

DK 621.311.21:532.5

Instrumenti za raziskovanje hidravličnih pulzacij v HE Jablanici

JOVAN MARUČIĆ

1. Uvod

Pri preciznih instrumentih za moderna raziskovanja zavzema čedalje vidnejše mesto elektronika, zlasti še, kadar gre za dinamične pojave. Uporaba elektronike, kakor n. pr. konkretno v hidravliki in strojništvu, pa je pogojena s tesnim sodelovanjem in vsklajanjem medsebojnih zahtev iz obeh vej.

Instrumenti za merjenje majhnih dinamičnih sprememb najpogosteje izkoriščajo določene električne pojave, ki služijo kot pretvarjalniki mehaničnih hidravličnih in drugih pojavov v električne. Pri tem je velika prednost, da se tudi najmanjše spremembe tako ojačijo, da se sploh lahko merijo. Tu je vredno pripomniti, da — glede na ostale sisteme — električni sistem nima inercije.

V HE Jablanici gre za merjenje majhnih pulzacij vodnih mas in hidravličnih pulzacij statičnega tlaka in podtlaka; dalje za merjenje pulzacij zraka ter vibracij turbine in okolne mase. (Podrobnosti so razvidne iz članka prof. dr. ing. I. Vučkovića »Raziskovanje hidravličnih pulzacij v HE Jablanici«.)^{*} Še pred začetkom merenj je bila opravljena vrsta preizkusov in izboljšav na pretvarjalniku v laboratoriju, hkrati pa izbrane primerne merilne metode za pogoje, kakršni obstajajo v HE Jablanici. Vsa merilna mesta so označena s številkami 1 do 8 na poenostavljeni shemi prereza strojnice in galerije zapornih organov v elektrarni (slika 1).

^{*} Glej SV 1960—21.

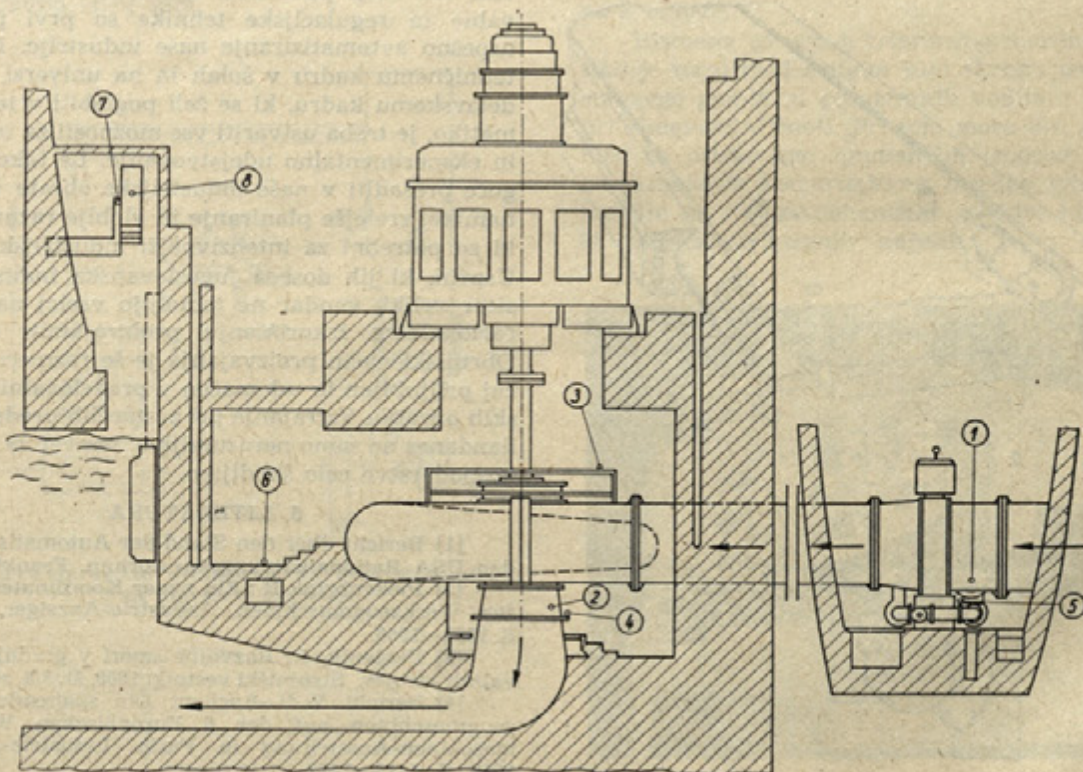
2. Instrumenti za merjenje hidravličnih pulzacij v vodni masi

Za to merjenje je pred turbinsko loputo (merilno mesto 1 na sliki 1) uporabljena cilindrična sonda z dvema luknjicama, ki sta razporejeni diametralno na smer strujanja. Sonda je v normalnem obratovanju v rabi za merjenje pretoka skozi turbino. Razlika tlakov v sondi določa hitrostni nivo tlaka v vodnem toku ($k v^2/2g$). Z določanjem razlike tlakov na dinamičnem diferencialnem manometru je mogoče izmeriti pulzacijo hitrosti pri strujanju.

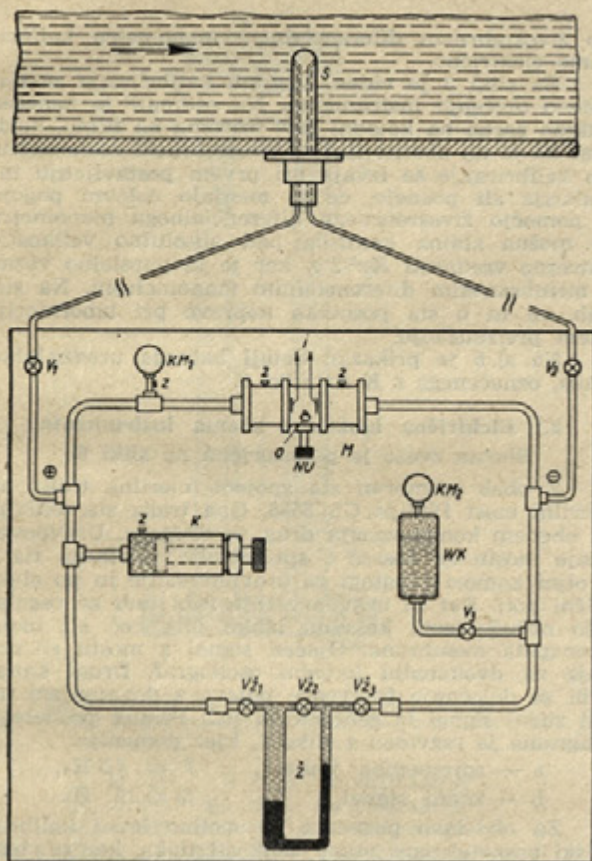
Merjenje majhnih pulzacij v vodni masi (s frekvenco od 2 do 15 Hz in s spremembo tlakov od 2 do 100 Torr), ki jih ne moreta spremljati ne mehanični ne hidravlični merilni sistem, spada med specialne primere. Zato je bil izbran sistem električnega pretvarjanja ter izdelan in kalibriran poseben pretvarjalnik.

Med več vrstami električnih pretvarjalnikov, ki delujejo na osnovi spremembe fizikalnih parametrov, se uporabljajo spremembe kapacitete, induktivnosti, magnetne reluktance in upora.

Ker gre tod za majhne spremembe tlaka, je potrebno izbrati sistem s čimmanjšo inercijo in dušenjem. Sistemi s spremembami kapacitete in induktivnosti ter reluktance zahtevajo trdno nepremično ploščo, od katere se meri položaj premične membrane. Povrh tega se z uporabo več mehaničnih elementov pojavlja možnost za nove lastne frekvence sistema ter povečanje inercije v njem. Pri naši napravi, kjer



Sl. 1. Prečni prerez strojnega prostora in galerije za zaporne organe z označbo merilnih mest



Sl. 2. Shema preizkusne naprave

S — cilindrična sonda, M — membranski diferencialni sprejemnik, K — batno uravnalo tlaka, WK — zračni prekat, Z — živosrebrni diferencialni manometer, KM — kontrolni manometri, i — merilni trakovi, V₁...V₃ — ventili, O — odprtina za olje, Z — vijaki za izpušanje zraka, NU — ničelno uravnalo tlaka, V₂₁...V₂₃ — ventili živosrebrnega manometra

imamo opravka s frekvenco do 25 Hz in tlaki od 2 Torr dalje, je neizbežna tudi uporaba elektronske aparature, preciznih delov in dobre zaščite pred električnimi in atmosferskimi motnjami. Spričo takih pogojev sprejemniki na teh osnovah, pa čeprav zelo precizni, niso najugodnejši, ker zahtevajo občutljivejšo aparaturu in večjo pazljivost glede električnih motenj. Tudi sprejemniki na osnovi spremembe magnetne reluktance niso primerni zaradi mehaničnega sistema in ker je nazadnje v vseh teh primerih mera tlaka sorazmerna upogibu v sredini membrane. Zato je to prednost, da ne menja inercije membrane. Slednja je zaradi tega lahko zelo občutljiva, ker se nanjo ne veže noben naknadni mehanični element in je glede delovne frekvence tako rekoč neomejena. Sicer ji lahko oporekamo težavo pri zaščiti pred vlago, kar pa za krajši čas ne povzroča preglavic. Membrana, ki sprejema tlak, je obenem tudi merilni pretvarjalnik, ker je nosilec merilnega traku. Vrh tega se majhne spremembe temperature uničujejo z uporabo kompenzacijskega traku, kar ni mogoče pri kapacitivnih ali induktivnih sprejemnikih. Po vsem tem je bila osvojena shema hidravlične zveze, kakršna je na sliki 2,* in sicer za merjenje, kontrolo in kalibriranje na kraju samem.

* Ta slika je bila objavljena že v navedenem Vučkovičevem članku, glej SV 1960—2, str. 46.

Problem prenosa hidravličnih pulzacij ob popolni odstranitvi zraka v hidravličnem sistemu, je v tem, da se zmanjšajo:

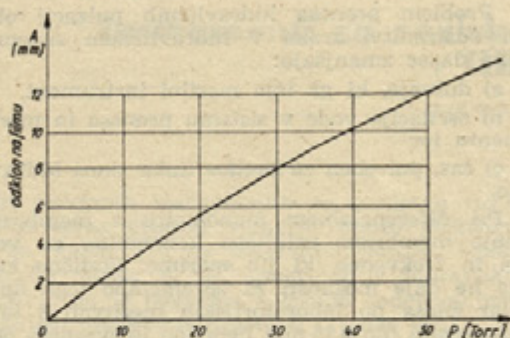
- dušenje, ki ga ima merilni instrument,
- oscilacije vode v sistemu prenosa in merilnem elementu ter
- čas, potreben za prenos tlaka skozi hidravlično linijo.

Pri diferencialnem manometru z membrano je dušenje membrane približno konstantno za velikost tlaka in frekvence, ki jih merimo. Statično kalibriranje ne daje možnosti za spremembo tega dušenja, vendar znaša po laboratorijskih meritvah s tankimi membranami (do 0,15 mm debeline in premera 60 mm) ter za razlike tlakov do 1 at (pri frekvenci do 30 Hz), napaka pod 1,5 % tlaka. Poizkus je bil izvršen delno eksperimentalno z oljno komoro ali dinamičnim vzbujevalnikom vibracij, delno pa računske. Ti podatki niso popolnoma natančni, ker je problem dinamičnega kalibriranja zelo zamotan. Kalibriranje lahko izvajamo s pomočjo hidravličnega udarca v kalibracijski posodi.

Problem oscilacije vode v vodih od merilnega mesta do merilnega sistema je pomemben pri merjenju pojavov s hidravličnim udarcem. Ker gre tukaj za majhne in harmonične spremembe, sistem ni izpostavljen parazitnim hidravličnim oscilacijam. Če se pojavijo hidravlične oscilacije v liniji, jih lahko dušimo z enosmernimi ventili. Pri morebitnem osciliranju membrane je zasnovana nekoliko večja oljna komora v diferencialnem manometru, ker se tedaj oscilacije dušijo v njej. Lastna frekvenca hidravlične linije je v glavnem odvisna od dolžine linije, od vrste tekočine ter nekoliko tudi od premera cevi in slednjč materiala, iz katerega je grajena. Priključni vodi z notranjim premerom 4 mm imajo periodo lastne frekvence $1/1000$ s za vsakih 0,25 cm linije, tako da je za linijo 4 m lastna frekvenca okrog 62 Hz. Natančnost je odvisna od obsega spremembe pritiska v primerjavi s skupno lastno frekvenco membrane in linije (4).

Hidravlična shema je zasnovana tako, da so vsi vodi in pipe dobro tesnjeni, je odstranjen ves zrak iz vodov ter se pulzacija vode brez dušenja (kompresije) prenaša na sprejemne membrane. V ta namen rabijo stožčasta tesnila in ventili za paro, manometer za visoki tlak in vse cevi iz bakra z zvarjenimi priključki. Razen tega je treba težiti za tem, da je priključni vod od sprejemnika do mesta, kjer se meri sprememba tlaka, čimkrajši ter volumen linije med mestom, kjer se odvzema tlak, in membrano ni velik v primerjavi s prostorom, v katerem imamo pojav, ki ga merimo. To se doseže z vodi z notranjim premerom 8 mm in postavljanjem diferencialnega manometra v neposredni bližini merilnega mesta. Diferencialni manometer sestoji iz dveh membran, postavljenih na komoro z oljem. Pozitivni tlak deluje na eno membrano, negativni na drugo. Ker sta membrani v komori druga proti drugi, dajeta merilna traka, ki sta nameščena z notranje strani membrane, razliko spremembe tlaka na eni in drugi membrani. Merilni trak sestoji iz tanke električne žice, nalepljene na papir v cikcakasti liniji v velikosti pošne znamke. Merilni trak je nalepljen na podlago tako, da z njo sestavlja celoto. Deformacija podlage (membrane) menja električni upor merilnega traku zaradi podaljšanja. Spremembe električnega upora se ojačujejo z elektronskim instrumentom in merijo na katodni cevi. S posnemanjem na filmu s katodne cevi dobimo potek dinamične spremembe tlaka. Zrak se iz instalacije prazni s pomočjo vijakov Z (sl. 2) za izpušanje zraka v najvišjih točkah posameznih vej na njej.

Pri merjenju se uporablja instalacija tako, da se ventil V3 zapre, ventili živosrebrnega manometra pa



Sl. 3. Kalibriranje diferencialnega manometra (za temperaturo 15°C , atenuator ojačevalnika mosta $A_m = 3$, atenuator ojačevalnika oscilografa $A_o = 3$)

se odprejo. Prav tako se odprejo tudi vijaki za izpuščanje zraka in počasi pušča voda skozi V_1 in V_2 . Ko voda iztisne zrak, zapremo vse vijake za izpuščanje. Tedaj je v vseh delih sheme enak tlak, ker je hidravlični vod diferencialnega sprejemnika kratko staknjen. Pred merjenjem se zapre dovod na ventilih V_1 in V_2 in uravnovesi tlak na ničlo z obeh strani diferencialnega manometra s pomočjo NU. Z odprtjem ventilov V_1 in V_2 ter zaprtjem ventila živosrebrnega manometra V_{32} je instalacija pripravljena za merjenje. Pri tem merjenju deluje tudi živosrebrni manometer, ki zaradi velike inercije živega srebra duši membrano diferencialnega manometra. Živosrebrni manometer rabi tudi za kontrolo dela, ker kaže srednjo vrednost razlike tlakov.

Za statično kalibriranje se odprejo ventili živosrebrnega manometra in ventil V_3 . Tako se dobi enak tlak na kontrolnem manometru zračne komore in na manometru v plus vodu. Pri izenačenem tlaku se zapirajo ventili V_1 in V_2 , s čimer je instalacija odcepljena od tlačnega voda ($Q = 0$). S postopnim dovajanjem tlaka v hidravlično zvezo čez batni ravnilnik tlaka, ob istočasnem izklapljanju kratkega stika diferencialnega manometra z zaprtjem ventila V_{32} , dospe statični tlak na oba diferencialna manometra.

Po živosrebrnem diferencialnem manometru kalibriramo električno.

Na sliki 3 je viden diagram kalibriranja za določeno ojačenje instrumenta. Na ordinati je nanesen odklon žarka na katodni cevi oziroma na filmu, medtem ko je na abscisi tlak v živosrebrnem manometru. To kalibriranje se izvaja pri prvem postavljanju instalacije ali pozneje, če se menja delovni pogoji. S pomočjo živosrebrnega diferencialnega manometra je možna stalna kontrola nad absolutno velikostjo ustrezne vrednosti $Kv^2/2g$, ker je ta paralelno vezan z membranskim diferencialnim manometrom. Na slikah 4a in b sta posnetka naprave pri laboratorijskem preizkušanju.

Na sl. 5 je prikazan detajl batnega uravnalnika tlaka, označenega s K na sliki 1.

2.1 Električna blokovna shema instrumenta

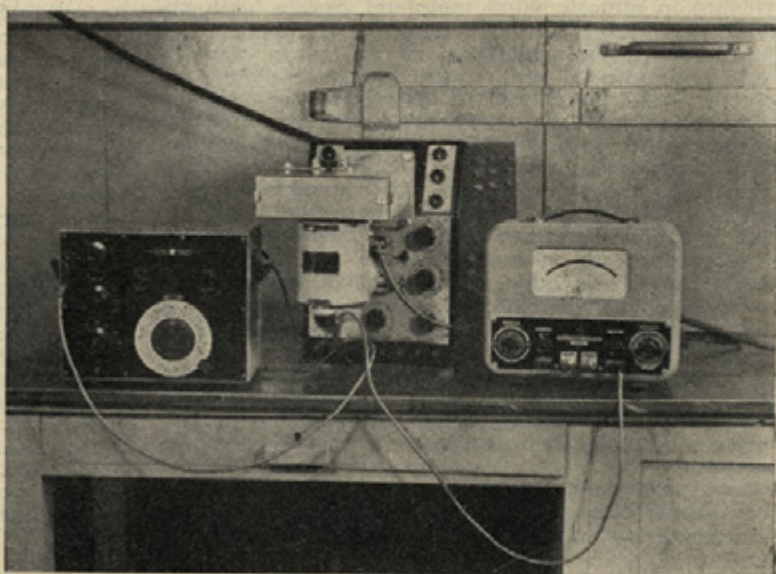
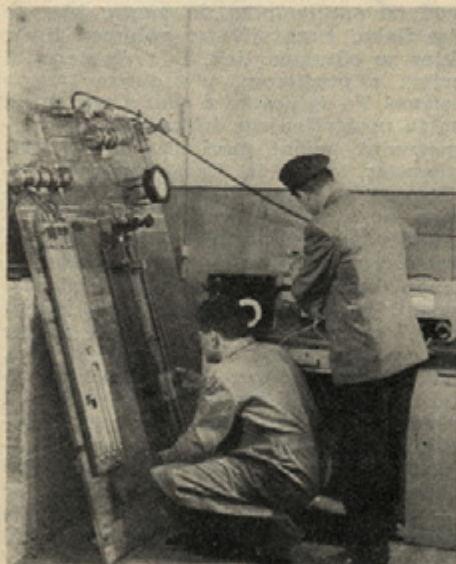
Shema zveze je ponazorjena na sliki 6.

Z obeh membran sta spojena merilna traka na merilni most Philips GM 5536. Oba traka sta aktivna in obenem kompenzacija drug za drugega. Uravnovešeno se doseže s spremembo začetnega tlaka v oljni komori z batom za uravnovešanje in po električni poti. Bat za uravnovešanje rabi tudi za regulacijo občutljivosti, kakršno lahko ima več ali manj prenapeta membrana. Ojačen signal z mostu se dovaja na dvokanalni katodni oscilograf. Drugi kanal rabi za določanje frekvence pojava z dovajanjem na isti znani signal iz generatorja RC. Primer posnetega diagrama je razviden s slike 7, kjer pomenijo:

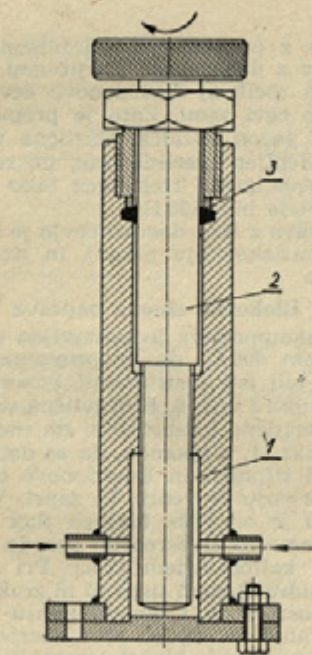
- a — spremembo tlaka, $f = 4,5 \text{ Hz}$,
- b — znani signal, $f_0 = 12 \text{ Hz}$.

Za obdelavo posnetka je ugodno imeti kalibracijski posnetek ene znane velikosti tlaka, ker se s tem preveri stabilnost instrumenta pri delu (uravnavanje, ojačenje, motnje) med merjenjem s primerjanjem s krivuljo kalibriranja. To se doseže tako, da se uporabi električni kalibrator, ki ga shematsko prikazuje slika 8.

Kalibrator sestoji iz uporske škatle, s pomočjo katere premostimo most z upornostnimi traki. Po tej poti uvedemo znane spremembe upora v merilni most. Od velikosti upora, ki smo ga vklopili paralelno v most, je odvisna velikost odklona pri katodnem žarku oz. tlaku, ki je simuliran. Vrednosti upora so:



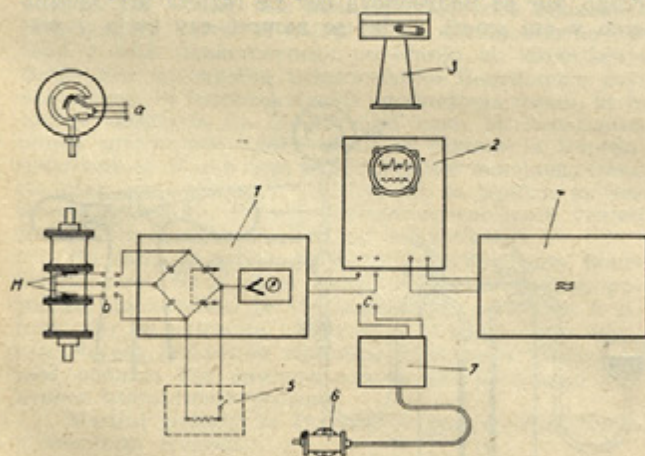
Sl. 4. Posnetka naprave pri laboratorijskem preizkušanju



Sl. 5. Detajl batnega uravnalnika tlaka
1 — vodna komora, 2 — bat, 3 — tesnila

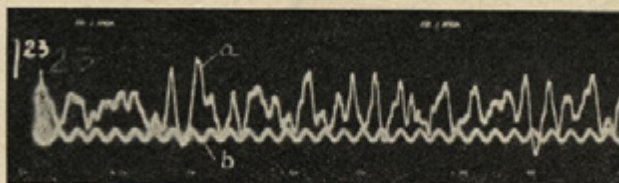
$R_1 = 100$	$k\Omega \rightarrow 3$	% raztezanja
$R_2 = 300$	$k\Omega \rightarrow 1$	% raztezanja
$R_3 = 600$	$k\Omega \rightarrow 0,5$	% raztezanja
$R_4 = 1$	$M\Omega \rightarrow 0,3$	% raztezanja
$R_5 = 1,5$	$M\Omega \rightarrow 0,2$	% raztezanja

Ce je krivulja kalibriranja membrane linearna, lahko električno kalibriramo tudi z obteženo membrano. Električni kalibrator rabi obenem tudi za povečanje občutljivosti merilnega mostu pri velikih raztezkih membrane, t. j. pri nasičenju ojačenja. To se doseže s tem, da uvajajo v most znane spremembe upora merilnega traku z nasprotnim predznakom in potem ravnovesje mostu privedemo približno na ničlo. Za trajno obratovanje rabi stikalo P (sl. 8); medtem ko je za kalibriranje ugodnejše tipkalo T. Ta sistem se je pokazal kot ugoden, ker je za določeno ojačenje pri večjem raztezu katodni žarek presegal zaslon, nakar je bilo uporabljeno električno uravnovešanje

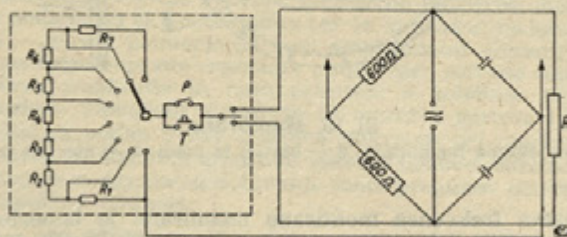


Sl. 6. Shema zveze

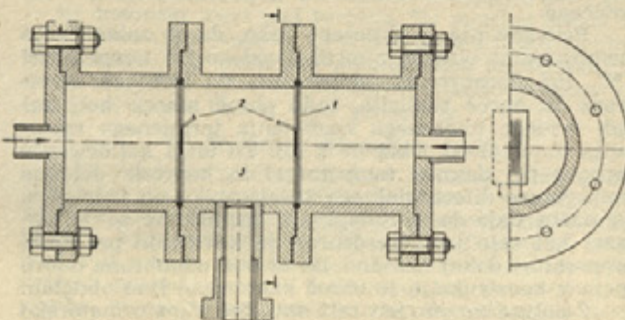
M — merilni trakovi, 1 — merilni most (Philips GM 5536), 2 — katodni oscilograf (Cossor KM II 1019), 3 — filmska kamera za oscilograf, 4 — tonski generator (Philips Z 906069), 5 — električni kalibrator, 6 — selizmični sprejemnik vibracij, 7 — merilnik amplitud vibracij (PR 9250)



Sl. 7. Posnetek diagrama spremembe tlaka



Sl. 8. Shema električnega kalibratorja



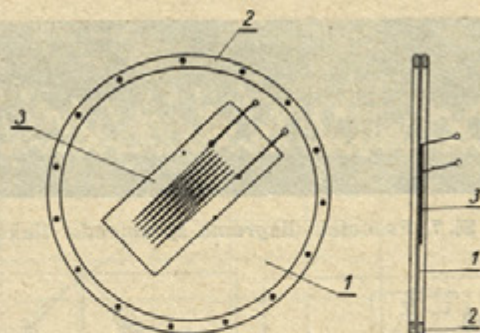
Sl. 9. Diferencialni električni sprejemnik tlaka
1 — membrana, 2 — merilni trakovi, 3 — oljna komora

mostu, t. j. vračanje katodnega žarka na ničlo, in sicer z namenom, da bi bilo ojačenje vedno enako. Premikanje žarka lahko dosežemo s potenciometrom za premikanje žarkov na katodnem oscilografu, in sicer pod kontrolo premika na graduiranem potenciometru ali na posebnem kontrolnem instrumentu. Ta rešitev ni praktična in izkazuje omejene možnosti. Druga prednost električnega vračanja mostu v ravnovesje je v večji obratovalni občutljivosti mostu, ker most tudi nadalje deluje okrog ničle.

Občutljivost sprejemnika z uporabljenim mostom za merilne trake Philips GM 5536 in katodnim oscilografom »Cossor« MK II — 1019 z ojačenjem 600 znaša: tlak ± 10 Torr daje premik katodnega žarka na oscilografu 60 mm.

2.2 Konstrukcija diferencialnega sprejemnika

Diferencialni električni sprejemnik tlaka je viden na sliki 9 in sestoji iz: oljne komore (3), ki je z obeh strani opremljena s po eno jekleno membrano (1), z debelino 0,1 mm iz vzmetnega jekla 62.21. Obe membrani sta z vnanje strani pod vodnim tlakom. Merilni trak na vsaki membrani ima upor $R = 600 \Omega$. Zaradi spremenljivega tlaka se membrana upogiba in menjava upor merilnega traku, obenem pa prenaša skozi olje pritisk na drugo stran komore. Enak pojav teče na nasprotni membrani. Iz tega izvira: merjenje samo razlike tlakov z leve in desne strani oljne komore. Osnovna lastna frekvenca membrane je preračunana (Hütte, 28. izd., str. 607) iz premera in znaša 1800 Hz. Ker je membrana iz konstruktivnih razlogov pritrjena s kovicami med dvema obročema in je radialno pritegnjena, je njena lastna frekvenca večja.



Sl. 10. Membrana

1 — jeklena membrana, 2 — obroči iz medi, 3 — merilni trak

Lastna frekvenca montirane membrane je izmerjena s pomočjo električnega vzbujevalnika (Phillips PR 9262) in znaša 2820 Hz. Ta lastna frekvenca pa je daleč zunaj delovnega območja. Membrana je razvidna na sliki 10 z dvema obročema, med katerima je zakovičena.

Pritegovanje je doseženo tako, da je zakovičenje membrane na obroče iz medi izvedeno pri temperaturi 0 °C. Pri obratovalni temperaturi ~ 15 °C se membrana in obroč razširita, toda obroč mnogo bolj zaradi večjega linearnega koeficienta termičnega raztezanja ($\alpha = 19$) od jekla ($\alpha = 11$). To terja kalibriranje naprave pri delovni temperaturi in kontrolo delovne temperature diferencialnega sprejemnika ob merjenju. Ta način dajanja prednapetosti membrane se je pokazal kot zelo ugoden, čeprav je kovičenje pri nizki temperaturi dokaj nerodno. Da bi bila membrana dobro vpeta v konstrukciji, je obroč membrane fino obdelan.

Za oljno komoro je v rabi navadno transformatorsko olje. Celoten diferencialni sprejemnik je izdelan iz medi in precej masiven.

Uporabljeni sistem s dvema membranama ima v primerjavi z eno samo membrano prednost v večji varnosti pri delu, ker ležita merilna traka v izolirani sredini (olju) in se membranama lahko da prednapetost, s čimer je povečana njuna občutljivost. Tako je mogoče vplivati na dobivanje linearne karakteristike pri sprejniku.

Merilni podatki za membranski diferencialni manometer:

občutljivost:	$7,3 \cdot 10^{-6} \Delta R/R$ [p/cm ²]
obseg do 150 p/cm ² :	linearen $\pm 1,5\%$
upor traku R:	600 Ω
lastna frekvenca:	2820 Hz
premer membrane:	60 mm
debelina membrane:	0,1 mm

Večji obseg se lahko dobi z uporabo debelejšee membrane.

3. Merjenje pulzacij statičnega tlaka za turbino

Za določanje hidravličnih pulzacij za turbino je bilo vzeto merilno mesto na sifonu turbine (slika 1, mesto 2), kjer je bil že priključek za vakuummeter. Predpostavljeno je bilo, da se statični tlak na tem mestu menjava za $\Delta p = \pm 0,2$ at s frekvenco $f = 2,5$ do 20 Hz, kar je bilo ugotovljeno tudi z merjenjem. Za pretvarjalnik hidravličnih pulzacij v električne se lahko izbira membrana z ustreznimi elementi in Bourdonovimi cevmi. Po izkušnjah pri raketnih motorjih je bila vzeta Bourdonova cev, ker je vrhu vsega za delo na terenu manj občutljiva od membranskega sprejemnika. Da bi zmanjšali učinek hidravlične linije, je bil postavljen manovakuummeter pri okrovu sifona. Zamuda prenosa Bourdonove cevi na spremembo tlaka zaradi dušenja in inercije je majhna za predvideno delovno območje. Dinamično kalibriranje Bourdonove

cevi je mogoče z izmeničnim hidravličnim udarcem v posodi, čeprav z določenimi omejitvami. Zaradi dušenja parazitnih oscilacij Bourdonove cevi se dodaja zunanje dušenje cevi sami. Zato je prepuščen mehanični sistem za pogon kazalca, elastična vzmet sama, na kateri je nalepljen merilni trak, pa rabi tudi kot dušilka. Izmerjena lastna frekvenca tako uporabljene Bourdonove cevi je bila 120 Hz.

Enaka naprava z Bourdonovo cevjo je bila uporabljena tudi pri raziskovanju nihanj, in sicer na istem mestu na sifonu.

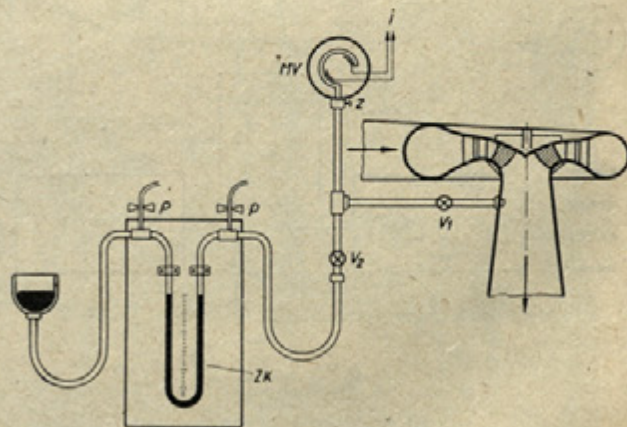
3.1 Blokovna shema naprave

Na manovakuummeter je postavljen merilni trak Philips z uporom 600 Ω , da bi prevzemal pulzacije. Uporabljeni so bili isti instrumenti kakor pri razlagi pod 2 in so razvidni s slike 6. Hidravlična shema vezave za merjenje in statično kalibriranje sta shematično ponazorjena na sliki 11, z opombo, da so dolžine hidravličnih linij med sifonom in Bourdonovo cevjo mnogo manjše. Pri merjenju je ventil V_2 zaprt, V_1 pa odprt. Pri kalibriranju je obratno. Majhen tlak ali vakuum se simulira s pomočjo živosrebrne posode in primerja z živosrebrnim kalibratorjem (ŽK). Pri tem je pomembno, da v hidravličnem sistemu ni zraka, kar lahko dosežemo z izpusti Z in P ob polnjenju hidravličnih vodov. Kalibriranje se izvaja pred merjenjem in po njem. Pri teh merjenjih je bil uporabljen električni kalibrator kot simulator določenega tlaka in kot naprava za vračanje zraka na ničlo pri velikem odklonu katodnega žarka, t. j. pri velikih spremembah tlaka, ker so bile iskane samo pulzacije statičnega tlaka. Tako je bil statični tlak približno električno kompenziran.

Shematični prikaz kaže sl. 12, na kateri je na ordinato nanesena sprememba upora merilnega traku, kar pa je v določenem razmerju tudi tlak. Na abscisi je čas. Vrednost $\Delta R/R$ je razmerje enosmernega tlaka. Ko v krog vstavimo upor $\Delta R/R$ ali njegovo približno vrednost, se katodni žarek zaradi uničenja enosmernosti pokaže v središču zaslona samo s pulzirajočo komponento (črtkana krivulja na sl. 12).

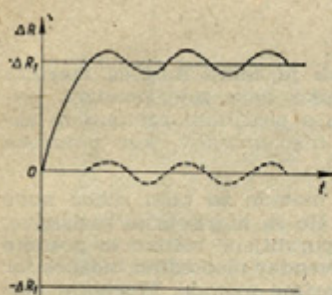
3.2 Konstrukcija sprejemnika

Jekleni trak, na katerem je nalepljen merilni trak, je 0,15 mm debel in 8 mm širok ter zvit v obliko podkve in pritrjen z enim koncem na trdni zaslon Bourdonove cevi, z drugim pa na njen vrh. Ta oblika vzmeti daje možnost za velike premike, obenem pa jekleni trak po obliki kakor tudi zaradi debeline ne povzroča velikih dušenj Bourdonove cevi. Postavljanje merilnega traku na pomožno vzmet, kakor kaže sl. 6, je neogibno potrebno, ker se Bourdonova cev ne razteza pri obtežbi samo v eni smeri. Tedaj se namreč cev zvija v po-



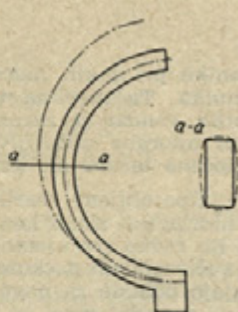
Sl. 11. Registriranje statičnih tlakov pod rotorjem

MV — manovakuummeter, 1 — merilni trakovi, 2K — živosrebrni kalibrator, V_1 ... V_2 — ventila, Z — vijak za izpušanje zraka, p — precepi



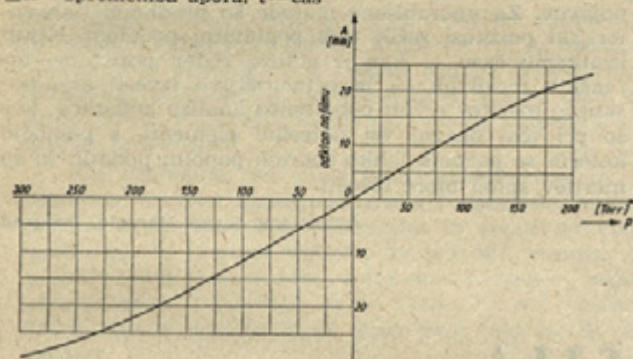
Sl. 12. Shematični prikaz spremembe upora merilnega traku (tlaka)

ΔR — sprememba upora, t — čas



Sl. 13. Zvijanje Bourdonove cevi

a — prečno, b — vzdolžno



Sl. 14. Kalibriranje manovakuummetera

(za temperaturo 15 °C, atenuator ojačevalnika mostu $A_m = 10$, atenuator ojačevalnika oscillografa $A_o = 3$)



Sl. 15. Posnetek diagrama hidravličnih pulzacij

dolžni smeri (sl. 13 a), obenem pa se širi po povprečnem rezu (sl. 13 b). To širjenje ni enakomerno po dolžini Bourdonove cevi in povzroča, da se na cev nalepljen trak — ker ima lastnost integracije raztezanja površine, na kateri je nalepljen — neenakomerno obnaša v teku enakomernega povečanja ali zmanjšanja tlaka. Ker mehanske karakteristike Bourdonove cevi niso znane, ni mogoče odbrati ugodnejšega mesta, ki bi morda obstajalo na Bourdonovi cevi, za konstanten odnos spremembe upora traku in raztezanja Bourdonove vzmeti. Razen tega je občutljivost merilnega traku na cevi sami majhna. Ta lastnost je tipična za vse Bourdonove cevi. Po več variant uporabljenih vzmeti je bil vzet naveden primer kot najugodnejši.

Na sl. 14 je prikazana krivulja kalibriranja Bourdonove cevi. Na sl. 15 je viden primer dobljenega posnetka, na katerem je »a« hidravlična pulzacija v sifonu, »b« pa pulzacija vatmetra pri raziskovanju nihanja. Noseča frekvenca vatmetra je omrežje (50 Hz), ki rabi obenem kot časovna osnova pri določanju frekvence hidravličnih pulzacij.

Merilni podatki za Bourdonov manovakuummeter z merilnim trakom:

občutljivost	$5,3 \cdot 10^{-6} \Delta R/R/p/cm^2$
območje do 300 g/cm ²	linearno $\pm 1,8\%$
upor traku R	600 Ω
debelina membrane d	0,15 mm
lastna frekvenca Bourdonove cevi	120 Hz

4. Merjenje mehaničnih vibracij

Spored raziskovanj je zajel tudi primerjavo hidravličnih pulzacij z mehničnimi vibracijami posameznih postrojenj in njihovih delov. Za merjenje mehaničnih vibracij je bil uporabljen klasični sprejemnik vibracij po seizmičnem načelu. Ta sestoji iz tuljave, ki je v permanentnem magnetu, tako da se s seizmičnimi premiki tuljave inducira v njej električna motorna sila, sorazmerna hitrosti premikanja. Uporabljen je bil sprejemnik Philips PR 9260. Električna blokovna shema je podana na sl. 6 c. Katodna cev je indikator, na katero se — zaradi primerjanja med amplitudami vibracij — s pomočjo naprave »merilnik amplitude« privede signal znane amplitude in nato primerja s količino, ki jo merimo. Dovedeni signal je iz omrežja spremenljive velikosti podan v mV oziroma mikronih pri merjenju premikov. Merilnik amplitude vsebuje obenem električni integrator signala za dobivanje mere premikov oziroma pospeškov vibracij.

4.1 Merjenje vibracij na delih postrojenja

Mehanične vibracije so bile merjene na mestih, ki so označena na sl. 1 s št. 3 — vibracije križa turbine; št. 4 — okrov sifona; št. 5 — cevovod obtočne cevi; št. 6 — na betonski masi pod turbino. Ta merilna mesta so bila izbrana kot ugodna za primerjavo s hidravličnimi pulzacijami. Vsi izmerjeni podatki niso registrirani in so ta merjenja čisto rabila za orientacijo prenosa vibracij in s tem tudi o vrsti vzbujaanja.

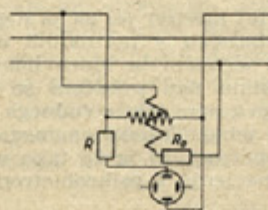
4.2 Merjenje vibracij v zraku

Za merjenje zračnega tlaka v pasareli je bil opravljen poskus za izmero frekvence tlaka s pomočjo mikrofona, nameščenega v pasareli sami ali nad vodno gladino, kjer voda izstopa iz pasarele. Ti poskusi so se izjalovili zaradi močnih vodnih šumov, tako da nivo zračnih pulzacij z nizko frekvenco, čeprav nevaren za stavbo, ni mogel biti izmerjen zaradi močnejših zvočnih vibracij. To nevšečnost smo obšli tako, da je bil nameščen seizmični sprejemnik vibracij na sredino pločevinastih vrat ob vходу v pasarelo (merilno mesto št. 8 — sl. 1). Pločevinasta vrata so rabila kot filter za višje vibracije zraka in resonator nižjih frekvenc. Preverjeno je bilo tudi, ali lastna frekvenca vrat ni po naključju v merilnem območju, kar pa ni bilo tako. Slednjič je bil povečan učinek bobnenja zraka v pasareli s tem, da je bila ena stran pasarele delno zaprta z deskami, kar je ojačilo pojav. Merilno mesto št. 7 na sl. 1 pomeni poskus merjenja vibracij pri bobnenju zraka na železni ograji pasarele, ki je imela enak učinek kakor vrata, a slabše izražen. S tem merjenjem je bila določena le frekvenca bobnenja, kar je bil tudi njegov namen.

5. Merjenje pulzacij električne moči

Pojav nihanja, izražen z osciliranjem kazalca na vatmetru, je terjal primerjavo frekvence in amplitude pri spremembi električnega učinka s hidravličnimi pulzacijami v sifonu.

Sprememba električne moči je bila merjena na vatmetski tokovni tuljavi s spremembo napetosti. Vzeta je bila paralelna odcep, ki je bil priveden na katodni oscillograf po vezalni shemi na sl. 16. Posnetek pulzacije je podan na sl. 15. Pri snemanju je poudarjen samo



Sl. 16. Vezalna shema

pulzirajoči del, medtem ko je ostali del noseče frekvence pomaknjen navzven katodnega zaslona.

Ta način pulzacij učinka lahko sprejmemo v primeru $U = \text{konst}$ in $\cos \varphi = \text{konst}$ v periodi merjenja, kar je bil pogoj za raziskovanje pojava nihanja. Namreč:

$$P_w = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

$$\Delta P_w = \sqrt{3} U \cos \varphi \Delta I = k \Delta I$$

Kalibriranje je bilo opravljeno v režimu, ko ni bilo pojava nihanja, tako da je bila ena obtežba na generatorju primerjana z odklonom na katodni cevi. N. pr. moči 15,5 MW je ustrezal odklon 20,4 mm. Potem je bila vzeta druga obremenitev, ki je dala drugačen odklon na katodni cevi. Razlika odklonov ustreza razliki učinkov vatmetra. Tako se dobi krivulja, ki je kmalu linearna, in se vzame srednja vrednost odklona katodnega žarka za enoto učinka. Če se vzame vrednost za različne stopnje ojačenja oscilografa, je mogoče nemoteno snemanje z najugodnejšim ojačenjem. Merjene so bile samo amplitude pulzacij učinka in njihova frekvenca.

6. Zaključki

Ustvarjanje posebnih merilnih metod in izdelava naprav za te hidravlične meritve so bile uspešne in zadovoljive, posebej glede na natančnost. Uporaba elek-

tronike pri takih meritvah je edina mogoča merilna tehnika. Ta merilna tehnika daje zelo precizne podatke, vendar je združena s pazljivim ravnanjem zaradi uporabe občutljivih instrumentov, kar povzroča določene težave na terenu.

Uporabljene merilne metode so tako rekoč nove v hidravliki, zlasti ker je šlo za hidravlične raziskave, ki jih redko srečujemo. Uporabljene rešitve so posnete iz več različnih poskusov, vendar niso edino mogoče ter dajejo pobude za nove merilne metode. Merjenje pulzacij v vodni masi bi se dalo morebiti ugodno izvesti za merilniki pretoka, ki delajo pod tlakom po načelu turbine (sistem »Peter«).

Med meritvami je bilo napravljenih okrog 80 posnetkov merjenj, kar je omogočilo pregledno analizo pojavov. Za uporabljene metode so predhodni laboratorijski poskusi rešili tudi pglavitni problem. Kljub kratkemu času — kar je gotovo reden pojav pri terenskih meritvah — je priporočljivo izvesti eno poskusno meritev s čim popolnejšo analizo podatkov, ker so pri tem opazni vsi potrebni elementi, s pomočjo katerih se pozneje lahko zberejo popolni podatki in se meritev sploh more izvesti.

Avtor: ing. Jovan Maručić, Beograd

POROČILA

DK 621.175.3.001.5

NEKAJ UGOTOVITEV OB MERITVAH PRVEGA HLADILNEGA STOLPA V TE ŠOŠTANJ*

PETER KUNC

V lanskih mesecih juliju in avgustu so bile opravljene precizne meritve obratovalnih razmer prvega hladilnega stolpa v TE Šoštanj (60 MW) pri maksimalni obremenitvi in različnih stanjih okolišnega zraka. Med ugotovitvami je zlasti presenetljiva, da je relativna vlažnost zraka pri izstopu iz pršišča daleč pod 100 %, ki jih navaja literatura o hladilnih stolpih kot podatek z »zadovoljivo natančnostjo«. Odstopanje od popolne nasičenosti zraka pri izstopu iz pršišča si razlagamo kot posledico mešanja dveh tokov; enega, ki je popolnoma nasičen, in drugega, ki te stopnje nasičenosti ne dosega, toda niti ne manj kakor 90 %. Mešanica obeh tokov pa ima zaradi prevladujoče množine popolno nasičenega toka zraka relativno vlažnost blizu popolne nasičenosti. Odstopanja od 100 % naj bi bila tako malenkostna, da so v mejah napake pri odčitavanju higrometra.

Nizko pršišče, ugodna razporeditev razpršilnih elementov in salonitnih plošč ter sorazmerno visok kamin ustvarjajo možnost za velike hitrosti zraka skozi prvi šoštanski hladilni stolp. Meritve kažejo, da ravno pri visokih hitrostih zrak pri prehodu skozi pršišče ne doseže popolne nasičenosti, temveč znos relativne vlažnosti zelo hitro pada s hitrostjo zraka.

Težavno pri tej meritvi je, da je neposredno merjenje relativne vlažnosti v normalnih okoliščinah, se pravi pri popolni termični in hidravlični obremenitvi, nemogoče. V kaminu nad pršiščem so v vesi vodne kapljice, ki jih trga zračni tok iz vodnega filma oziroma curka in odnaša s seboj. Ti delci onemogočajo natančno merjenje s higrometrom, ki je že tako nezanesljiv. Se bolj pa ovirajo merjenje s psihrometrom, ker ni mo-

goče izpolniti pogoja, da bi eden izmed termometrov kazal temperaturo »suhega termometra«. Zategadelj si moramo pomagati s toplotno bilanco.

Toplota, ki jo oddaja hladilna voda v časovni enoti, je enaka:

$$\Phi_v = q_v \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (1)$$

Pri tem pomenijo:

Φ_v — toplotni tok iz vode [J/s = W];

q_v — pretok vode [kg/s];

c_v — specifično toplotno vode [J/kg deg];

ΔT — temperaturni interval [deg].

Toplota, ki jo prevzame zrak z ogrevanjem in ovlaževanjem, je:

$$\Phi_{zr} = q_{zr} \cdot \Delta i \quad (2)$$

Pri tem pomenijo:

Φ_{zr} — toplotni tok na zrak [J/s = W];

q_{zr} — pretok zraka [kg/s];

Δi — entalpijski prirastek [J/kg].

Z zadovoljivo natančnostjo računamo, če izenavimo oba izraza:

$$\Phi_v = \Phi_{zr} = \Phi \quad (3)$$

Zvezo med hitrostjo in relativno vlažnostjo φ_2 pa dobimo takole:

$$\Delta i = i_2 \varphi_2 T_2 - i_1 \varphi_1 T_1$$

Pri tem pomenijo:

i_2 — entalpijo zraka pri izstopu [J/kg];

i_1 — entalpijo zraka pri vstopu (v okolici) [J/kg];

φ_2 — relativno vlažnost zraka pri izstopu;

φ_1 — relativno vlažnost zraka pri vstopu;

T_2 — temperaturo zraka pri izstopu;

T_1 — temperaturo zraka pri vstopu.

Nadalje je:

$$q_{zr} = v \cdot A \cdot \varphi_1 \quad (4)$$

* Stolp je opisan v članku: Z. Rant, Hladilni stolp TE Šoštanj, Strojniški vestnik III (1957), št. 4/5, str. 95 ... 97.