

## 2.2. Měření a indikace síly v medicíně a biologii

Problematika měření nebo indikace síly v biologii a medicíně je velmi různorodá, což velmi dobře koresponduje se značnou variabilitou silových projevů v biomedicíně. K tomu přispívá nakonec i ta skutečnost, že řada projevů živého organismu je s výhodou na sílu převáděna.

Z technického hlediska jde o problém analogového převodu mechanické veličiny, v tomto případě tedy síly, na odpovídající elektrický signál. V zásadě jde tedy o shodný problém, jako při měření tlaků a je také zpravidla využíváno velmi podobných řešení a shodných principů, například tenzometrických, kapacitních nebo induktivních mechanoelektrických převodníků. Tomu také odpovídá problematika použitých materiálů, technologie a způsob elektronického zpracování.

### 2.2.1. Tokografie a tokometrie

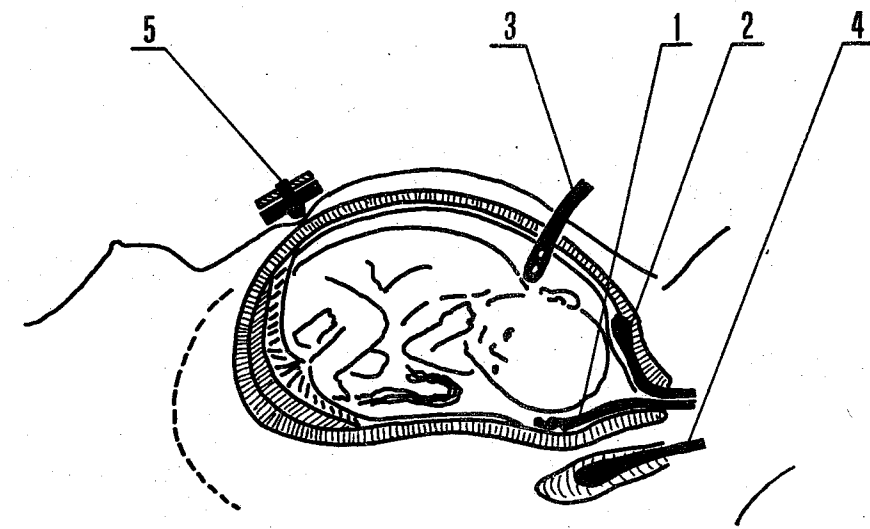
Abdominální tokografie nebo tokometrie je typickým případem měření nebo indikace síly, vyvolané například kontrakcemi děložních svalů při porodu. Jde o jednu z hlavních oblastí aplikace, i když lze obecně tokometrii chápat jako obor měření stahů různých biologických tkání, obvykle svalů. Neomezuje se tedy pouze na porodnictví. Přesto je však převážně spojována se záznamem průběhu děložních kontrakcí v předporodním období, těsně před porodem nebo během vlastního porodu. Samotné snímání děložních kontrakcí má jen podružný význam a důležitosti nabývá především ve spojení se sledováním dalších údajů, které charakterizují průběh porodu a hlavně stav plodu během jeho nitroděložního života. Průběh děložních kontrakcí je proto sledován současně s fetální tepovou frekvencí [35] nebo  $pO_2$ , případně i pH. Souhrnně je pak toto měření, které má charakter dlouhodobého monitorování, nazýváno kardiotokeografií a zabývá se posouzením průběhu těhotenství, porodu a vytypováním rizikových těhotenství. Tokometrie je tedy součástí této metody a jejím hlavním úkolem je charakterizovat rozsah mechanického působení na plod během těhotenství a během porodu. Jde tedy vlastně o nepřímou indikaci nitroděložního tlaku, který bezprostředně působí na plod a ovlivňuje jej. Základní metody tokometrie jsou zřejmé z obr.2.35. Metody měření intraamniálního, intrauterinálního a rektálního tlaku svou problematikou spadají do kapitoly 2.1.2.

Pro klinickou praxi však mají význam především neinvazivní, abdominální metody, které mají charakter detekce silových projevů kontrahujícího svalstva, popřípadě je metodu možné charakterizovat jako detekci tuhosti resp. poddajnosti děložní stěny. Jde o nepřímou metodu, která neposkytuje tak rozsáhlé informace jako metody přímé, snižuje však případné riziko pro matku i plod a metoda je použitelná v kterémkoliv stupni těhotenství.

Princip měření spočívá v zatlačení kolíku nebo plošky přes kůži břicha matky do děložní stěny konstantní silou. Pokud je děložní stěna v klidu, nemění se poloha kolíku, je tedy v poloze, která odpovídá hodnotě bazálního napětí svalu dělohy. Pokud dochází ke stahu děložních svalů a tím i zvýšení tuhosti děložní stěny, je kolík vychýlen ze své klidové polohy silou, která odpovídá změně tuhosti děložní stěny a tedy i intenzitě probíhající kontrakce. Přistupuje však ještě celá řada parazitních faktorů, které snižují přesnost měření. Princip metody je patrný z obr.2.36.

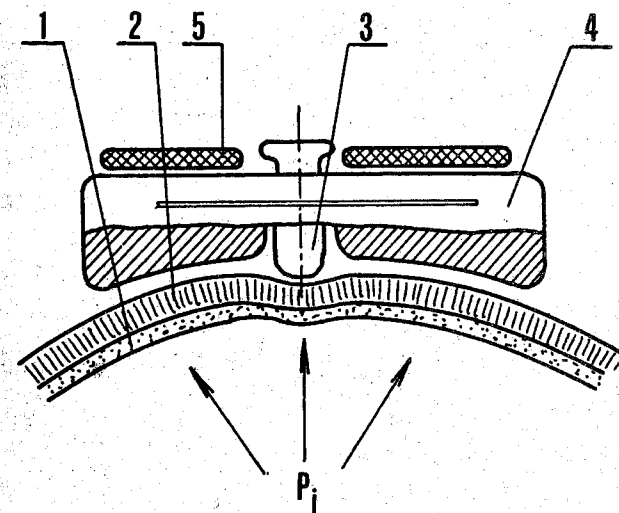
Jedná se o měření proměnné síly, nízkých absolutních hodnot v rozmezí 0 až 10 N,

frekvencí kolísání 1 až 5 stahů za 5 minut. Je tedy měřena velmi malá síla, což vyžaduje relativně citlivý snímač, který je pak citlivý i k indikaci artefaktů.



Obr.2.35. Tokometrické metody snímání děložní aktivity [35].

- 1 - měření intraamniálního tlaku
- 2 - měření intrauterinálního tlaku
- 3 - transabdominální měření intraamniálního tlaku
- 4 - indikace rektálního tlaku
- 5 - abdominální neinvazivní tokometrie



Obr.2.36. Princip abdominální tokometrie

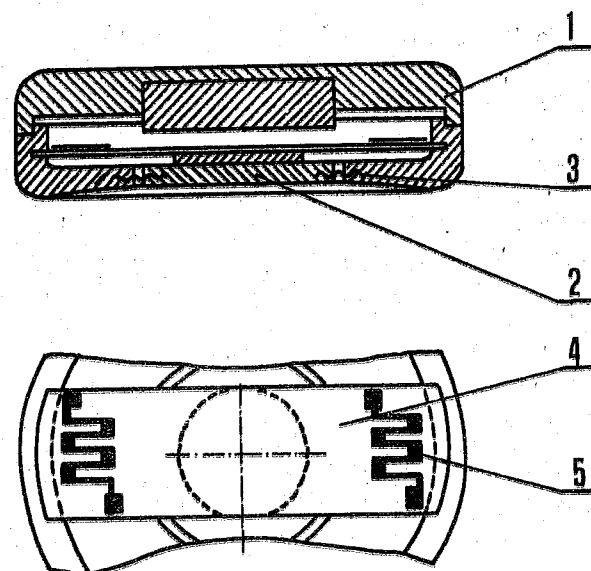
- 1 - děložní stěna
- 2 - tkáň břicha matky
- 3 - tokokolík
- 4 - těleso snímače
- 5 - upevňovací elastický popruh

Při posuzování této metody musíme vycházet z té skutečnosti, že děloha je poměrně složitý a velmi nesusrodý orgán, což je dáno především jeho anatomickou stavbou. Indikovaná síla, resp. přesnost jejího měření, je do značné míry závislá na umístění snímače, dále na typu pacientky (podkožní tuk, poloha dělohy), na poloze plodu, atd. Přistupují i pohybové artefakty, celkem typické pro tuto metodu a v případě velmi neklidné pacientky mohou měření téměř znehodnotit. Jde tedy o relativní měření, pokud se týče amplitudy signálu, doby trvání kontrakcí, včetně tvaru kontrakce a bazálního tonusu.

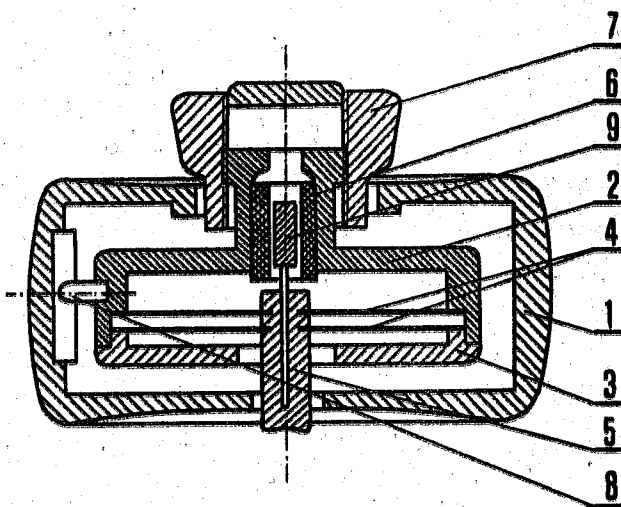
Absolutně je měřena pouze frekvence děložních kontrakcí. Základní požadavky kladené na snímač lze shrnout do několika základních bodů, které pak určují konstrukční provedení, použité materiály a technologii, včetně vhodného principu :

- malé rozměry a hmotnost
- snadná upínatelnost na břicho matky
- vysoká stabilita parametrů a citlivost
- vysoká tuhost systému.

Vhodným principem, který splňuje tyto základní požadavky je princip induktivní nebo tenzometrický. Příklady řešení tokometrických snímačů jsou na obr.2.37. na obr.2.38. a na obr.2.39. [36, 76, 33, 94], opět je nutné dodržení podmínky linearity a optimálního rozmístění tenzometrů, jak je to analogicky řešeno pro tlakové snímače v kap.2.1.3.



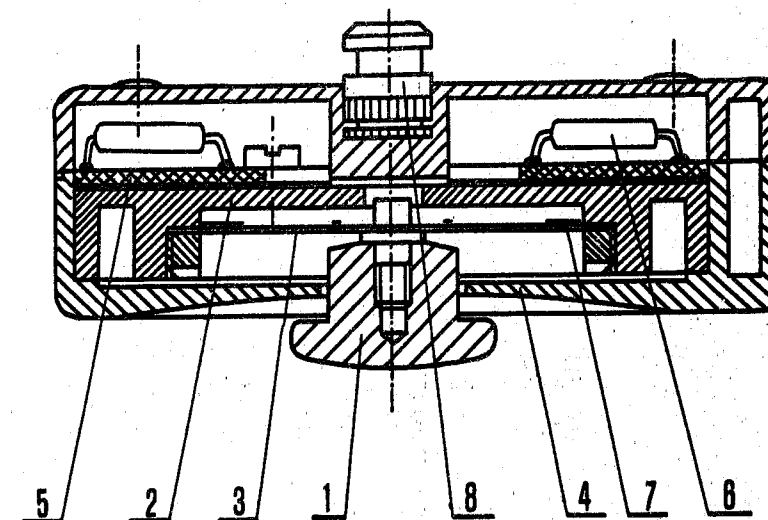
Obr.2.37. Abdominální tokometrický snímač s fóliovými tenzometry  
 1 - kryt 2 - tokohrot  
 3 - oddělovací membrána  
 4 - deformační planžeta  
 5 - fóliový tenzometr



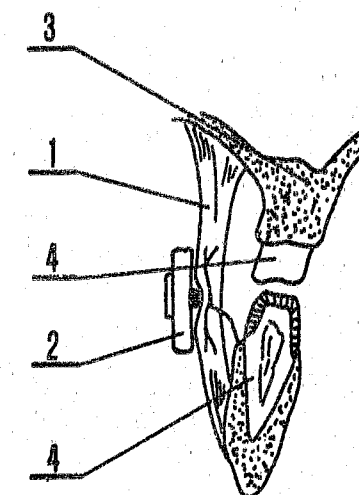
Obr.2.38. Induktivní abdominální tokometrický snímač  
 1 - kryt 2 - nosník  
 3 - základna 4 - membrána  
 5 - tokokolík 6 - cívka 7 - posuv  
 8 - kolík 9 - jádro

Měření svalových kontrakcí se neomezuje pouze na porodnictví, ale uplatňuje se také i v jiných oborech medicíny nebo biologie, i když význam je již menší. Tyto aplikace jsou omezeny spíše na měření výzkumného charakteru [113, 115]. Velmi pěkným příkladem je měření ve stomatologii, při měření resp. indikaci reflexního prnutí žvýkacího svalu při muskulárním symptomu. Z obr.2.40. je patrný způsob měření, který je obdobný způsobu, popsanému v předchozím odstavci. Tuhost žvýkacího svalu je v tomto případě úměrná velikosti vyvinuté žvýkací síly. Vlastní technické řešení snímače je provedeno buď formou ručkového indikátoru (mechanické provedení) nebo jako mechanoelektrický převodník v miniaturním provedení.

Způsob elektronického zpracování je v případech těchto speciálních snímačů shodný s předchozími případy a proto je zpravidla snahou využívat stávající snímače určené pro běžná měření a pro speciální případy stomatologie, měření na pokusných zvířatech, atd., je pouze upravovat.



Obr.2.39. Abdominální tokometrický snímač s polovodičovými tenzometry [94].  
 1 - tokohrot 2 - základna 3 - membrána  
 4 - horní a dolní kryt snímače 5 - plošný spoj  
 6 - kompenzační odpory 7 - křemíkové tenzometry 8 - upevňovací trn



Obr.2.40. Indikace reflexního prnutí žvýkacího svalu [31].  
 1 - žvýkací sval 2 - snímač s tonokolíkem  
 3 - čelist 4 - zubořadí

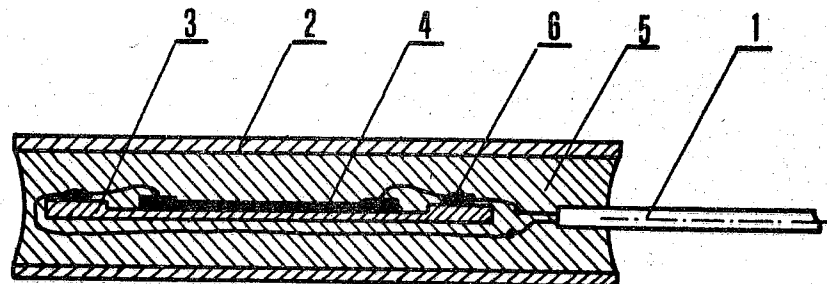
### 2.2.2. Miniaturní snímače síly

Jedná se o vysoce specializovanou skupinu snímačů, používaných pro některá měření výzkumného charakteru. Tyto snímače jsou proto vyvíjeny a zhotovovány jen pro daný speciální účel a nejsou zpravidla předmětem výrobního programu. Proto je

tato skupina snímačů velmi variabilní co do provedení i svých vlastností. Jde však o snímače zajímavého technického provedení a řadu poznatků získaných při jejich realizaci, lze výhodně uplatnit při konstrukci jiných snímačů.

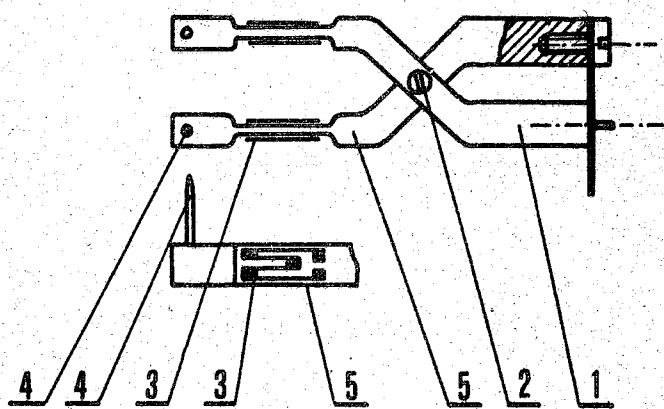
Charakteristický znak, vysoká miniaturizace, vede na řešení využívající polovodičových tenzometrů a progresivních materiálů i moderních technologií a proto i z tohoto důvodu lze tuto skupinu považovat za důležitou. Ve většině případů je měřena malá síla.

Na obr.2.41. je řešení snímače síly na špičce katétru, které je určeno pro přímé měření kontrakční síly v malých dutinách nebo orgánech pokusných zvířat, například extraluminální měření svalové kontraktility v oviduchu nebo ovaria, zatím u pokusných zvířat - opic. Podobný případ je možné řešit i pomocí rtuťových tenzometrů, které však nejsou použitelné v humánní medicíně. Nevhodně se zde uplatňuje toxicita rtuti, i když je oddělena.

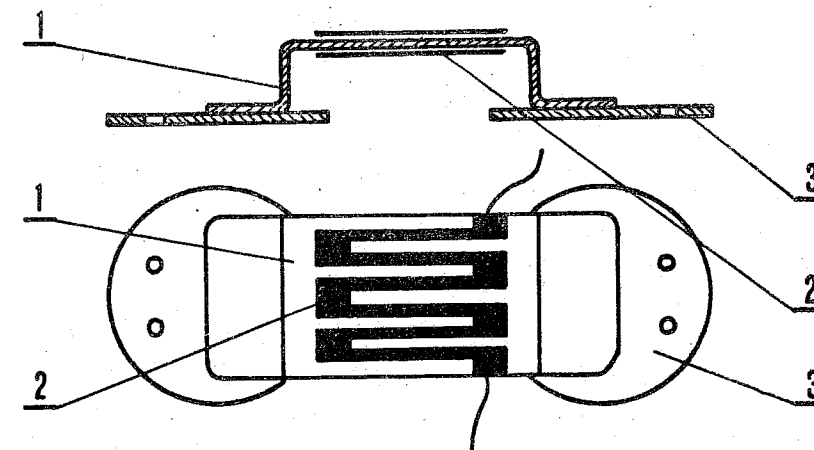


Obr.2.41. Miniaturní snímač síly na špičce katétru [30].  
1 - vodič s teflonovou izolací 2 - silikonová trubička 3 - CuBe planžeta 4 - křemíkový tenzometr 5 - výplň 6 - spoj

Dalším příkladem speciálního snímače síly může být snímač lokálního pnutí na myokardu, který umožňuje měření izometrického pnutí při současné elektrostimulaci, nebo snímač, který umožňuje přímé snímání kontrakcí srdečního svalu, obr.2.42. a Obr.2.43.



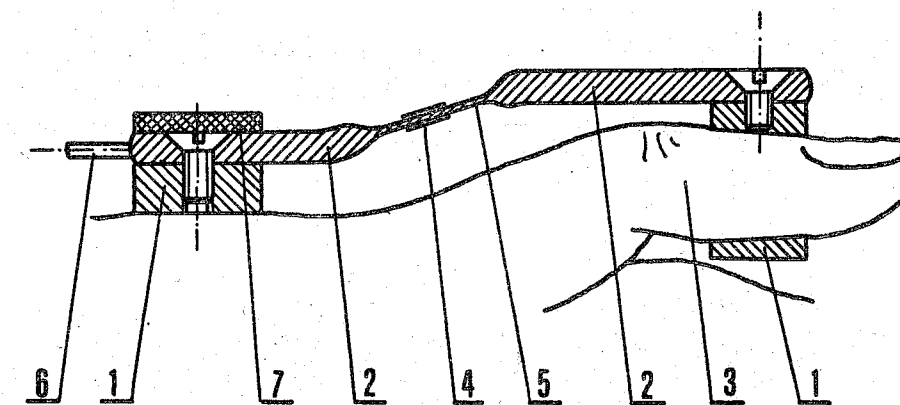
Obr.2.42. Miniaturní snímač lokálního pnutí myokardu [29].  
1 - raménko 2 - kloub 3 - tenzometr 4 - stimulační jehla 5 - deformační raménko



Obr.2.43. Snímač pro přímé měření kontrakcí srdečního svalu [3].  
1 - deformační planžeta 2 - tenzometr 3 - podložka

### 2.2.3. Měření síly a mechanického pnutí, měření hmotnosti

Velmi častým případem měření síly je měření síly, kterou vyvinou košterní svaly, například rukou, jednotlivých prstů. Tato měření jsou velmi důležitá např. ve sportovním lékařství, při rehabilitaci, v neurologii, hygieně práce, atd. Je používáno celé škály tenzometrických snímačů, drátkových nebo fóliových, hlavně pak s polovodičovými křemíkovými tenzometry. Podmínkou je pouze vhodné tvarování vazebních prvků snímače, aby bylo možné jeho uchopení nebo stisknutí, přičemž by byla jen minimálně narušena přirozená fyziologie. Stejně podmínky platí i tehdy, je-li snímač na příslušný orgán například připevněn, obr.2.44.

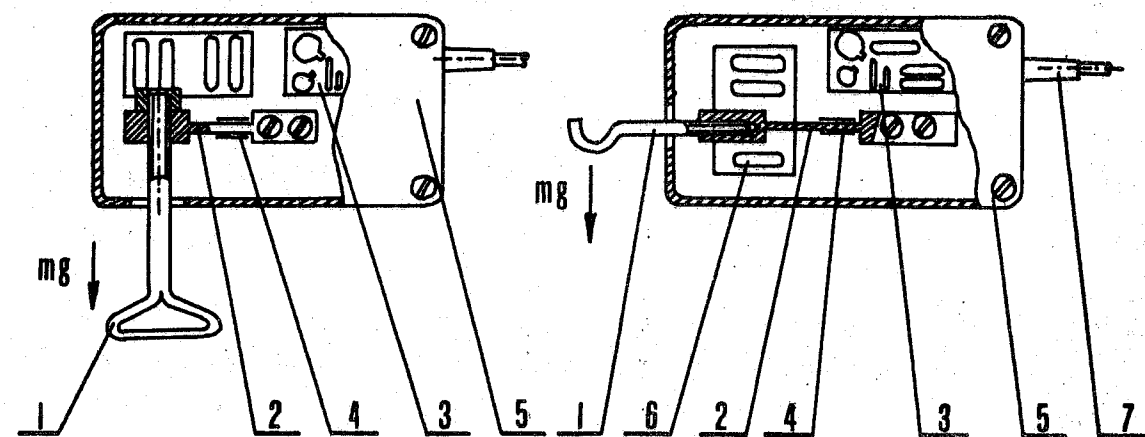


Obr.2.44. Snímač síly prstu  
1 - manžeta 2 - planžeta 3 - prst  
4 - křemíkový tenzometr 5 - deformační nosník 6 - kablík 7 - upínací pás

Deformační podložku, na které je připevněn tenzometr, je nutné vhodně dimenzovat, aby bylo dosaženo lineární závislosti výstupního napětí snímače pro rozsah sil od 300 až do 2 000 N. Většinou se jedná o ryze statická měření nebo měření jen pomalu se měnících sil.

Pojem měření síly je často rozšiřován o měření hmotnosti, kdy je využíváno Newtonova zákona, je pak měřena síla, kterou vyvine příslušná hmotnost, kterou měříme.

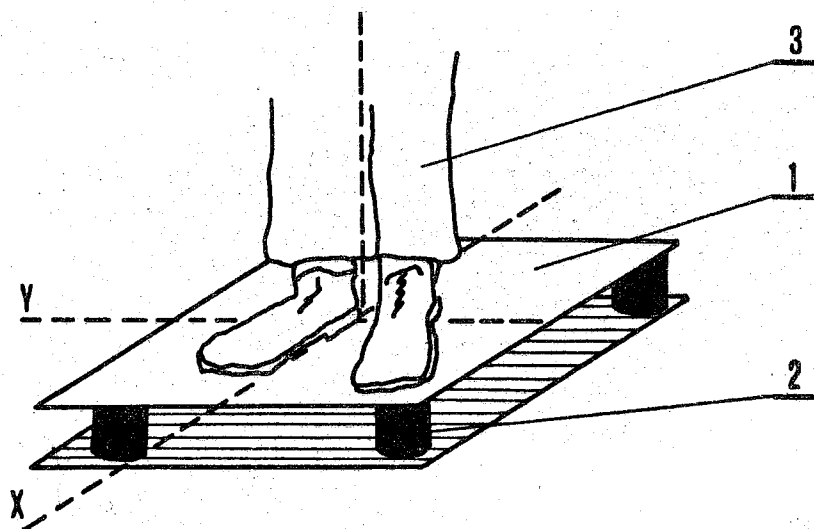
Měření hmotnosti má značný význam na dialyzačních jednotkách, kde je nutné monitorování změny hmotnosti ležících pacientů. Významné je rovněž měření hmotnosti intravenózních roztoků nebo výdeje tekutin (například moči). Provedení snímačů je na obr.2.45., snímače jsou připevňovány na infúzní tyče nebo přímo na postel. Jedná se o tzv. závěsné typy snímačů hmotnosti. Snímač pro měření hmotnosti vzorků, preparátů nebo pokusných zvířat je na obr.4.15. Snímače jsou zpravidla osazeny křemíkovými nebo fóliovými tenzometry.



Obr.2.45. Závěsné tenzometrické snímače hmotnosti

- 1 - závěs 2 - deformační nosník 3 - proudový napájecí zdroj 4 - tenzometr 5 - kryt 6 - kompenzační odpor 7 - průchodka výstupního kabelu

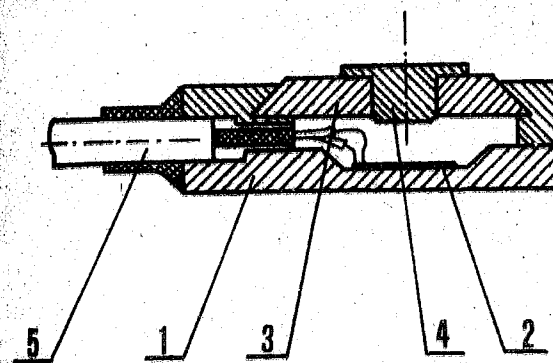
Dalším případem měření nebo indikace hmotnosti je tzv. ekvilibrační měření. I v tomto případě se jedná o měření síly, která odpovídá vychýlení pacienta z rovnovážné polohy. Základní vzpřímený postoj je v tomto případě indikován jako nulová poloha. Vychýlení pacienta z rovnovážné polohy je indikováno pomocí čtyř snímačů síly, jak je patrné z obr.2.46.



Obr.2.46. Princip ekvilibrační desky [38].

- 1 - základní deska 2 - snímač síly 3 - pacient

Dalším případem může být indikace a měření parametrů silových projevů žvýkacího aparátu ve stomatologii, například měření žvýkací síly. Může se jednat o měření frontálním nebo premolárním úseku zubořadí nebo jeho protetické náhrady. Jde o měření poměrně velikých sil, až do 5 kN. Důležité je, aby snímač byl dimenzován tak, aby jen málo narušoval fyziologii žvýkání, je tedy nutné, aby tloušťka snímače v místě skusu byla v rozmezí 7 až 17 mm. Navíc musí snímač umožňovat bezpečné rokusnutí, aniž by došlo k poškození chrupu. Měření je prakticky výhradně používáno tenzometrických snímačů s fóliovými nebo křemíkovými tenzometry. Provedení snímače pro molární úsek zubořadí s fóliovým tenzometrem je na obr.2.47. a snímač s křemíkovými tenzometry pro frontální úsek zubořadí je na obr.2.48.

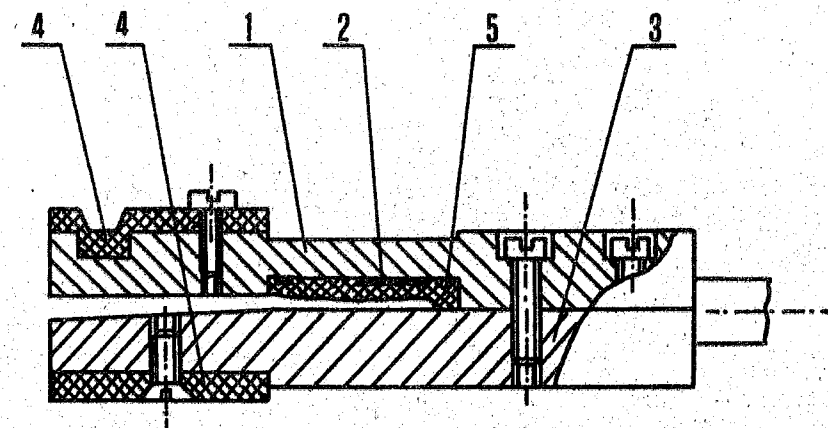


Obr.2.47. Snímač žvýkací síly [78].

- 1 - deformační nosník 2 - tenzometr 3 - deska 4 - kabel 5 - kolík

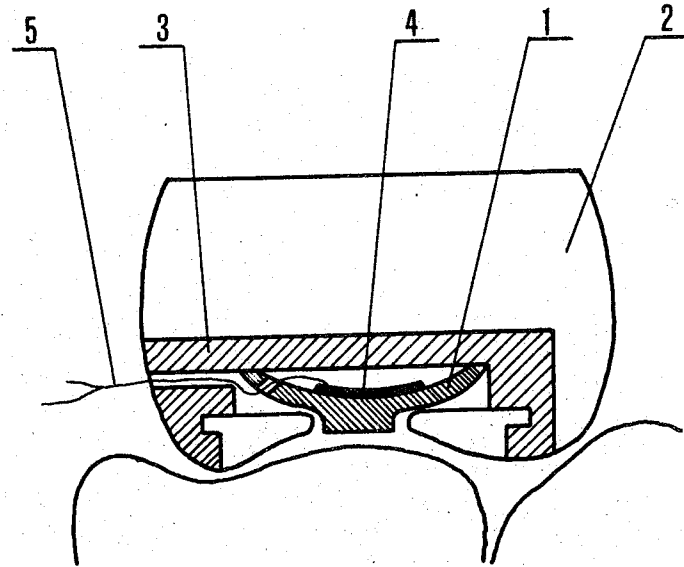
Je možné i takové provedení snímače žvýkací síly, které využívá k měření piezokeramického měniče. Výrazná miniaturizace křemíkových tenzometrů umožňuje realizovat snímání síly pomocí snímače, který je umístěn přímo do zubu, obr.2.49.

Pro potřeby zvláštní diagnózy nebo pro výzkumné účely je často potřeba měřit další mechanické parametry, které souvisí s fyziologií žvýkání. Může se opět jednat o přímé měření, například měření síly vyvinuté rty, lícními svaly nebo jazykem na zubořadí, princip měření a praktické provedení snímače s tenzometry je na obr.2.50.

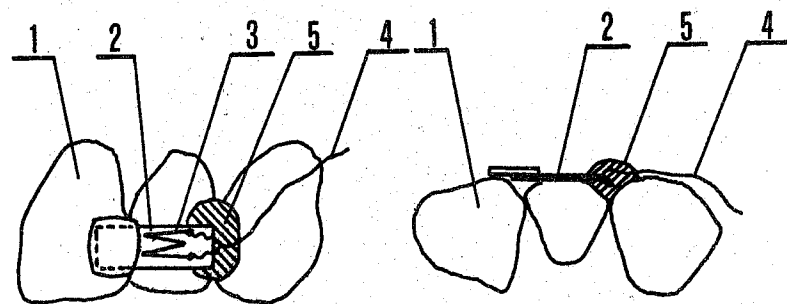


Obr.2.48. Snímač žvýkací síly s křemíkovými tenzometry

- 1 - deformační nosník 2 - tenzometr 3 - základna 4 - skusové nádstavce 5 - silikonová pryž

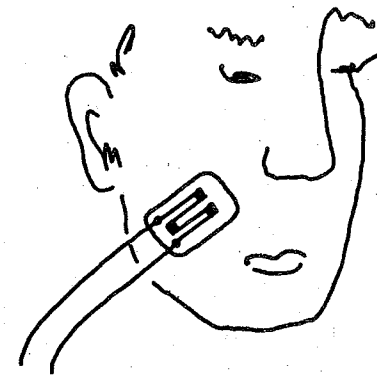


Obr. 2.49. Miniaturní snímač žvýkací síly [28].  
 1 - deformační podložka 2 - zub  
 3 - těleso snímače 4 - křemíkový tenzometr 5 - vodiče



Obr. 2.50. Měření síly ve stomatologii [77].  
 1 - zubořadí 2 - deformační podložka  
 3 - tenzometr 4 - vodiče 5 - tmel

Méně častým případem je snímání mechanického pnutí přímo z kůže pacienta. Zde je však nutné počítat s výrazným zkreslením, které je dáno přenosem síly přes kůži pacienta, promítají se zde výrazně anatomické odlišnosti. Navíc bude měření tohoto typu silně závislé na kvalitě lepení tenzometru na kůži pacienta. Zde platí omezení vyplývající z nutnosti použít lepidel, která tolik nedráždí pokožku a pak je zpravidla reprodukovatelnost výsledků nanejvýš problematická. Uplatní se i příprava povrchu pokožky (mastnota) a pak lze naměřit značné rozdíly v prokluzu tenzometrů. Značná neurčitost v adhezi na biologickou tkáň a její malá trvanlivost vedou k závěru, že se jedná spíše o indikaci. Princip měření je na obr. 2.51.



Obr. 2.51. Měření pnutí na kůži

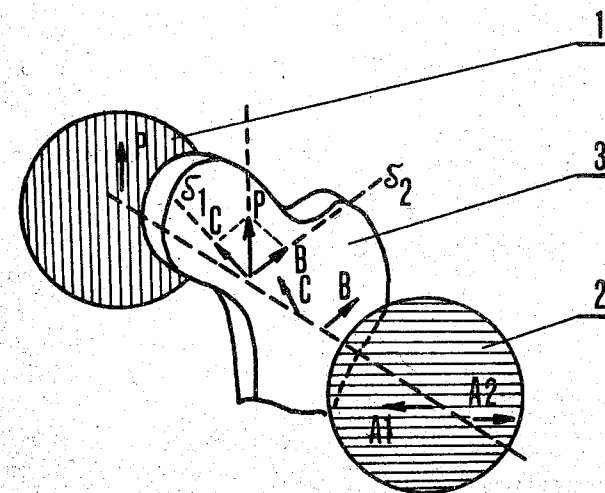
Velmi často je nutné posoudit rozložení mechanického pnutí v biologické tkáni. Je výhodné a v některých případech i nutné, provést toto měření na modelech a to zvláště tam, kdy takovéto měření realizovat na živém organismu není prakticky možné. Takovým případem je například hodnocení rozložení mechanického pnutí ve velkých kostech nebo kloubových uloženích. Tato měření jsou velmi důležitá především z hlediska návrhu a ověření protetických náhrad, stanovení jejich opotřebení, atd. Experimentálně může být posuzována napjatost mechanicky zatížených vzorků kostí opatřených vhodnými tenzometry.

Při měření mechanické napjatosti a rozložení mechanického pnutí je s výhodou používáno modelových zkoušek, nejčastěji fotoelasticimetrie. Tímto způsobem je zkoumáno rozložení mechanického pnutí v kyčelních nebo i jiných kloubech, na modelech chrupu. Významně se zde v posledních letech uplatňuje i holografie. Princip fotoelasticimetrické metody hodnocení rozložení mechanického pnutí v kyčelním kloubu je na obr. 2.52.

Pro uspořádání izochromat platí :

$$\mathcal{J} = c (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{d}{\lambda}$$

kde :  $\mathcal{J}$  - uspořádání izochromat  
 $\sigma_1, \sigma_2$  - hlavní mechanické pnutí  
 $d$  - tloušťka modelu  
 $\lambda$  - vlnová délka použitého monochromatického světla  
 $c$  - konstanta materiálu

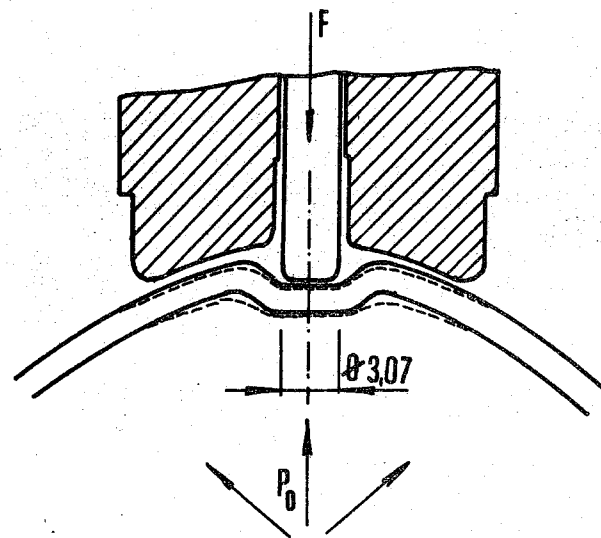


Obr. 2.52. Fotoelasticimetrické posuzování rozložení mechnického napětí [4].  
 1 - polarizátor 2 - analyzátor 3 - model kyčelního kloubu

Tyto modelové zkoušky umožňují alespoň částečně analyzovat rozložení mechanického pnutí v předpokládané části lidského organismu. Na základě těchto měření a zpracování výsledků lze optimalizovat dimenze a volit vhodný materiál pro protetickou náhradu, kterou je nejčastěji kyčelní kloub nebo zubní protézy, obr. 2.52. Je třeba mít při tom na zřeteli, že tyto modelové zkoušky nemají absolutní platnost a jsou vodítkem.

### 2.2.4. Oftalmotonografie

Měření nitroočních tlaků je spojováno především se včasnou diagnózou zeleného zákalu, tedy onemocnění, které je známo z literatury pod pojmem glaukom. Včasná diagnóza tohoto velmi těžkého onemocnění oka, které ve svých důsledcích vede zpravidla k trvalému oslepnutí, je možná na základě spolehlivého měření nitroočních tlaků. Je možné přímé měření nitroočního tlaku propíchnutím stěny oka dutou jehlou a měření pak má charakter klasického invazivního měření tlaku. Tento způsob měření se však v rutinní praxi neuplatnil pro malou šetrnost zákroku. Pro měření nitroočního tlaku a měření "průtoku" nitroočního moku se uplatnily především nepřímé metody. Princip měření spočívá v zatížení oka kolíkem - pelotou o přesně definované hmotnosti a průměru, která je zatlačena do oka konstantní silou, odpovídající její tíži. Hloubka zatlačení peloty do rohovky oka, zjednodušeně interpretováno, je úměrná velikosti nitroočního tlaku. Princip měření je patrný z obr.2.53. a rovněž z grafu na obr.2.54, který platí pro "standardní oko" s tuhostí (rigiditou) okolo  $0,0215 \text{ mm}^3$ . A právě tuhost oka může do měření zanášet chybu, protože se případ od případu může měnit. Jistou roli hraje i velikost oka, za průměrnou hodnotu je považována hodnota 30 mm, tomu také odpovídá křivost čelní plochy snímače [46, 48].



Obr.2.53. Princip impresní tonometrie a tonografie

Měření změny nitroočního tlaku v daném časovém úseku umožňuje sledovat a charakterizovat průtokovou dynamiku nitroočního moku. Rychlost tlakových změn během časového intervalu (zpravidla 4 až 7 minut), umožňuje přesnou diagnózu a stanovení rozsahu patologických změn, vyvolaných glaukomem. U oka nemocného glaukomem, i v počátečním stádiu nemoci, je zvýšen odtokový odpor, proto se nitrooční tlak mění při stejném zatížení pomaleji, než u oka zdravého, u kterého je odtokový odpor minimální [46].

Mluvíme o tzv. impresní tonometrii nebo tonografii, která je základní diagnostickou metodou.

Základní vztah pro impresní tonometrii lze psát ve tvaru [121]:

$$\log P_0 = \log \frac{F}{a + b d_0} - K \Delta V \quad \text{kde} \quad K = \frac{\log P_t - \log P_0}{\Delta V}$$

kde : F - působící síla peloty

K - sklerární rigidita (tuhost oka)

a, b - statisticky určené konstanty

$d_0$  - zanoření peloty do rohovky oka (čtení na stupnici tonometru)

Závislost  $P_0$  a  $d_0$  je uvedena v tabulkách nebo je odečítána z grafu, viz obr.2.54.

Průtok nitroočního moku je možné popsat následujícím vztahem [46, 48]:

$$C = \frac{\Delta V}{t [P_t - (P_0 + \Delta P_v)]}$$

kde :  $P_t$  - tlak v zatíženém oku

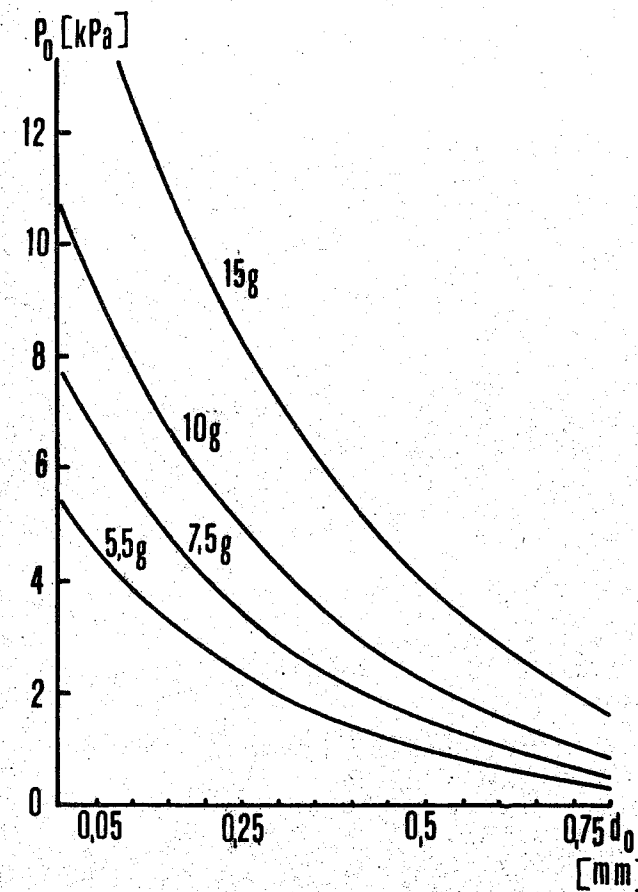
$P_0$  - tlak v nezatíženém oku

$\Delta P_v$  - korekce na tlak v episklerálních vénách

t - čas

$\Delta V$  - změna objemu rohovky

Prakticky lze měření realizovat tak, jak je patrné z obr.2.53. Rohovka oka je zatížena kolíkem - pelotou, nejčastěji o hmotnosti 5,5g, 10g a 16,5g. Změna nitroočního tlaku je registrována jako změna polohy peloty, obr.2.54



Obr.2.54. Závislost prohnutí rohovky na nitroočním tlaku [48, 46].

Změna nitroočního tlaku je sledována průběžně v časovém intervalu, průběh tlaku je zaznamenán na papír a zápis vyhodnocen pomocí tabulek. Toto měření je zatíženo chybou, která je dána nestandardní tuhostí oka, pohybovými artefakty, rozdílnými anatomickými poměry (velikost oka).

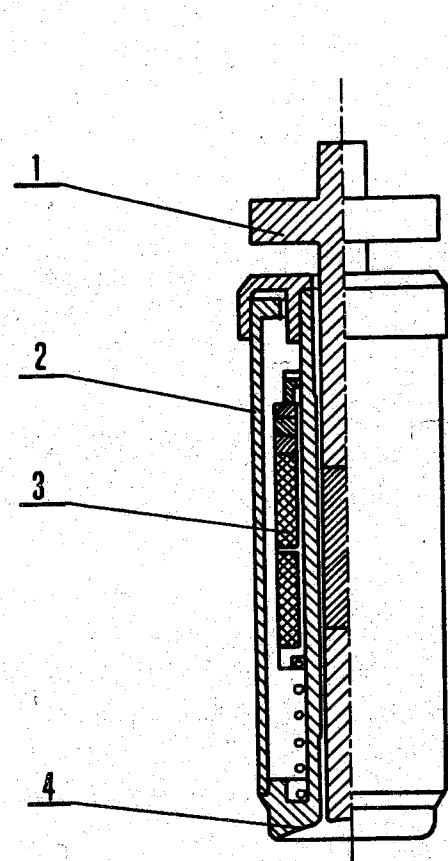
Praktické měření je zpravidla registrováno tonometry, tedy mechanickými přístroji, které umožňují měření nitroočního tlaku na ručkovém indikátoru, který registruje pomocí mechanického převodu prohnutí rohovky.

Pro potřeby tonografie, která registruje nitrooční tlak v jistém časovém úseku a umožňuje záznam na papír, je použito tonometrů elektronických, které používají induktivních snímačů, obr.2.55. Snímač je umístěn na oko ve speciálním držáku, který zaručuje, že snímač bude na oku ve standardní poloze, obr.2.56.

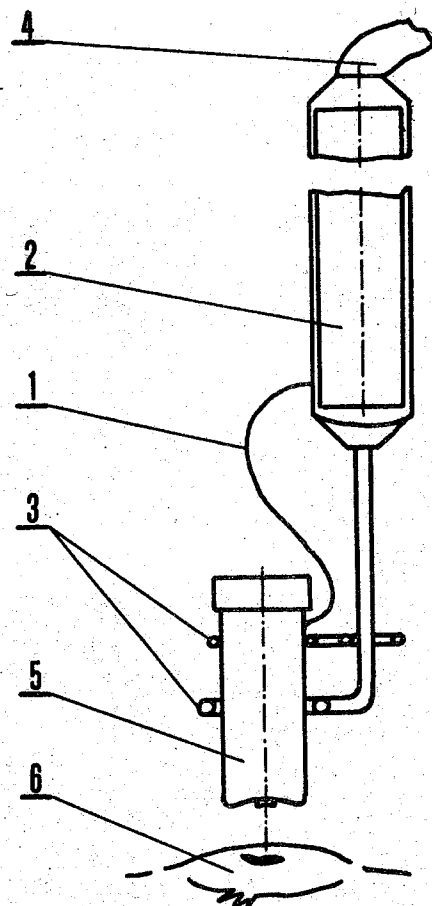
Tímto způsobem jsou omezeny i pohybové artefakty. Měření je však velmi náročné na manuální zručnost lékaře a klade značné nároky na jeho praxi.

Rozměry i hmotnost snímače musí být standardizovány. Jako materiálu se používá

především vysoce legovaných nerezocelí, teflonu, polymethylmetakrylátu, titanu. Materiály musí splňovat požadavky dokonalé korozní odolnosti, zdravotní nezávadnosti, možnosti desinfekce a snadného čištění.



Obr.2.55. Induktivní tonografický snímač  
1 - pelota 2 - těleso snímače  
3 - cívka 4 - kulová plocha

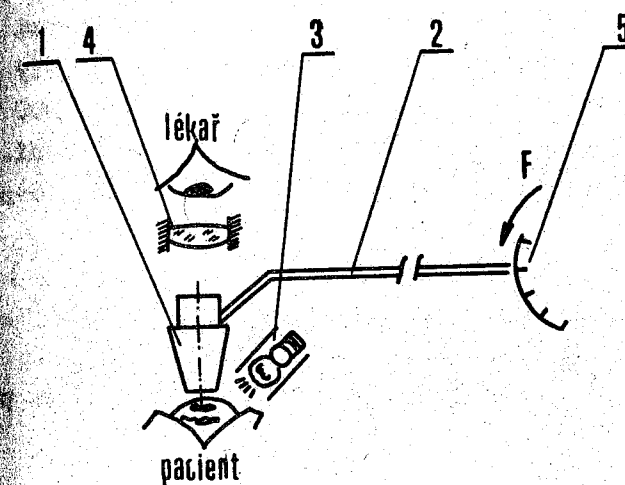


Obr.2.56. Tonografický snímač s držákem [46].  
1 - flexibilní vodiče 2 - držák 3 - očka  
4 - kabel 5 - snímač 6 - oko

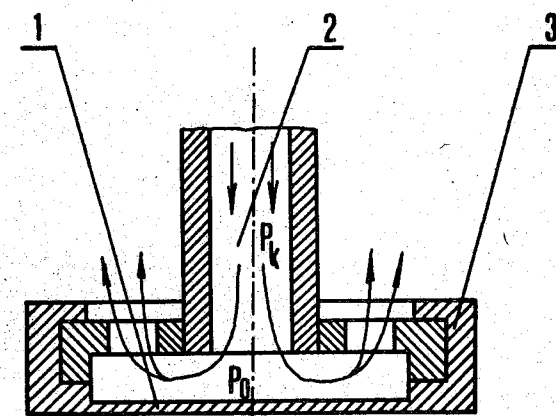
Princip měření je shodný jak pro tonometrii, tak pro tonografii. Tonometrie registruje pouze hodnotu nitroočního tlaku v diskrétním časovém okamžiku a k tomu používá jednoduchých mechanických přístrojů, které pracují na principu ručkového indikátoru, který registruje posuv kolíku - peloty. Tonometrie zase používá elektromechanických snímačů a elektronických přístrojů, které velmi citlivě registrují posuv kolíku - peloty v daném časovém úseku. Sledování změn tlaku v tomto časovém úseku je právě velmi důležité pro včasnou diagnózu zeleného zákalu - glaukomu. Všechny tonometrické i tonografické snímače jsou v podstatě snímači posuvu pro rozsah 1 mm, což je dobře zřejmé z grafu na obr.2.54.

Snímač na obr.2.55. pracuje na induktivním principu, pelota s feritovým jádrem, přikládaná na oko, je umístěna mezi diferenciální cívky, jejich indukčnost se mění v závislosti na poloze feritového jádra. Principiálně se tedy jedná o stejný problém, jako například při realizaci induktivního snímače tlaku, viz.2.4. a obr.2.5.

V praxi se v širším měřítku uplatnila i tzv. aplanační tonometrie, která je prováděna tzv. Goldmanovým tonometrem. Princip metody spočívá v přiložení speciální prizmy na oko, je při tom přitlačena takovou silou, až je dosaženo stavu, kdy povrchové mechanické pružení rohovky je v rovnováze se silou danou elasticitou na povrchové vrstvě rohovky a pak platí, že síla působící na rohovku přes prizmu, je v tomto okamžiku úměrná nitroočnímu tlaku. Princip měření je patrný z obr.2.57.



Obr.2.57. Goldmanův ruční tonometr [47]  
1 - prizma 2 - raménko  
3 - osvětlení 4 - lupa  
5 - registrační zařízení



Obr.2.58. Měřicí hrot pneutonometru [49]  
1 - membrána 2 - komůrka 3 - hrot

Postupně je zaváděna i tzv. pneutonometrie, jejíž hlavní předností je šetrnost v průběhu měření. Princip metody spočívá v přiložení speciální tenké membrány k oku, přičemž mezi hrotem a membránou protéká laminárně plyn. Změna průhybu membrány, která je závislá na nitroočním tlaku, omezuje průtok plynu mezi hrotem a membránou a otvory v hrotu sondy. Změna tlaku v komůrce snímače, která takto vznikne je registrována snímačem tlaku. Změna tlaku v komůrce je úměrná průběhu nitroočního tlaku. Princip metody je patrný z obr.2.58.

### 3. Měření průtoku a proudění

V zásadě se jedná buď o měření průtoku plynů (proudění respiračních plynů), nebo o měření průtoku kapalin. V případě měření průtoku kapalin jde téměř výhradně o měření průtoku krve v různých místech hemodynamického systému. V menší míře se jedná o měření průtoku dialyzačního roztoku v umělé ledvině nebo měření průtoku moči.