

DK 532.542.8

Dovajanje zraka v sesalno cev*

ALBERT STRUNA — LEOPOLD SOLC

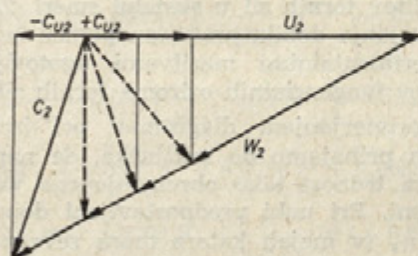
V uvodnih ugotovitvah je prikazan pretok vode iz gonilnika v vstopni prerez sesalne cevi in nastanek vrtničnega jedra pri majhnih obremenitvah ter kavitacije pri večjih obremenitvah. V prvem primeru je omenjena še odvisnost od statične sesalne višine, sicer pa se poglavje konča z znanim navodilom o dovajanju zraka v sesalno cev. Nekaj izkušenj iz prakse potrjuje gornje navedbe in jih dopolnjuje s podatki o tlakih v zgornjem delu sesalne cevi krajevno, časovno, po velikosti ter o prehodu z enega predznaka v drugega.

Podatki iz literature se spuščajo v način dovajanja zraka z ugotovitvijo, da to vprašanje še ni dokončno rešeno. Omenjeni so ukrepi za preprečevanje posledic nemirnega teka pri majhnih obremenitvah in ukrepi za preprečevanje vzrokov za te pojave.

»Litostroj« predlaga v petih točkah način dovajanja zraka, med katerimi je zlasti izrednega pomena imperativna zahteva, da sta sistema za tako dovajanje v sredino in na obod prereza sesalne cevi povsem deljena. Namesto skopih podatkov iz literature o količini potrebnega zraka je zanj navedena empirična enačba, kakršno je potrdila praksa. Tudi utemeljitev predlogov se opira na izkušnje v posameznih hidroelektrarnah.

Ker pa problem glede nadaljnjega še ni dognan dokončno, so v zaključku razen predloga za konstrukcijsko rešitev naštete posamezne faze raziskovalnih del v hidravličnem laboratoriju.

Uvodne ugotovitve. Vstop vode v sesalno cev Francisove turbine je odvisen od okoliščin pri izstopu iz gonilnega kolesa. Iz znanega izstopnega trikotnika hitrosti za polne in delne obremenitve [1], slika 1, izhaja,



Sl. 1. Izstopni trikotnik hitrosti za polne in delne obremenitve

da absolutna izstopna hitrost c_2 samo pri določeni obremenitvi (praviloma pri 75 do 85 % polne obremenitve) nima obodne komponente c_{u2} in vstopa voda v tem primeru v sesalno cev povsem aksialno oz. izstopa iz gonilnika »normalno«. V vseh drugih primerih pa teče voda po spirali v bolj ali manj strmih navojnicah, se pravi, da tvori voda vrtnice, ki ima pri obremenitvah pod normalnim izstopom pozitivno tj. smer vrtenja gonilnika in pri večjih obremenitvah negativno smer, ustrezno smeri obodne komponente absolutne hitrosti.

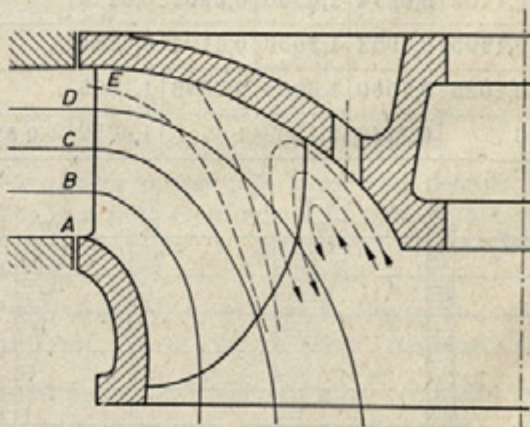
Iz rotacijskega gibanja ($c_u r = \text{konst}$) v sesalni cevi izhaja, da bi pri $r = 0$ rotacijska izguba postala neskončna. V resnici pa narava sama preprečuje ta pojav, ker tvori voda vrtnično jedro z določenim polmerom r [2].

Pojav vrtničnega jedra je nadalje pojasnjen s tem, da je za vstop v sesalno cev mimo kroženja vode značilna še neenakomerna razdelitev pretoka na posamezne parcialne turbine, ki se spreminja z obremenitvijo. Iz izstopnih trikotnikov, določenih npr. po Braunovi metodi [3] izhaja, da se pri majhnih obremenitvah relativna izstopna hitrost bolj zmanjša v notranjih parcialnih turbinah (D, E), slika 2, kakor v zunanjih

(A, B) in se pri velikih obremenitvah relativna izstopna hitrost notranjih parcialnih turbin bolj poveča kakor v zunanjih. Razvidno je, da v parcialnih turbinah D in E pretoka ni več in se zato voda vrača, kakor je prikazano na sliki 2, v smeri osi pod gonilnim kolesom pa nastaja prazen prostor.

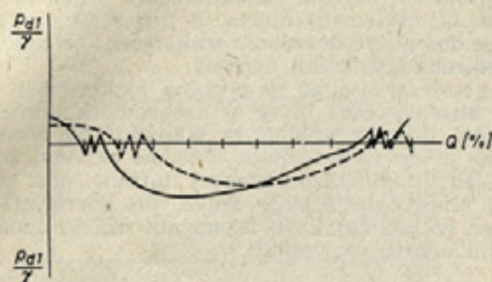
Pri majhnih obremenitvah vstopa torej voda v sesalno cev v obodnih predelih, pri čemer napravlja pozitivni vrtnice obodno kroženje še izrazitejše. Prazen prostor v sredini pod gonilnim kolesom oziroma v sredini sesalne cevi je že omenjeno vrtnično jedro, ki sega vanjo različno globoko, opleta in se izmenoma tudi polni in prazni. Med posledice spadajo udarci, pokanje in prasketanje, vibracije obloge sesalne cevi ter vse-kakor najbolj opazno nemirno obratovanje stroja. Slednje je že tako dolgo znano, da ga Dériaz [1] omenja med zgodovinskimi podatki.

Pri večjih obremenitvah napolnjuje voda tudi srednji del vstopnega prereza v sesalni cevi. Čeprav jo negativni vrtnice potiska proti obodu, se ob stenah sesalne cevi lahko pojavlja izmenoma odlepljanje in prilepljanje, ki se sliši in povzroča tresenje. Te pojave pa je zelo težko ločiti od »normalne« kavitacije, ki nastaja samo pri velikih obremenitvah.



Sl. 2. Pretok skozi gonilnik Francisove turbine pri majhnih obremenitvah

* Članek je prevod referata »L'introduction de l'air dans le diffuseur«, ki sta ga avtorja imela na kongresu I. A. H. R. v Londonu, 1963.



Sl. 3. Sprememba tlakov pri vstopu v sesalno cev v odvisnosti od pretoka

Polna črta: v sredini sesalne cevi.
črtkana črta: na obodu sesalne cevi

Neprijetne posledice opisanih pojavov se omilijo ali preprečujejo z dovajanjem zraka. Če dovod zraka ni zadosten ali če je nepravilno urejen, niha tlak pri izstopu iz gonilnika nad in pod vrednostjo, ki je določena s statično in dinamično sesalno višino:

$$\frac{p_{dt}}{\gamma} = H_B - H_S - \eta_d \frac{c_{dt}^2 - c_{d2}^2}{2g}$$

Statična sesalna višina H_S je pri polni obremenitvi in pri praznem teku praktično enaka, ni pa brez vpliva na pojavljanje vrtninčnega jedra, če se bistveno zmanjša [4]. Dinamična sesalna višina, ki je pri manjših obremenitvah nepomembna, znatno zmanjša tlak pri velikih polnitvah, s čimer se — ob določenih pogojih — pojavlja kavitacija.

O identičnih pojavih, kakršni so pri majhnih obremenitvah Francisovih turbin, je govor tudi pri Kaplanovih turbinah ob neustrezni uravnavi vodilnika in gonilnih lopatic, tj. kadar ima propellerska turbina obratovalno točko predaleč od ustrezne pri Kaplanovi turbini [5].

Povsem drugačnega izvora je prazen prostor pri vstopu v sesalno cev, če se turbina hitro razbremeni in se zaradi kinetične energije vodni tok v sesalni cevi poskuša pretrgati ali celo pretrga. Tudi v tem primeru je potreben dovod zraka.

Nekaj izkušenj iz prakse

Podobno kakor so vse našteje pojave beležili skozi dolga leta v turbinski praksi nasploh, tako so se v ožjem obsegu ponavljali tudi pri turbinah Litostrojevega izvora, turbinskega podjetja, ki je oprto samo nase preživel (mimo ostalega) tudi to razvojno fazo v izredno skrčenem obdobju. Zato ni čudno, da so prihajala na njegov naslov zdaj pa zdaj poročila iz posameznih hidroelektrarn o vibracijah »sifonske obloge«, o odpadanju sekundarnega betona, o kavitaciji, o področjih nemirnega obratovanja, o bobnanju v sesalni cevi itd. Čeprav sprva teh pojavov ni bilo mogoče povezati v celoto, so se vendar dale izluščiti naslednje najbolj značilne ugotovitve:

— Področje nemirnega teka ni konstantno; celo pri enakih turbinah, ki obratujejo z enakimi pogoji, je različno po legi in obsegu.

— S spremembo obremenitve se spreminja tlak na obodu in v sredini vstopnega prereza v sesalno cev po vrednosti in predznaku. Podtlak se pojavlja na obodu in v sredini hkrati ali pa časovno premaknjeno, odvisno od vsakokratne obremenitve.

— Prehod tlaka od pozitivnih vrednosti na negativne ni miren, marveč ga spremljajo močne pulzacije (posebno na obodu).

— Pri manjših obremenitvah je sesanje zraka v sredini izrazitejše kakor na obodu, pri večjih obremenitvah pa je narobe.

— Spremembo tlakov prikazuje slika 3, ki je povzeta z ene izmed Francisovih turbin iz sistema Mavrovskih hidroelektrarn (v SR Makedoniji). V diagramu niso vpisane številčne vrednosti, marveč so te registrirane po videzu za različne količine vode oz. za različno intenzivno sesanje zraka v sredini in na obodu sesalne cevi.

Podatki iz literature in nekatere izvedbe

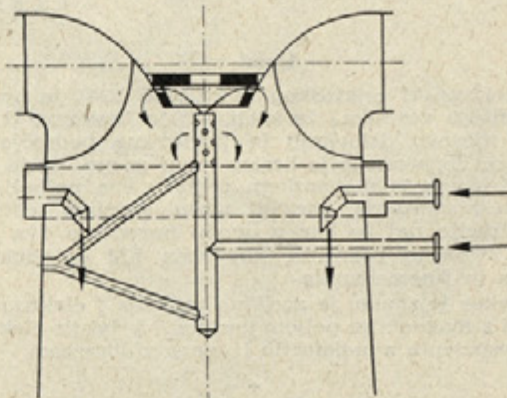
Strokovna literatura navaja, da je treba v sesalno cev dovajati zrak, če naj se preprečuje kavitacija pri velikih obremenitvah, povratni udarec pri naglih razbremenitvah in zračni vrtninčno jedro pri majhnih obremenitvah [3, 4]. Za dovajanje pa rabijo votla turbinska gred, posebni ventili v turbinskem pokrovu in prevrtano pesto gonilnika oziroma posebna cev z ustjem pod gonilnikom. Podatki o količinah potrebnega zraka so prav tako skopi. Večidel je beseda o količini, ki naj bo enaka maksimalni količini vode pri hitrosti 250 m/s v zračnih ventilih [3] pri preprečevanju vodnega udarca v sesalni cevi, za preprečevanje nemirnega teka pri majhnih obremenitvah pa količina ni omenjena, pač pa poudarjena potreba po povezanosti zračnih ventilov in regulacijskih obročev. Če omenimo samo še tvrdko Voith, ki vodnega udarca ne preprečuje z zračenjem, pač pa dovaja zrak v sredini in na obod sesalne cevi, je zadostno prikazana raznolikost izvedb, ki jo v ostalem še potrjujejo konstrukcije, kakršne so v literaturi najdljive. To je potrditev, da dovajanje zraka v sesalno cev Francisovih turbin še ni dokončno raziskano, kaj šele dokončno rešeno. V načelu pa bi bilo namesto zraka ustrezno tudi z dovajanjem vode [4].

Med ukrepe za preprečevanje posledic nemirnega obratovanja pri majhnih obremenitvah spada splošno priporočilo, da naj se s Francisovimi turbinami ne obratuje pod 40 % maksimalne obremenitve in to izraža s pogoji kavitacijskih garancij, čeprav pojavi pri takem obratovanju niso v nobeni zvezi s kavitacijo.

Med doslej še nerealizirane ukrepe za preprečevanje vzrokov nemirnega obratovanja pa spada npr. dovajanje zraka kombinirano z uporabo vodilnih lopatic za gonilnim kolesom [6].

Predlog Litostroja je plod vseh dosedanjih izkušenj, predvsem glede na pobude tvrdk Voith in Charmilles, opira pa se na številne uspele izvedbe pri hidroelektrarnah v Jugoslaviji, med katerimi so npr. Jablanica, Gojak, Raven, Vrben itd.:

1. Zrak je treba dovajati v sredino vstopnega prereza in na obod sesalne cevi.



Sl. 4. Dovod zraka v sesalno cev s pomočjo dveh ločenih sistemov

2. Za dovajanje zraka v sredino ni primerna votla turbinska cev, marveč je potrebna posebna cev, ki ga dovaja s spodnje strani. Zgoraj odprta cev sega do odprtine v kapi gonilnega kolesa, razen tega pa je na zgornjem koncu gosto perforirana v dolžini 1 d do 3 d, pri čemer velja večja vrednost za manjšo specifično vrtilno hitrost in obratno.

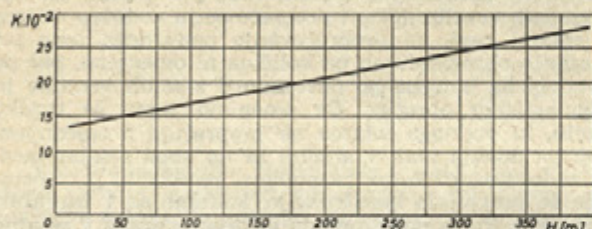
3. Na obodu naj bodo za dovod zraka vgrajena vsaj štiri kolena z izstopom aksialno navzdol z izmerami po sliki 4.

4. Oba dovajalna sistema nista združena, marveč imata dovodne cevi speljane ločeno v drenažo ali prostor zunaj strojnice. Cevi sta opremljeni s povratnimi ventiloma, da ni mogoč izstop vode, pač pa vstop zraka ob vsakokratnem podtlaku.

5. Vsota dovodnih prerezov za oba sistema je dana s formulo:

$$S \geq K \frac{Q}{250},$$

pri čemer je vrednost koeficienta K , določena po dose-
danjih izkušnjah, razvidna iz diagrama na sliki 5.



Sl. 5. Vrednost koeficienta K , s katerim se določajo prerezi sistemov za dovod zraka v sesalno cev

Prerez S [m²] pa se razdeli na centralnega (S_c) in obodnega (S_o) v razmerju

$$S_c/S_o = 7/3 \quad S_c + S_o = S$$

Predlog je utemeljen z naslednjim:

— Turbinska gred ni primerna za dovajanje zraka, ker bi morebitno prelivanje vode škodovalo agregatu, žvižgajoče sesanje v strojnici pa je tudi neugodno.

DK 537.533.35:681

Nekaj problemov fine mehanike pri konstrukciji elektronskih mikroskopov

ALES STROJNIK

Uvod

Elektronski mikroskop (okrajšano EM) je bralcu »Strojniškega vestnika« želel znan, saj je Leskovar [1] že opisal njegovo delovanje in poglavitna področja za uporabo. Verjetno pa je bralcu manj znano, da je EM v električnem in mehanskem pogledu ena najbolj zahtevnih konstrukcij, kar jih pozna sodobna tehnika. V ilustracijo naj že kar v uvodu navedemo dva primera, ki bosta pokazala, kaj terjata EM od elektrotehnika in finomehanika.

Kakor je znano, je goriščna razdalja f elektronske leče, ki z magnetnim poljem gostote B krivi tir elektronov, pospešenih z napetostjo U , dana z obrazcem

$$\frac{1}{f} = \frac{K}{U} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} B^2 dz,$$

— Cev v sredini sesalne cevi usmerja jedro vrtinca, ki zato manj opleta. S primernim perforiranjem je dosegljivo dovajanje zraka kjer koli niže, če se taka potreba izkaže kot uspešna.

— Najvažnejša pa je popolna ločitev obeh dovajalnih sistemov, saj bi se v nasprotnem primeru ob hkratnem tlaku v sredini in podtlaku na obodu (ali obratno) po ceveh pretakala voda, ne pa sesal zrak.

— Pri nagli razbremenitvi turbine oba sistema skupaj omogočata sesanje zraka, ob povratku vodne mase pa ga zadržujeta in ustvarjata zračno blazino, ki povratni udarec vsaj ublaži.

Zaključek

Dovajanje zraka po dveh ločenih sistemih je prikazano na sliki 4. Predlog zadeva področje, ki kompleksno še ni raziskano in terja zato še laboratorijske raziskave v naslednjih smereh:

— primerjalna merjenja na modelni turbini in ustrezni industrijski izvedbi glede ukrepov in analogije vpliva na nemirni tek pri manjših obremenitvah;

— ugotovitve zakonitosti o poteku tlakov v sredini in na obodu sesalne cevi, odvisno od n_m obremenitve in lege spodnje vodne gladine;

— ugotovitev najugodnejšega načina za dovajanje zraka in njegove količine;

— konstrukcijsko izvedbo dovajanja zraka oz. vode.

Literatura

[1] P. Dériaz, A contribution to the understanding of flow in draft tubes of Francis turbines (AIRH, Symposium de Nice 1960, B-1).

[2] I. Vučković, Über Rotationsverluste hinter Laufrädern von Turbomaschinen, Escher Wyss Mitteilungen, 1941.

[3] M. Nechleba, Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství, Praha, SNTL 1964.

[4] N. Obradović, Pseudokavitacija, Tehnika, 1958/4, Beograd.

[5] W. Thuss, Betriebszustände von Kaplan-turbinen, Voith 1958.

[6] Habilitačijsko delo dr. ing. Iva Vučkovića, Beograd, 1960.

Naslov avtorjev: prof. ing. Albert Struna, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani; ing. Leopold Šote, Litostroji, Ljubljana

pri čemer je K stalnica, ki vsebuje med drugim vpliv oblike leče, z pa je koordinata vzdolž optične osi leče. Če hočemo, da bo slika tudi pri velikih povečavah ostra, se sme f spreminjati za manj kakor 1:100 000. To pomeni, da smeta biti vsaka zase spremembi visoke napetosti U in magnetnega polja največ

$$\frac{\Delta U}{U} < 1:100\,000, \quad \frac{\Delta B}{B} < 1:200\,000.$$

Ker pa se pojavljata oba skupaj, ju ocenimo na

$$\frac{\Delta U}{U} < 1:200\,000, \quad \frac{\Delta B}{B} < 1:400\,000.$$