

DK 389.159:621

Giorgijev sistem mer (MKSA) in strojništvo

BOJAN KRAUT

O merskih sistemih je bilo pri nas že nekaj napisanega. Posebno temeljito jih obravnava odlična knjiga prof. F. Avčina: »Osnove metrologije« (1950). Za strojnike najbolj neogibno potrebne podatke o njih pa podaja moj »Strojniški priročnik« (1954). Razen tega so o merskih problemih objavljali že marsikaj »Elektrotehniški vestnik« in nekaj tudi »Strojniški vestnik« ter drugi. Zato bi se v teh izvajanjih omejil samo na nekatera posebna vprašanja, ki zanimajo strojništvo, ter navedel nekaj primerov.

Namen članka je, predložiti večjo preglednost pri računanju z veličinskimi enačbami in rabi merskih sistemov s koherentnimi (povezanimi) enotami. V času, ko se mednarodno urejajo ta vprašanja in se o njih pripravlja ustrezen zakonski predpis tudi pri nas, se pač morajo z njimi spoznati vsi, med njimi tudi tisti strokovnjaki, ki gledajo na te »novotarije« po strani samo zato, ker jih še ne poznajo.

O ENOTI MASE IN SILE

Prednost veličinskega pisanja enačb je že dobro znana iz geometrije in mehanike, kjer že — samo po sebi umevno — uporabljamo večinoma le veličinske enačbe in koherentne enote.

Veličinske enačbe povezujejo veličine kot fizikalne pojme, ne oziraje se na njihovo mero. Za primer naj služi enakomerna hitrost, za katero velja povezanost veličin:

$$\text{pot} = \text{hitrost} \times \text{čas.}$$

Ker zaradi poenostavitve označujemo veličine s simboli (ki so v našem primeru za pot s , za hitrost v in za čas t), lahko napišemo ustrezno veličinsko enačbo

$$s = vt.$$

Ta je splošno veljavna, pa naj uporabljamo kakršne koli enote. Vendar bo računanje s to enačbo enostavnejše, če bomo uporabljali za mero njenih veličin koherentne (povezane) enote.

Sistemi koherentnih enot raznih veličin izhajajo iz določenih, po volji izbranih osnovnih enot kot izhodišča sistema.

Pri nas najbolj razširjen sistem mer, ki obsega koherentne enote veličin s področja mehanike, je tehniški sistem mer. To je »silski« sistem mer, zgrajen na osnovnih enotah

- za dolžino — meter [m],
- za čas — sekunda [s],
- za silo — kilogram-sila [kg f]
ali kilopond [kp].

V času francoske revolucije (leta 1797) je bila definirana enota mase »kilogram« [kg] z maso 1 dm³ kemijsko čiste vode pri temperaturi 4°C in tlaku 760 mm Hg. Kasneje so v mehaniki začeli uporabljati isto ime »kilogram« za enoto sile, in sicer je to sila, ki je enaka teži (zemeljski gravitacijski sili) mase 1 kg. Do današnjega časa se je zavlekla taka uporaba imena kilogram hkrati za enoto mase in sile, kar je marsikod dovajalo do zgrešenih zaključkov.

Na 9. generalni konferenci za mere in uteži (9. Conférence Générale des Poids et Mesures) v Parizu leta 1948 je bilo mednarodno sprejeto, da je kilogram enota mase — in ne sile. Obenem je bil sprejet sistem mer MKSA (meter-kilogram-sekunda-ampere), imenovan tudi »Giorgijev sistem mer« (v čast prof. Giorgiju, ki ga je prvič predložil že leta 1901). Ta sistem mer je zgrajen na naslednjih osnovnih enotah:

- za dolžino — meter [m],
- za čas — sekunda [s],
- za maso — kilogram [kg],
- za električni tok — amper [A].

Četrta osnovna enota Giorgijevega sistema mer je bila izbrana glede na elektrotehniko, medtem ko za strojništvo ni neposredno potrebna.

Na 10. generalni konferenci za mere in uteži v Parizu leta 1954 sta bili dodani za praktični sistem mer k prvotnim osnovnim enotam Giorgijevega sistema mer še enoti

- za temperaturo — stopinja Kelvina [°K],
- za svetlobno jakost — candela [cd].

Z uvedbo kilograma kot enote za maso je morala enota za silo v tehniškem sistemu mer dobiti ustrezno označbo, in sicer sta to označbi

- kilogram-sila [kg f] ali kilopond [kp],

ki sta obe enako v rabi.¹ S tem naj bi bilo urejeno vprašanje enote za silo v tehniškem sistemu mer, ki dobro služi mehaniki in je zunaj anglosaškega sveta tako močno v rabi, da ga ni mogoče kar čez noč zamenjati z novim sistemom mer MKSA.

Enota za silo v sistemu mer MKSA je izvedena s pomočjo Newtonovega zakona kot definicijske enačbe, po katerem je sila F enaka zmnožku mase m in pospeška a :

$$F = ma$$

Ker je enota za maso v sistemu mer MKSA kilogram, enota (izvedena) za pospešek pa je — m/s²,

¹ Glej SV 1966, številka 4, str. 1141

izhaja iz prednje definicijske enačbe enota za silo v tem sistemu mer: kg m/s^2 , ki je dobila posebno ime — *newton* [$N = \text{kg m/s}^2$]. Ta enota je približno 10-krat manjša od kiloponda ($9,81 N = 1 \text{ kp}$).

Kolikor bi se torej zadovoljili samo z enotama za silo (s kilopondom v tehniškem in z newtonom v Giorgijevem sistemu mer), bi bilo vprašanje enote za silo razčiščeno. Toda v praksi se uporabljajo za težo (to je silo) še vedno tudi druge mere za maso, kakor sta na primer zlasti tona [t] in cent [q]. Podobno uporabljajo v anglosaškem svetu za težo najrazličnejše mere, na primer funt (pound, lb.) in še mnogo drugih. Vse te mere za maso označujejo enkrat maso, drugič težo. Če govorimo o 10-tonskem železniškem vozu, si pač predstavljamo, da njegova masa znaša 10 t ($= 10\,000 \text{ kg}$), toda prav tako pravimo v praksi, da je njegova teža, to je sila, ki pritiska na tirnice, tudi 10 t (misleč na gravitacijsko silo 10 000 kp). To velja seveda enako tudi za cent, funt in podobne mere.

Tudi pri vseh teh merah bi bilo potrebno uvesti razlikovanje med mero za maso in mero za silo, kakršno je v rabi med kilogramom in kilopondom. Tako bi pritisk voza na tirnico označili namesto z mero 10 t pravilneje z mero 10 Mp (1 megapond [Mp] = 10^3 kp), lokomotiva pa bi seveda tudi še nadalje vlekla maso, to je — »tone«.

Za dosledno razlikovanje med enotami za maso in silo je treba seveda strogo razlikovati ta dva pojma sama. To pa nemalo otežuje okoliščina, da se v splošni vsakdanji rabi ob besedah teža, težak itd. ne pojmuje vedno le gravitacijska sila Zemlje, ampak tudi količina materiala, to je — masa. Za popolno razčiščenje pojmov bo dosledno razlikovanje neogibno potrebno tudi tu.

O TOPLOTNIH ENOTAH

10. generalna konferenca za mere in uteži v Parizu leta 1954 je sprejela za praktični sistem mer osnovno enoto za temperaturo — deloma že dolgo uporabljano — Kelvinovo stopinjo [$^{\circ}\text{K}$], ki bo imela odslej mednarodno veljavo (tudi v anglosaškem svetu).

Ta odločitev nas ne zadene mnogo, ker je Kelvinova stopinja tesno naslonjena na Celzijevo [$^{\circ}\text{C}$] in imata obe enako velikost, toda drugo izhodišče. Mnogo občutnejša je za anglosaški svet, ki meri temperaturo v stopinjah Fahrenheita [$^{\circ}\text{F}$], le-te pa se od Kelvinovih znatno razlikujejo, tako po velikosti kakor tudi po izhodišču.

Naj na tem mestu omenim nepotrebno razlikovanje med simboloma za temperaturo, če jo merimo v Kelvinovih ali Celzijevih stopinjah. Za absolutno temperaturo (merjeno od absolutne ničle) je mednarodno določen simbol T . Medtem pa se za temperaturo, merjeno v Celzijevih stopinjah, v strokovni literaturi mnogo uporablja simbol t , oziroma — ker je ta po mednarodnih določbah v rabi kot simbol za čas — tudi še simbol θ . Tako razlikovanje pa je popolnoma odveč. Saj je temperatura samo ena veličina, naj bo merjena s ka-

kršnimi koli stopinjami ali drugimi merami. Če bi za vsako drugačno mero uvajali drugačen simbol, bi morali imeti za temperaturo, merjeno v stopinjah Fahrenheita, še tretji simbol. Itd.

Tudi tlake merimo absolutno in relativno (glede na barometrični tlak), pa vendar uporabljamo za tlak samo en simbol: p , način meritve pa pokažemo z mero: ata ali atn. Tako označujemo na primer:

$$p = 2 \text{ atn} = 3 \text{ ata}.$$

Prav tako lahko napišemo za temperaturo:

$$T = 100^{\circ}\text{C} = 373^{\circ}\text{K}.$$

Več simbolov za temperaturo je popolnoma odveč. Če pa uporabljamo neko številsko enačbo, moramo tako navesti vse mere za vse uporabljene veličine.

Glede toplote (toplote energije) je bilo na 9. generalni konferenci za mere in uteži v Parizu leta 1948 določeno, da je njena enota — *joule* [J], torej ista enota, ki v sistemu mer MKSA velja tudi za druge oblike energije (mehansko, električno itd.). S tem so toplotni problemi vključeni v koherentni sistem enot, ki povezujejo vsa področja fizike in tehnike. S koherentno enoto za toploto — *jouleom* — postanejo tudi toplotne enačbe veličinske, torej take, kakršne narekujejo čista fizikalna razmerja med veličinami.

Za splošno uvedbo računanja z enoto joule pa je neogibno potrebno, da so v ustreznih koherentnih enotah podani tudi mnogi številski podatki o raznih lastnostih snovi. Brez njih je računanje z veličinskimi enačbami precej težavno. Pri nas pa vsaj najpotrebnejše ustrezne številске podatke imamo, saj jih v uvodu omenjeni »Strojniški priročnik« priobčuje razen v enotah na bazi kilokalorije tudi v koherentnih enotah Giorgijevega sistema mer. Obe vrsti enot sta upoštevani tudi v diagramu is za vodno paro, ki je priložen temu članku.

Naj omenim še, da je joule po vrednosti sicer dokaj različen od kilokalorije ($1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$), medtem ko anglosaški enoti za toploto — *British Thermal Unit* [B. T. U.] precej dobro ustreza ($1 \text{ B. T. U.} = 1,055 \text{ kJ} = 1055 \text{ J}$).

PRIMERI

1. primer: Vlečna sila lokomotive.

V strokovni literaturi se mnogo rabi za vlečno silo lokomotive F številska enačba, ki upošteva moč P in hitrost vožnje v :

$$F = 270 \frac{P}{v} \quad \begin{array}{l} F \text{ — kp} \\ P \text{ — KS} \\ v \text{ — km/h} \end{array}$$

V tej enačbi je vlečna sila izražena z močjo, merjeno s »konjskimi močmi« [KS] (ki bi jih pač res že lahko prepustili — zgodovini). Če bi mnogo primerneje merili moč s kilowatti [kW], kakor pri

električnih lokomotivah, bi gornja številska enačba dobila obliko:

$$F = 367 \frac{P}{v} \quad \begin{array}{l} F - \text{kp} \\ P - \text{kW} \\ v - \text{km/h} \end{array}$$

Niti v prvem niti v drugem primeru ne računamo s koherentnimi enotami, zato se nam vsiljuje nepotreben pretvorni faktor, ki bi bil zopet drugačen, če bi izbrali še neke druge mere.

Veličinska enačba pravi, da je moč zmnožek sile in hitrosti:

$$P = Fv$$

in je sila torej enaka

$$F = \frac{P}{v}$$

Nobenega nepotrebega iz določene izbire enot izviraajočega faktorja ni v tej enačbi, velja pa za kakršne koli enote, na primer:

$$\begin{array}{ll} \text{a) } P = 2000 \text{ KS} & 1 \text{ KS} = 75 \text{ kp m/s} \\ v = 60 \text{ km/h} & 1 \text{ km/h} = 1/3,6 \text{ m/s} \end{array}$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2000 \text{ KS}}{60 \text{ km/h}} = \frac{2000 \cdot 75}{60/3,6} \frac{\text{kp m/s}}{\text{m/s}} = 9000 \text{ kp}$$

$$\begin{array}{ll} \text{b) } P = 2500 \text{ HP} & 1 \text{ HP} = 550 \text{ ft. lb/s} \\ v = 40 \text{ miles/h} & 1 \text{ mile/h} = 1760.3/3600 \text{ ft/s} \end{array}$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2500 \text{ HP}}{40 \text{ miles/h}} = \frac{2500 \cdot 550}{40 \cdot 1760.3/3600} \frac{\text{ft. lb/s}}{\text{ft/s}} = 23440 \text{ lb.}$$

V primeru, da so enote za vse veličine v enačbi med seboj koherentne, je računanje posebno preprosto:

$$P = 3000 \text{ kW} = 3 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$v = 20 \text{ m/s} (= 72 \text{ km/h})$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{3 \cdot 10^6}{20} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ N} = 150 \text{ kN.}$$

2. primer: Moment zamaha.

V praksi izražamo moment zamaha z naslednjo veličinsko enačbo:

$$GD^2 = 4 g J$$

V njej merimo — ob uporabi tehniškega sistema mer — težo G s kp in premer D z m, zemeljski pospešek $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, enota za vztrajnostni moment mase J pa je $\text{kp s}^2 \text{ m}$. Zelo nepregledna je ta enota in kaj malo pove.

Moment zamaha bomo izrazili pravilneje z maso m , in ne s težo G . Ker je $G = mg$, lahko preoblikujemo prejšnjo enačbo v

$$m D^2 = 4 J \quad \text{ali} \quad m \left(\frac{D}{2} \right)^2 = J$$

V tej enačbi bomo lahko zelo lepo uporabili enote sistema mer MKSA: za maso m — kg, za premer D — m, za vztrajnostni moment mase J pa bo sledila enota kg m^2 , ki je jasna in fizikalno razumljiva.

Naj omenim še, da je številska vrednost za $m D^2$ prav taka, kakršna je za GD^2 . (Vztrajnik, ki ima

$GD^2 = 10000 \text{ kp m}^2$, ima $m D^2 = 10000 \text{ kg m}^2$.) Pripadajoči vztrajnostni moment mase J pa se bo številsko razlikoval, če bo merjen z enoto $\text{kp s}^2 \text{ m}$ ali pa s kg m^2 .

3. primer: Specifično mehansko delo.

Pri pogonskih strojih računamo pogosto z mehanskim delom, ki ga opravlja enota mase pretakajočega se fluida.

Vzemimo za primer mehansko delo W , ki ga dobimo zaradi zmanjšanja kinetične energije mase m , če se ji je hitrost zmanjšala od v_1 do v_2 :

$$W = m \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = G \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

To delo W bomo merili v tehniškem sistemu mer z enoto kp m , v sistemu MKSA mer pa z J (joule).

Specifično delo glede na enoto mase bi bilo

$$\frac{W}{m} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

in to bi merili pravilno z enoto J/kg .

Računanje mehanskega dela na enoto teže

$$\frac{W}{G} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}$$

bi nam v tehniškem ali Giorgijevem sistemu mer dalo enoto — m ($\text{kp m}/\text{kp} = m$, $J/N = \text{Nm}/N = m$), toda to seveda ni specifično mehansko delo glede na enoto mase. Nosilec energije pa je masa, ne teža.

4. primer: Specifični impulz.

Impulz izražamo z maso m in hitrostjo v ali silo F in časom t :

$$\int m dv = \int F dt$$

Specifični impulz je impulz glede na enoto mase:

$$v_2 - v_1 = \int \frac{F}{m} dt$$

Imeti mora torej dimenzijo hitrosti: dolžina/čas, ki ji pripada enota m/s . Ta izhaja tudi iz izraza na desni strani, če merimo veličine s koherentnimi enotami sistema mer MKSA. Če pa v tem izrazu merimo silo F s kilopondji, čas t s sekundami, maso m pa s kilogrami, kar se dogaja v praksi, dobimo nekoherentno enoto kp s/kg . Zanimarjanje razlike med kilopondom in kilogramom bi nam s krajšanjem dalo enoto — sekundo, torej dimenzijo čas, kar je nesmiselno, saj je prava dimenzija seveda — hitrost.

Strogo razlikovanje med kilogramom in kilopondom očuva torej pravilno fizikalno predstavbo veličin.

5. primer: Vodna moč.

Mnoge knjige še zmerom navajajo številske enačbe, po kateri je vodna moč P [KS] izračunana iz volumenskega pretoka Q [m^3/s] in vodnega padca h [m]:

$$\begin{array}{ll} P = 10 Q h & P - \text{KS} \\ Q - \text{m}^3/\text{s} & \\ h - \text{m} & \end{array}$$

Naprednejši strokovnjak se morda s to enačbo ne bo zadovoljil, ampak se bo odločil, da je za podobne vodne turbine pravilnejši izraz $P = 11 Q h$ ali celo $P = 12 Q h$. Kdor pa ne ve, kako je zgrajena ta približna in res nezanesljiva številska enačba, bo pričakoval še nadaljnja stopnjevanja tudi do $P = 13 Q h$. Kaj je torej pravilno?

Veličinska enačba za vodno moč P , izraženo z volumenskim pretokom Q in padcem h , se glasi:

$$P = \gamma Q h \eta$$

Iz nje se jasno vidi, da bi druga tekočina (zaradi druge specifične teže γ) dala drugačno moč in je ta odvisna tudi od izkoristka naprave η , ki se giblje — po popolnosti izvedbe — nekako med vrednostmi $\eta = 0,75 \dots 0,90$.

Ta enačba velja seveda za kakršne koli enote, če so le koherentne. Volumenski pretok Q bomo vsekakor merili s m^3/s , padec h pa z m . Če bomo uporabljali nadalje tehniški sistem mer, bomo merili specifično težo γ s kp/m^3 in dobili moč P , izmerjeno s $kp \cdot m/s$. V sistemu mer MKSA pa merimo specifično težo γ z N/m^3 , medtem ko bo moč P izražena v W .

Merjenje moči vodnih turbin s konjskimi močmi [KS] bi pač res že morali nadomestiti z merjenjem s kilowatti [kW], to tembolj, ker vodne turbine gonijo sedaj skoraj izključno samo še električne stroje. Zato bi bilo izražanje moči vodnih turbin s kilowatti ne samo pravilno, ampak tudi enostavnejše in preglednejše.

Tudi volumenski pretok Q , s katerim lahko računamo samo pri nestisljivih tekočinah, je problematična veličina. Splošno veljavnost ima pretok mase q [kg/s], s katerim dobi veličinska enačba za vodno moč P naslednjo obliko:

$$P = q g h \eta.$$

Ta enačba je enostavna (zlasti še glede na vrednost $g = 9,81 m/s^2 \approx 10 m/s^2$), daje pa vodno moč neposredno v W .

6. primer: Tlačna višina centrifugalnih črpalk.

V literaturi¹ se navaja, da je tlačna višina pri centrifugalnih črpalkah »koristna razlika energijske vsebine 1 kg pretočne tekočine pred strojem in za njim v $kg \cdot m/kg$ ali m , predstavlja kot višina tekočinskega stebra pretočne tekočine.«

Ta obrazložitev zasluži pripombo.

Iz Bernoullijeve enačbe za nestisljive tekočine izhaja izraz za energiji ustrezno višino H :

$$H = h + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma}$$

Vsi členi v tej enačbi so čiste višine (z dimenzijo dolžine [m]).

Skupna tlačna višina centrifugalnih črpalk izhaja iz dela (energije) W , ki ga je treba opraviti proti teži (sili) G določene mase, da bi se ta dvig-

nila za višinsko razliko (pot) $H_2 - H_1$ (ustrezajočo povečanju energije v stroju):

$$W = G (H_2 - H_1)$$

in je torej

$$H_2 - H_1 = \frac{W}{G}$$

Ta izraz določa za tlačno višino vedno le dimenzijo dolžine [m], pa naj uporabljamo koherentne enote katerega koli sistema mer (tehniškega: $kp \cdot m/kg = m$, Giorgijevega: $J/N = Nm/N = m$).

Zato je treba v zgornji navedbi iz literature brez izjeme vse »kg« razumeti kot enoto sile — kilopond. Omenjena obrazložitev bi se glasila zato pravilneje: tlačna višina centrifugalnih črpalk je enaka povečanju energije pri pretoku določene tekočine skozi stroj, računajoč to povečanje na enoto teže.

7. primer: Plinska konstanta.

V strokovni literaturi, tudi še najnovejši¹, imamo za plinsko konstanto R navedeno enoto »[$kg \cdot m/kg^\circ$] ali [m^2]«, kar nikakor ni povsem točno.

Tej enoti ustreza, v literaturi navajana enačba stanja plinov

$$p V = G R T$$

povezuje tlak p , prostornino V , težo G , plinsko konstanto R in absolutno temperaturo T . Po tej enačbi je definicijska enačba za plinsko konstanto

$$R = \frac{p V}{G T}$$

iz katere izhaja njena enota iz enot tehniškega sistema mer: $kp \cdot m/(^\circ K \cdot kp)$. S krajšanjem kp bi pač prišli do enote $m/^\circ K$, toda tako definirana plinska konstanta daje sicer uporabne številske vrednosti, ni pa fizikalno brezhibna.

Plinska konstanta R je razlika specifičnih toplot pri konstantnem tlaku c_p in konstantni prostornini c_v :

$$R = c_p - c_v$$

Ima torej dimenzijo specifične toplote z enoto J/kg .

Plinska konstanta R izhaja iz enačbe stanja za popolne pline

$$p V = m R T$$

ki povezuje tlak p , prostornino V , maso m in temperaturo (absolutno) T . Torej je definicijska enačba za plinsko konstanto:

$$R = \frac{p V}{m T}$$

iz česar zopet izhaja njena specifični toploti ustrezna koherentna enota v sistemu mer MKSA: $J/(^\circ K \cdot kg)$.

8. primer: Prevod toplote.

Toplotni tok Φ skozi neko snov računamo z enačbo

$$\Phi = \lambda (T_1 - T_2) \frac{A}{\delta}$$

¹ N. pr.: Hütte II A, 28. izd. 1964, str. 820.

¹ Hütte I, 28. izd. 1965, str. 442.

kjer je $(T_1 - T_2)$ razlika temperatur, A površina, δ debelina snovi, λ pa toplotna prevodnost.

Toplotna prevodnost λ je značilna lastnost posamezne snovi, katere številsko vrednost je razvidna iz priročnikov. Podana je v enoti, ki izhaja iz definicijske enačbe

$$\lambda = \frac{\Phi}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\delta}{A}$$

Medtem ko ni dvoma, da bomo površino A merili s m^2 , debelino δ z m in razliko temperatur $T_1 - T_2$ s stopinjami $^\circ$, pa je od izbrane enote za toplotni tok $\Phi = Q/t$ odvisno, kakšna bo enota za toplotno prevodnost λ .

V Evropi so toplotni tok doslej merili z enoto kcal/h, kar da enoto za toplotno prevodnost: kcal/h $^\circ$ m. Ti enoti sta pač med seboj koherentni (skladni) za ozko območje prevoda toplote, ki ga računamo z gornjo enačbo za toplotni tok. Za vse druge probleme pa nista koherentni.

Enota za toplotni tok v sistemu mer MKSA je watt [W]. S to enoto je koherentna enota za toplotno prevodnost — po gornji definicijski enačbi — W/ $^\circ$ m. Seveda bomo s tema enotama mogli računati samo, če nam bodo na voljo podatki o toplotni prevodnosti snovi v ustrezni enoti. (Tudi ti podatki — v obeh enotah — so obseženi v »Strojniškem priročniku«, omenjenem v uvodu.)

Izračunajmo toplotni tok pri prevodu skozi steno iz mehkega jekla (0,2 % C), ki ima debelino 20 mm in površino 2 m^2 , pri temperaturni razliki 50 $^\circ$!

a) Iz uporabe kalorijskih enot izhaja:

$$\lambda = 43 \text{ kcal/h}^\circ\text{m}$$

$$T_1 - T_2 = 50^\circ$$

$$A = 2 \text{ m}^2$$

$$\delta = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$$

$$\Phi = 43 \cdot 50 \cdot \frac{2}{0,02} = 215\,000 \text{ kcal/h}$$

b) Iz uporabe Giorgijevega sistema mer izvira:

$$\lambda = 50 \text{ W/}^\circ\text{m}$$

$$T_1 - T_2 = 50^\circ$$

$$A = 2 \text{ m}^2$$

$$\delta = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$$

$$\Phi = 50 \cdot 50 \cdot \frac{2}{0,02} = 250\,000 \text{ W} = 250 \text{ kW}$$

9. primer: Prandtlovo število.

Prandtlovo število Pr je brezdimenzijsko število, ki ga uporabljamo pri izračunavanju Nusseltovega koeficienta za določitev toplotne prestopnosti α .

Literatura¹ navaja izraz za Prandtlovo število:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad a = \frac{\lambda}{c \gamma}$$

$$Pr = \frac{\nu c \gamma}{\lambda}$$

kjer je ν kinematična viskoznost [m^2/s], c — specifična toplota [kcal/ $^\circ$ kg], γ — specifična teža [kp/ m^3] in λ — toplotna prevodnost [kcal/s $^\circ$ m].

¹ Hütte, I, 28. izd. 1955, str. 495.

S temi enotami dobimo za Prandtlovo število dimenzijo kp/kg in bi bilo to torej brezdimenzijsko število samo v primeru, če bi kp kratko in malo enačili s kg, kar pa nikakor ni pravilno.

Če bi v isti izraz vnesli koherentne enote sistema mer MKSA:

$$\text{za kinematično viskoznost } \nu \text{ — } m^2/s,$$

$$\text{za specifično toploto } c \text{ — } J/^\circ\text{kg},$$

$$\text{za specifično težo } \gamma \text{ — } N/m^3,$$

$$\text{za toplotno prevodnost } \lambda \text{ — } W/^\circ\text{m},$$

bi dobili za Prandtlovo število dimenzijo N/kg, torej vsekakor ne brezdimenzijsko število.¹ Zato navedeni izraz za Prandtlovo število ni pravilen, čeprav daje pravilno številčno vrednost (v kp/kg).

Pravilen izraz za Prandtlovo število se glasi

$$Pr = \frac{c \eta}{\lambda} \quad \eta = \nu \rho$$

$$Pr = \frac{\nu c \rho}{\lambda}$$

V njem se pojavlja gostota ρ namesto specifične teže γ , kar daje Prandtllovemu številu čisto brezdimenzionalnost.

10. primer: Iztočna hitrost plinov in par.

V zvezi s tehničkim sistemom mer in nekoherentno enoto za toploto — kilokalorijo, smo računali doslej iztočno hitrost v plinov in par s pomočjo številске enačbe

$$v = 91,53 \sqrt{i_1 - i_2} \quad v \text{ — } m/s \\ i \text{ — } kcal/kg$$

kjer sta i_1 in i_2 specifični entalpiji pretočne snovi pred in za mestom iztoka. Pretvorni koeficient 91,53 ne pove prav ničesar o zakonitostih medsebojnega razmerja med hitrostjo in spremembo entalpije.

Veličinska enačba za iztok izhaja iz pretvorbe energije: kolikor se zmanjša energijska vsebina (entalpija) snovi, toliko se poveča njena kinetična energija:

$$m \frac{v^2 - v_0^2}{2} = m (i_1 - i_2)$$

Če je $v_0 = 0$, velja:

$$v = \sqrt{2(i_1 - i_2)}$$

V tej veličinski enačbi uporabljamo s pridom koherentne enote sistema mer MKSA, in sicer bo hitrost v merjena z m/s, specifična entalpija i pa z J/kg.

11. primer: Moč parne turbine.

Moč parne turbine smo računali doslej s številsko enačbo

$$P = \eta q H / 860,$$

¹ Brezdimenzijski rezultat bi pač dobili, če bi razumeli specifično toploto c glede na enoto teže in bi torej specifična toplota morala biti merjena v zvezi s tehničkim sistemom mer z enoto kcal/kp, v Giorgijevem pa z enoto J/N. To pa nikakor ni v skladu s pojmovanjem specifične toplote kot lastnosti materije, torej mase.

kjer so bili merjeni: moč P s kW, pretok mase (pare) q s kg/s in toplotni padec H s kcal/kg. Izkoristek η je brezdimenzijsko število.

Do nedavna, ko smo merili moč parne turbine še s konjskimi močmi [KS], smo temu ustrezno uporabljali enačbo

$$P = \eta q H / 632$$

V obeh navedenih enačbah imamo nepotrebna pretvorna koeficienta, ki sta za fizikalno predstavo popolnoma odveč.

Veličinska enačba za moč turbine se glasi enostavno

$$P = \eta q H$$

V njej uporabljamo koherentne enote Giorgijevega sistema mer: za moč P — W, za pretok mase q — kg/s, za toplotni padec H — J/kg.

12. primer: Potisk curka.

V literaturi je v rabi za potisk curka izraz

$$F = \frac{\gamma}{g} \cdot Q v$$

Enačba je veličinska; pravilen rezultat bomo dobili s kakršnimi koli enotami, posebno preprosto pa bo računanje s koherentnimi enotami.

Z uporabo tehniškega sistema mer bo sila F merjena s kp, specifična teža γ s kp/m³, zemeljski

pospešek $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, prostorninski pretok Q merimo s m³/s in hitrost v z m/s. Pri uporabi koherentnih enot sistema mer MKSA bi merili silo F z N in specifično težo γ z N/m³, ostale enote pa bi bile enake.

Potisk curka F pa lahko mnogo enostavneje izrazimo z zmnožkom pretoka q in hitrosti v :

$$F = q v$$

Za to veličinsko enačbo ustrezne koherentne enote daje le Giorgijev sistem mer: za silo F — N, za pretok mase q — kg/s, za hitrost v — m/s.

ZAKLJUČEK

Primeri, zbrani z dokaj različnih področij, kažejo, da uvedba veličinskih enačb ne samo poenostavlja enačbe, ampak jim daje fizikalni smisel in s tem razumljivost, ponekod pa celo pojasnjuje pojme, medtem ko je raba številskih enačb le več ali manj slepo računanje po receptih.

Računanje z veličinskimi enačbami je posebno preprosto, če uporabljamo koherentne enote veličin. Ta koherenca enot pa je rešena z Giorgijevim sistemom mer (MKSA), ki povezuje najrazličnejša področja fizike in tehnike.

Avtor: prof. ing. Bojan Kraut,
Oddelek za strojništvo tehniške fakultete,
Ljubljana.

DK 621.917:621.833.1

Analiza univerzalnega stroja za ozobljenje

(Sistem Pfauter)

CIRIL PISANSKI

Kotalne rezkalne stroje gradijo že od konca preteklega stoletja. Leta 1887 je Grand patentiral svoj stroj za rezkanje čelnih zobnikov z ravnimi zobmi, leta 1894 pa J. E. Reinecker stroj za rezkanje polžastih zobnikov. Herman Pfauter je dne 2. septembra 1897 vložil patent za nov postopek — patent univerzalnega rezkalnega stroja za ozobljenje čelnih zobnikov z ravnimi in poševnimi zobmi ter za ozobljenje polžastih zobnikov. Ta stroj je v svoji metodi postal najpopolnejši stroj za ozobljenje, tako da je Herman Pfauter v svoji patentni prijavi upravičeno dejal »...v vsem je treba novo metodo označiti kot dovršeno, ki se ne da več izboljšati...« (Sl. 1, 2.)

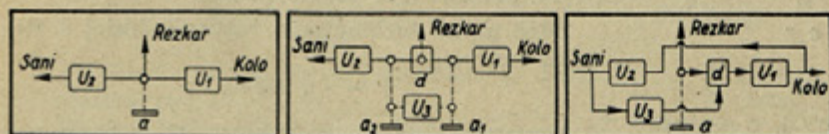
Pri rezkanju čelnih zobnikov uporabljamo kot orodje cilindričen, polžasto oblikovan kotalni rezkar, ki je zastružen in zabrušen tako, da se profil po vsakokratni obrabi in brušenju ne spreminja, kar je velikega pomena. Kotalni rezkarji so izoblikovani tako, da profil zoba kotalnega rezkarja, gledan pravokotno na zavojnico, ustreza profilu zoba zobatega droga. (Sl. 3.)

V naslednjem nameravam podrobneje opisati univerzalni rezkalni stroj firme J. E. Reinecker — URF 7a

(sl. 2, sistem Pfauter), ki ga med ostalimi stroji nahajamo v Litostroju in sem ga z različnimi dopolnitvami in rekonstrukcijami usposobil za univerzalna ozobljenja. (Sl. 4, 5, 6.) Ker sem imel takrat, ko sem šele začel sestavljati kinematično shemo, veliko težav — manjkali so razni strojni deli, predvsem zobniki, ki so v bistvu vplivali na konstante stroja, le-te pa so osnove za nameščanje ustreznih menjalnih zobnikov — in mi ni bila dostopna primerna literatura, ne dvomim, da bodo naslednja razmišljanja pomagala tistim tehnikom, ki imajo tudi opravka z dopolnjevanjem in rekonstrukcijami sličnih strojev.

Za ozobljenje z različnimi načini so izvedena na stroju (sl. 2) naslednja gibanja (vrtenja, pomiki):

1. vrtenje rezkarja,
2. vrtenje mize pri stroju,
3. vertikalni pomik rezkalnega suporta,
4. horizontalni pomik stojala pri stroju,
5. aksialni (osni) pomik rezkalnih sani na suportu.



Brez diferenciala

Z diferencialom

Dokončna izvedba

a = pogon, d = diferencial, U₁ = delilni menjalni zobniki, U₂ = diferencialni menjalni zobniki, U₃ = podajalni menjalni zobniki

Sl. 1. Razvojne sheme univerzalnega rezkalnega stroja za ozobljenje (postopek Pfauter)

Dokončna izvedba daje povsem skladno posevno ozoblje — levo ali desno — pri vsakem številu zob in poljubni velikosti pomika