

Měření dechové frekvence

Miloš Němec

12. ledna 2005

Obsah

1	Fyziologický úvod	3
1.1	Vnější dýchání	3
1.2	Vnitřní dýchání	4
1.3	Dýchací soustava	5
1.4	Mechanika dýchání	6
1.5	Řízení dýchání	6
2	Měření dechových parametrů	6
2.1	Hodnoty získané spirometrickým vyšetřením	7
2.2	Konstrukce měřících zařízení	9
2.2.1	Objemové spirometry	9
2.2.2	Průtokové spirometry	10
2.2.3	Přenosná zařízení	10
2.3	Prodejní sortiment měřících zařízení	11
2.4	Základní oblasti použití spirometrů	13

1 Fyziologický úvod

Základním úkolem *dýchání* je příjem kyslíku a jeho transport do jednotlivých orgánů, v nichž se spotřebovává, a odvádění produkovaného oxidu uhličitého. Živé organismy si tak opatřují energii potřebnou pro růst, příjem živin a další fyziologické procesy. Vlastní výměna plynů probíhá v organismu na několika úrovních:

- *plicní ventilace*, tj. výměna plynů mezi atmosferickým vzduchem a vzduchem v plicních alveolech,
- výměna dýchacích plynů mezi *alveolárním vzduchem* a krví,
- výměna dýchacích plynů mezi krví a *intersticiálním mokem*,
- výměna mezi intersticiálním mokem a buňkami.

První a druhá úroveň dýchání je souhrnně označována jako *vnější dýchání*, třetí a čtvrtá jako *dýchání vnitřní*.

Průměrná *frekvence dýchání* je v klidu mezi 12 a 16 vdechy za minutu. Při každém vdechu a výdechu se vymění s vnějším prostředím přibližně 500 ml vzduchu, *minutová ventilace* tedy činí 6-8 litrů. Během jedné minuty organismus spotřebuje přibližně 250 ml kyslíku za současné produkce 200 ml oxidu uhličitého. Poměr mezi produkcí CO_2 a O_2 se nazývá *respirační kvocient*. Jeho hodnota závisí na skladbě metabolizovaných živin a je nižší než 1. Proto je i množství vydechovaného vzduchu nižší, než objem vzduchu vdechovaného.

1.1 Vnější dýchání

Na ventilaci plicních alveol se nepodílí celý vdechovaný objem, je od něj třeba odečíst objem *mrtvého prostoru*, který je tvořen dýchacími cestami a zaujímá přibližně 150 ml. Krev se v alveolech nesetkává přímo s atmosferickým vzduchem, neboť při každém vdechu se do alveol dostává plyn z mrtvého prostoru, který představuje závěr expirovaného vzduchu z předchozího dýchacího cyklu.

V alveolárním vzduchu je proti atmosferickému obsaženo menší množství kyslíku - přibližně 14 % objemu (v atmosferickém vzduchu je to cca. 21 %) a vyšší množství oxidu uhličitého - 5 % (oproti 0,04 %). Dále obsahuje alveolární vzduch přibližně 75 % dusíku (oproti 78 %) a 6 % vodních par (v atmosferickém vzduchu je to méně než 1 %). Z toho vyplývají i hodnoty parciálních tlaků jednotlivých frakcí alveolárního vzduchu - 100 mmHg pro O_2 , 39 mmHg pro CO_2 , 574 mmHg pro N_2 a 47 mmHg pro vodní páry. Uvedené údaje je třeba považovat pouze za orientační, konkrétní hodnoty závisí na metabolismu, prokrvení plic a mnoha dalších faktorech.

Uvedená hodnota parciálního tlaku oxidu uhličitého v alveolech je nižší, než parciální tlak CO_2 v žilní krvi, naopak hodnota parciálního tlaku kyslíku ve *venózní krvi* je nižší než alveolární parciální tlak. Takto vzniklý tlakový gradient umožňuje difuzi CO_2 z krve stěnou kapilár do alveol a difuzi O_2 opačným směrem. Přestup plynů je ovlivňován zejména ventilací alveolů, průtokem krve plicemi a alveolární membránou. V arteriální krvi, která opouští plíce jsou za normálních okolností parciální tlaky dýchacích plynů (včetně dusíku) prakticky shodné s jejich parciálními tlaky v alveolech.

1.2 Vnitřní dýchání

Kyslík je v krvi *transportován* ve dvou formách:

- *volně rozpuštěný* v plazmě. Podle *Henryho zákona* je množství rozpuštěného kyslíku přímo úměrné jeho parciálnímu tlaku, 100 ml krve obsahuje přibližně 0,3 ml rozpuštěného O_2 , což je množství, které je ve srovnání s druhou formou transportu zanedbatelné,
- reverzibilně *vázaný na hemoglobin*. *Hemoglobin* - červené krevní barvivo obsažené v *erythrocytech* je složeno z bílkoviny - *globinu* a čtyř subjednotek, z nichž každá obsahuje *hem* s centrálním atomem dvojmocného železa Fe^{2+} , který je schopen *oxygenací* reverzibilně vázat jednu molekulu O_2 . Množství kyslíku, vázaného na hemoglobin je určováno *disociační křivkou* v závislosti na parciálním tlaku $O_2(pO_2)$. Tato křivka má *sigmoideální* tvar, při nízkých hodnotách pO_2 strmě stoupá a při vysokých hodnotách, kdy se sycení hemoglobinu blíží úplné saturaci, se zplošťuje. Tvar a poloha křivky je závislá na parciálním tlaku CO_2 , pH prostředí a teplotě. Vyšší parciální tlak oxidu uhličitého (pCO_2) a nižší pH ve tkáních posouvá křivku doprava, snižuje afinitu hemoglobinu vůči kyslíku a usnadňuje tak jeho uvolňování. V plicních kapilárách se naopak CO_2 uvolňuje, pH krve roste, disociační křivka se posouvá doleva, a tím dochází k snadnějšímu sycení hemoglobinu kyslíkem. Vliv pH resp. pCO_2 je znám jako *Bohrův efekt*.

Jeden litr krve obsahuje přibližně 150 gramů hemoglobinu, z nichž každý může vázat maximálně 1.38 ml O_2 . Pro průměrnou saturaci hemoglobinu v arteriální krvi 97 % vychází koncentrace kyslíku přibližně 200 ml na litr arteriální krve.

Běžná hodnota parciálního tlaku kyslíku ve tkáních je okolo 40 mmHg, tedy výrazně nižší než v přitékající krvi. Za těchto okolností dochází k rychlému uvolňování kyslíku z hemoglobinu a jeho difuzi do tkáňového moku a buněk. pO_2 v krvi se snižuje až k hodnotě okolní tkáně za současné *disociace* asi 30 % *oxyhemoglobinu*. Koncentrace kyslíku klesá v klidu na 14-15 ml na 100 ml venózní krve, při velmi namáhavé fyzické práci však může klesnout i pod 5 ml $O_2/100$ ml krve. Klidová arteriovenózní diference je tedy 5-6 ml $O_2/100$ ml krve.

Opačným směrem než kyslík postupují molekuly CO_2 , tvořeného ve tkáních ($pCO_2 \approx 47$ mmHg). Z buněk snadno difundují do intersticiálního moku a stěnou kapilár do krve ($pCO_2 \approx 40$ mmHg), kde tak dochází k vyrovnávání parciálního tlaku CO_2 s úrovní tkání. Vzhledem k mnohonásobně vyšší rozpustnosti CO_2 v krvi než u kyslíku a vyšší krevní kapacitě pro CO_2 je i koncentrace CO_2 v krvi vyšší (cca. 55 ml/100 ml arteriální krve a 60 ml/100 ml venózní krve). Z kapilár jsou molekuly *oxidu uhličitého* dopravovány do plic některou z následujících forem *transportu*:

- chemické *rozpuštění* v krvi nebo erythrocytech. Na tento způsob transportu CO_2 ze tkání připadá asi 10% arteriovenózní diference v koncentraci CO_2 ,
- *vytvoření karbaminosloučenin*, tj. navázání na hemoglobin v plazmě za vzniku *karbaminohemoglobinu* případně na některou bílkovinu plazmy za vzniku *karbaminoproteinu* (představuje 13% arteriovenózní diference),

- *transport ve formě HCO_3^- . CO_2 , který vnikl do erytrocytů, se při katalytické reakci za účasti karboanhydrázy spojuje s molekulou vody za vzniku HCO_3^- a H^+ . Kationt H^+ je neutralizován navázáním na hemoglobin, zatímco HCO_3^- difunduje po koncentračním gradientu z krvinek. Tato reakce je stejně jako reakce v předchozích typech transportu reverzibilní, připadá na ni 79 % arteriovenózní difference.*

Množství CO_2 rozpuštěného v krvi je přímo úměrné jeho parciálnímu tlaku, v ostatních případech chemicky vázaného CO_2 se řídí závislost mezi $p\text{CO}_2$ a koncentrací CO_2 v krvidisociační křivkou. Její tvar je dán omezenou schopností hemoglobinu vázat H^+ ionty a vytvářet *karbaminovazby*.

Tyto schopnosti jsou ovlivňovány stavem hemoglobinu resp. jeho saturací kyslíkem. Pro nižší saturaci je venózní krvi je disociační křivka strmější, při daném $p\text{CO}_2$ může být vázáno a transportováno vyšší množství CO_2 , naopak syčení hemoglobinu kyslíkem v krvi podporuje uvolňování CO_2 . Jedná se o *Haldaneův efekt*.

1.3 Dýchací soustava

Dýchací soustavu člověka tvoří:

- *Dutina nosní* začíná nosními dírkami a ústí *nozdrami* do nosohltanu. Na bočních stěnách se nacházejí *skořepky nosní*, z nichž horní dvě jsou výběžky kosti čichové, dolní je samostatná kost, připojená k horní čelisti. Dutina je vystlána sliznicí, krytou řasinkovým epitelem, obsahující drobné hlenové žlázy. Ve sliznici a pod ní jsou husté pleteně žilní. V nosní dutině se vzduch zbavuje prachu, který se zachycuje v řasinkovém epitelu, sytí se vodními parami a na prokrvené sliznici se předeřívá.
- *Vedlejší dutiny nosní*: dutiny horní čelisti, dutiny v kosti čelní a klínové, dutinky v kosti čichové. Dutiny jsou rovněž vystlány sliznicí. Choanami přechází vzduch do hltanu, kde se rozdělují cesty polykací a dýchací, a vstupuje do hrtanu.
- *Hrtan* je soubor chrupavek, vzájemně pohyblivě spojených. Vazivovou blánou je zavěšen na jazylce. Největší je *chrupavka štítná*, pod ní je *chrupavka prstencová*, na jejíž zadní stranu nasedají dvě trojboké *chrupavky hlasivkové*. Od chrupavky štítné k přením hrotům hlasivkových chrupavek jsou napjaty dva páry *hlasových vazů*, tvořících *hlasivkovou štěrbinu*. Hrtan je vystlán sliznicí. Nad chrupavkami hlasivkovými je šikmo skloněna chrupavčitá *příklopka hrtanová*. Při polykání se příklopka sklání nad vchodem do hrtanu.
- Pokračováním hrtanu je *průdušnice*. Je připojena vazivem na dolní okraj chrupavky prstencové. Je dlouhá 10 až 12 cm a je složena ze 16-ti až 20-ti chrupavek, spojených vazivem. Je vystlána sliznicí a kryta řasinkovým epitelem. Sestupuje do mezihrudní přepážky a ve výši 4. a 5. hrudního obratle se štěpí na pravou a levou průdušku.
- *Průdušky* jsou rovněž chrupavčité. Zanořují se do plic a větví se dále na *průdušinky*. Sliznice průdušek obsahuje drobné hlenové žlázy a je kryta řasinkovým epitelem.
- *Plíce* jsou párový orgán, uložený v dutině hrudní. Vazivovou *mezihrudní přepážkou* jsou odděleny na pravou a levou plíci. V mezihrudní přepážce je uložen osrdečník se srdcem vychýleným k levé straně. Levá plíce je menší, tvořená dvěma laloky,

pravá je větší, tvořená třemi laloky. Povrch plic kryje vazivová blána - *poplicnice*, přecházející na vnitřní stranu hrudníku jako *pohrudnice*. Mezi oběma blánami je *štěrbina pohrudniční*, vyplněná vazkou tekutinou, umožňující klouzání blan při dýchání. Průdušinky se větví v tenkostěnné *alveolární chodbičky*, otvírající se do *plicních sklípků*. Stěna sklípků je tvořena jednovrstevným epitelem; je podepřena sítí jemných krevních vlásečnic z oblasti plicní tepny, které přivádějí žilní krev.

1.4 Mechanika dýchání

Hlavními vdechovými svaly jsou *bránice* a *zevní mezižeberní svaly*. V pohrudniční štěrbině je podtlak a tlakem atmosférického vzduchu jsou plíce tlačeny k hrudní stěně. Pasivně sledují změny objemu hrudní dutiny. Při vdechu se bránice pohybuje směrem dolů jako píst a stahem mezižeberních svalů se hrudník zvětšuje. Výdech nastává ochabnutím bránice a mezižeberních svalů a jeho dokončení zajišťují vnitřní mezižeberní svaly.

V klidu je využita jen malá část kapacity plic. Po normálním vdechu můžeme ještě usilovně vdechnout asi $2,5 \text{ dm}^3$ vzduchu a po klidném výdechu ještě usilovně vydechnout asi 1 dm^3 vzduchu. Jestliže tedy po usilovném vdechu usilovně vydechneme, můžeme vyměnit cca 4 dm^3 vzduchu. Tento objem je označován jako *vitální kapacita plic*. Její hodnota závisí na věku, pohlaví, a trénovanosti.

1.5 Řízení dýchání

Dýchání je jako jedna ze základních životních funkcí řízeno řadou *regulačních mechanismů*. Volní změny dýchání jsou regulovány mozkovou kůrou, dýchací automatika je zajišťována dýchacími centry v prodloužené míše a mostu, kde vznikají rytmické vzruchy, které jdou míšními nervy k dýchacím svalům. Je nezbytné, aby aktivita dýchacích center byla v souladu s metabolickou situací v organismu resp. aby reagovala na změny obsahu dýchacích plynů ve vnitřním prostředí organismu. Hovoříme o *chemickém řízení dýchání*, jehož základním úkolem je udržovat relativně stabilní parciální tlaky kyslíku a oxidu uhličitého, a to zejména v arteriální krvi.

Potřebné informace pro řízení získává centrální nervová soustava pomocí *periferních a centrálních chemoreceptorů*. Hlavním periferním receptorem je *glomus caroticum*, uložený v místě větvení karotid. Tento receptor reaguje zvýšenou frekvencí vysílaných impulsů především na pokles pO_2 , ale i na růst pCO_2 a koncentrace H^+ iontů. Centrální receptory, lokalizované v oblasti prodloužené míchy a mozkového kmene, reagují na změny pCO_2 a pH mozkomíšního moku.

Činnost dýchacího centra můžeme ovlivnit i vědomě (dočasnou zástavou dechu) a ovlivňují ho také emoce (smích, pláč, hněv).

2 Měření dechových parametrů

Jednou ze složek *vnějšího dýchání* je *plicní ventilace*, která zabezpečuje výměnu vzduchu mezi atmosférou a plicními alveoly. Intenzita ventilace závisí především na hloubce jednotlivých dechů (dechových objemů) a na počtu dechů za časovou jednotku (*dechové frekvenci*). Hlavní metodou, kterou je možno vyšetřit plicní ventilaci, je **spirometrie**.

Dechová frekvence, jako jeden z mnoha parametrů plicní ventilace, se obvykle měří společně s ostatními parametry při spirometrickém vyšetření. Určitou výjimkou je snad jen resuscitace, při které se ale pro měření dechové frekvence žádných zvláštních přístrojů nepoužívá. A také anestezie - při té ovšem bývá sledování dýchacích pohybů a dechové frekvence spojeno s volumetrickým měřením vydechovaného dechového objemu.

Úroveň ventilace je významně ovlivňována rozdělením vdechovaného vzduchu mezi jednotlivé alveoly, tedy jeho intrapulmonální *distribucí* do jednotlivých částí plic. Distribuce vzduchu v plicích není ani v klidu a za fyziologických podmínek zcela roznoměrná. Například vstoje a v sedě jsou ventilovány dolní oblasti plic 1,3x více než oblasti horní.

2.1 Hodnoty získané spirometrickým vyšetřením

Hodnoty získané spirometrickým vyšetřením můžeme rozdělit na hodnoty statické a dynamické (tj. hodnoty za jednotku časovou).

Hodnoty statické:

- VC vitální kapacita ($IRV + V_T + ERV$)
- IRV inspirační rezervní objem
- ERV expirační rezervní objem
- V_T dechový objem
- RV reziduální objem
- FRC funkční reziduální kapacita
- TC celková plicní kapacita ($VC + RV$)

Hodnoty dynamické:

- FVC usilovná rozepsaná vitální kapacita
- FEV_1 rozepsaný usilovný výdech vitální kapacity za 1 s
- PEF vrcholný expirační průtok
- MVV maximální minutová ventilace
- MEF 25,50,75 max. expirační průtok při 25,50,75 % VC max
- F dechová frekvence
- V' minutová ventilace ($V' = V_T \cdot f$)

Definice jednotlivých hodnot:

Vitální kapacita (VC) je největší objem vzduchu, který může vyšetřovaný vdechnout po maximálním výdechu nebo vydechnout po maximálním vdechu. Vitální kapacita nás informuje jediné o objemovém rozdílu mezi maximálním vdechem a maximálním výdechem, statické jednotce plicní ventilace.

Inspirační rezervní objem (IRV) je ono množství vzduchu, které dovede vyšetřovaný po normálním vdechu ještě vdechnout.

Expirační rezervní objem (ERV) je ono množství vzduchu, které dovede vyšetřovaný po normálním výdechu ještě vydechnout.

Reziduální objem (RV) je objem vzduchu, který zůstane v plicích po maximálním výdechu. Udává se v procentech celkové kapacity.

Celková (totální) plicní kapacita (TC) je veškeré množství vzduchu obsažené v plicích po hlubokém vdechu.

Maximální minutová ventilace (MVV) představuje největší možnou mechanickou ventilaci plic za jednu minutu.

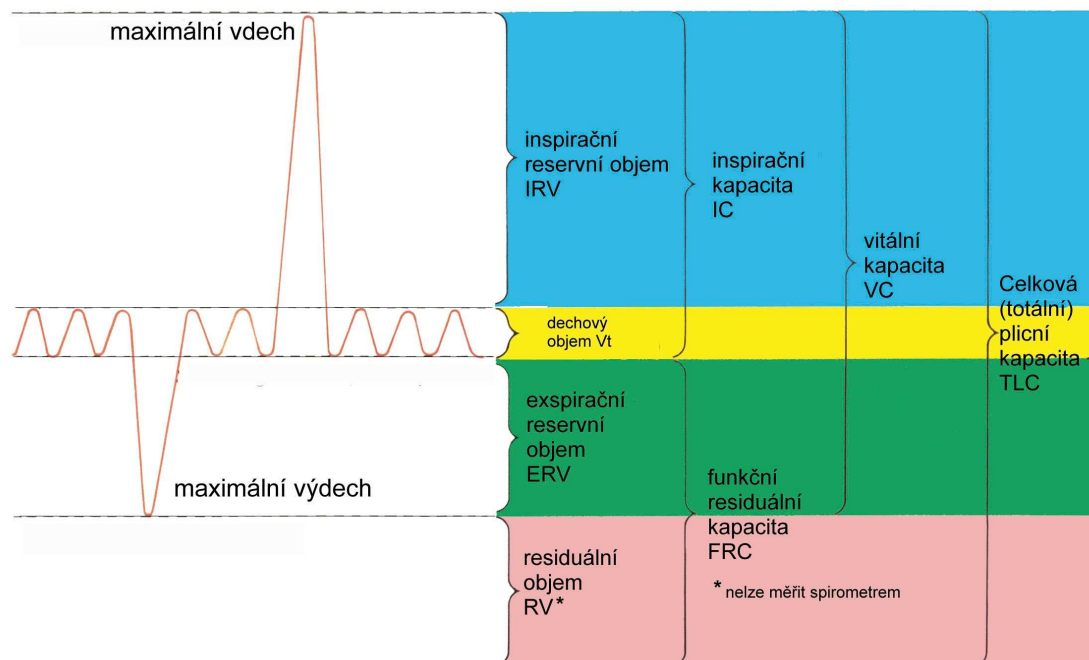
Klidová minutová ventilace klidová mechanická ventilace za 1 minutu (součin průměrného dechového objemu a dechové minutové frekvence)

Usilovná vitální kapacita (FVC) je takové množství vzduchu, které může vyšetřovaný po maximálním vdechu co nejpruději vydechnout.

Rozepsaný usilovný výdech vitální kapacity za 1 sekundu (FEV_1) udává kolik procent VC je vydechnuto během jedné sekundy. Měla by být větší jak 75 % normy pro vyšetřovanou osobu.

Střední výdechová rychlost (MEF 25,50,75) je průměrná rychlost měřená při usilovném rozepsaném výdechu vitální kapacity mezi jeho 25-75 % od počátku výdechu.

Procento vitální kapacity za 1 sekundu (FEV_1 %) je poměr usilovné vitální kapacity k rozepsanému usilovnému výdechu VC za 1 sekundu x 100.



Obrázek 1: Základní parametry spirometrie.

2.2 Konstrukce měřících zařízení

Nejčastěji používaná zařízení zahrnují objemové a průtokové spirometry používané v laboratořích, nebo přenosné spirometry pro osobní použití. Současná lepší zařízení poskytují přímo grafický výstup (spirogram).

2.2.1 Objemové spirometry

Běžné spirometry umožňují přímé měření respiračního objemu pomocí:

- posunu zvonu (vodou uzavřeného),
- pístů,
- měchů.

Výsledek je prezentován ve formě grafického zobrazení průběhu vydechnutého objemu v čase (spirogram). Hodnoty FVC, FEV₁ a VC je většinou třeba ručně spočítat ze spirogramu a právě z tohoto důvodu je práce s objemovým spirometrem časově náročná a tento spirometr je málo vhodný pro běžnou lékařskou praxi.

Obecně, objemové spirometry jsou jednoduché, přesné, spolehlivé, solidní a jednoduše udržovatelné, a poskytují jasný a permanentní záznam testu. Jsou ovšem také méně přenosné, než průtokové spirometry a je obtížnější je čistit a desinfikovat.

2.2.2 Průtokové spirometry

Pokrok ve vývoji elektroniky a mikroprocesorové technologie v posledních letech, vedl k vývoji nové třídy mobilních spirometrů. Průtokové spirometry obecně využívají senzor měřící průtok jako primární signál a počítají objem s pomocí elektronické (analogové), nebo numerické (digitální) integrace průtokového signálu. Nejčastěji používané senzory detekují a měří průtok pomocí:

- poklesu tlaku proti odporu,
- chlazení vyhřívaného drátku (anemometr),
- elektronického počítání otáček turbínky.

V oblasti praktických lékařů tato zařízení většinou nahradila objemové spirometry. Zejména pro jejich přenositelnost, automatické výpočty, ukládání výsledků testů, výpočet referenčních hodnot pro testovaného pacienta a tisk výsledků včetně spirogramu a průtok-objemové smyčky, spolu s jednoduchou obslohou, snadnou údržbou (čištění a dezinfekce), se tato zařízení stala velmi populární.

Některé průtokové spirometry mají senzory na jedno použití. Výměnou těchto senzorů po každém vyšetření lze efektivně eliminovat potřebu čištění a dezinfekce.

2.2.3 Přenosná zařízení

Mechanická zařízení pro osobní použití pacientů trpících astmatem, jako jsou například mechanické výdechoměry, jsou k dispozici již několik desetiletí. Většina těchto zařízení je dostatečně robustní a poskytující reprodukovatelné výsledky pro základní sledování. Nicméně, často mají limitovanou přesnost a protože poskytují jen hodnoty závislé na úsilí, mají limitovanou aplikovatelnost při počátečním posuzování respiračních onemocnění.

V poslední době bylo vyvinuto několik malých, levných, přesných, baterií napájených zařízení, které umožňují ukládat měřená data a přenést je do počítače pro další statistickou analýzu.

2.3 Prodejní sortiment měřících zařízení

- Spirometry pro domácí monitorování
 - Mechanické výdechoměry (většinou jednoúčelové průtokoměry)



Obrázek 2: Mechanický výdechoměr.

- Elektronické výdechoměry (umožňují testovat více expiračních parametrů)



Obrázek 3: Elektronický výdechoměr.

- Cartridgové spirometry (integrováný display a tiskárna, přímé zobrazování křivek na displeji, k naměřeným hodnotám často tisknou i interpretaci)



Obrázek 4: Cartridgový spirometr.

- Počítačové spirometry (automatická správa spirometrických dat, kontrola testů kvality, protokolování dat z více přístrojů, automatická kalibrace, standardní propojení s databankami správy patientských dat, import geografických údajů o pacientech, export dat pro statistickou analýzu, interaktivní software, atd.)



Obrázek 5: Počítačový spirometr.

2.4 Základní oblasti použití spirometrů

Spirometrie je moderní metoda sloužící k posouzení funkčního stavu plic. Pomocí spirometrie je již možno rozlišit jednotlivé plicní onemocnění. Lékař toto vyšetření doporučí při podezření na astma (záchvatovité plicní onemocnění provázené zúžením dechových cest) a dále při chronické obstrukční chorobě bronchopulmonální (chronické onemocnění plic provázené kašlem a dechovou tísní) nebo plicních onemocnění z povolání apod.

Reference

- [1] ECK, V., RAZÍM, M. (1996). *Biokybernetika*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [2] ECK, V. (1998). *Bionika*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [3] JELÍNEK, J. (1998). *Biologie člověka a úvod do obecné genetiky*. Nakladatelství Olomouc.
- [4] *Úkoly z fyziologie dýchání*. Fakulta tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy v Praze
- [5] PIERCE, R., JOHNS, D. (2004). *The Measurement and Interpretation of Ventilatory Function in Clinical Practice*.