

## RAD I PRIMJENA PLETIZMOGRAFA

P. GUGIĆ

*Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada JAZU, Zagreb*

*(Primljeno 28. V 1971)*

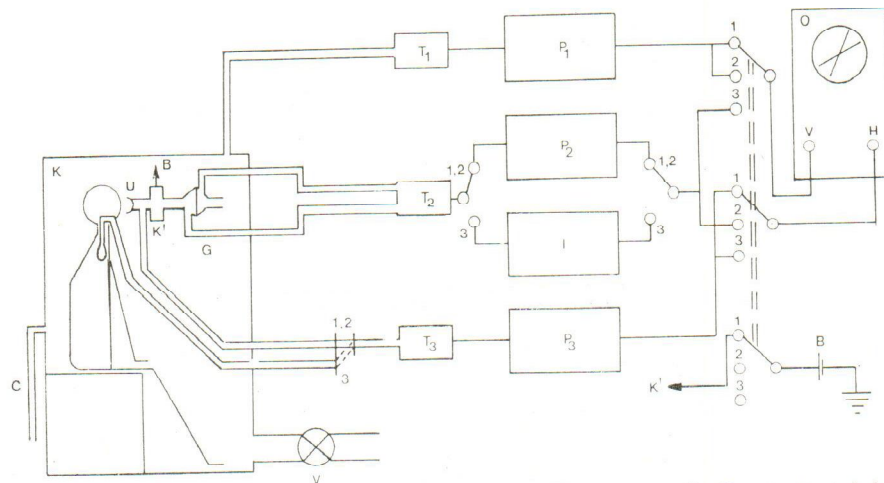
Opisan je pletizmograf sagrađen u Institutu za medicinska istraživanja u Zagrebu. Prikazan je postupak za mjerenje funkcionalnog rezidualnog kapaciteta, otpora zračnog puta i popuštanja i izvedene su baždarnе relacije za njihovo izračunavanje.

Jedna od metoda mjerenja parametara respiratornog trakta je pletizmografska mjerna metoda. Osniva se na primjeni određenih fizikalnih zakonitosti na rad pluća u jednom zatvorenom dinamičkom sustavu. Pознаvajući tako odnose među veličinama i mjerenjem dostupnih nepoznanica, kao i prikladnom kombinacijom analitičkih i grafičkih postupaka, dolazi se do traženih parametara.

Mjerni uređaj sastoji se od: mjerne kabine, mjernih pretvornika, sustava za obradu podataka i baždarnih jedinica. U izvedbeni opis pojedinih dijelova ovdje se neće ulaziti, jer je to učinjeno na drugom mjestu (1). Ovdje će pažnja biti posvećena samo onim njihovim osobitostima koje su bitne za ostvarenje svrsishodne funkcionalnosti mjernog uređaja.

### MJERNA KABINA

Služi za izolaciju pluća od okolne atmosfere. Prema tome, u pravilu treba da bude zračno nepropusna, što u stvari i jest, ali samo za dinamičko stanje. Naime, preko cijevi C (sl. 1) promjera 3 mm i duljine 55 cm spojena je s vanjskom atmosferom. Ta cijev za stabilizaciju tlaka, uz standardnu mjernu dinamiku, predstavlja za zračni tijek praktički beskonačan otpor, pa se može uzeti da je kabina u dinamičkom stanju »zračno nepropusna«. S druge strane, postojeći otvor omogućuje kontinuirano održavanje statičkog tlaka u kabini na razini referentnog atmosferskog tlaka.



Sl. 1. Strukturni prikaz pletizmografa (K - kabina, T - pretvornik, P - pretpojačalo, O - osciloskop, K - kapak, U - usni nastavak, G - pneumotahograf, B - baterija, C - cijev za stabilizaciju tlaka, V - ventil za provjetravanje)

Osim tog stalnog otvora postoji još i jedan povremeni otvor promjera oko 3 cm, koji se preko elektromehaničkog ventila V može otvarati i zatvarati. Služi za provjetravanje kabine prije početka mjerenja, tj. neposredno nakon što je u nju zatvoren ispitanik. Svrha joj je zapravo ista kao i »cijevi za stabilizaciju tlaka«, samo što zbog mnogo manjeg otpora zračnom tijeku djeluje mnogo brže; s tog razloga za vrijeme mjerenja mora biti zatvorena.

Veličina i oblik kabine primarno su uvjetovani veličinom i položajem tijela ispitanika kojeg u nju treba smjestiti. Kabina našeg pletizmografa ima obujam od 503 litre, te ispitanik može u njoj relativno udobno sjediti.

Radi otklanjanja eventualne klaustrofobije i mogućnosti vizualnog kontakta s ispitanikom poželjno je da kabina bude što providnija. S tog razloga na našoj su kabini vrata i prozor na prednjem zidu napravljeni od prozirnog pleksiglasa. Audioveza s ispitanikom u zatvorenoj kabini ostvarena je preko interfona.

#### MJERNI PRETVORNICI

Mjerni pretvornici služe za mjerenje tlaka i brzine tijeka. Jedan je od njih tlakomjer  $T_1$  za mjerenje tlaka u kabini, koji - uz standardnu mjernu dinamiku - treba da mjeri tlak od 0,03 cm  $H_2O$  do 3 cm  $H_2O$ . Za taj tlakomjer upotrijebljen je Stathamov pretvornik PM - 97  $\pm$  0,05. Drugi tlakomjer  $T_2$  služi za mjerenje tlaka u plućima. On treba da mjeri tlak od oko 5 cm  $H_2O$ . Za taj tlakomjer upotrijebljen je Stathamov pretvornik PM 5  $\pm$  0,7.

I konačno, mjerilo brzine tijekom  $G + T_3$ , koje je sastavljeno od pneumotahografa i Stathamovog diferencijalnog tlačnog pretvornika PM 283 TC  $\pm 0,15$ . Na osnovi razlike tlakova, koji se tijekom zraka stvaraju na membrani pneumotahografa, moguće je tu mjernu kombinaciju izbaždariti tako da pokazuje direktno brzinu tijekom u litrama po sekundi.

#### SUSTAV ZA OBRADU PODATAKA

Analogne električne signale, tj. signale proporcionalne mjerenim veličinama koje se dobivaju na izlazima pretvornika, treba na neki način izmjeriti. Budući da su oni u izvornom stanju tek reda veličine milivolta, potrebno ih je prethodno pojačati. U tu svrhu primijenjena su prepojačala Hewlett-Packard tipa 350-1100 C, s kontinuiranom mogućnošću pojačanja od nula do  $10^4$ . Prepojačala tipa 350-1100 C osim pojačanja posjeduju i mogućnost interne električne kalibracije i kompenzacije istosmjernog potencijala, što znatno poboljšava kvalitetu mjerenja. Budući da u jednoj mjernoj kombinaciji analogni signal brzine tijekom treba prije osciloskopa integrirati, u aparaturu je ugrađen i jedan integrator I iste tvrtke tipa 350-3700.

S prepojačala i integratora analogni signali vode se na tzv. »Storage« osciloskop. To je katodni osciloskop na ekranu kojeg je zapis moguće zadržati. Posjeduje vertikalno otklonsko pojačalo i vremensku bazu, koja se, međutim, može isključiti tako da se mjereni signali mogu po želji dovesti na vertikalni i na horizontalni otklonski sustav.

#### JEDINICE ZA BAŽDARENJE

Svaku mjernu granu treba prije početka mjerenja izbaždariti jer se jedino na osnovi baždarenja mogu interpretirati zapisi na ekranu osciloskopa. Pod mjernom granom podrazumijeva se put kojim ide mjerni podatak od uzbude pretvornika, preko njega samog, zatim prepojačala i, otklonskog sustava osciloskopa na ekran katodne cijevi.

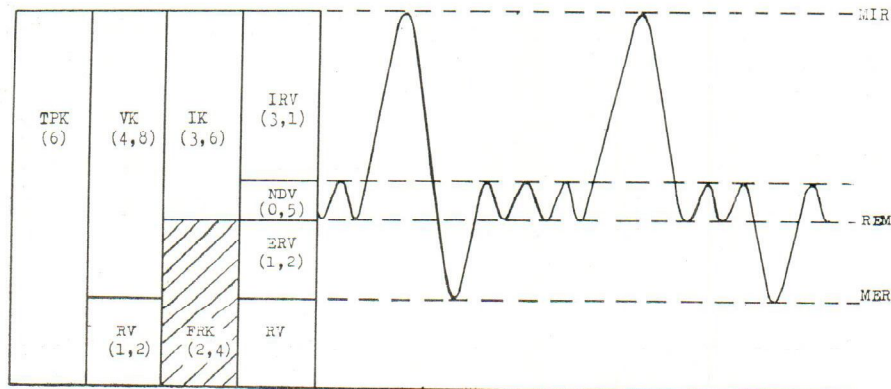
Budući da tlakomjer koji mjeri tlak u kabini služi za mjerenje promjene obujma kabine, njegovu granu treba izbaždariti u jedinicama obujma. U tu je svrhu na kabinu priključen jedan cilindar s klipom, čiji hod od jednog do drugog krajnjeg položaja iznosi 30 ml. Na taj se način radom klipa, koji pokreće jedan elektromotor brzinom od oko dvije periode u sekundi, obujam kabine smanjuje i povećava za 30 ml. To se očituje u povećanju i smanjenju tlaka, pa se analogni zapis na ekranu katodnog osciloskopa baždari neposredno u jedinicama obujma.

Granu s tlakomjerom za mjerenje tlaka u ustima i jednjaku treba izbaždariti u jedinicama tlaka. U tu svrhu primijenjen je jednostavni vodeni manometar, koji je pričvršćen na čeonom zidu kabine.

Grana sa sustavom za mjerenje brzine zračnog tijekom baždari se rotametrom. Pomoću jednog reguliranog upuhivača (usisivača) zrak se puše kroz rotametar, na koji je pričvršćen pneumotahograf. Na taj se način

brzina zračnog tijeka kroz pneumotahograf može s reguliranim upuhivačem i rotametrom kao mjerilom brzine namjestiti na željenu vrijednost. Budući da je na pneumotahograf priključen diferencijalni pretvornik tlaka, koji sa svog izlaza na ekran katodnog osciloskopa šalje električni signal analogan brzini zračnog tijeka u pneumotahografu, izlazi da je na taj način ostvareno baždarenje te mjerne grane.

Za kvantitativna mjerenja baždarenje mjernih grana od primarnog je značenja jer su rezultati čak i u slučaju idealnog podudaranja biološkog sustava s fizikalnim modelom, usprkos najpreciznijim mjerenjima u izvjesnoj mjeri uvijek bremeniti baždarnim pogreškama zbog nestabilnosti referentnih parametara (tlak, vlaga, temperatura). S tog razloga baždarenju mjernih grana treba posvetiti osobitu pažnju. To praktički znači da osim pažljivog baždarenja treba vršiti i česta provjeravanja; koliko često, zavisit će ponajvećma od stabilnosti atmosferskog tlaka i temperature ambijenta.



Sl. 2. Plućni obujmi, TPK – totalni plućni kapacitet, VK – vitalni kapacitet, RV – rezidualni volumen, IK – inspiratorni kapacitet, FRK – funkcionalni rezidualni kapacitet, IRV – inspiratorni rezervni volumen, ERV – ekspiratorni rez. volumen, NDV – normalni dišni volumen, MIR – maksimalna inspiratorna razina, MER – maksimalna ekspiratorna razina, REM – razina ekspiratornog mirovanja. Brojevi u zagradama su reprezentativne vrijednosti u litrama (2).

#### MJERENJE FUNKCIONALNOG REZIDUALNOG KAPACITETA (FRK)

Jedan od parametara koji se uspješno mjere pletizmografom je funkcionalni rezidualni kapacitet (3). Prema konvencionalnoj definiciji (4) to je zbroj ekspiratornog rezervnog volumena (ERV) i rezidualnog volumena (RV) (sl. 2). Ideja se zasniva na analognom modelu prikazanom na sl. 3. U zatvorenoj posudi »k« smješten je cilindar »p« sa stapom »s«, a sve skupa nalazi se u ambijentu konstantnog tlaka i temperature. »c« je cijev za stabilizaciju tlaka. U početnom stanju tlakovi u posudi ( $V_k$ ) i u cilindru ( $V_p$ ) su isti. Ako se stap s pomakne udesno za obujam  $\Delta V$ ,

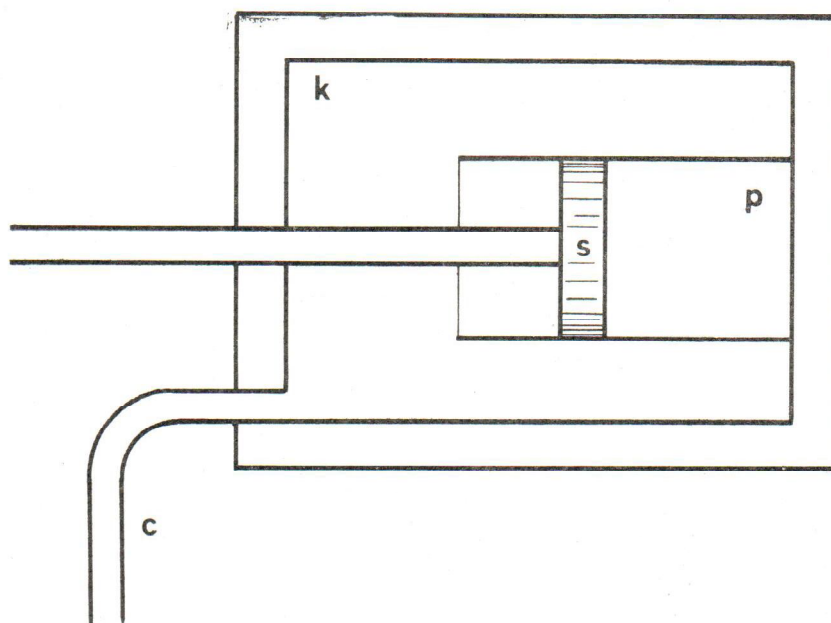
povećat će se tlak u cilindru za  $\Delta P_p$ , i ako se začepi cijev c, tlak u posudi će se smanjiti za  $\Delta P_k$ . Vraćanjem stapa ulijevo za  $\Delta V$  igra će se ponoviti, ali s obrnutim predznakom. Za dovoljno malo i dovoljno brzo pomicanje stapa dade se pokazati da se i s otvorenom cijevi c, samo ako je dovoljno uska i dovoljno dugačka, može postići toliki otpor zraka da utjecaj otvora na promjenu tlaka  $\Delta P_k$  postaje zanemariv. U našem slučaju pokazalo se da za  $\Delta V = 0,03$  litara i frekvenciju obujma od oko dvije periode u sekundi postavljene uvjete zadovoljava cijev promjera 0,3 cm i duljine 55 cm.

Na tako definiran sustav može se primijeniti Boylov zakon, koji uz postavljene oznake glasi

$$P V_p = (P \mp \Delta P_p) (V_p \pm \Delta V), \quad (1)$$

gdje je  $P$  – atmosferski tlak. Sređivanjem jednadžbe (1) dobiva se

$$\mp \Delta P_p V_p \pm P \Delta V - \Delta P_p \Delta V = 0 \quad (2)$$



Sl. 3. Mehanički analogni model za mjerenje FRK

i uz  $\Delta V \ll V_p$  i  $\Delta P_p \ll P$  izlazi

$$V_p = P \frac{\Delta V}{\Delta P_p} \quad (3)$$

Fizikalni sustav predodčen na sl. 3 model je mjerne kabine u kojoj se nalazi ispitanik. Posuda k odgovara mjernoj kabini, a cilindar p plu-

ćima; dosljedno tome,  $V_p$  odgovara obujmu pluća,  $\Delta P_p$  promjeni tlaka u plućima i  $\Delta V$  promjeni obujma, koja je ista za pluća i za kabinu.

Iz modela je vidljivo da zrak iz pluća ne komunicira sa zrakom u kabini. To je realizirano na taj način što je ispitaniku nos začepljen, a disanje se odvija kroz usta, koja su preko usnog nastavka, jedne produžne cijevi i pneumonografa spojena sa zrakom u kabini. Na produžnoj cijevi nalazi se elektromehanički kapak  $K'$  (sl. 1) kojim se cijev može zatvarati. U početku mjerenja kapak se zatvara, i to u trenutku kad se ispitanik nalazi na razini ekspiratornog mirovanja (Resting Expiratory Level), tj. točno onda kad obujam pluća odgovara FRK. U tom trenutku ispitanik počinje širiti i stiskati grudni koš u ritmu od oko dvije periode u sekundi s promjenom obujma  $\Delta V$  od oko 0,3 litre. Budući da je promjena obujma kabine jednaka promjeni obujma pluća, to se mjerenjem promjene obujma kabine preko izbaždarenog tlakomjera PM-97  $\pm 0,05$  dolazi do tražene vrijednosti  $\Delta V$  (jed. 3). Promjenu tlaka u plućima  $\Delta P_p$  mjeri tlakomjer PM-5  $\pm 0,7$ , koji je priključen na produžnu cijev na dijelu između usnog nastavka i kapka za zatvaranje zračnog puta.

Pri mjerenju naročito treba paziti da ispitanik drži lice ukruženo, tj. da promjenu  $\Delta V$  izazove samo grudnim košom, jer inače napuhivanje i ispuhivanje usta unosi odgovarajuće pogreške u mjerne rezultate.

Analogni signal  $\Delta V$  vodi se na vertikalni otklonski sustav, a analogni signal  $\Delta P_p$  na horizontalni otklonski sustav katodnog osciloskopa. Budući da su to dvije vremenski zavisne veličine, na ekranu se dobiva izdužena elipsa, čija velika os s apscisom zatvara put

$$\alpha_1 = \text{arc tg } \frac{\Delta V}{\Delta V_p} \quad (4)$$

Što se tiče numeričke vrijednosti  $\text{tg } \alpha_1$ , ona će zavisiti od prethodno izvršenog baždarenja, kojim je postignuto da »m« centimetara otklona na vertikalnoj osi katodnog osciloskopa predstavlja »n« milimetara promjene obujma, a »p« centimetara otklona na horizontalnoj osi katodnog osciloskopa da predstavlja »q« cm  $\text{H}_2\text{O}$  promjene tlaka u plućima. Drugi član jednadžbe (3) prema tome poprima oblik

$$\frac{\Delta V}{\Delta P_p} = \text{tg } \alpha_1 \frac{n p}{m q} \quad (5)$$

U našem slučaju je odabrano  $m = 4$  cm,  $n = 30$  ml,  $p = 2$  cm i  $q = 5$  cm  $\text{H}_2\text{O}$ , pa uz takvo baždarenje izlazi

$$\frac{\Delta V}{\Delta P_p} = 3 \text{ tg } \alpha_1 \quad (6)$$

Konstantu  $P$ , za koju je rečeno da predstavlja atmosferski tlak, treba u izvjesnom smislu obraditi. Naime, zrak u plućima je zasićen vodenim parama, kojih tlak na temperaturi od  $36^\circ\text{C}$  iznosi 64 cm  $\text{H}_2\text{O}$ , pa stoga

tu vrijednost treba odbiti od atmosferskog tlaka čija vrijednost iznosi 1034 cm H<sub>2</sub>O. Prema tome, vrijednost konstante P u našem slučaju iznosi 970 cm H<sub>2</sub>O.

Ako je baždarenje izvršeno s praznom kabinom, tj. bez ispitanika (što se pokazalo najprikladnijim, pa se u našem slučaju i primjenjuje), potrebno je u konačnu relaciju unijeti još i faktor korekcije zbog prisustva tijela ispitanika. Da bi se do tog faktora došlo, polazi se od Boylovog zakona za kabinu

$$P V_k = (P \pm \Delta P_k) (V_k \mp \Delta V), \quad (7)$$

odakle za promjenu tlaka kabine izlazi

$$\Delta P_k = P \frac{\Delta V}{V_k} \quad (8)$$

Ako se kabina umanjuje za  $V_k/n$ , a promjena obujma ostane ista, promjena tlaka kabine će biti

$$P_{k1} = P \frac{V}{V_k - (V_k/n)} \quad (9)$$

Dijeljenjem jednadžbi (8) i (9) i sređivanjem izlazi

$$\Delta P_k = \Delta P_{k1} \frac{V_k - (V_k/n)}{V_k} \quad (10)$$

odakle izlazi da tlak koji se mjeri u smanjenoj kabini, tj. u kabini s ispitanikom, treba pomnožiti s faktorom

$$K = \frac{V_k - (V_k/n)}{V_k} \quad (11)$$

Time su obuhvaćeni svi baždarni i korekcionni faktori kojima treba upotpuniti jednadžbu (3) da bi se dobila kvantitativna vrijednost mjerenog obujma; a mjeri se FRK povećan obujmom usne šupljine i obujmom produžne cijevi sve do kapka za zatvaranje zračnog puta. Mjerenjem je ustanovljeno da taj dodatni obujam iznosi 0,2 litre. Stoga od izmjerene vrijednosti treba odbiti 0,2 litre da bi se dobio čisti funkcionalni rezidualni kapacitet, dakle

$$\text{FRK} = (0,97 \text{ tg } \alpha_1 \frac{n p}{m q} \frac{V_k - T_i}{V_k}) - 0,2 \quad (12)$$

i uvrštenjem odabranih baždarnih vrijednosti za ovaj specifični slučaj izlazi

$$\text{FRK} = (2,91 \text{ tg } \alpha_1 \frac{503 - T_i}{503}) - 0,2 \quad (13)$$

po kojoj relaciji FRK izlazi u litrama.

## MJERENJE OTPORA ZRAČNOG PUTA (OZP)

Slijedeći parametar koji se uspješno mjeri pletizmografom je otpor zračnog puta (Airway Resistance) (5); definiran je kao promjena tlaka u plućima po jediničnoj promjeni brzine tijeka (4), simbolički izraženo

$$\text{OZP} = \frac{\Delta P_p}{\Delta V'} \quad (14)$$

gdje je  $\Delta V'$  derivacija promjene obujma po vremenu.

Do vrijednosti OZP dolazi se posrednim putem. Jedan dio posla već je obavljen mjerenjem tangensa kuta  $\alpha_1$ , koji glasi

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{\Delta V}{\Delta P_p} \quad (15)$$

Drugi dio sastoji se od mjerenja brzine tijeka  $\Delta V'$ . To se obavlja tako da se u istom ritmu i obujmu dahtanja kao i kod prethodnog mjerenja – samo s otvorenim kapkom K – pomoću pneumotahografa i tlakomjera PM-283 TC  $\pm 0,15$  mjeri brzina tijeka u zavisnosti od promjene obujma kabine  $\Delta V$ . Analogni signal  $\Delta V$  vodi se na vertikalni otklonski sustav, a analogni signal  $\Delta V'$  na horizontalni otklonski sustav katodnog osciloskopa. Budući da su te dvije veličine vremenski zavisne, na ekranu katodnog osciloskopa formira se razvučena elipsa čija je velika os prema apscisi nagnuta pod kutem

$$\alpha_2 = \text{arc tg } \frac{\Delta V}{\Delta V'} \quad (16)$$

ili

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{\Delta V}{\Delta V'} \quad (17)$$

Dijeljenjem jednadžbe (17) s jednadžbom (15) dobiva se

$$\frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} = \frac{\Delta V / \Delta V'}{\Delta V / \Delta P_p} = \frac{\Delta P_p}{\Delta V'} \quad (18)$$

što je prema definicijskoj jednadžbi (14) upravo otpor zračnog puta, dakle

$$\text{OZP}_t = \frac{\text{tg } \alpha_1}{\text{tg } \alpha_2} \quad (19)$$

I ovdje treba unijeti baždarne faktore da se dođe do numeričkih rezultata. Ako se uzme da su vrijednosti za  $p$  i  $J$  iste kao i kod mjerenja FRK i da »r« cm otklona na katodnom osciloskopu predstavlja brzinu tijeka od »s« litara u sekundi, onda relacija za izračunavanje ukupnog OZP (UOZP) glasi

$$\text{UOZP} = \frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} \frac{q r}{p s} \quad (20)$$

Pod UOZP podrazumijeva se ukupni otpor koji uređaj mjeri, a to je uz OZP pluća i otpor mjerne naprave (usni nastavak, produžna cijev i



pneumotahograf). Da bi se dobio čiti OZP, treba otpor naprave odbiti od UOZP. Konačna relacija stoga glasi

$$\text{OZP} = \frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} \frac{q r}{p s} - \text{OMN}, \quad (21)$$

gdje OMN označava otpor mjerne naprave.

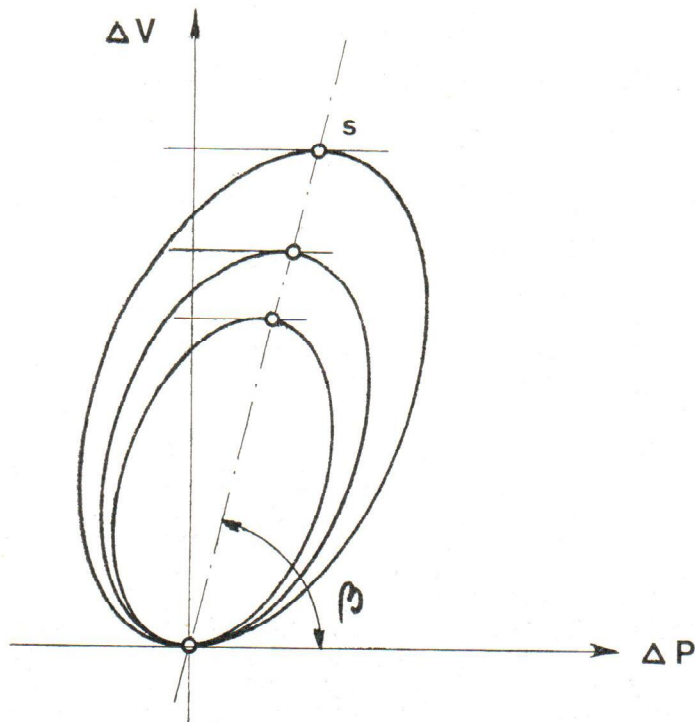
U našem slučaju pokazalo se najprikladnijim, uz već poznate vrijednosti za  $p$  i  $q$ , odabrati  $r = 4$  cm i  $s = 1,2$  litara u sekundi. OMN je izmjeren i iznosi 0,1 cm H<sub>2</sub>O/litre/sek. Uvrštenjem tih numeričkih podataka u jednadžbu (21) dobiva se konačni izraz za numeričko izračunavanje OZP u ovom određenom slučaju i glasi

$$\text{OZP} = 8,34 \frac{\text{tg } \alpha_2}{\text{tg } \alpha_1} - 0,1 \quad (22)$$

s dimenzijom cm H<sub>2</sub>O/litri/sek.

#### MJERENJE POPUŠTANJA (COMPLIANCE)

Popuštanje (POP) je izvorno definirano kao promjena obujma pluća po jediničnoj promjeni tlaka uslijed elastičnih sila (4)



Sl. 4. Pojednostavljeni zapis katodnog osciloskopa kod mjerenja popuštanja (compliance) s ukupnim tlakom u plućima

$$\text{POP} = \frac{\Delta V_p}{\Delta P_{el}} \quad (23)$$

Veličina u brojniku može se dobiti iz integrala brzine tijeka

$$\Delta V_p = \int V' dt. \quad (24)$$

Realizacija te ideje sastoji se u tome da se analogni signal s pneumotahografa vodi na električni integrator, koji ga integrira i na izlazu daje traženu promjenu obujma pluća.

Do veličine u nazivniku može se doći na dva načina. U oba slučaja polazi se od konstatacije da se ukupni tlak u plućima, teoretski, sastoji od tri komponente (6), i to tlaka uslijed elastičnih sila, tlaka uslijed otpornih sila i tlaka uslijed inercijskih sila

$$\Delta P = \Delta P_{el} + P_{ot} + \Delta P_{in}. \quad (25)$$

Trenutni tlak uslijed elastičnih sila proporcionalan je obujmu tijeka

$$\Delta P_{el} = f(V), \quad (26)$$

trenutni tlak uslijed otpornih sila proporcionalan je brzini tijeka

$$\Delta P_{ot} = f\left(-\frac{dV}{dt}\right) = f(V') \quad (27)$$

i trenutni tlak uslijed inercijskih sila proporcionalan je ubrzanju tijeka

$$\Delta P_{in} = f\left(-\frac{d^2V}{dt^2}\right) = f(V''). \quad (28)$$

Mjerenjem je ustanovljeno da je tlak izazvan inercijskim silama u usporedbi s ostala dva člana vrlo malen i da se stoga može zanemariti. Prema, tome, dobiva se da je

$$\Delta P = f(V) + f(V'), \quad (29)$$

a odatle izlazi da će u svakom trenutku kad je brzina tijeka jednaka nuli – dakle za  $f(V') = 0$  – ukupni tlak biti jednak samo trenutnom tlaku uslijed elastičnih sila

$$\Delta P = f(V). \quad (30)$$

Budući da se točke u kojima je brzina protjecanja jednaka nuli poklapaju s točkama normalne inspiratorne razine i normalne ekspiratorne razine, dovoljno je u tim točkama izmjeriti odnos promjene plućnog obujma i ukupnog tlaka da bi se prema definicijskoj jednadžbi (23) dobilo upravo traženo popuštanje.

Mjerenje tlaka u plućima obavlja se u ovom slučaju preko tzv. ezofagusnog balona. To je crijevasti gumeni mjehur duljine oko 8 cm, promjera oko 1 cm i debljine stijena oko 0,1 mm, koji se pomoću plastične cijevi promjera oko 1 mm spušta u jednjak. Postavljanje se može izvršiti kroz usta (uz pomoć gutanja vode) ili kroz nos (s anestezijom). Najprije se spusti u želudac toliko duboko da kod udisanja dolazi do porasta tlaka u balonu. Zatim se balon polako podiže sve dok ne dođe u položaj

gdje se predznak tlaka u balonu mijenja. Neposredno iznad te točke vrši se mjerenje. Vrijedno je spomenuti da se malim pomacima u okolišu tog položaja može naći i mjesto na kojem je utjecaj pulsa na tlak u balonu minimalan. Taj položaj je ujedno i najbolji.

Plastična cjevčica izvedena iz tako postavljenog balona ide na pretvornik tlaka, s kojeg se analogni električni signal preko pretpojačala vodi na horizontalni otklonski sustav katodnog osciloskopa.

Analogni signal brzine tijekom s pneumotahografa, kao što je naprijed rečeno, vodi se na integrator, a odatle, transformiran u analogni signal promjene plućnog obujma, ide na vertikalnu os katodnog osciloskopa.

Budući da su promjene tlaka i obujma pluća međusobno zavisne veličine, svaka će dišna perioda na ekranu katodnog osciloskopa izazvati zapis elipsastog oblika, čija će velika os biti pod izvjesnim kutem nagnuta prema osi apscisa. Mijenjajući dišni obujam ispitanik može na ekranu izazvati niz elipsa istog nagiba, kao što je ilustrirano na sl. 4. A budući da tjemena tih elipsa, tj. točaka u kojima vodoravne tangente dodiruju elipse, predstavljaju upravo ona stanja u kojima je brzina tijekom jednaka nuli, mjerenjem tangensa kuta beta, koji zatvara sekanta S s apscisnom osi (sl. 4), dolazi se do tražene vrijednosti popuštanja

$$\text{POP}_t = \left( \frac{\Delta V_p}{\Delta P_{et}} \right)_t = \text{tg } \beta. \quad (31)$$

Popuštanje se na drugi način mjeri tako da se na apscisu ne dovodi ukupni tlak, već samo njegov parcijalni dio koji je izazvan elastičnim silama. Do vrijednosti tog parcijalnog tlaka, prema jednadžbi (29), dolazi se na taj način da se od ukupnog tlaka odbije parcijalni tlak izazvan otpornim silama

$$\Delta P_{et} = \Delta P - \Delta P_{ot}. \quad (32)$$

S druge strane, parcijalni tlak izazvan otpornim silama je prema jednadžbi (14) umnožak OZP i promjene brzine tijekom

$$\Delta P_p = \Delta P_{ot} = (\text{OZP}) \Delta V'. \quad (33)$$

Budući da je OZP mjerljiva konstanta a  $\Delta V'$  mjerljiva varijabla, moguće je konstantu prethodno izmjeriti a zatim je na električnom množilu kontinuirano množiti s varijablom  $\Delta V'$ ; rezultat je te operacije upravo traženi parcijalni tlak izazvan otpornim silama. Nakon toga preostaje još samo da se, prema jednadžbi (32), na električnom suptrктору od analognog signala ukupnog tlaka odbije analogni signal parcijalnog otpornog tlaka i da se rezultirajući analogni signal

$$\Delta P_{et} = \Delta P - V' (\text{OZP}) \quad (34)$$

odvede na horizontalnu os katodnog osciloskopa. Zapis na ekranu sada će imati oblik ravne linije nagnute prema osi apscisa pod kutem beta, čiji tangens daje traženo popuštanje

$$\text{POP}_t = \text{tg } \beta = \frac{\int V' dt}{\Delta P - \Delta V' (\text{OZP})}. \quad (35)$$

Ako se ostave isti baždarni koeficijenti za brzinu tijeka i za plućni tlak kao i kod prijašnjih mjerenja, kvantitativni rezultat u litrama po cm H<sub>2</sub>O dobiva se iz relacije

$$\text{POP} = \text{tg } \beta \frac{p s}{q r} \quad (36)$$

a uvrštenjem odabranih numeričkih vrijednosti izlazi za ovaj specifični slučaj

$$\text{POP} = 0,12 \text{ tg } \beta \quad (37)$$

Opisane pletizmografske mjerne metode imaju svojih prednosti i mana u usporedbi s drugim metodama mjerenja. Mane su im u relativno velikim investicijama i potrebi kooperacije između ispitivača i ispitanika, a prednost im je u desetak puta većoj brzini rada. Stoga njihova prednost dolazi osobito do izražaja u onim slučajevima kad na relativno malom broju ispitanika treba izvršiti velik broj mjerenja u relativno kratkom vremenskom razdoblju.

#### Literatura

1. Gugić, P.: Pletizmografski uređaj za mjerenje parametara respiratornog trakta. Zbornik materijala XV jugoslavenske konferencije ETAN-a u Splitu, 1971.
2. Comroe, J. H.: The Lung, The Year Book Publishers, Inc, Chicago, (1960) str. 5-6.
3. Du Bois, A. B., Botelho, S. Y., Bedel, G. N., Marshall, R., Comroe, J. H. Jr.: J. Clin. Invest., 35 (1956) 322.
4. Pappenheimer, J. R.: Fed. Proc., 9 (1950) 602.
5. Du Bois, A. B., Botelho, S. Y., Comroe, J. H. Jr.: J. Clin. Invest., 35 (1956) 327.
6. Mead, Y., Whittenberger, J. L.: J. Appl. Physiol., 5 (1953) 779.

#### Summary

#### PLETHYSMOGRAPH - OPERATION AND APPLICATION

The plethysmograph built at the Institute for Medical Research in Zagreb is described. The methods of measurement of functional residual capacity, airway resistance and compliance are given and calibrating equations for the calculation of their numerical values are derived.

*Institute for Medical Research and  
Occupational Health, Yugoslav Academy  
of Arts and Sciences, Zagreb*

*Received for publication  
June 28, 1971*