

UDK 532.575:621.224

Kriteriji in metode za merjenje pretoka na vodnih turbinah

FRANC SCHWEIGER

1. UVOD

Merjenje pretoka na hidroagregatih je zahtevna in kočljiva naloga. Splošno merimo pretok iz več razlogov, in sicer:

— pri prevzemnih meritvah, kjer določamo izkoristek agregata,

— pri vsakodnevnem pogonu, kjer naj bi imeli stalno kontrolo pretoka, kar bi bilo namenjeno urejeni obremenitvi posameznih turbinskih agregatov,

— kot statistični podatek za hidrološko službo.

Pretok lahko določimo z uporabo različnih meriskih metod. Specifični pogoji za izbiro posamezne metode so podani z državnimi standardi ali z mednarodnimi prevzemnimi predpisi. Vsaka metoda pa terja posebne merilne naprave, ki naj bodo:

- zanesljive,
- natančne,
- uporabljive na najbolj občutljivem področju,
- ponovljive z razsipanjem v dopustnih mejah,
- dosegljive za primerno ceno.

Zahteve in določila za meritve posameznih veličin na hidro-agregatih so določene s poprejšnjo pogodbo o prevzemu agregata.

Pri izbiri merilne metode se pojavljajo zahteve, ki so značilne za določen hidro-agregat. Na izbiro merilne metode vplivajo:

- velikost pretoka,
- velikost padca,
- situacijska razporeditev cevovodov in kanalov,
- natančnost meritve,
- kakovost fluida,
- osebje,
- gospodarnost meritve.

Sestava zahtev, ki jih narekujejo izbira merilne metode in pogoji za delovanje naprav, šele omogoča pravilno odločitev.

Velikost pretoka daje prvi podatek, ki omejuje izbiro merilne metode. V hidroagregatih, kjer je dovod vode urejen po cevovodih ali po zaprtih kanalih, merimo pa manjše pretoke, lahko uporabljamo metodo s hidrometričnimi krili, tlačno časovno metodo itd. Pri večjih pretokih pa lahko dodamo še solno razredčilno metodo. Prednost imajo tiste metode, ki jih lahko uporabljamo v obeh smereh toka.

Te metode so posebno zanimive za agregate s črpalno turbinskimi agregati. Velikost padca vpliva na izbiro turbine ter posredno tudi na izbiro merilne metode (Peltonova turbina). Zaradi preprostosti in gospodarnosti pa je vredno posvetiti posebno pozornost Winter-Kennedyjevi metodi, ki sicer še ni priznana. Le-ta sloni na zakonu o prostem vrtnicu, ki se ustvarja v okrovu turbine. Različne lokalne hitrosti v okrovu turbine so osnova za merjenje pretoka.

Pretok merimo v izbranem pretočnem prerezu. Za vsako metodo je zaželeno, da imamo na mestu meritve lepo izoblikovan turbulentni profil hitrosti. Turbulentni profil hitrosti se pojavlja, kadar imamo primerno dolžino ravnega cevovoda, kjer se vse nepravilnosti fluidnega toka izravnavajo in odpadejo. Običajno potrebujemo ravno dolžino cevovoda v dovodu in odvodu od merilnega mesta, da zadostimo pogoju turbulentnega toka. Lahko sklepamo, da razporeditev cevovodov kakor tudi oblika terena in možnost pristopa do merilnega mesta določajo dolžino ravnega cevovoda.

Mednarodni predpisi (IEC — *International Electrotechnical Commission*) oziroma državni standardi določajo mejo natančnosti za merjenje posameznih veličin. Posebno vlogo imajo tu instrumenti, katerih kakovost mora biti nesporna. Mnogi instrumenti morajo biti testirani pred meritvijo in po njej. S tem zagotovimo upoštevanje vseh nepravilnosti, ki se pojavljajo med meritvijo.

Sestava fluida in mineralnih primesi pomenijo v določenih primerih pomemben faktor, ki lahko resno ogroža oziroma poškoduje merilne instrumente (hidrometrična krila) kakor tudi statične priključke na stenah. Posledica so nepravilni odbirki in napačni rezultati.

Osebe, ki opravlja prevzemne meritve na hidravličnih agregatih, mora imeti primerne izkušnje in mora biti »uglašeno«, da teče meritev brezhibno. Vsaka merilna metoda pretoka ima svoje posebnosti, ki jih mora osebe pri meritvah dobro poznati. S poznavanjem merilne tehnike in vrednotenjem rezultatov dobimo pravilno oceno pri pripravljalnih kakor tudi pri prevzemnih meritvah.

Z gospodarnostjo meritve razumemo izbiro tiste merilne metode za pretok, ki v danih razmerah ustreza optimalnim pogojem. Pri določanju optimalnih pogojev upoštevamo stroške meritve same, hkrati pa ne smemo zanemarjati stroškov, ki nastanejo zaradi prenehanja obratovanja hidrocentra-

le med montažo in demontažo merilnih naprav, kakor tudi omejitve obremenitve turbine med meritvijo. Stroški meritve se spreminjajo glede na izbiro metode, zato si prizadevamo za izpopolnitev in pridobitev izkušenj s takimi metodami, ki bi bile za večino hidrocentral najprimernejše.

2. MERILNE METODE

Mednarodni predpisi in standardi dovoljujejo in priporočajo izbiro določenih merilnih metod pri prevzemnih meritvah. Z razvojem tehnike in potreb po merjenju pretoka se je razvilo več metod, ki se stalno izpopolnjujejo in dopolnjujejo.

2.1. Merjenje pretoka s krili

Pri tej metodi uporabljamo hidrometrična krila, ki posredno merijo hitrost pretakajočega se fluida. Od začetnih poskusov pa do sedaj smo dobili natančen in zanesljiv instrument za merjenje pretoka. Prednost merilnika s krili je ta, da sešteva hitrost pretakajočega se fluida na izbranem merilnem mestu neomejen čas. Zapis števila vrtljajev krila je do opazovalca prenesen električno. Pri pravilni uporabi hidrometričnega krila izmerimo pretok v mejah $\pm 0,5\%$. Krila so pritrjena in razvrščena na nosilcu, ki je prirejen za izbrani merilni prerez. Na merilnem mestu mora biti napravljen primeren dostop za kontrolo merilnika. Pri izbiri merilnega mesta po upoštevanju naslednje:

- merilna prereza izberemo po možnosti v odvodu,
- stranice merilnega prereza naj potekajo vzporedno in naj bodo ravne,
- os posameznega krila naj bo vzporedna s smerjo toka.

V določenih primerih uporabljamo komponentna krila, ki niso posebej občutljiva za smer toka. Podatki o razmestitvi in izbiri velikosti krila ter vrednotenju rezultatov so podani v predpisih. Tu je treba omeniti probleme nosilne konstrukcije za krilo ter njen vpliv na hitrostni profil, ki še ni popolnoma razčiščen. Kratek pregled merilne metode s krili pokaže, da je hidrometrično krilo še vedno zelo zanesljiv instrument za merjenje pretoka.

2.2. Tlačno časovna metoda

Tlačno časovno metodo je razvil Gibson v Severni Ameriki ter se večkrat po njem tudi imenuje. V novjšem času jo koristno uporabljajo in izpopolnjujejo tudi Japonci. Turboinstitut v Ljubljani ima tudi potreben instrumentarij ter si je že pridobil določene izkušnje pri uporabi te metode. Fizikalno načelo metode temelji na Newtonovem zakonu, ki pravi, da je sprememba gibalne količine fluida enaka impulzu, ki ga dobimo pri nenadni redukciji pretoka. Jakost impulza merimo z integracijo tlačno časovnega diagrama, ki ga dobimo pri zapi-

ranju lopute, ko zapremo tok skozi turbino v kratkem časovnem presledku. Za zapis tlačno časovnega diagrama so uporabljali v začetni dobi filmski trak, na katerega so snemali nihanje v cevi U, polnjeni z živim srebrom. V novejši dobi uporabljamo (posebno Japonci) tlačno elektronska tipala za zapis spreminjanja tlaka s časom. Tlačno časovna metoda terja skrbno izbiro instrumentov, dobro pripravo celotnega preizkusa ter osebje, izkušeno pri izračunu in meritvi.

2.3. Solnohitrostna metoda in solnorazredčilna metoda

Solno hitrostna metoda sloni na merjenju časa, ki ga porabi v vodi raztopljena sol za pot v obliki »oblaka« od merilnega mesta 1 do mesta 2. Na mestih 1 in 2 imamo nameščene elektrode, ki zapisujejo čas, ko gre »oblak« mimo obeh merilnih mest. Pretok dobimo tako, da delimo prostornino tlačnega voda med obema mestoma s poprečnim časom, ki ga porabi solni »oblak« za pot med obema merilnima ravninama. Pri tej metodi je poudarjeno merjenje prostornine, za kar izmerimo več dolžin in premerov, poudarjena pa je tudi meritev časa. Za določitev časovnega presledka uporabljamo večkrat koordinate težišča zapisnega diagrama, ki ga dobimo, ko gre solni »oblak« mimo merilnih mest.

Solno razredčilno metodo za merjenje pretoka uporabljamo pri padcih prek 50 do 100 m ter za pretoke 30 do 50 m³/s. V vodni tok, ki mu želimo izmeriti pretok, injiciramo določen čas solno raztopino, ki se pomeša s pretakajočim se fluidom. V odvodu naj bo koncentracija homogena, tako da razmerje med pretokom Q in injicirano količino q kaže jakost koncentracije in mešanja. Pretok dobimo pri predpostavki, da fluid poprej ne vsebuje injicirane raztopine, po enačbi:

$$Q = \frac{C}{C_I} q$$

kjer pomenita:

C — koncentracijo injicirane raztopine, C_I — koncentracijo v odvodu na mestu odvzema.

Pri izmerjeni injicirani količini q ter znani koncentraciji, ki jo dobimo s kemično analizo, lahko določimo pretok fluida. Glavni vir napak je pri merjenju koncentracije. Oprema je preprosta, vendar pa analiza koncentracije na merilnem mestu samem ni mogoča, kar zavre uporabnost te metode. Prednost metode pa je ta, da ne terja ustavitve obratovanja hidrocentrale. Varianta te metode je uporaba radioaktivnih izotopnih sredstev. Tu se zmanjša količina injicirane raztopine, kar je velika prednost pri merjenju večjih pretokov. Jasno pa je, da moramo pri uporabi izotopov upoštevati vse predpise, ki veljajo za radioaktivna sredstva, to je raztopljivost, stabilnost, dobo trajanja, dovoljeno stopnjo radioaktivnosti itd.

2.4. Druge metode

V to skupino naj vključimo metode, ki še niso priznane z mednarodnimi standardi. Te metode oziroma merilniki imajo to prednost, da ne povzročajo motenj pri toku, niso občutljivi za korozijo, za usedline raznega materiala in ne povzročajo tlačnih izgub. Dodatno lahko tudi trdimo, da njihova uporaba pri merjenju toka ne povzroča obratovalnih motenj hidroagregata.

Tu naj omenimo:

- merilnik pretoka z ultrazvokom in
- merilnik pretoka z elektromagnetnim poljem, ki sta že prekorajčila laboratorijske meje in se tudi na terenu dobro uporabljata.

Pri merilniku pretoka z ultrazvokom uporabljamo kot osnovo hitrost širjenja zvoka v fluidu. Razliko širjenja zvočne hitrosti v odvodu in v dovodu daje časovni presledek in pomeni linearno odvisnost s pretokom. Drugi tip merilnika pretoka sloni na spremembi elektromagnetne indukcije E . Pri konstantnem magnetnem fluksu je elektromagnetna indukcija sorazmerna hitrosti pretakajočega se fluida. Tako dobimo pretok:

$$Q = k E$$

kjer je k — konstanta, določena z umerjanjem. Prednosti dobljene odvisnosti so velike, saj v enačbi za pretok ni veličin temperature, viskoznosti, gostote, niti oblike profila hitrosti.

Tu bi lahko navedli še nekatere druge metode, ki pa so glede na celotno problematiko manj pomembne.

2.5. Winter-Kennedyjeva metoda

Takoj uvodoma naj povemo, da ta metoda ni priznana kot standardna prevzemna metoda. Je pa možnost, da bo pri zadostnem številu zbranih preizkusnih podatkov in pri izkušnjah iz različnih delov sveta tudi ta metoda prišla v mednarodne prevzemne predpise. Merilo za pretok po tej metodi je velikost tlačne razlike med dvema točkama tokovnega polja v okrovju turbinskega stroja. Da ustvarimo v cevovodu tlačno razliko, morajo biti izpolnjeni določeni pogoji. V mnogih primerih povzročajo ti pogoji dodatne izgube, ki so nezaželene. Zato uporabljamo že obstoječe elemente (kolena, konuse itd.) kot merilnike za tlačno razliko. V primeru vodnih turbin uporabljamo razporeditev tlaka v spiralnem okrovju kot vir tlačne razlike. Na posameznih mestih spiralnega okrova imamo različne tlake ter temu ustrezne različne hitrosti, kar rabi za merilo pretoka. Že kratek vpogled v načelo metode same pokaže izredne prednosti te metode tako s hidravličnega kakor tudi montažnega stališča. Uporabljeni instrumenti so preprosti in poceni, namestitve pa ne pomeni posebnih težav. Vredno je poudariti, da bi morali biti statični stenski priključki narejeni že pri sami izdelavi spiralnega okrova.

Ta kratek oris metode pove, da Winter-Kennedyjeva metoda tudi z gospodarskega stališča ni zahtevna. Lahko trdimo, da ta metoda v večini primerov zadošča optimalnim pogojem. Metoda sloni na določenih predpostavkah in ima nekatere omejitve glede na tip hidravličnega stroja, ki ga želimo preizkusiti. Zaradi mnogih prednosti, ki jih ima ta metoda v primerjavi s standardnimi, jo bomo v nadaljevanju podrobno obdelali.

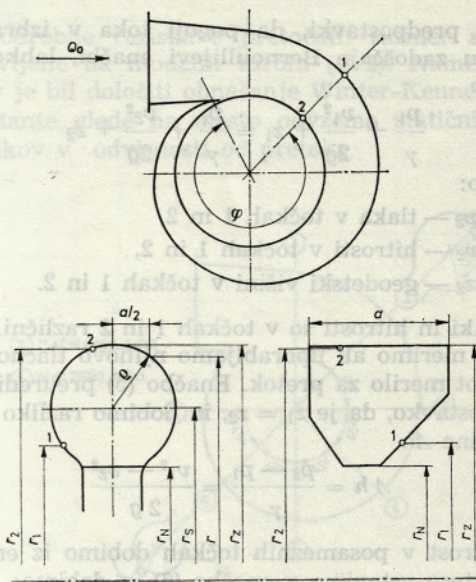
3. TEORIJA METODE

Teorija merjenja pretoka po Winter-Kennedyjevi metodi sloni na načelu prostega vrtinca:

$$v r = k \quad (1)$$

kjer so: v — hitrost, r — polmer, k — konstanta.

Ta zakon se ohranja po vsem prerezu spiralnega okrova. Oblika vrtinca je posebno izrazita pri manjših in srednjih padcih in se pojavlja v okrovu hidravličnega stroja.



Sl. 1. Spiralni okrov

Pretočna količina Q na izbranem prerezu spiralnega okrova (sl. 1) znaša:

$$Q = Q_0 \frac{\varphi}{2\pi}$$

kjer pomenita:

Q_0 — celotni pretok skozi hidravlični stroj,

φ — kot, ki označuje izbrani prerez, na katerem določamo pretok.

Dalje lahko izrazimo pretok skozi izbrani prerez

$$Q = \int_{r_n}^{r_z} v a dr \quad (2)$$

kjer pomenijo:

r_z in r_n — zunanji in notranji polmer izbranega prereza,

v — hitrost v posamezni točki,

a — širino spiralnega okrova,

dr — prirastek polmera.

Iz enačbe (1) izrazimo hitrost v in jo vstavimo v enačbo (2) pa dobimo:

$$Q = k \int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr \quad (3)$$

Izraz, ki je podan z enačbo (3), pomeni pretok skozi izbrani prerez. Nasprotno pa lahko iz enačbe (3) pri znanem pretoku Q in geometriji spiralnega okrova izračunamo konstanto k :

$$k = \frac{Q}{\int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr} \quad (4)$$

Pri predpostavki, da pogoji toka v izbranem prerezu zadoščajo Bernoullijevi enačbi, lahko zapišemo

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (5)$$

kjer so:

p_1 in p_2 — tlaka v točkah 1 in 2,

v_1 in v_2 — hitrosti v točkah 1 in 2,

z_1 in z_2 — geodetski višini v točkah 1 in 2.

Tlaki in hitrosti so v točkah 1 in 2 različni, lahko jih merimo ali uporabljamo njihovo tlačno razliko kot merilo za pretok. Enačbo (5) preuredimo s predpostavko, da je $z_1 = z_2$, in dobimo razliko tlačne višine Δh

$$\Delta h = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (6)$$

Hitrost v posameznih točkah dobimo iz enačbe (1), katero vstavimo v enačbo (6) in dobimo:

$$\Delta h = \frac{k^2}{2g} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \quad (7)$$

Konstanto k v zgornji enačbi izrazimo z vrednostjo, podano v enačbi (4). Tako dobimo za razliko tlačne višine med obema merilnima točkama obliko

$$\Delta h = \frac{1}{2g} \frac{Q^2}{\left(\int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr \right)^2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \quad (8)$$

Pretok lahko izrazimo tudi s splošno znano relacijo

$$Q = k_1 \sqrt{\Delta h} \quad (9)$$

Enačbi (8) in (9) združimo ter dobimo

$$Q = k_1 \frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{Q}{\int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr} \frac{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}}{r_1 r_2} \quad (10)$$

kar da vrednost konstante:

$$k_1 = \sqrt{2g} \int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr \frac{r_1 r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \quad (11)$$

Iskani celotni pretok lahko sedaj izrazimo

$$Q_0 = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \frac{2\pi}{\varphi} \sqrt{2g \cdot \Delta h} \int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr \quad (12)$$

Celotni pretok je izražen z obliko okrova in z razliko tlačne višine Δh . Za geometrično različna okrova izračunamo vrednost integrala

$$\int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr$$

Najpreprostejši je idealiziran primer pravokotnega prereza, kjer sta

višina okrova $b = r_z - r_n$

širina okrova $a = \text{const}$

Vrednost integrala znaša

$$\int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr = a \ln \frac{r_z}{r_n} \quad (13)$$

Izraz za pretok dobi obliko

$$Q_0 = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \frac{2\pi}{\varphi} a \cdot \ln \frac{r_z}{r_z - b} \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (14)$$

Podobno dobimo izraz za pretok, če izberemo okrov s krožnim prerezom

$$Q_0 = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \frac{2\pi}{\varphi} 2\pi \left(r_s - \sqrt{r_s^2 - \varrho^2} \right) \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (15)$$

V primeru poljubnega prereza okrova turbine dobimo pretok po enačbi (12), tako da za dani prerez analitično ali grafično določimo vrednost integrala.

Če hitrost ne ustreza prostemu vrtincu, se pojavljajo odstopanja med vrednostma konstante, ki sta dobljeni analitično ali s preizkusi. Tu so potrebne podrobne raziskave, ki naj pokažejo velikostni red odstopanj posameznih veličin kakor tudi razporeditev hitrosti po prerezu okrova.

Metodo pa je mogoče uporabiti tudi v nasprotnem pomenu, tako da statične odbirke Δh na okrovu merimo pri znanem pretoku Q . Tako usmerjeni statični priključki so namenjeni za stalno kontrolo pretoka.

Pretok dobimo potem po enačbi (9)

$$Q = k_1 \sqrt{\Delta h} \text{ oz. } Q_0 = k_0 \sqrt{\Delta h} \text{ kjer je } k_0 = k_1 \frac{2\pi}{\varphi}$$

Analitična vrednost konstante znaša:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\varphi} \frac{r_1 r_2}{\sqrt{r_2^2 - r_1^2}} \sqrt{2g} \int_{r_n}^{r_z} \frac{a}{r} dr \quad (16)$$

Vrednost konstant k_1 oz. k_0 je odvisna od oblike okrova hidravličnega stroja kakor tudi od izbire mesta statičnih priključkov, kar je neposredno povezano z velikostjo polmerov r_1 in r_2 .

Ekperimentalna vrednost konstante k_1 znaša

$$k_1 = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}}$$

Obe vrednosti konstante se popolnoma ne ujemata. Vzroki za odstopanja so v domnevi, da se fluid giblje po načelu prostega vrtinca po vsej širini okrova kakor tudi, da je tok v turbini enakomeren po vsem obodu. Pretočne razmere so glavni vzrok za odstopanja med obema vrednostma konstante. Odstopanja so posebno izrazita, kadar turbina obratuje v območju, ki je daleč od optimalne točke. V takih primerih se pojavljajo sekundarni tokovi, ki deformirajo pretočno polje.

Vrednost konstante ugotavljamo lahko na modelu oziroma na končnem izdelku. Enačba (16) pove, da je konstanta proporcionalna površini m^2 . Sedaj lahko zapišemo relacijo za konstanto, ki velja za končni izdelek in model:

$$\frac{k_1}{k_{1m}} = \zeta^2 \quad (17)$$

ki pomeni razmerje površine.

k_1 — konstanta za končni izdelek,

k_{1m} — konstanta za model.

Enačbo (17) lahko pišemo v obliki

$$k_1 = \zeta^2 k_{1m}$$

ki nam pri znani obliki modela in izdelka ter pri znani konstanti za model daje konstanto za končni izdelek. Tu se pojavljajo delna odstopanja zaradi nepopolne podobnosti pretočnih razmer v modelu in izdelku.

Da lahko problem podrobneje razčlenimo, vpeljemo še naslednje pojme za konstante:

k'_1 — analitična konstanta za izdelek,

k'_{1m} — analitična konstanta za model.

Pri predpostavki, da imamo popolno geometrično in hidravlično podobnost, veljata tudi enakost Reynoldsovega števila

$$Re_{izdelka} = Re_{modela}$$

in povezava med posameznimi konstantami

$$k'_{1m} : k_{1m} = k'_1 : k_1 \quad (18)$$

Po enačbi (18) lahko napišemo

$$\frac{1}{k_{1m}} = \frac{k'_1}{k'_1} \frac{1}{k_{1m}}$$

Vpeljemo še analitično vrednost za ζ , ki pomeni geometrično modelno merilo, pa dobimo

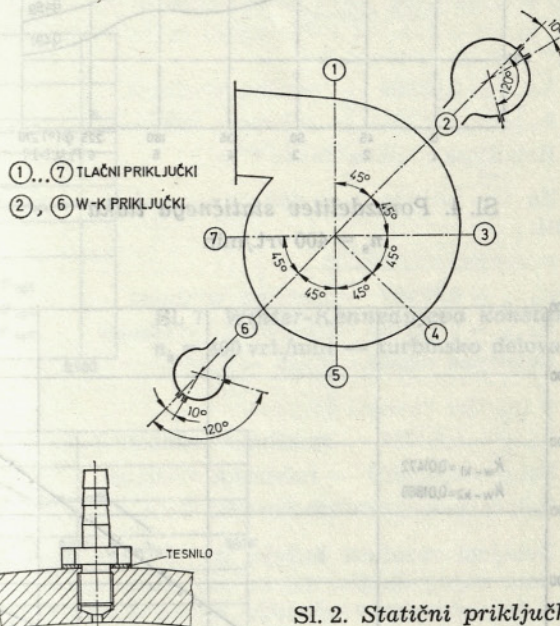
$$\zeta^2 = \frac{k'_1}{k'_{1m}} \quad (19)$$

S tem pridemo do končne oblike

$$k_1 = \zeta^2 \cdot k_{1m}$$

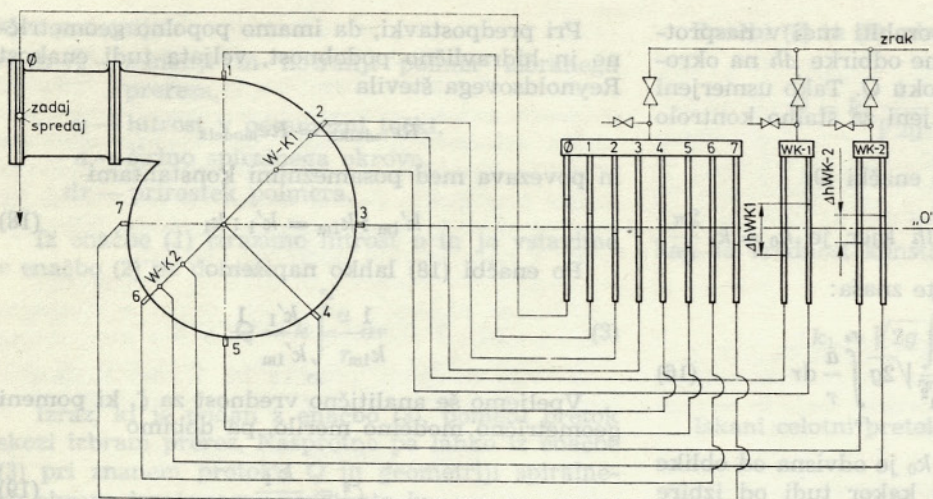
4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Podrobne raziskave pretočnih razmer so bile opravljene na modelih turbin (sl. 2). Namen raziskav je bil določiti obnašanje Winter-Kennedyjeve konstante glede na mesto odvzema statičnih priključkov v odvisnosti od pretoka.

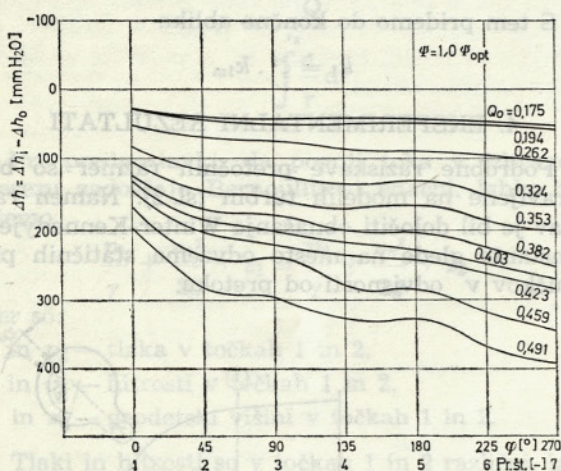


Sl. 2. Statični priključki

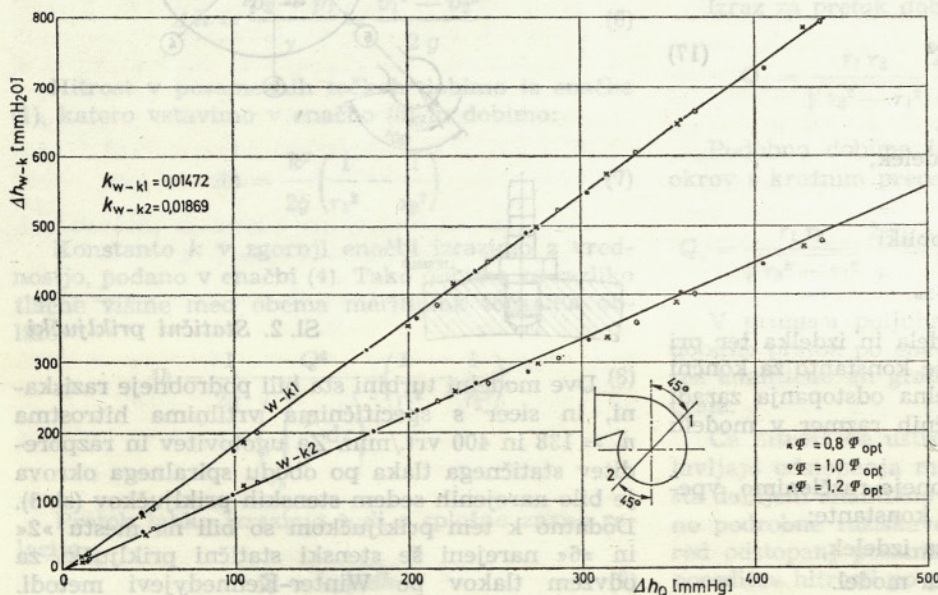
Dve modelni turbini sta bili podrobneje raziskani, in sicer s specifičnima vrtilnima hitrostma $n_s = 138$ in 400 vrt./min. Za ugotovitev in razporeditev statičnega tlaka po obodu spiralnega okrova je bilo narejenih sedem stenskih priključkov (sl. 3). Dodatno k tem priključkom so bili na mestu »2« in »6« narejeni še stenski statični priključki za odvzem tlakov po Winter-Kennedyjevi metodi.



Sl. 3. Merilna shema



Sl. 4. Porazdelitev statičnega tlaka

 $n_s = 400$ vrt./min

Sl. 5. Turbinsko delovanje

 $n_s = 138$ vrt./min

Prva merilna ravnila je bila izbrana v ravlini, nagnjeni za 45° od navpične, medtem ko je bila druga merilna ravnila izbrana v ravlini, nagnjeni za 225° . Oba statična priključka v teh ravlinah sta bila izbrana v presečišču stene in premice, nagnjene za 10° in 120° , merjeno od simetrale prereza (sl. 2).

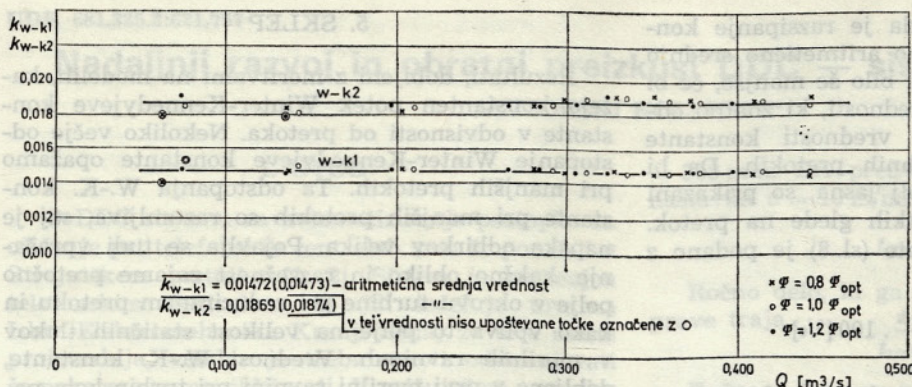
V turbinskem delovanju je bil narejen preizkus pri treh različnih tlačnih številih, in sicer:

$$\psi = 0,8 \psi_{\text{opt.}}$$

$$\psi = \psi_{\text{opt.}}$$

$$\psi = 1,2 \psi_{\text{opt.}}$$

Porazdelitev statičnega tlaka po obodu spiralnega okrova je v določenih področjih neenakomerna (sl. 4). To je posebno izrazito opazno pri večjih pretokih. Neenakomernost tlaka hkrati kaže, da se pojavlja neenakomeren odpor pri spremenjenem pretoku. Vzrok za neenakomerno porazdelitev sta-



Sl. 6. Winter-Kennedyjeva konstanta

 $n_s = 138$ vrt./min — turbinsko delovanje

tičnega tlaka je prehod iz toka v ceveh na tok v spiralnem okrovu. Tudi posamezne površine pre-rezov spiralnega okrova se morajo postopoma spreminjati po obodu, drugače pride do dodatnih izgub. Da bi lahko podrobno ocenili neenakomernost statičnega tlaka, bi morali poznati celotno pretočno polje po vsem prerezu na vsakem mestu odvzema statičnega tlaka.

Odbirki oziroma njihovo razmerje $\Delta h_Q / \Delta h_{w-k}$ pri izbranih tlačnih številih ψ kažejo, da so odstopanja posebno v prvi merilni ravnini neznatna.

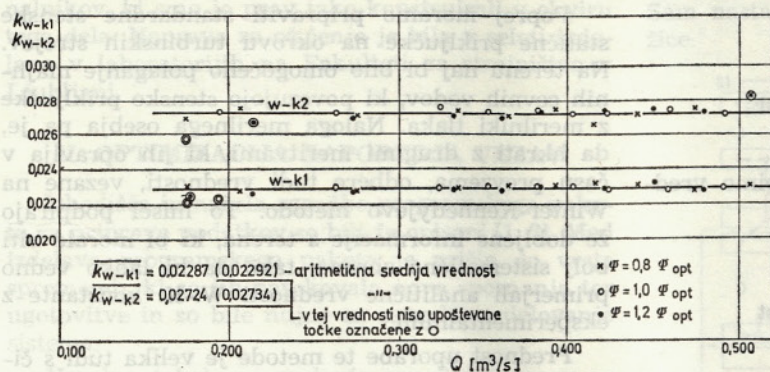
Δh_Q — odbirek na Venturijeji šobi,

Δh_{w-k} — odbirek na stenskih statičnih priključkih, določenih po Winter-Kennedyjevi metodi.

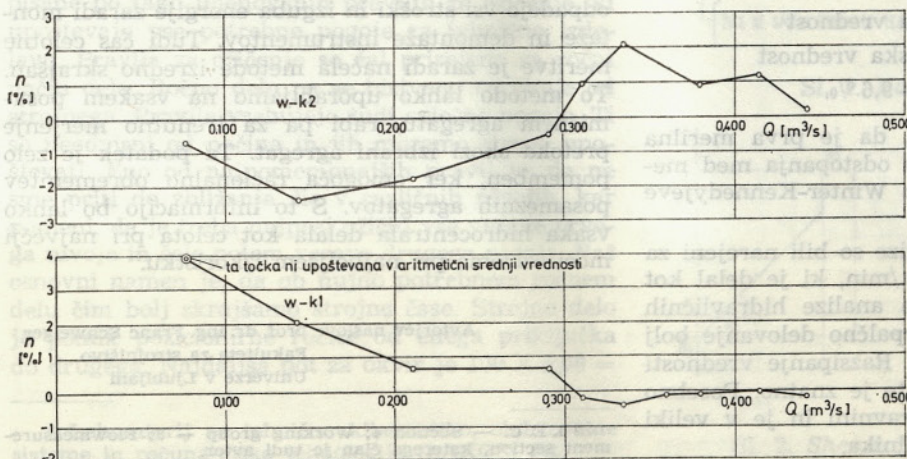
Potek razmerja $\Delta h_Q / \Delta h_{w-k}$ je za obe merilni ravnini linearen (sl. 5 in 6) ter ima naslednje vrednosti:

n_s vrt./min	Ravnina 1	Ravnina 2
138	$\Delta h_Q / \Delta h_{w-k} = 0,55476$ $k_{w-k} = 0,01472$	$\Delta h_Q / \Delta h_{w-k} = 0,89436$ $k_{w-k} = 0,01869$
400	$\Delta h_Q / \Delta h_{w-k} = 1,335$ $k_{w-k} = 0,02287$	$\Delta h_Q / \Delta h_{w-k} = 1,894$ $k_{w-k} = 0,02724$

Grafični prikaz posameznih vrednosti Winter-Kennedyjeve konstante k_{w-k} (sl. 7), ki temelji na



Sl. 7. Winter-Kennedyjeva konstanta

 $n_s = 400$ vrt./min — turbinsko delovanjeSl. 8. Odstopanje konstante k_{w-k}

$n_s = 138$ vrt./min;
 $\psi = \psi_{opt}$ — turbinsko delovanje

izmerjenem pretoku, kaže, da je razsipanje konstante majhno glede na njeno aritmetično srednjo vrednost. To razsipanje pa bi bilo še manjše, če bi zanemarili tiste izmerjene vrednosti, ki znatno odstopajo. Znatna odstopanja vrednosti konstante opazimo predvsem pri majhnih pretokih. Da bi bila slika konstante k_{w-k} bolj jasna, so prikazani diagrami odstopanj v odstotkih glede na pretok. Odstotno odstopanje konstante (sl. 8) je podano z enačbo

$$n = \frac{k_{w-k} - \bar{k}_{w-k}}{\bar{k}_{w-k}} \cdot 100 [\%]$$

kjer je $\bar{k}_{w-k}$ — aritmetična srednja vrednost konstante.

Pri analizi Winter-Kennedyjeve konstante je posebno zanimiva primerjava vrednosti konstante, dobljene z meritvijo, in konstante, dobljene z izračunom pri znani obliki okrova turbine in mestih statičnih priključkov.

Za tip turbine $n_s = 138$ vrt./min dobimo vrednosti:

- v merilni ravnini 1:

$k_{w-k} = 0,01472$ — merilna vrednost

$k_{w-k} = 0,014695$ — računska vrednost

Relativna napaka:

$$\frac{k_{w-k}(\text{meritev}) - k_{w-k}(\text{račun})}{k_{w-k}(\text{meritev})} \cdot 100 = 0,2 \%$$

- v merilni ravnini 2:

$k_{w-k} = 0,01869$ — merilna vrednost

$k_{w-k} = 0,017546$ — računska vrednost

Relativna napaka znaša 6 %.

Za tip turbine $n_s = 400$ vrt./min dobimo vrednosti:

- v merilni ravnini 1:

$k_{w-k} = 0,02287$ — merilna vrednost

$k_{w-k} = 0,023756$ — računska vrednost

Relativna napaka znaša — 3,9 %.

- v merilni ravnini 2:

$k_{w-k} = 0,02724$ — merilna vrednost

$k_{w-k} = 0,029866$ — računska vrednost

Relativna napaka znaša — 9,6 %.

Dobljeni rezultati kažejo, da je prva merilna ravnina najugodnejša, saj so odstopanja med merilno in računsko vrednostjo Winter-Kennedyjeve konstante najmanjša.

Podobni preizkusi in analize so bili narejeni za hidravlični stroj $n_s = 138$ vrt./min, ki je delal kot črpalka. Že prve meritve in analize hidravličnih veličin so pokazale, da je črpalčno delovanje bolj nestabilno in neenakomerno. Razsipanje vrednosti Winter-Kennedyjeve konstante je znatno. Posebno izrazito je v drugi merilni ravnini in je v veliki meri odvisno od odprtja vodilnika.

5. SKLEP

Rezultati, dobljeni z meritvami na modelih, kažejo konstanten potek Winter-Kennedyjeve konstante v odvisnosti od pretoka. Nekoliko večje odstopanje Winter-Kennedyjeve konstante opazimo pri manjših pretokih. Ta odstopanja W.-K. konstante pri manjših pretokih so razumljiva, saj je napaka odbirkov velika. Pojavlja se tudi vprašanje, kakšno obliko in razsežnost zajame pretočno polje v okrovu turbine pri reduciranem pretoku in kako vpliva to polje na velikost statičnih tlakov v merilnih ravninah. Vrednost W.-K. konstante, dobljene v prvi merilni ravnini pri turbinskem pogonu, je sprejemljiva. Ta sklep pa še bolj potrjuje teoretična vrednost W.-K. konstante, ki jo dobimo iz čiste geometrije turbinskega okrova. Izbira lege prve merilne ravnine je zelo primerna, saj so si merilne in računske vrednosti W.-K. konstante zelo blizu. Eksperimentalni in analitični rezultati so zelo ugodni, tako da lahko pričnemo s sistematičnim zbiranjem podatkov o Winter-Kennedyjevi metodi, in sicer v laboratoriju kakor tudi na terenu. Tako zbrani podatki bi lahko bili v trdno oporo, da bi Winter-Kennedyjevo metodo sprejeli kot absolutno. Ti statistični podatki, zbrani pri različnih terenskih razmerah in različnih vrstah obratovanja, bi nadalje rabili kot osnova za jugoslovanske predloge, naslovljene na I. E. C. — *International Electrotechnical Commission*.¹

Poprej moramo pripraviti standardne stenske statične priključke na okrovu turbinskih strojev. Na terenu naj bi bilo omogočeno polaganje majhnih cevni vodov, ki povezujejo stenske priključke z merilniki tlaka. Naloga merilnega osebja pa je, da hkrati z drugimi meritvami, ki jih opravlja v času prevzema, odbere tudi vrednosti, vezane na Winter-Kennedyjevo metodo. To misel podpirajo že dobljene informacije s terena, ki bi morale biti bolj sistematično zbrane, tako da bi lahko vedno primerjali analitične vrednosti W.-K. konstante z eksperimentalnimi.

Prednost uporabe te metode je velika tudi s čisto gospodarnega vidika. Pri uporabi te metode odpadejo vsi stroški in izguba energije zaradi montaže in demontaže instrumentov. Tudi čas celotne meritve je zaradi načela metode izredno skrajšan. To metodo lahko uporabljamo na vsakem posamičnem agregatu, rabi pa za trenutno merjenje pretoka skozi izbrani agregat. Ta podatek je zelo pomemben, ker omogoča racionalno obremenitev posameznih agregatov. S to informacijo bo lahko vsaka hidrocentrala delala kot celota pri največji moči oziroma pri najboljšem izkoristku.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Franc Schweiger
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani

¹ I. E. C. — Section 4; Working group — 8; Flowmeasurement section, katerega član je tudi avtor.