

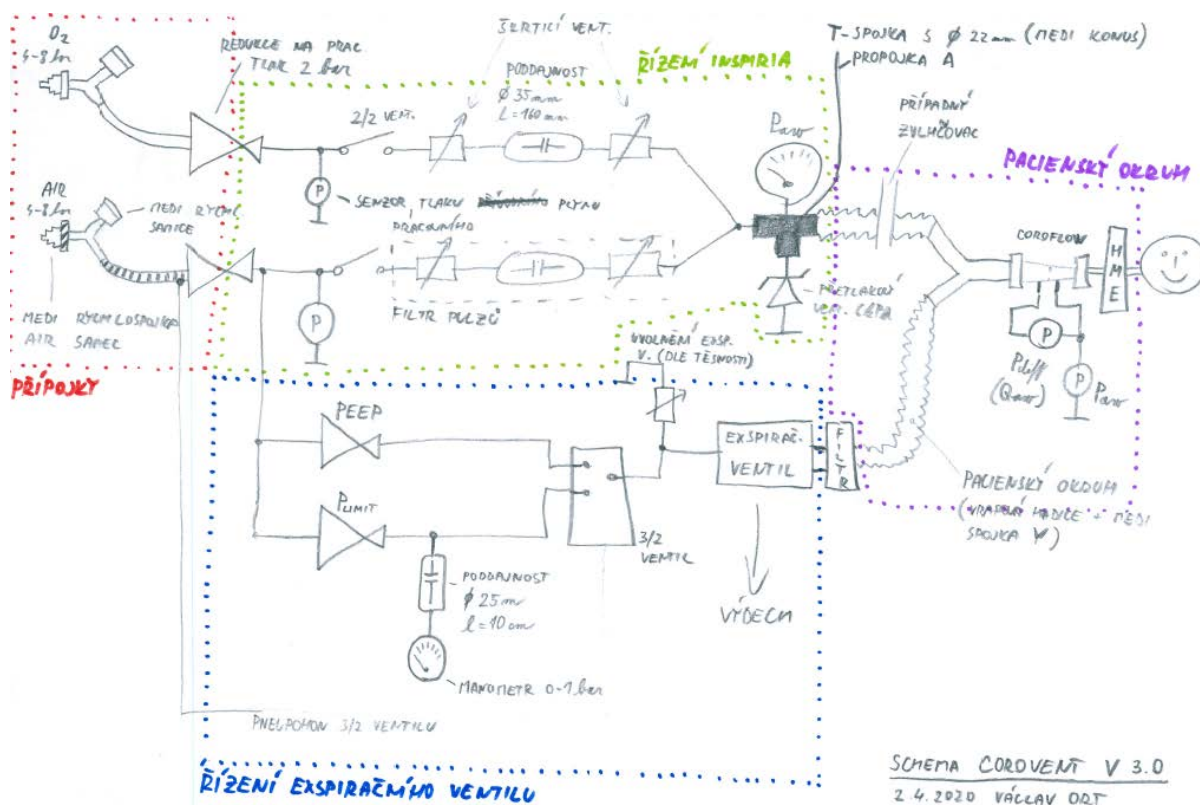
Schéma a popis funkce ventilátoru CoroVent

V 3.1a - 4. 4. 2020 - Václav Ort, Karel Roubík

Upozornění: K tomuto dokumentu je navázána licence: **COROVENT TEMPORARY OPEN LICENCE (COVID-19 RESPONSE) VERSION 1, IN FORCE FROM 4 APRIL 2020**, která je od tohoto dokumentu neoddělitelná a je zveřejněna na <https://ventilation.fbmi.cvut.cz/>.

Základní popis struktury ventilátoru

Pneumatické schéma celého ventilátoru je uvedeno na následujícím obrázku. Jednotlivé bloky jsou ve schématu barevně označené a jsou popsány v následujících odstavcích taktéž barevně označených odpovídající barvou.



Přípojky

Přípojně hadice slouží k připojení ventilátoru do nemocničního rozvodu vzduchu a kyslíku. Tlak v nemocničním rozvodu může být cca od 4 do 8 barů.

Vzduchový přívod

Vzduchová větev začíná T propojkou, na kterou jsou přišroubované:

- medicínská rychlospojka pro vzduchový rozvod - zástrčka. Tímto se ventilátor připojí do nemocničního rozvodu vzduchu.

- medicínská rychlospojka pro vzduchový rozvod - zásuvka. Díky této zásuvce i když "zabereme" vzduchovou zásuvku v nemocničním rozvodu, dáme k dispozici nové přípojn  místo pro připojení dalšího ventilátoru.
- hadičník, na kter m je připojena vzduchov  hadice ( erno-bíl  podle ČSN EN), která dále vede do vlastního ventilátoru.

Tato propojka tedy slouží jako rozdvojka nemocničního rozvodu plynu, kdy na jednom v vod  máme nov  přípojn  místo (zásuvku) a na druh m vlastní ventilátor.

Kyslíkový přívod

Je řešen obdobn , jako vzduch. Jen rychlospojky jsou kyslíkov , hadice b l  (podle ČSN EN) a materiály kompatibilní s kyslíkem.

Redukční ventily

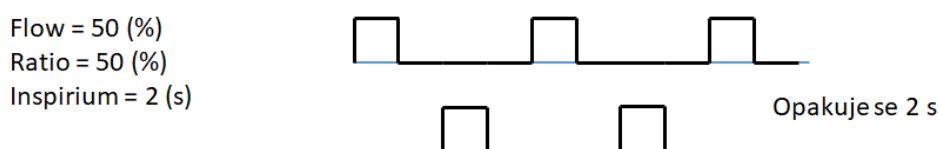
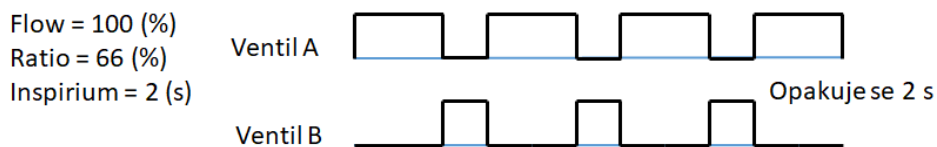
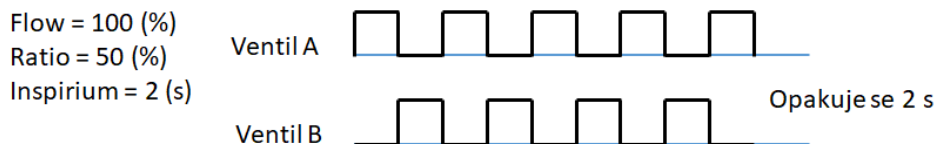
Přívodní hadice jsou uvnitř ventilátoru napojeny na redukční ventily. Ty redukují tlak z nemocničního rozvodu na pracovní tlak ventilátoru, kdy doporu en  hodnota tohoto pracovního tlaku je 2 bary jak pro vzduch, tak pro kyslík. Redukční ventily musí umožnit dostatečný výstupní p tok plynu (min 55 L/min, lépe 80 L/min). Redukční ventily také musí mít při otevření 2/2 ventilů v kyslíkov  a vzduchov  větví p bližn  stejn  pokles tlaku vlivem vzniklého p toku.

Je důležité, aby redukční ventily byly zabudovány do ventilátoru tak, aby v rámci servisu byl seřiditeln  jejich výstupní tlak.

Řízení inspira

Rozvody uvnitř ventilátoru jsou, pokud není ře eno jinak, realizovány hadičkami a šroubeními pro hadičku 6 mm vnější p m r.

Pro řízení inspira jsou použit  dva rychl , elektricky ovl dan  2/2 ventily. Oba ventily využívají pulzn  šířkovou modulaci (známou spíše z elektroniky), pomocí které generují inspirační p tok a řídí frakci kyslíku ve ventilační směsi. Zároveň přerušováním tohoto p toku jsou schopny řídít inspirační  as a počet dechů za minutu. Zásada je, aby se ventily co nejvíce doplňovaly ve svých otevřených a zavřených stavech tak, aby v sledn  p tok byl co nejhladší. Příklad je uveden na následujícím obrázku:



Kritické je také znát minimální čas potřebný k otevření a zavření ventilů (nestačí jen přečíst datasheet, je potřeba změřit). Tomuto času je nutné přizpůsobit pracovní periodu ventilu tak, aby i při minimálních dechových objemech bylo stále možné řídit frakci kyslíku s dostatečnou přesností (tedy aby se ventil stíhal dokonale otevírat i při krajních nastaveních frakce a objemu)

Kyslíková větev

Senzor pracovního tlaku plynu

Senzor slouží k monitoraci stavu kyslíkové větve řízení inspira. Měl by mít rozsah alespoň do 3 barů. Na základě dat ze senzoru jsou vybaveny alarmy:

- nízkého tlaku kyslíku
- velkého rozdílu pracovních tlaků plynů
- nefunkčnosti 2/2 ventilu - pro tento alarm jsou sledovány pulzní poklesy pracovních tlaků při průtoku plynu ventilem, které jsou důkazem toho, že se ventil otevírá.

2/2 ventil

Slouží k řízení frakce kyslíku ve ventilační směsi, dechového objemu, dechové frekvence a poměru inspiračního a expiračního času. Je důležité použít ventily s co největší životností (ideálně miliardy cyklů). Ventil nesmí omezit průtok kyslíkovou větví při daném tlaku pod 60 L/min.

Filtr pulzů

Slouží k vyhlazení inspiračního průtoku. Je sestaven ze dvou škrticích ventilů a poddajnosti mezi nimi. Poddajnost má podobu rigidní trubky o vnitřním průměru 35 mm a délce 160 mm. Nastavení škrticích ventilů viz sekce *Nastavení ventilátoru*. Hadičky spojující poddajnost se škrticími ventily by měly být co nejkratší. Naprosto zásadní pro správné řízení dechového

objemu je zkrácení hadičky spojující 2/2 ventil a první škrticí ventil filtru pulzů na co nejmenší délku.

Vzduchová větev

Řešena obdobně, jako kyslíková větev. Před 2/2 ventilem z ní odbočuje hadička napájející tlakem řízení *expiračního ventilu*.

Spojení vzduchové a kyslíkové větve

Obě větve se po spojení napojí přes redukci na T propojku medicínálních rozměrů (22mm konus samec na výstupu z ventilátoru, 22mm vnitřní konus pro napojení přetlakového ventilu).

Propojka A

Propojka A je díl vyrobený ideálně z kovu (minimálně část, která vystupuje z ventilátoru ven a na kterou se napojuje ventilační okruh musí být kovová s rozměry medicínálního konusu 22 mm, podle ČSN EN musí být provedena z kovu kvůli odolnosti). Není nutné, aby díl byl zrovna tvaru T. Propojuje pneumatické obvody řízení inspiria s patientským okruhem a přetlakovým bezpečnostním ventilem.

Přetlakový ventil

Přetlakový ventil slouží k ochraně pacienta před tlakem v dýchacích cestách vyšším než 6 kPa (cca 60 cmH₂O) dle ČSN EN normy. Pro jeho správnou funkci je zásadní, aby byl k ventilačnímu okruhu připojen nízkoimpedančním vedením (vnitřní průměr potrubí spojujícího přetlakový ventil a ventilační okruh musí být srovnatelný s vnitřním průměrem ventilačního okruhu). Přetlakový ventil je připojen do *Propojky A*.

Manometr Paw

Manometr měřící tlak na vstupu do patientského okruhu. Tento tlak je v zásadě stejný, jako bychom naměřili v Y-spojce patientského okruhu a lze jej tedy označovat jako Paw (pressure airways, tlak na počátku dýchacích cest). Tento manometr musí odebírat tlak co nejbližší k napojení na patientský okruh, ideálně v *Propojce A*.

Pacientský okruh

Standardní patientský okruh je spotřebním materiálem k ventilátoru. CoroVent je navržen tak, aby byl kompatibilní s běžnými patientskými okruhy s Y-spojku a dvěma oddělenými hadicemi pro inspirační a expirační rameno. CoroVent není vhodný pro použití koaxiálního patientského okruhu.

Standardní patientský okruh

Jedná se o spotřební materiál, který se mění nejpozději s každým novým pacientem. V případě nedostatečného množství patientských okruhů lze použít medicínální Y-spojku s medicínálním konusem 22 mm male vnější a 15 mm female na všech třech koncích. Na dva konce Y-spojky se nasadí typicky 160 cm vrapované hadice (tvořící inspirační a expirační rameno) a na třetí konec se připojí měřící clona CoroFlow.

Měřící clona CoroFlow

Jedná se měřicí prvek tlaku na vstupu do dýchacích cest pacienta (Paw) a průtoku do pacienta (Qaw). Celý prvek funguje jako obstrukční clona, na které při průtoku plynu překážkou vzniká tlakový úbytek, který můžeme měřit diferenčním čidlem. Vztah tlakového úbytku na průtoku je více méně parabolický. Na CoroFlow jsou dva měřicí trny (jeden před překážkou a jeden za překážkou) pro hadičku o vnitřním průměru 2,5 mm. Pomocí hadiček nasazených na měřicí trny je tlak z trnů přenášen do ventilátoru, kde je přiveden na diferenční tlakový senzor (pro Qaw) a senzor měřící přetlak vůči atmosféře (pro Paw). Hadičky pro propojení CoroFlow a ventilátoru musejí být dostatečně tuhé a nesmějí být výrazně delší než patientský okruh, aby neovlivňovaly naměřené tlaky.

Řízení expiračního ventilu + expirační ventil

Expirační ventil

Expirační ventil je prvkem, který uzavírá expirační rameno patientského okruhu při inspiriu a otevírá toto rameno při expiriu. Při inspiriu funguje jako pneumaticky řízený přetlakový ventil umožňující limitovat maximální inspirační tlak P_{lim} v patientském okruhu (pacientovi). Při expiriu funguje jako pneumaticky řízený průtočný odpor, pomocí kterého lze, spolu s nastavením času výdechu, regulovat pozitivní tlak na konci výdechu (PEEP). Tato konstrukce ventilu umožňuje při expiriu kompenzovat přidaný průtočný odpor výdechového filtru zařazeného mezi patientský okruh a expirační ventil. Řídicí tlak nastavující maximální inspirační tlak v patientském okruhu a průtočný odpor při expiriu je do ventilu přiváděn z pneumatických obvodů řízení expiračního ventilu přes šroubení hadičkou o vnějším průměru 6 mm.

Expirační ventil je navržen tak, aby řídicí tlak byl desetkrát vyšší, než je řízený tlak v patientském okruhu. Toho je dosaženo konstrukcí pístu s desetinásobnou transformací tlaku. Díky tomu lze malé tlaky v patientském okruhu (jednotky kPa) řídit tlaky vyššími (desítky kPa), které jsou dosažitelnější běžně dostupnými redukčními prvky.

Expirační ventil je nutné vyrábět buď jako spotřební materiál, nebo ověřit jeho časovou stálost, odolnost a sterilizovatelnost a používat jej jako sterilizovatelné příslušenství.

Redukční ventil pro řízení P_{limit} (P_{lim})

Jedná se o redukční ventil, který svým výstupním tlakem řídí maximální možný tlak v patientském okruhu (P_{lim}). Užitečné výstupní tlaky se pohybují v rozsahu do 50 kPa (což po transformaci tlaků na expiračním ventilu znamená tlaky v patientském okruhu do 5 kPa).

Je důležité, aby tento redukční ventil umožňoval přesné nastavování výstupního tlaku bez zvlnění při otevírání a zavírání 3/2 ventilu napojeného na výstup z redukčního ventilu. Dále musí reagovat dostatečně rychle na pokles tlaku ve výstupních hadičkách tak, aby tento pokles nebyl znatelný na expiračním ventilu. V opačném případě hrozí vlivem poklesu a následném zpětném nárůstu řídicího tlaku k pohybu pístu v expiračním ventilu způsobujícímu tlakový ráz propagující se do respiračního systému pacienta. Částečnou kompenzaci tohoto rázu může zajistit poddajnost připojená na pneumatické vedení mezi tento redukční ventil a 3/2 ventil.

Poddajnost

Poddajnost kompenzuje úbytky tlaku ve výstupním pneumatickém vedení z redukčního ventilu pro řízení Plim. Tato poddajnost slouží také jako dolnopropustní filtr filtrující zákmity tlaku měřené manometrem, na kterém obsluha ventilátoru vidí řídicí tlak Plim.

Poddajnost byla v našem případě vytvořena rigidní trubicí o vnitřním průměru 25 mm a délkou 100 mm.

Manometr pro měření řídicího tlaku Plim

Manometr s rozsahem 0-60 kPa (či až 1 bar). Ideální je, pokud ukazuje kilopascaly, protože potom (díky transformaci tlaku na pístu expiračního ventilu 10:1) stačí přepsat jednotku na stupnici z "kPa" na "cm H₂O" a nastavená hodnota pak přímo odpovídá nastavenému limitnímu tlaku v patientském okruhu.

Redukční ventil pro řízení PEEP (pozitivního tlaku na konci výdechu)

Tímto redukčním ventilem se provádí řízení odporu expiračního ventilu při expiriu. U tohoto ventilu je důležitá rychlá dodávka plynu do řídicího vedení při otevření 3/2 ventilu. Vzhledem k tomu, že PEEP je měřen tlakovým senzorem pro Paw a manometrem pro Paw, není potřeba měřit tlak na výstupu z redukčního ventilu pro řízení PEEP. U tohoto redukčního ventilu je tedy nejdůležitější rychlost dodávky plynu a nejsou kladeny takové nároky na stabilitu výstupního tlaku při otevírání a zavírání 3/2 ventilu. Naopak, v současné době využíváme mírného zvýšení výstupního tlaku z redukčního ventilu při uzavření 3/2 pro zrychlení dodávky plynu do expiračního ventilu při otevření 3/2 ventilu.

3/2 ventil

Jedná se o elektricky řízený pneumaticky poháněný ventil. Tento ventil přepíná řídicí tlakovou větev expiračního ventilu mezi tlaky na výstupu redukčního ventilu pro PEEP a pro Plim. Ventil využívá pro svůj pohon stlačený vzduch z nemocničního rozvodu (více jak 2,5 bar), tedy odebírá tento tlakový vzduch ještě před vstupním vzduchovým redukčním ventilem. Je-li elektrické řízení 3/2 ventilu bez napětí, měl by být jeho výstup propojen s řídicím tlakem PEEPu a ne s řídicím tlakem parametru Plim. Totéž platí i při výpadku/absenci pohonného tlaku ventilu. To je důležité pro uvolnění tlaku plynu z patientského okruhu při různých neočekávaných událostech.

Škrticí ventil pro uvolnění tlaku v řídicí větvi expiračního ventilu

Jedná se o škrticí ventil, jehož funkcí je malým průtokem (jednotky L/min) upouštět tlak z řídicí větve expiračního ventilu. Tato funkce je důležitá k zajištění uvolnění expiračního ventilu při přepnutí na nižší řídicí tlak v případně velké těsnosti řídicího pneumatického vedení a expiračního ventilu. V případě, že expirační ventil bude kolem vnitřního pístu upouštět požadovaný průtok z řídicí větve, nebude popisovaný škrticí ventil potřeba.

Řídicí jednotka

Řídicí jednotka zajišťuje řízení ventilátoru, měření ventilačních parametrů, vizualizaci naměřených a nastavených parametrů a ovládání ventilátoru obsluhou. Rozvržení obrazovky i způsob ovládání ventilátoru odpovídá běžným ventilátorům tak. Zdravotnický personál si tedy nemusí zvykat na nový způsob ovládání.

Ovládání ventilátoru

Ventilátor je navržen jako objemově řízený, tlakově limitovaný ventilátor. Od toho se také odráží uživatelsky nastavitelné parametry ventilace. Uživatelsky nastavitelné parametry jsou na obrazovce napsány zeleným textem. Nastavitelné parametry jsou:

- FiO₂: frakce kyslíku v rozsahu 0,21 - 1
- RR: dechová frekvence v rozsahu 5 - 30 dechů za minutu
- I:E: poměr inspiračního a expiračního času (1:1 - 1:3)
- V_t: dechový objem. Dechový objem je součinem průtoku a času inspira. Čas inspira je definován kombinací parametrů RR a I:E. Průtok lze měnit tlačítky V_{t+} a V_{t-} po dvaceti krocích mezi minimálním průtokem a maximálním průtokem (50 L/min). Tím je zajištěno i nastavování dechového objemu. Nastavený dechový objem je poté nutné vyčíst z naměřených parametrů.

Ventilátor měří následující parametry (na obrazovce uvedené bílým textem):

- V_{ti}: inspirovaný dechový objem (mL)
- V_{te}: exspirovaný dechový objem (mL)
- PEEP: pozitivní tlak na konci výdechu (cm H₂O)
- P_{max}: maximální dosažený tlak během inspira (cm H₂O)
- T_i/T: poměr inspiračního času v dechovém cyklu
- RR: dechová frekvence (b/min)

Obecné poznámky

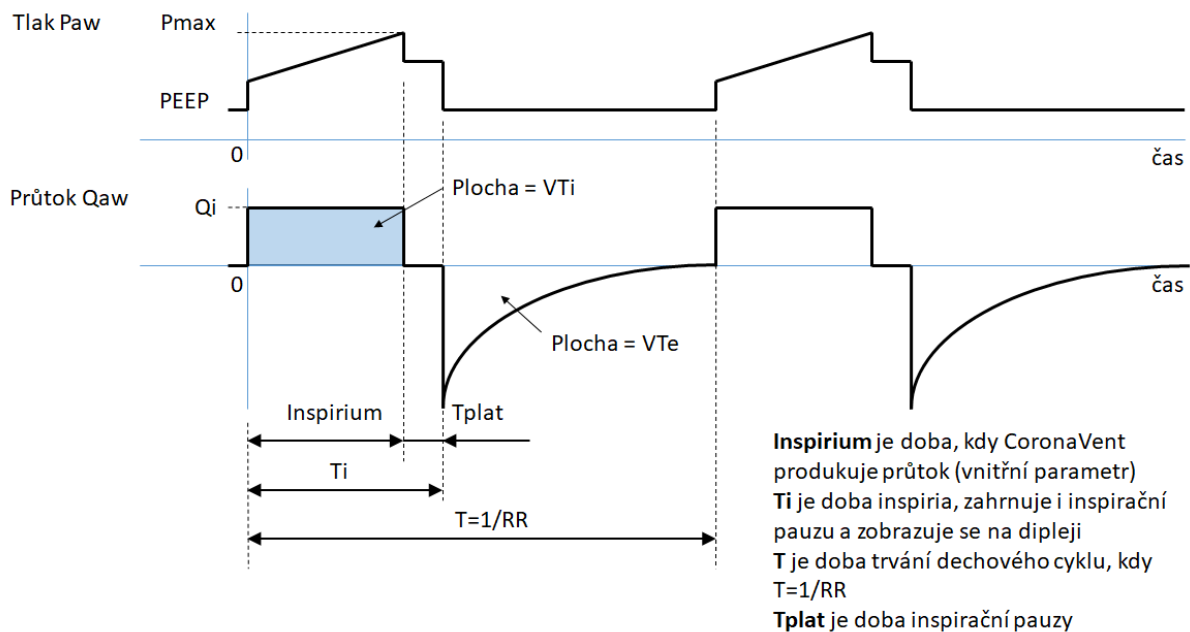
K poddajnostem

Poddajnost u rigidních nádob závisí téměř výhradně na objemu nádoby. Nicméně v našem případě je důležitý i tvar této nádoby. Poddajnosti používáme jako filtrační členy a u nich využíváme i inertanci (setrvačnosti) plynu v nádobě sloužící jako poddajnost. Proto je pro nás nejvhodnější použít válcové nádoby (rozšířené trubky), kdy v ose této nádoby je na jedné straně vstupní a na druhé výstupní vedení. Tím je dosaženo toho, že tato nádoba zajišťuje poddajnost a tlakové rázy jsou zároveň bržděny po dostatečně dlouhé dráze inertancí plynu v nádobě.

Medicínské vlastnosti ventilátoru a generování řízeného dechu

Ventilátor obsahuje jeden ventilační režim, který je však vhodný pro pacienty s respiračním selháním vlivem Covid-19. Jedná se o objemově řízenou tlakově limitovanou ventilaci. Jedná se plně autonomní ventilaci bez možnosti synchronizace s dechovým úsilím pacienta. Významné dechové úsilí pacienta se však neočekává vzhledem k indikacím, ke kterým je CoroVent určen.

Idealizovaný průběh dechu v podobě proximálního tlaku P_{aw} a proximálního průtoku Q_{aw} jsou uvedeny na následujícím obrázku. Z obrázku je zřejmé i značení a význam jednotlivých parametrů řízených dechů.



Pro bezpečnost pacienta jsou důležité následující tlaky:

- PEEP - je generován expiračním ventilem a je možné ho nastavovat redukčním ventilem PEEP tlaku, jehož ovládání je vyvedeno na přední panel ventilátoru.
- Psafe - bezpečnostní maximální tlak, nad který nemůže stoupnout tlak v dýchacím okruhu pacienta. Je dán bezpečnostním přetlakovým ventilem a nelze měnit. Je od výroby nastaven na 6 až 6,5 kPa.
- Plim - limitní tlak, který se může objevovat v dýchacím okruhu. Může být nastaven z předního panelu ventilátoru a může být nastaven v rozsahu od PEEP do Psafe.

Ventilátor je vybaven vlastním monitorovacím softwarem, který funguje nezávisle na řídicím systému ventilátoru. To znamená, že využívá pouze navzorkované průběhy tlaku Paw a průtoku Qaw k tomu, aby dosahované parametry ventilace následně zobrazované na displeji vypočítal.