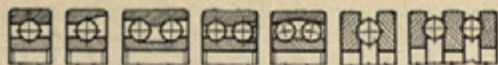
Dinamična nosilnost C , pri kateri se zadovoljimo z dobljeno trajnostjo, avtomatično določa velikost kotalnega ležaja, vsekakor pa se moramo poprej odločiti za tip ležaja, kakršnega narekujejo obratovalne okoliščine (narava zunanjsih sil in namen ležaja).

b) Znano: F — [kp]
 n — [vrt./min]
 t — [o.h].

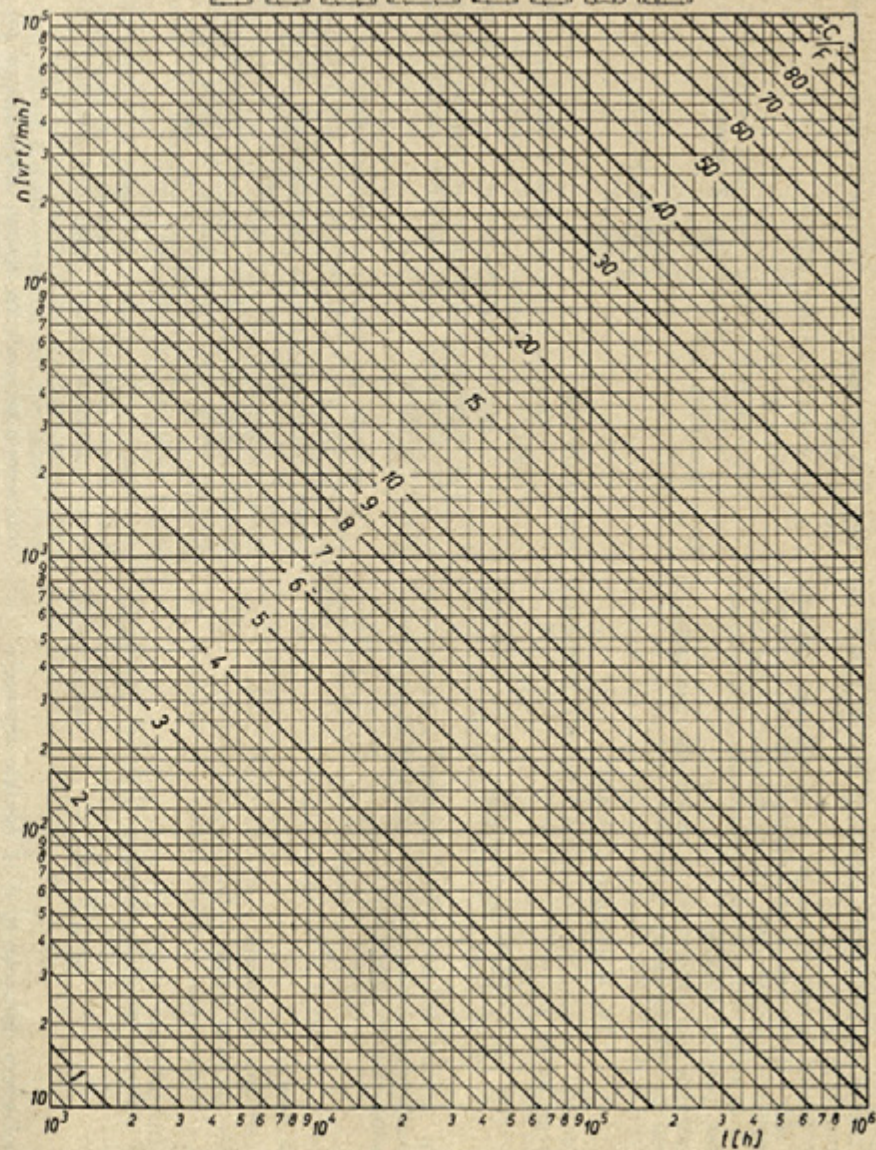
Iščemo: C — [kp].

Rešitev:

$$C = F \sqrt[p]{\frac{60 n t}{10^6}}$$



Sl. 11. Diagram za izbiro krogličnih ležajev



Sl. 12. Diagram za izbiro valjčnih ležajev

Tabela 1.

Številčne vrednosti C/F pri izbiri krogljčnih ležajev

f [h]	Vrtilna hitrost n [vrt/min]																												
	10	16	25	40	63	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000	12 500	16 000	
100									1,06	1,15	1,24	1,34	1,45	1,56	1,68	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	
500				1,06	1,24	1,45	1,56	1,68	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	
1 000			1,15	1,34	1,56	1,82	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	
1 250		1,06	1,24	1,45	1,68	1,96	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	
1 600		1,15	1,34	1,56	1,82	2,12	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	
2 000	1,06	1,24	1,45	1,68	1,96	2,29	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	
2 500	1,15	1,34	1,56	1,82	2,12	2,47	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	
3 200	1,24	1,45	1,68	1,96	2,29	2,67	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	
4 000	1,34	1,56	1,82	2,12	2,47	2,88	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	
5 000	1,45	1,68	1,96	2,29	2,67	3,11	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	
6 300	1,56	1,82	2,12	2,47	2,88	3,36	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	
8 000	1,68	1,96	2,29	2,67	3,11	3,63	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	
10 000	1,82	2,12	2,47	2,88	3,36	3,91	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	
12 500	1,96	2,29	2,67	3,11	3,63	4,23	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	
16 000	2,12	2,47	2,88	3,36	3,91	4,56	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	
20 000	2,29	2,67	3,11	3,63	4,23	4,93	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	
25 000	2,47	2,88	3,36	3,91	4,56	5,32	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,6	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	
32 000	2,67	3,11	3,63	4,23	4,93	5,75	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,60	11,5	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1	
40 000	2,88	3,36	3,91	4,56	5,32	6,20	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,60	11,50	12,4	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1		
50 000	3,11	3,63	4,23	4,93	5,75	6,70	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,60	11,50	12,40	13,4	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1			
63 000	3,36	3,91	4,56	5,32	6,20	7,23	7,81	8,43	9,11	9,83	10,60	11,50	12,40	13,40	14,5	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1				
80 000	3,63	4,23	4,93	5,75	6,70	7,81	8,43	9,11	9,83	10,60	11,50	12,40	13,40	14,50	15,6	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1					
100 000	3,91	4,56	5,32	6,20	7,23	8,43	9,11	9,83	10,60	11,50	12,40	13,40	14,50	15,60	16,8	18,2	19,6	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1						
200 000	4,93	5,75	6,70	7,81	9,11	10,60	11,50	12,40	13,40	14,50	15,60	16,80	18,20	19,60	21,2	22,9	24,7	26,7	28,8	31,1									

Tabela 2.

Številčne vrednosti C/F pri izbiri valjčnih ležajev

t [h]	Vrtilna hitrost n [vrt/min]																													
	10	16	25	40	63	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000		
100									1,05	1,13	1,12	1,30	1,39	1,49	1,60	1,71	1,83	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50
500				1,05	1,21	1,39	1,49	1,60	1,71	1,83	1,37	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30
1000			1,13	1,30	1,49	1,71	1,83	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	
1250		1,05	1,21	1,39	1,60	1,83	1,97	2,14	2,26	2,42	2,59	2,78	2,87	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	
1600		1,15	1,30	1,49	1,71	1,97	2,11	2,26	2,42	2,59	2,79	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	
2000	1,05	1,21	1,39	1,60	1,83	2,11	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	
2500	1,13	1,30	1,49	1,71	1,97	2,26	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	
3200	1,21	1,30	1,60	1,83	2,11	2,42	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	
4000	1,30	1,49	1,71	1,97	2,26	2,59	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	
5000	1,39	1,60	1,83	2,11	2,42	2,78	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	
6300	1,49	1,71	1,97	2,26	2,59	2,97	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	
8000	1,60	1,85	2,11	2,42	2,78	3,19	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	
10000	1,71	1,97	2,26	2,59	2,97	3,42	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	
12500	1,83	2,11	2,42	2,78	3,19	3,66	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	
16000	1,97	2,26	2,59	2,97	3,42	3,92	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	
20000	2,11	2,42	2,78	3,19	3,66	4,20	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6	
25000	2,26	2,59	2,97	3,42	3,92	4,50	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6		
32000	2,42	2,78	3,19	3,66	4,20	4,82	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6			
40000	2,59	2,97	3,42	3,92	4,50	5,17	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6				
50000	2,78	3,19	3,66	4,20	4,82	5,54	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6					
63000	2,97	3,42	3,92	4,50	5,17	5,94	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6						
80000	3,19	3,66	4,20	4,82	5,54	6,36	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6							
100000	3,42	3,92	4,60	5,17	5,94	6,81	7,30	7,82	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6								
200000	4,20	4,82	5,54	6,36	7,30	8,38	8,98	9,62	10,3	11,0	11,8	12,7	13,6	14,6	15,6	16,7	17,9	19,2	20,6											

Z vrednostjo dobljene potrebne dinamične nosilnosti C izberemo iz kataloga ležaj vnaprej določenega tipa, in sicer vedno zaokrožujemo navzgor, če se vrednosti iskane in razpoložljive dinamične nosilnosti ne pokrivajo popolnoma.

- c) Znano: F — [kp]
 C — [kp]
 t — [h].

Iščemo: n — [vrt./min].

Rešitev:

$$n = \left(\frac{C}{F}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{16\,667}{t}$$

- d) Znano: t — [h]
 n — [vrt./min]
 C — [kp].

Iščemo: F — [kp].

Rešitev:

$$F = \frac{C}{\sqrt[3]{\frac{60\,n\,t}{10^6}}}$$

2. Grafični postopek (s pomočjo diagramov na sl. 11 in 12).

Pomožni logaritemski diagrami so izdelani po obrazcih 13 do 17. Na absciso so nanesene vrednosti trajnosti t v obratovalnih urah, na ordinato pa vrtilne hitrosti n v vrt./min. Poševne linije prikazujejo razmerje C/F .

Kontrola in izbira kotalnih ležajev obstoji v tem, da se znane vrednosti t , C , F in n nanašajo v diagram (glede na kroglični ali valjni tip ležaja), presečišča omenjenih podatkov pa dajejo vrednosti iskanih veličin. Vsekakor je treba paziti, da izbiramo ležaj vsakokrat samo na ustrezajočem diagramu.

Glede na štiri možne primere (a, b, c in d) obratovalnih okoliščin iz točke 1 tega poglavja izbiramo ležaje takole:

a) Izračunamo razmerje C/F . V diagramu poiščemo poševno črto, ki približno ustreza vrednosti C/F , in horizontalno črto, ki ustreza dani vrtilni hitrosti. Presečišče obeh črt daje točko, iz katere potegnemo vertikalo do abscisne osi, na kateri nato samo še odberemo vrednost za trajnost t .

b) V diagram vnesemo podatke za t in n . Njihovo presečišče določa vrednost linije C/F . Iz razmerja C/F , ki ga tako dobimo, določimo kotalni ležaj s tem, da z znano vrednostjo F določimo C , na njeni osnovi pa iz kataloga izberemo ležaj.

c) Izračunamo razmerje C/F . Vrednost razmerja C/F in trajnosti t vnesemo v diagram. Presečišče določa na ordinati vrednost vrtilne hitrosti n .

d) V diagram vnesemo vrednosti za trajnost t in vrtilno hitrost n . Njihovo presečišče določa razmerje C/F . Z znano vrednostjo C izračunamo vrednost dopustne ekvivalentne obremenitve F .

3. Tabelarni postopek (s pomočjo tabel 1 in 2).

Tabeli 1 in 2 sta izdelani na osnovi obrazcev 16 za kroglične in 17 za valjne kotalne ležaje. Glede na podatke t , C , F in n iz točke 1 tega poglavja izbiramo kotalne ležaje takole:

a) Določimo vrednost razmerja C/F . V tabeli poiščemo približno vrtilno hitrost n . V isti vertikalni koloni poiščemo potem vrednost razmerja C/F , ki mu ustreza vrednost trajnosti v koloni t .

b) Iz vrednosti vrtilne hitrosti n (v vertikalni koloni) in trajnosti t (v horizontalni koloni) določimo razmerje C/F . Z znano vrednostjo F izračunamo nato vrednost dinamične nosilnosti C , kakršno mora imeti določen kotalni ležaj.

c) Določimo vrednost razmerja C/F . Glede na velikost trajnosti (horizontalno) in razmerje C/F določimo približno vrednost vrtilne hitrosti.

d) Iz podatkov za trajnost t in vrtilno hitrost n določimo razmerje C/F . Rešitev tega razmerja z znanim C daje vrednost dopustne ekvivalentne obremenitve F .

Izmed vseh opisanih postopkov (računskega, grafičnega in tabelarnega) je računski najbolj natančen (čeprav zamuden), tabelarni pa najmanj natančen (a najhitrejši).

Ko se konstruktor spozna in se privadi na opisane pripomočke, je izbira kotalnih ležajev precej preprosta stvar. Za tako delo potrebuje omenjene diagrame, tabele, dober katalog s podatki za vse vrste kotalnih ležajev in tehnično jasne podatke oziroma pogoje za obratovalne okoliščine iskanega ležajnega sklopa.

Avtorjev naslov: Franci Stariha, dipl. inž. strojništva, BELT — Crnomelj

DK 658.51

Planiranje z mrežastimi diagrami

ZORAN SELJAK

1. Razvoj

Zaradi stalnega razraščanja projektov in programov v modernem poslovnem življenju so bila podjetja in velike ustanove primorane začeti uporabljati znanstvene metode za planiranje in izvajanje teh projektov. Znanstvena oziroma proizvodna analiza (Operational Research) je precej splošen pojav v praksi modernega vodenja proizvodnje. Tako se je porajala cela vrsta uspešnih metod za reševanje problemov organizacije in upravljanja proizvodnje.

Uspešen pripomoček pri reševanju problemov za smotno organizacijo proizvodnje je uporaba elektronskih računalnikov, ki omogočajo izredno hitro reševanje matematičnih problemov. Matematiki so razvili tako imenovano teorijo grafikonov, za katero se uporabljajo mrežasti diagrami. Z mrežastimi diagrami je možno podrobno opazovati ali planirati potek izvajanja določenega projekta, lahko pa se uporablja tudi pri planiranju njegovega financiranja. Potemtakem imajo

mrežasti diagrami različne možnosti za uporabo in zato so se tudi razvile mnoge inačice v metodi planiranja.

Uporaba mrežastih diagramov za planiranje in vodenje izvajanja projektov sega v leti 1957 in 1958. V letu 1957 je bil uporabljen sistem CPM (Critical Path Method) — metoda kritičnega zaporedja. Ta sistem je bil v rabi v kemičnem velepodjetju du Pont de Nemours v sodelovanju z Remington Rand Corporation pri določanju terminov pri izvajanju del na novih kemičnih postrojenjih. Vedeti je treba namreč, da so ravno kemična postrojenja izredno kompleksne narave. Od osnovnih projektov do gradbenih del obsega projekt tudi izvajanje ali postavljanje strojne opreme in naprav za elektronsko upravljanje procesov. Časovno vsklajanje izvajanja tako mnogostranskih opravil pa razumljivo terja izredne organizacijske napore, ki so jim bili kos vprav z uporabo nove metode planiranja.

PERT (Program Evaluation and Review Technique) je morda najpopularnejši sistem planiranja, ki ga je