

EDICE INTENZIVNÍ MEDICÍNA

Kniha vyšla za laskavé podpory společností:

Dräger

GENERÁLNÍ PARTNER

ASQA a.s.
Age, Si Quid Agis



**FRESENIUS
MEDICAL CARE**

**Doc. MUDr. Pavel Dostál, Ph.D., MBA,
a kolektiv**

ZÁKLADY UMĚLÉ PLICNÍ VENTILACE

4. rozšířené vydání

**JESSENIUS
MAXDORF**

EDICE INTENZIVNÍ MEDICÍNA

Editoři: prof. MUDr. Vladimír Černý, Ph.D., FCCM
prof. MUDr. Martin Matějovič, Ph.D.

DŮLEŽITÉ UPOZORNĚNÍ

Autoři i nakladatel vynaložili velkou péči a úsilí, aby všechny informace v knize obsažené týkající se dávkování léků a forem jejich aplikace odpovídaly stavu vědy v okamžiku vydání. Nakladatel však za údaje o použití léků, zejména o jejich indikacích, kontraindikacích, dávkování a aplikačních formách, nenese žádnou odpovědnost, a vylučuje proto jakékoli přímé či nepřímé nároky na úhradu eventuálních škod, které by v souvislosti s aplikací uvedených léků vznikly. Každý uživatel je povinen důsledně se řídit informacemi výrobců léčiv, zejména informací přiloženou ke každému balení léku, který chce aplikovat.

Ochranné obchodní známky (chráněné názvy) léků ani dalších výrobků nejsou v knize zvlášť zdůrazňovány. Z absence označení ochranné známky proto nelze vyvozovat, že v konkrétním případě jde o název nechráněný.

Toto dílo, včetně všech svých částí, je zákonem chráněno. Každé jeho užití mimo úzké hranice zákona je nepřipustné a je trestné. To se týká zejména reprodukování či rozšiřování jakýmkoli způsobem (včetně mechanického, fotografického či elektronického), ale také ukládání v elektronické formě pro účely rešeršní i jiné. K jakémukoli využití díla je proto nutný písemný souhlas nakladatele, který také stanoví přesné podmínky využití díla. Písemný souhlas je nutný i pro případy, ve kterých může být udělen bezplatně.

© Pavel Dostál, 2004, 2005, 2014, 2018

© Maxdorf, 2004, 2005, 2014, 2018

Illustrations © Maxdorf, 2004, 2005, 2014, 2018

Cover layout © Maxdorf, 2004, 2005, 2014, 2018

Cover Photo © fotografie na obálce použita s laskavým svolením společnosti Dräger

Vydal Maxdorf s. r. o., nakladatelství odborné literatury, Na Šejdru 247/6a, 142 00 Praha 4

e-mail: info@maxdorf.cz, internet: www.maxdorf.cz

Jessenius® je chráněná značka [No. 267113] označující publikace určené odborné zdravotnické veřejnosti

Odpovědný redaktor: **Mgr. Zuzana Samohylová, Mgr. Irena Kratochvílová, Ing. Veronika Pátková**

Ilustrace: **David Zogala, Jan Krečmar, Mgr. Veronika Mrázová; ilustrace do kapitoly 1 dodali autoři**

Sazba: **Denisa Honzalová**

Tisk: Books Print s.r.o.

Printed in the Czech Republic

ISBN 978-80-7345-562-0

HLAVNÍ AUTOR

- **Doc. MUDr. Pavel Dostál, Ph.D., MBA**, Klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny, Univerzita Karlova v Praze, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Fakultní nemocnice Hradec Králové

SPOLUAUTOŘI

- **MUDr. Renata Černá Pařízková, Ph.D., LL.M.**, Klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny, Univerzita Karlova, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Fakultní nemocnice Hradec Králové
- **Prof. MUDr. Vladimír Černý, Ph.D., FCCM**, Klinika anesteziologie, perioperační a intenzivní medicíny, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Masarykova nemocnice v Ústí nad Labem, Institut postgraduálního vzdělávání ve zdravotnictví, Centrum pro výzkum a vývoj, Klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny, Univerzita Karlova, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Fakultní nemocnice Hradec Králové, Department of Anesthesia, Pain Management and Perioperative Medicine, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada
- **MUDr. Josef Polák**, Klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny, Univerzita Karlova, Lékařská fakulta v Hradci Králové, Fakultní nemocnice Hradec Králové
- **MUDr. Vladislav Rogozov**
- **Prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.**, Fakulta biomedicínského inženýrství, České vysoké učení technické v Praze
- **MUDr. Bronislav Stibor**, Abteilung für Anästhesiologie und Intensivmedizin, Landesklinikum Baden, Baden bei Wien, Austria
- **MUDr. Tomáš Tyll, Ph.D.**, Klinika anesteziologie, resuscitace a intenzivní medicíny, Univerzita Karlova, 1. lékařská fakulta v Praze, Ústřední vojenská nemocnice – Vojenská fakultní nemocnice Praha

RECENZENTI

- **MUDr. Ivan Herold, CSc.**
- **Prof. MUDr. Pavel Ševčík, CSc.**

EDICE INTENZIVNÍ MEDICÍNA

Vážení čtenáři a kolegové,

od prvního vydání této publikace z Edice intenzivní medicína uběhlo téměř 15 let a za tu dobu si kniha vydobyla pozici základního edukačního zdroje pro širokou populaci lékařů všech oborů, kterých se problematika umělé plicní ventilace, jako jednoho z nejrozšířenějších postupů orgánové podpory, týká. Dostáváte do rukou 4. vydání knihy, které se v základu neliší od předchozích – nadále představuje srozumitelný a čtivý text, umožňující pochopení a klinickou adopci všech klíčových principů, z nichž ventilační podpora jakéhokoli typu vychází. V dnešní době internetu a prakticky okamžité on-line dostupnosti všech nových informací jsou knihy často považovány za „zastaralý“ zdroj našeho vzdělávání. Vlastností dobrých knih ale není to, že jsou vydány rychle, aby stihly obsahovat i ty nejnovější studie – tam nemůže sebelepší kniha konkurovat on-line informacím. Dobrá kniha má jinou roli – být zdrojem principů dané problematiky, principů, které prověřil čas a stupeň odborného poznání, principů, které tvoří základ našeho klinického rozhodování, principů, které by nám měly umožnit kritickou analýzu všech nových doporučení, než je adoptujeme do naší každodenní praxe.

Nárůst nových informací se týká každé oblasti medicíny, problematika ventilační podpory není výjimkou – vývoj nových technologií, miniaturizace, zjednodušení složitých přístrojů s využitím prvků umělé inteligence, telemedicína – to vše bude klinickou medicínu ovlivňovat tempem v minulosti nevídaným. Role lékaře se tím ale neumenšuje, naopak – schopnost aplikace postupů ventilační podpory s respektem k fyziologickým principům bude vždy tvořit základ dobré medicíny, bez ohledu na to, zda jde „jen“ o neinvazivní plicní ventilaci nebo ECMO.

Čtvrté vydání reflektuje rozvoj poznání ve všech oblastech problematiky umělé plicní ventilace a umožňuje čtenáři být „*up to date*“. Současně si ale kniha zachovává svou hlavní hodnotu – být přehledným a edukačně mimořádně

kompaktním referenčním zdrojem. Pokud bych měl pro předmluvu k dispozici jen jednu větu, tak bych s nejlepším vědomím a svědomím napsal – lepší kniha v České republice k dané problematice neexistuje.

prof. MUDr. Vladimír Černý, Ph.D., FCCM
Hradec Králové

OBSAH

Předmluva ke 4. vydání	13
1 Historie vývoje umělé plicní ventilace	14
1.1 Úvod	14
1.2 Historický vývoj umělé plicní ventilace	14
2 Základní principy umělé plicní ventilace	53
2.1 Cíle a indikace umělé plicní ventilace	53
2.2 Vybrané fyziologické a patofyziologické principy se vztahem k umělé plicní ventilaci	56
2.3 Formy umělé plicní ventilace	74
2.4 Ventilace pozitivním přetlakem	75
2.5 Komplikace umělé plicní ventilace	80
3 Ventilací režimy konvenční ventilace pozitivním přetlakem	99
3.1 Fáze dechového cyklu	99
3.2 Klasifikace ventilačních režimů	101
3.3 Použití jednotlivých ventilačních režimů, indikace, přednosti a nevýhody, praktické poznámky	112
4 Pozitivní endexpirační přetlak (PEEP)	125
4.1 Úvod	125
4.2 Cíle aplikace PEEP	127
4.3 PEEP a plicní poškození v důsledku umělé plicní ventilace	129
4.4 Vybrané patofyziologické aspekty terapie PEEP	131
4.5 Praktické poznámky k nastavení PEEP	135
4.6 Závěr	138
5 Přístroje k umělé plicní ventilaci, péče o dýchací cesty	139
5.1 Úvod	139
5.2 Definice ventilátoru	139
5.3 Klasifikace ventilátorů	140
5.4 Technické řešení řízení ventilačního režimu	153
5.5 Vysokofrekvenční ventilace	159
5.6 Péče o dýchací cesty	160

6	Monitorování v průběhu umělé plicní ventilace	178
6.1	Úvod	178
6.2	Klinické monitorování.	179
6.3	Monitorování výměny plynů	181
6.4	Monitorování mechaniky respiračního systému	191
6.5	Elektrická impedanční tomografie.	224
7	Umělá plicní ventilace u nemocných s chronickou obstrukční plicní nemocí	228
7.1	Úvod	228
7.2	Patofyziologie	229
7.3	Umělá plicní ventilace u nemocných s CHOPN	236
7.4	Obecné principy péče o nemocné s dekompenzovanou CHOPN	241
7.5	Mimotělní metody plicní podpory.	241
7.6	Závěr	242
8	Umělá plicní ventilace u těžkých forem astmatu	244
8.1	Úvod	244
8.2	Patofyziologie	247
8.3	Umělá plicní ventilace u nemocných s bronchiálním astmatem	249
8.4	Závěr	255
9	Umělá plicní ventilace u nemocných s oběhovým selháním	256
9.1	Úvod	256
9.2	Patofyziologie	256
9.3	Umělá plicní ventilace u nemocných se selháním oběhu	261
10	Umělá plicní ventilace u nemocných s akutním plicním selháním	264
10.1	Úvod	264
10.2	Diagnostická kritéria	265
10.3	Patofyziologická charakteristika ALI/ARDS z pohledu ventilace pozitivním přetlakem	265
10.4	Konvenční ventilace pozitivním přetlakem u nemocných s ARDS	277
10.5	Nekonvenční ventilace u nemocných s akutním plicním selháním.	298
11	Neinvazivní plicní ventilace	302
11.1	Úvod	302
11.2	Definice	303
11.3	Mechanismus účinku a klinické cíle	303
11.4	Indikace a kontraindikace	304

11.6	Praktické poznámky	308
11.7	Klinické poznámky k použití NIVS u vybraných stavů	310
11.8	Komplikace	313
11.9	Závěr	313
12	Ukončování umělé plicní ventilace	316
12.1	Úvod	316
12.2	Definice pojmu	316
12.3	Obecné předpoklady pro ukončení ventilační podpory	319
12.4	Postup ukončení ventilační podpory	321
12.5	Extubace	332
12.6	Tracheostomie	334
12.7	Neinvazivní ventilace a vysokoprůtoková nosní oxygenoterapie v procesu odvykání od ventilátoru	335
12.8	Specifika odvykání od ventilátoru u vybraných skupin nemocných	337
12.9	Příčiny selhání odpojení	341
12.10	Trvalá nutnost ventilační podpory, domácí umělá plicní ventilace	346
13	Umělá plicní ventilace v anestezii	349
13.1	Úvod	349
13.2	Vliv celkové anestezie na respirační systém	349
13.3	Pooperační plicní komplikace	351
13.4	Anesteziologický přístroj a ventilátor	352
13.5	Péče o dýchací cesty během celkové anestezie	357
13.6	Nastavení umělé plicní ventilace během anestezie	357
13.7	Nekonvenční ventilace	361
13.8	Závěr	361
14	Pneumonie ventilovaných nemocných	363
14.1	Úvod	363
14.2	Etiopatogeneze VAP	364
14.3	Rizikové faktory pro vznik VAP	366
14.4	Prevence vzniku VAP	367
14.5	Diagnostika VAP	372
14.6	Terapie VAP	378
14.7	Výskyt VAP jako indikátor kvality	381

15	Rescue postupy u nemocných se závažným plicním selháním	384
15.1	Úvod	384
15.2	Pronační poloha	385
15.3	Metody mimotělní plicní podpory	390
15.4	Vysokofrekvenční ventilace	400
15.5	Ostatní rescue postupy	402
15.6	Závěr	404
16	Vysokoprůtoková oxygenoterapie	407
16.1	Úvod	407
16.2	Technické zajištění	407
16.3	Mechanismy účinku	408
16.4	Fyziologické účinky	410
16.5	Indikace	410
16.6	Způsob provedení vysokoprůtokové oxygenoterapie	412
16.7	Nežádoucí účinky	413
16.8	Závěr	413
	Přehled použitých zkratk	415
	Seznam obrázků	421
	Shrnutí	425
	Summary	426
	O autorech	427
	Rejstřík	431

PŘEDMLUVA KE 4. VYDÁNÍ

Vážené čtenářky, vážení čtenáři,

dostáváte do rukou čtvrté vydání knihy *Základy umělé plicní ventilace*. Umělá plicní ventilace představuje jeden ze základních postupů orgánové podpory nemocných nejenom v intenzivní péči a její použití zasahuje do řady medicínských oborů. Absence obecně dostupného, uceleného a přitom přehledného literárního zdroje s tématem umělé plicní ventilace v tuzemském písemnictví nás před lety vedla k přípravě prvního vydání této publikace. Jejím cílem nebylo konkurovat rozsáhlým zahraničním monografiím z oblasti umělé plicní ventilace, ale chtěli jsme vytvořit text, který by přístupnou, srozumitelnou a přehlednou formou umožnil zájemcům o umělou plicní ventilaci proniknout do základních principů problematiky.

Při přípravě prvních vydání této publikace se pro autory ukázalo jako nejobtížnější zpracování českého názvosloví, neboť překlady anglických termínů nejsou v tuzemském písemnictví používány jednotně, na většině pracovišť je používána „místně“ přijatá terminologie a existence řady synonym situaci značně komplikuje. V reálném životě jsou často používány původní anglické termíny nebo zkratky. Při volbě českých ekvivalentů zavedených názvů a zkratk jsme proto v některých případech volili termíny tak, aby jejich zkratka byla obdobná zkratce používané v angličtině, přestože existují jiné možné české alternativy, příkladem je například v publikaci používaný termín pozitivní endexpirační přetlak (PEEP).

Při přípravě čtvrtého vydání jsme provedli rozsáhlou aktualizaci a doplnění textu včetně doporučené literatury a doplnili kapitolu věnovanou technice vysokoprůtokové oxygenoterapie. Při zpracování textu jsme věnovali maximální pozornost srozumitelnosti textu, kladli důraz na objasnění fyziologických a patofyziologických souvislostí a snažili jsme se zapracovat všechny významné novinky v oblasti umělé plicní ventilace.

Najdete-li v této knize podstatné informace pro Vaši běžnou denní praxi nebo podnítí-li Vás její četba k dalšímu studiu problematiky umělé plicní ventilace, byl náš záměr naplněn.

Za kolektiv autorů

Pavel Dostál
Hradec Králové, leden 2018

2

ZÁKLADNÍ PRINCIPY UMĚLÉ PLICNÍ VENTILACE

Pavel Dostál

2.1 CÍLE A INDIKACE UMĚLÉ PLICNÍ VENTILACE

2.1.1 Úvod

Umělá plicní ventilace (UPV) představuje způsob dýchání, při němž mechanický přístroj plně nebo částečně zajišťuje průtok plynů respiračním systémem. Umělá plicní ventilace je používána ke krátkodobé nebo dlouhodobé podpoře nemocných, u kterých došlo ke vzniku závažné poruchy ventilační nebo oxypenační funkce respiračního systému nebo taková porucha aktuálně hrozí.

Postupy, jimiž je umělá plicní ventilace zajišťována, zaznamenaly od uvedení UPV do širokého klinického použití zcela zásadní vývoj a jsou nadále předmětem rozsáhlého klinického a experimentálního výzkumu.

Z klinického hlediska je UPV nutno chápat jako postup orgánové podpory s potenciálními riziky a komplikacemi, jejichž znalost je bezpodmínečně nutná k dosažení dobrých klinických výsledků.

2.1.2 Cíle umělé plicní ventilace

American College of Chest Physicians' Consensus Conference formulovala v roce 1993 tzv. cíle UPV, které byly rozděleny na cíle patofyziologické a klinické. Tyto cíle je vhodné mít na zřeteli nejen při zahájení UPV, ale je také nutno se k nim opakovaně vracet i v jejím průběhu. Zanikne-li patofyziologické nebo klinické odůvodnění, je třeba UPV co nejčasněji ukončit.

A. Fyziologické cíle umělé plicní ventilace

■ Podpora nebo jiná manipulace s výměnou plynů v plicích

- Podpora alveolární ventilace – tj. manipulace s arteriální tenzí CO_2 (PaCO_2) a pH.

- *Podpora arteriální oxygenace* – tj. korekce arteriální tenze O_2 (PaO_2), saturace hemoglobinu v arteriální krvi (SaO_2), zvýšení obsahu kyslíku v arteriální krvi (CaO_2).

■ Ovlivnění velikosti plicního objemu

- *Endinspirační plicní objem – end-inspiratory lung volume (EILV)* – cílem je dosažení dostatečné plicní expanze při léčbě atelektáz a s tím spojené ovlivnění oxygenace, plicní compliance a plicních obranných mechanismů (schopnost účinné expektorace).
- *Funkční reziduální kapacita – functional residual capacity (FRC)* – cílem je zvýšení a udržení FRC u stavů, ve kterých je snížení FRC spojeno se zhoršením plicních funkcí.

■ Snížení dechové práce

- *Snížení práce dýchacích svalů* – za stavů, kdy je dechová práce zvýšena pro vzestup rezistance dýchacích cest nebo snížení poddajnosti respiračního systému a pacientovo dechové úsilí je neúčinné nebo již v něm není schopen pokračovat.

B. Klinické cíle

Umělá plicní ventilace slouží po dobu nezbytně nutnou k podpoře či náhradě oxygenační a ventilační funkce selhávajícího respiračního systému. Na obecné úrovni se při aplikaci UPV snažíme o dosažení následujících cílů:

- dosažení vzhledem k aktuálnímu stavu nemocného individualizovaných (nikoli nutně normálních) parametrů oxygenace a ventilace
- omezení nežádoucích účinků UPV – mimoplicních i plicních

Následující výčet uvádí konsenzuální (všeobecně akceptované) klinické cíle UPV:

- *Zvrat hypoxemie* – za cílové hodnoty jsou obvykle považovány hodnoty PaO_2 nad 60 mmHg a hodnoty SaO_2 nad 90 %, u vybraných skupin nemocných jsou při absenci známek tkáňové hypoxie akceptovány krátkodobě i hodnoty nižší (tzv. permissivní hypoxemie).
- *Zvrat akutní respirační acidózy* – okamžitá korekce „život ohrožující“ acidózy, ne nutně korekce k normokapnii nebo normálnímu pH. Za vybraných klinických situací je třeba vzhledem k neúměrnému riziku iatrogenního poškození nemocného rezignovat na snahy o dosažení normálních hodnot $PaCO_2$ nebo pH.
- *Zvrat dechové tísně* – odstranění netolerovatelného diskomfortu do doby odstranění nebo zlepšení příčiny.

V případě nadměrného zvýšení dechové práce může dojít k rozvoji ventilačního selhání pro únavu dýchacích svalstva nebo k celkovému zhroucení kardio-pulmonální homeostázy.

Ke vzniku ventilačního selhání může vést porucha ventilace na několika úrovních:

- CNS – deprese nebo dysfunkce
- motoneuron – míšní léze, polyradikuloneuritida apod.
- myoneurální spojení – myasthenia gravis, myorelaxancia, organofosfáty
- hrudní stěna – abnormality pohyblivosti a tvaru hrudní stěny
- dýchací svaly – únavu dýchacích svalů (viz dále), myopatie (především metabolické a toxické) apod.

Vztah oxygenace a ventilace pozitivním přetlakem

Umělá plicní ventilace je schopna korigovat hypoxemii způsobenou hypoventilací. Je-li příčinou hypoxemie plicní zkrat nebo závažný stupeň nepoměru mezi distribucí plicní ventilace a perfuze, nemusí vést zahájení ventilace pozitivním přetlakem k odstranění arteriální hypoxemie (kromě situací, kdy snížením spotřeby kyslíku dýchacími svaly dojde ke vzestupu saturace hemoglobinu ve smíšené venózní krvi, která je jednou z významných determinant saturace hemoglobinu v arteriální krvi u nemocných s plicní patologií). Porucha oxygenace arteriální krve nemusí být tedy korigována ventilací pozitivním přetlakem *per se*, ale současným použitím kyslíkové terapie, pozitivního přetlaku na konci expira, snížením spotřeby kyslíku dýchacími svaly a zlepšením bronchiální toalety.

Hlavními determinantami oxygenace při UPV pozitivním přetlakem (vyjadřují stupeň oxygenační podpory poskytované v průběhu UPV) jsou:

- hodnota středního tlaku v dýchacích cestách (MAP, mean airway pressure) je dána dosaženými hodnotami inspiračních tlaků, délkou inspira a expira a použitou hodnotou PEEP, konkrétní způsob výpočtu MAP závisí na použitém ventilačním režimu
- inspirační frakce kyslíku ve vdechované směsi (FiO_2 , inspiratory fraction of oxygen), tj. koncentrace kyslíku ve vdechované směsi vyjádřená jako podíl čísla 1 (40% koncentraci kyslíku ve vdechované směsi odpovídá FiO_2 0,4)

2.3 FORMY UMĚLÉ PLICNÍ VENTILACE

Z hlediska mechanismu zajišťujícího průtok plynů respiračním systémem při dýchání dělíme UPV do skupin:

1. Ventilace pozitivním přetlakem – tzv. konvenční UPV – při použití dechových frekvencí blízkých hodnotám fyziologickým je velikost dechového objemu

větší než objem tzv. mrtvého prostoru – je nejrozšířenějším typem umělé plicní ventilace.

2. Ventilace negativním tlakem – příkladem jsou tzv. železné plíce vyvíjející podtlak na hrudní a břišní stěnu.
3. Trysková ventilace.
4. Oscilační ventilace.

Vzhledem k univerzálnímu rozšíření ventilace pozitivním přetlakem pojednává další výklad o tomto typu ventilace. Ventilace negativním tlakem (nebo také podtlaková ventilace) není široce využívána pro kriticky nemocné, trysková ventilace je v současné době především alternativní technikou ventilace v úzkých indikacích (např. při některých chirurgických výkonech v oblasti hrtanu a průdušnice). Problematika vysokofrekvenční oscilační ventilace – high frequency oscillatory ventilation (HFOV) – je stručně zmíněna v části věnované přístrojům k UPV a o jejím použití v terapii syndromu akutní dechové tísně – acute respiratory distress syndrome (ARDS) – je referováno v části věnované tomuto syndromu.

2.4 VENTILACE POZITIVNÍM PŘETLAKEM

Při ventilaci pozitivním přetlakem (nebo také přetlakové ventilaci) – positive pressure ventilation (PPV) – vzniká inspirační průtok plynů cyklickým zvyšováním tlaku na vstupu do dýchacích cest.

2.4.1 Základní fyzikální a fyziologické principy ventilace pozitivním přetlakem

A. Rovnice pohybu

Při nepodporovaném spontánním dechu je tlak nutný k inflaci plic generován dýchacími svaly (P_{mus}). U ventilovaných nemocných je inflační tlak generován buď přístrojem (P_{res}) – při kontrolovaném dechu u nemocného bez dechové aktivity, nebo vzniká kombinací obou mechanismů. Velikost tlaku nutného k zajištění dostatečného inspiračního průtoku plynu $\dot{V}_{I}(t)$ (tj. k dosažení požadovaného dechového objemu za dobu inspiria) je při určitém zjednodušení tvořena:

1. Složkou nutnou k překonání rezistance respiračního systému, tj. inspirační části okruhu, rourky nebo tracheostomické kanyly a dýchacích cest, plicní tkáně a hrudní stěny – $P_{rs}(t)$.
2. Složkou nutnou k udržení respiračního systému v rozepnutém stavu, tj. překonání elastance respiračního systému (E_{rs}) – ΔP_{el} , r_s .
3. Složkou nutnou k překonání endexpiračního alveolárního tlaku – $P_{alv_{ex}}$ (viz dále).

5.3 KLASIFIKACE VENTILÁTORŮ

Přístroje pro umělou plicní ventilaci, tj. plicní ventilátory nebo zkráceně jen ventilátory, je možné klasifikovat podle mnoha vlastností a charakteristik.

Jedním z podstatných hledisek je účel, k jakému má plicní ventilátor sloužit. Tento účel mnohdy jednoznačně určuje vlastnosti, které musí ventilátor splňovat. Mnoho vlastností a principů může být naopak společných pro všechny typy ventilátorů.

Podle účelu použití lze ventilátory rozdělit na:

- ventilátory pro intenzivní péči
- transportní ventilátory
- ventilátory pro domácí péči
- ventilátory bez aktivního řízení výdechu (ventilátory pro CPAP či PSV)
- ventilátory jako součásti anesteziologických přístrojů

5.3.1 Ventilátory pro intenzivní péči

Základním požadavkem na moderní ventilátory určené pro intenzivní péči je možnost optimalizace ventilačního režimu vzhledem k potřebám pacienta a zejména vzhledem k typu jeho plicního postižení a stavu jeho respirační soustavy.

Ventilátory určené pro intenzivní péči obsahují velké množství režimů, které je možné při ventilaci zvolit. Tyto ventilátory umožňují jemné nastavování značného množství ventilačních parametrů, které daný režim charakterizují. Parametry ventilace lze volit v širokém rozmezí. Ventilátory určené pro intenzivní péči umožňují díky velké variabilitě režimů a jejich parametrů nastavit ventilaci tak, aby splňovala podmínky protektivní ventilace a zároveň zohledňovala ventilační strategie doporučené pro různé typy postižení respirační soustavy.

Moderní ventilátory pro intenzivní péči dokáží parametry zvoleného ventilačního režimu upravovat v reálném čase, a tím reagovat na změnu stavu pacienta, která zvolený ventilační režim může ovlivnit a zapříčinit i změnu cílových parametrů. Typickým příkladem je průběžná úprava ventilačních parametrů tak, aby i při změnách mechanických parametrů respirační soustavy pacienta (zejména její poddajnosti a průtočného odporu) byla stále dosahována konstantní minutová ventilace. Při průběžné změně ventilačních parametrů ventilátor navíc respektuje další pravidla a omezení, aby se režim nestal agresivní a nepoškozoval ještě více respirační soustavu pacienta. Jedním ze základních omezení bývá rozpětí tlaků, které ventilátor může v respirační soustavě pacienta generovat.

Aby mohl lékař optimalizovat ventilační režim podle potřeb pacienta a podle stavu pacientovy respirační soustavy, jsou ventilátory určené pro intenzivní péči vybavené detailním monitorováním jak ventilačního režimu a parametrů ventilace, tak i mechanických vlastností respirační soustavy pacienta (zejména

poddajnosti respirační soustavy a průtočného odporu dýchacích cest). Detailní monitorování je samozřejmě podmínkou i pro optimalizaci či udržování stability ventilačního režimu, které provádí sám ventilátor, jak bylo popsáno v předchozím odstavci.

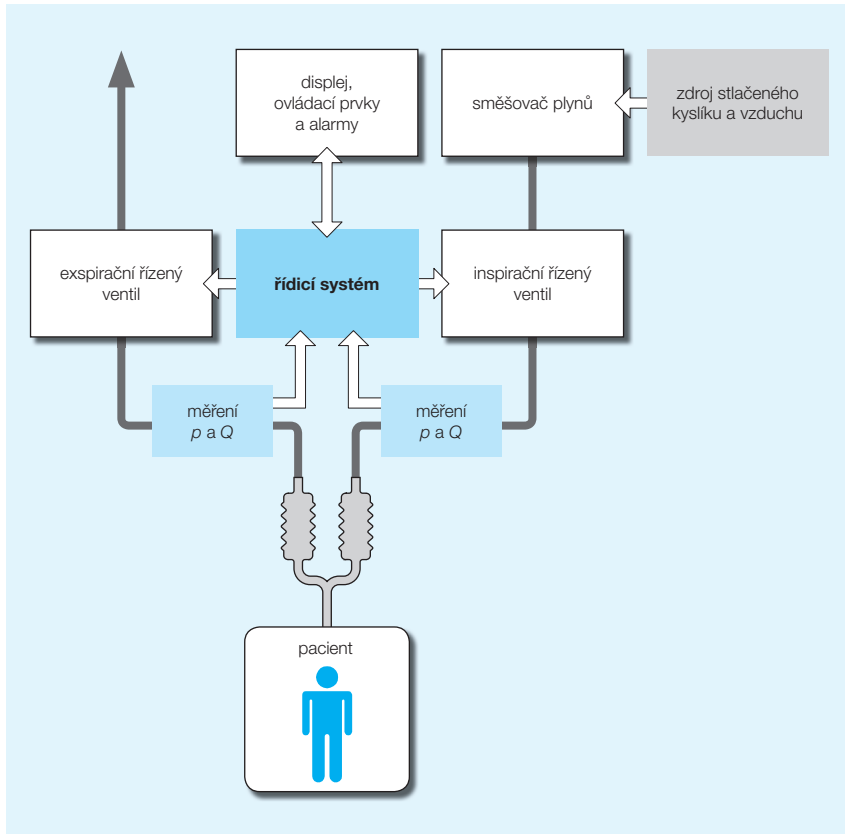
Zobrazení mnoha parametrů najednou bývá nepřehledné a může kvůli tomu dojít k přehlédnutí určité hodnoty s velkým diagnostickým významem. Kromě standardních alarmů, které jsou u ventilátorů povinné a které upozorňují na překročení horní nebo dolní meze určitého parametru, bývají moderní ventilátory vybaveny i pokročilými nástroji, které automaticky analyzují a posuzují vhodnost parametrů ventilace ve vztahu k parametrům plicní mechaniky pacienta. Výsledek analýzy zobrazují pomocí jednoduchých piktogramů, díky kterým uživatel velmi rychle (například podle převládající barvy, tvaru a velikosti obrázku plic nebo jiného vhodného grafického způsobu reprezentace) rozpozná, zda ventilace probíhá „optimálně“ (přesněji řečeno v souladu s očekávanými a předem nastavenými pravidly) nebo zda se ventilace od „optimálního“ ventilačního režimu vzdaluje.

Ventilátory pro intenzivní péči jsou jako jediné vybaveny speciálními funkcemi, které opět slouží k optimalizaci ventilačního režimu a celé respirační péče. Jednou z takových funkcí je nástroj pro provádění recruitment manévrů, který zajistí dodržení časového průběhu požadované změny tlaku, rozsah tlaků, vizualizaci úspěšnosti recruitment manévru apod.

Daleko nižší nároky jsou u ventilátorů určených pro intenzivní péči kladeny na další funkce a vlastnosti. Vychází se při tom z předpokladu, že ventilátor je zpravidla trvale umístěn u lůžka pacienta, kde jsou stále dostupné medicínální plyny a je nepřetržitě zajištěno zásobování elektrickou energií. Tyto ventilátory proto obsahují záložní baterii, která dokáže napájet ventilátor jen po velmi omezenou dobu, a počítají s rozvodem medicínálních plynů jako s hlavním zdrojem plynů pro výrobu dýchací směsi. Ventilátory bývají umístěny na samostatném stojanu nebo jsou konstruovány přímo jako pojízdný přístroj na kolečkách. Hmotnost ventilátorů pro intenzivní péči, jejich velikost, spotřeba elektrické energie, spotřeba plynů a další parametry nepatří k podstatným a příliš sledovaným parametrům.

Konstrukce ventilátorů pro intenzivní péči

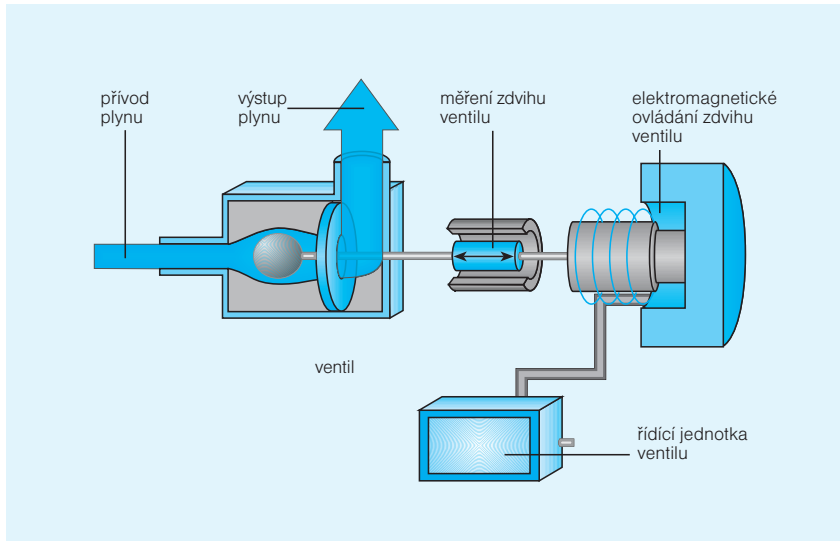
Vnitřní struktura ventilátorů určených pro intenzivní péči se u starších typů ventilátorů mohla zásadně odlišovat, zejména v závislosti na způsobu, jakým ventilátory vytvářely požadované dechové objemy či ventilační tlaky (od měchů, přes pístové systémy až po servomechanismy). S rozvojem mikroprocesorové techniky a vývojem nových řízených mechanických a pneumatických prvků se struktura a princip činnosti moderních ventilátorů poměrně unifikuje.



Obr. 5.1 Typická struktura ventilátoru pro intenzivní péči. Měřené veličiny: p – tlak, Q – průtok plynu

Typická struktura moderního ventilátoru pro intenzivní péči je znázorněna na obrázku 5.1.

Stlačený kyslík a vzduch z centrálních rozvodů medicijních plynů jsou přivedeny do směšovače plynů, ve kterém je možné nastavit frakci kyslíku FiO_2 ve ventilační směsi od $FiO_2 = 0,21$ (tj. ventilace čistým vzduchem) do frakce $FiO_2 = 1$ (ventilace čistým kyslíkem). Směšovač plynů bývá na výstupu opatřen redukčním ventilem, který zajišťuje konstantní pracovní tlak na vstupu inspiračního řízeného ventilu i v případě, že dochází ke kolísání tlaku plynů v centrálních rozvodech.



Obr. 5.2 Příklad konstrukce proporcionálního elektricky řízeného ventilu – high flow servo valve firmy Dräger (použita firemní dokumentace)

Inspirační řízený ventil se otevírá v době inspiria a je uzavřen v době expiria a v době inspirační pauzy, je-li tato přítomna. Inspirační ventil je řešen jako proporcionální řízený ventil, kdy ventil propouští takové množství plynu, které je úměrné řídicímu napětí, které je na ventil přivedeno. Příklad konstrukce proporcionálního elektricky řízeného ventilu je uveden na obrázku 5.2. V uvedeném příkladu způsobuje změna napětí přivedeného na elektromagnet ventilu změnu polohy kuličky vůči otvoru napojeného na přívod vzduchu (v obrázku 5.2 zcela vlevo), a tím dochází k regulaci průtoku.

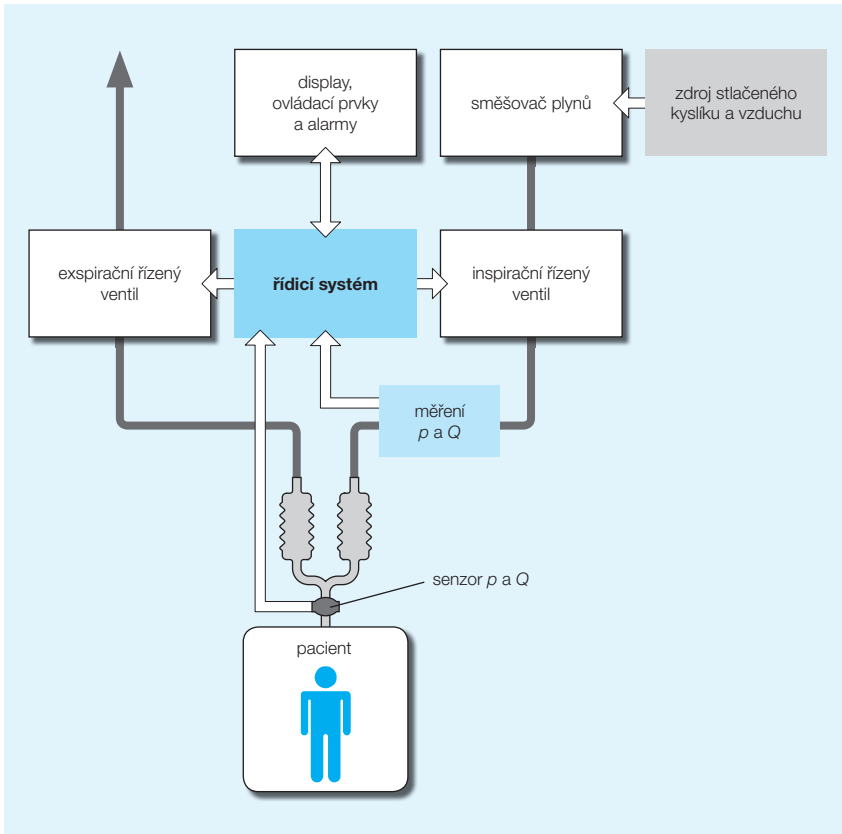
Spojením konstantního zdroje tlaku na vstupu řízeného ventilu a možnosti regulace světlosti ventilu výše popsaným způsobem je umožněno generovat téměř libovolný průběh průtoku v čase v době inspiria (konstantní, sinusoidální, regresivní či jakýkoli jiný i nestandardní tvar průtokové křivky). Řízení proporcionálního inspiračního ventilu a následná změna generovaného průtoku jsou u moderních ventilátorů natolik rychlé, že ventilátor může v reálném čase upravovat průtokovou křivku v závislosti na kontinuálně měřených parametrech (tlak, průtok) a z nich odvozených parametrů, jako je například doposud (od počátku inspiria) dodaný dechový objem. Ventilátor tak může reagovat na okamžitý stav respirační soustavy, únik plynu z okruhu apod.

Obdobně jako inspirační ventil je i expirační ventil řešen jako proporcionální elektricky řízený ventil. Jeho úlohou je zejména otevírání výdechové cesty v počátku expiria a řízené uzavírání výdechové cesty ke konci expiria, kdy je nutné včas ukončit expirium, aby tlak v dýchacích cestách neklesl pod požadovanou hodnotu endexpiračního přetlaku, PEEP. V době inspiria a inspirační pauzy je tento ventil zcela uzavřen. Konstrukčně je expirační ventil řešen podobně jako ventil inspirační, uvedený na obrázku 5.2, s tím rozdílem, že je řešen jako nízko-odporový. Cílem je, aby při úplném otevření expiračního ventilu nedocházelo k nežádoucímu omezování expiračního průtoku vlastním odporem tohoto ventilu, tj. k omezování vyprazdňování plic, což by mohlo zapříčinit vznik nežádoucí hyperinflace plic podobně jako při existenci intrinsického PEEP. Elektromagnetickým mechanismem je proto místo kuličky řízena poloha membrány uzavírající poměrně velký průměr expiračního portu.

Proporcionální řízení obou ventilů zajišťuje řídicí systém ventilátoru, který je založen na mikroprocesorové technice. K řídicímu systému jsou připojeny i ovládací prvky ventilátoru, display, různé vizuální indikátory nastavených a změřených veličin a též komponenty zajišťující vizuální a zvukovou indikaci alarmů.

Vzhledem k množství monitorovaných parametrů jsou ventilátory pro intenzivní péči vybaveny kvalitním displejem, na kterém je možné volit rozložení zobrazovaných křivek a parametrů, provádět odečty hodnot ze zobrazovaných křivek pomocí pohyblivých grafických kurzorů nebo zobrazovat nastavené a měřené parametry podle logických souvislostí (např. zvolit obrazovku se základními ventilačními parametry, obrazovku se změřenými hodnotami mechanických parametrů respirační soustavy apod.).

V obrázku 5.1 je naznačeno dvojí měření tlaku a průtoku, které se používá k monitorování ventilace a k řízení samotné funkce ventilátoru. Jedná se o měření v inspirační i expirační větvi. Díky tomuto uspořádání je možné měřit zvlášť inspirovaný a expirovaný dechový objem, vyhodnocovat únik plynu z okruhu ventilátoru nebo detekovat rozpojení okruhu. Nevýhodou uvedeného uspořádání, kdy oba měřicí systémy jsou uloženy uvnitř ventilátoru, je skutečnost, že ventilátor sice může vyhodnocovat dechové objemy, ale jedná se o objemy dodávané či odebírané ze soustavy pacient–pacientský okruh. Kvůli nenulové poddajnosti patientského okruhu je určitá část dechového objemu spotřebována na natlakování a objemové změny patientského okruhu a není dopravena do respirační soustavy pacienta. Při ventilaci dospělých pacientů, kdy jsou k ventilaci používány velké dechové objemy, je rozdíl mezi dechovým objemem generovaným ventilátorem a dechovým objemem skutečně doručeným do respirační soustavy pacienta nepodstatný. Se snižováním velikosti dechového objemu se však rozdíl zvětšuje. Určitou možností korekce představuje tzv. kompenzace poddajnosti okruhu, což je funkce moderních ventilátorů, která ze znalosti vlastností použitého pacient-



Obr. 5.3 Schéma ventilátoru pro intenzivní péči s měřením ventilačních parametrů u vstupu do dýchacích cest pacienta. Měřené veličiny: p – tlak, Q – průtok plynu

ského okruhu dokáže vliv poddajnosti pacientského okruhu na snižování skutečně dodávaného dechového objemu do respirační soustavy pacienta eliminovat.

Uvedená kompenzace poddajnosti pacientského okruhu není dostatečně efektivní v případě velmi malých dodávaných dechových objemů, jako jsou dechové objemy používané u neonatologických pacientů. Spolehlivé měření skutečně dodávaných dechových objemů je u neonatologických pacientů zajištěno jejich měřením přímo na vstupu do dýchacích cest pacienta, tj. mezi pacientskou Y-spojku a konektorem endotracheální kanyly. Schéma uspořádání ventilátoru s měřením parametrů ventilace na úrovni pacientské Y-spojky je zobrazeno na obrázku 5.3.