

Ing. Karel MATĚJČEK
Inženýrská činnost provozů TZB

Provozní zkušenosti s regulací parametrů přiváděného vzduchu

Operational Experience with Control of Supply Air Parameters

Recenzent
doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.

Článek pojednává o zkušenostech s provozem vzduchotechnických systémů z pohledu regulace parametrů přiváděného vzduchu do větraných nebo klimatizovaných prostor s důrazem na optimální pohodu vnitřního prostředí a maximální efektivitu provozu.

Klíčová slova: vzduchotechnika, přiváděný vzduch, regulace

The article presents experience with the operation of HVAC systems, focusing on the control of supply air parameters in ventilated and air-conditioned spaces, with an emphasis on optimum indoor environmental comfort and maximum operational efficiency.

Keywords: HVAC systems, supply air, control, control

ÚVOD

Regulace parametrů přiváděného vzduchu ze zařízení pro úpravu vzduchu, ve většině případů vzduchotechnických (VZT) jednotek, je realizována systémy měření a regulace (MaR). Požadavky na parametry přiváděného vzduchu z VZT jednotek musí vycházet z požadovaných parametrů vnitřního prostředí ve větraných/klimatizovaných prostorech. Tyto požadavky jsou zpracovávány systémy MaR vlastních zařízení. Jde o tzv. vlečnou regulaci kaskádou dvou PID regulátorů. Výsledek prvního regulátoru z požadavků na parametry vnitřního prostředí v prostoru je žádanou vstupní hodnotou pro druhý regulátor vlastního zařízení. Základní výhoda je v tom, že je možné zadávat pásma pro min. a max. hodnoty požadovaných veličin parametrů přiváděného vzduchu. Druhou výhodou je celková stabilita regulačního procesu.

PARAMETRY PŘIVÁDĚNÉHO VZDUCHU

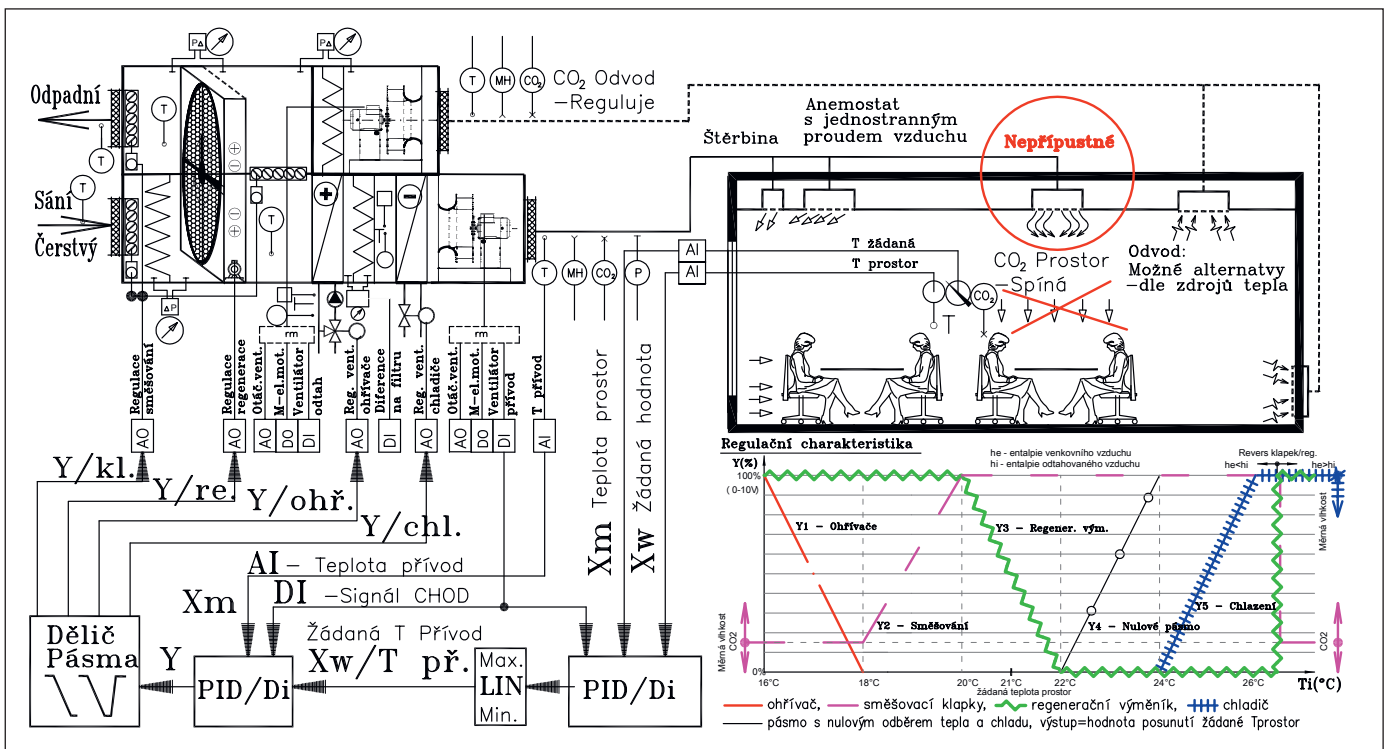
Teplota přiváděného vzduchu

Hodnota žádané teploty přiváděného vzduchu z VZT jednotky může být buď konstantní, nebo vlečně přestavována.

Konstantní teplota přiváděného vzduchu je využívána např. pro zajištění přívodu čerstvého vzduchu bez pokrytí tepelných ztrát/zisků prostoru.

Vlečně přestavována může být teplota přiváděného vzduchu v závislosti na:

- ❑ Teplotě vnitřního vzduchu – většinou jde o jeden reprezentativní prostor.
- ❑ Teplotě venkovního vzduchu – zásadní vliv mají venkovní klimatické podmínky.



Obr. 1 Jednoduchá regulace teploty přiváděného vzduchu ze vzduchotechnického zařízení pro jeden prostor

Fig. 1 Simple control of supply air temperature from an HVAC system serving a single zone

- Individuální regulaci více prostorů dle:
 - regulace na „otevřený/uzavřený ventil“ – cílem je, aby v prostoru, který je ohříván přiváděným vzduchem, nedocházelo k chlazení, nebo (např. v letním období), kdy se přiváděný vzduch chladí, ale v některém prostoru se musí zpětně ohřát,
 - počtu otevření/uzavření vnitřních jednotek pro pokrytí tepelných ztrát/zisků – např. u regulace systému s indukčními jednotkami,
 - výběru minimálního signálu ze všech prostor,
 - výběru maximálního signálu ze všech prostor,
 - výběru z obou min. i max. pro oblast s nulovým pásmem – pokud tepelné zisky pokryje venkovní vzduch.

Ve všech případech musí být projektantem vzduchotechniky/technologem zadána minimální a maximální hodnota teploty přiváděného vzduchu. Mezní hodnoty teplot přiváděného vzduchu v prostoru vždy vycházejí ze způsobu distribuce vzduchu v prostoru a z druhu/typu použití přívodních výustek. Důležitá je také vzdálenost a směr proudění vzduchu od vyústění přiváděného vzduchu do zóny pobytu osob, příp. do místa, kde je umístěna technologie. Vždy musí být zajištěn dosah proudu vzduchu s požadavkem na provětrání prostoru za podmínky min./max. rychlosti přiváděného vzduchu v zóně pobytu osob. Na to vše má zásadní vliv teplota přiváděného vzduchu.

Měrná vlhkost přiváděného vzduchu

Žádaná měrná vlhkost přiváděného vzduchu je regulována/přestavována na základě naměřené aktuální teploty vnitřního vzduchu v prostoru a žádané relativní vlhkosti vnitřního vzduchu daného prostoru. Požadovaná relativní vlhkost vnitřního vzduchu je rozdílná při požadavku na vlhčení (většinou zimní provoz) a při požadavku na odvlhčování (letní provoz), který se realizuje regulací teploty chladicí vody a výkonem chladiče s následným dohřevem vzduchu. Vychází to z rozdílných požadavků na relativní vlhkost vnitřního vzduchu v létě a v zimě při rozdílných klimatických podmínkách. Např. požadavku na teplotu a relativní vlhkost vnitřního vzduchu pro zimní provoz 22 °C/35 % a letní provoz 26 °C/60 % odpovídá požadovaná měrná vlhkost ($p = 100$ kPa) cca 6 g/kg pro zimu, resp. cca 10 g/kg pro léto. Algoritmus výpočtu je součástí systému MaR. Při požadavku na vlhčení je konkrétní způsob regulace měrné vlhkosti závislý na způsobu a použití zvlhčovače.

Příklady

- Adiabatická pračka vzduchu nízkotlaká s vanou. Tlak do trysek cca 2,5 bar.
 - Čerpadlo pračky CHOD:

Dle požadované měrné vlhkosti přiváděného vzduchu se přestavuje žádaná teplota vzduchu pro měřenou teplotu v pračce, příp. za eliminátorem kapiček – pokud tam není těsně nainstalován dohřev vzduchu. Od této žádané a měřené teploty vzduchu se regulují komponenty vzduchotechnické jednotky kromě ohříváče za pračkou. Výstupní teplota přiváděného vzduchu se následně upravuje v dohříváči za pračkou, příp. zónovými ohříváči.
 - Čerpadlo pračky STOP a naměřená měrná vlhkost < max. žádaná měrná vlhkost léto:

Dle požadované teploty přiváděného vzduchu na výstupu z jednotky – ideálně za přívodním ventilátorem – se regulují veškeré komponenty VZT jednotky bez ohledu na měřenou měrnou vlhkost vzduchu.
- Adiabatická pračka vzduchu vysokotlaká bez vany. Tlak do trysek cca 70 bar.

Dle požadované měrné vlhkosti přiváděného vzduchu se spíná vysokotlaké čerpadlo pračky a následně otevírají spínáním solenoidů jednotlivé větve s vysokotlakými tryskami. Žádaná teplota přiváděného

vzduchu se reguluje jednotlivými komponenty jednotky bez ohledu na požadovanou měrnou vlhkost. Teplotu je vhodné měřit až za přívodním ventilátorem.

- Vlhčení párou, např. vyvíječem páry nebo centrálním zdrojem páry.

Dle požadované měrné vlhkosti přiváděného vzduchu se reguluje množství přiváděné páry. Žádaná teplota přiváděného vzduchu se reguluje jednotlivými komponenty jednotky bez ohledu na požadovanou měrnou vlhkost. Teplotu je vhodné měřit až za přívodním ventilátorem.

ALARM – převlhčení přiváděného vzduchu se aktivuje od překročení relativní vlhkosti přiváděného vzduchu – nutné u parního vlhčení.

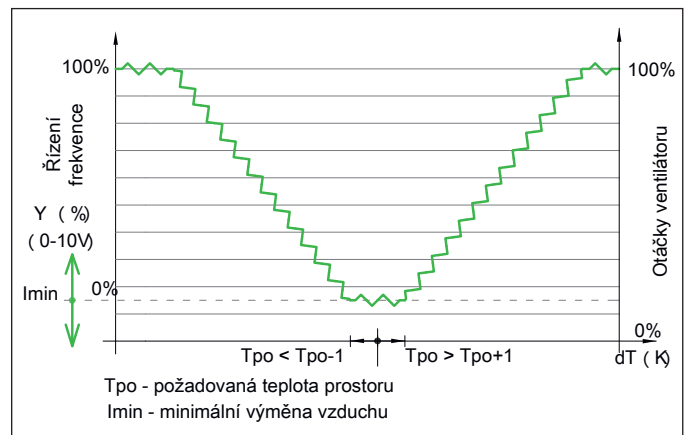
Přetlak vzduchu v přívodním potrubí/množství přiváděného a odváděného vzduchu

Požadované množství přiváděného vzduchu musí být stanoveno jako:

- Minimální množství přiváděného vzduchu – minimální množství přiváděného vzduchu pro daný prostor (varianty: obsazenost prostoru – počty osob; požadovaná výměna vzduchu; měření CO₂ v odváděném vzduchu pro jeden prostor/více prostorů – max. hodnota; dosah proudu vzduchu; min. množství čerstvého vzduchu atd.).
- Maximální množství přiváděného vzduchu – musí zajistit pokrytí maximálních tepelných ztrát, tepelných zisků, min. množství čerstvého vzduchu pro max. obsazenost atd.

Otáčky přívodního ventilátoru jsou regulovány podle požadovaného přetlaku vzduchu v přívodním vzduchovodu, který je přestavován v mezích množství vzduchu uvedených výše dle dosažení požadované teploty a kvality vzduchu v prostoru (např. max. koncentrace CO₂), přitom je měřeno celkové množství přiváděného vzduchu. Od tohoto množství přiváděného vzduchu je regulováno množství odváděného vzduchu regulací otáček odvodního ventilátoru. Základní podmínky pro regulaci množství přiváděného vzduchu:

- Množství přiváděného vzduchu je možné regulovat pouze tehdy, pokud je k tomuto účelu navržen odpovídající způsob distribuce vzduchu v prostoru tak, aby bylo vždy zajištěno řádné provětrání prostoru i při minimálním množství přiváděného vzduchu.
- Navyšovat žádané množství přiváděného vzduchu nad minimální množství je nutné, je-li dosažena max. (zima), min. (léto) teplota přiváděného vzduchu a teplota vnitřního vzduchu v prostoru je menší (zima)/větší (léto) než žádaná hodnota o více než 1 K. Snižovat množství vzduchu je možné, když teplota vnitřního vzduchu je větší (zima)/menší (léto) než žádaná hodnota o 1 K.



Obr. 2 Regulace množství přiváděného vzduchu na základě teploty vnitřního vzduchu pro zimní provoz

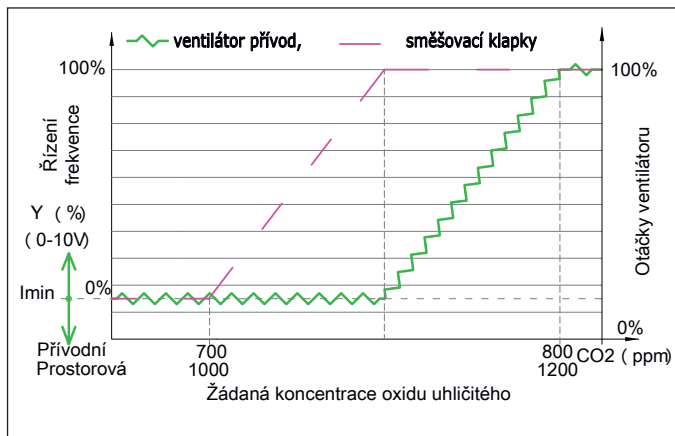
Fig. 2 Control of supply air volume flow rate based on indoor air temperature for winter operation

Režim ZIMA nebo LÉTO se stanoví podle toho, zda je regulace VZT jednotky v oblasti pod nulovým pásmem – ZIMA, nebo nad nulovým pásmem – LÉTO dle regulační charakteristiky. Cílem je dosáhnout požadovaných parametrů vnitřního vzduchu pouze venkovním vzduchem bez úpravy, tj. bez aktivace zdrojů tepla a chladu. Mnoha experimenty bylo zjištěno, že se s rostoucím množstvím přiváděného čerstvého vzduchu do daného prostoru snižuje počet osob pociťujících diskomfort (Allen et al. 2016; Wargocki et al. 2008, 2013 a další). Základní parametr, který má vliv na pocit diskomfortu ve smyslu vnímání kvality vzduchu, je koncentrace CO₂ (viz dále).

Kvalita vzduchu – koncentrace CO₂

Obecně je vhodné měřit obsah CO₂ ve vzduchu následovně:

- ❑ V přiváděném vzduchu – dle této hodnoty se reguluje směšování odváděného a venkovního vzduchu (je-li VZT zařízení vybaveno směšování). Většinou se nastavuje na hodnotu 700 až 800 ppm přiváděného vzduchu – proporcionálně.
- ❑ V prostoru – dle této hodnoty (překročení cca 1400 ppm) se aktivuje chod zařízení. Pokud VZT zařízení nezajišťuje větrání jen jednoho prostoru (vícezónové systémy), vybere se max. naměřená koncentrace CO₂ ze všech měřených prostorů, reguluje se směšování a následně množství přiváděného vzduchu.
- ❑ V odváděném vzduchu – pokud zařízení zajišťuje větrání jednoho prostoru (jednozónové systémy), reguluje se kvalita přiváděného



Obr. 3 Regulace otáček přívodního ventilátoru a směšování na základě koncentrace CO₂ ve vzduchu
Fig. 3 Control of supply fan speed and air mixing based on indoor CO₂ concentration

vzduchu vhodným poměrem (směšováním) venkovního a oběhového vzduchu. V odváděném vzduchu může být koncentrace 1000 až 1200 ppm – proporcionálně. Pokud se jedná o vícezónové systémy, koncentrace CO₂ se v odváděném vzduchu neměří, neboť o ničem nevyovídá.

Základní požadavek na regulaci dle koncentrace CO₂

Algoritmus pro regulaci množství čerstvého venkovního vzduchu musí být vždy proporcionální. Např. při koncentraci CO₂ naměřené v přiváděném vzduchu 700 ppm je požadavek regulace na minimální množství čerstvého vzduchu od CO₂. Při naměřené koncentraci CO₂ 800 ppm je požadavek regulace na maximální množství čerstvého vzduchu od CO₂. Tato závislost je lineární. Není možné použít integrační ani derivační složku regulátoru. Odůvodnění: Při příchodu většího množství osob do klimatizovaného prostoru dochází k nárůstu koncentrace CO₂ v řádech minut a tomu musí odpovídat i požadavek na okamžitý nárůst množství čerstvého vzduchu. Pokud daný prostor lidé opustí, je pokles hodnoty CO₂ relativně pozvolný, než se prostor vyvětrá. Z tohoto důvodu nehrozí kmitání regulace při použití samostatné proporcionální regulace. Hodnoty CO₂ mezi 700 a 800 ppm na přívodu a 1000 a 1200 ppm na odvodu jsou přípustné.

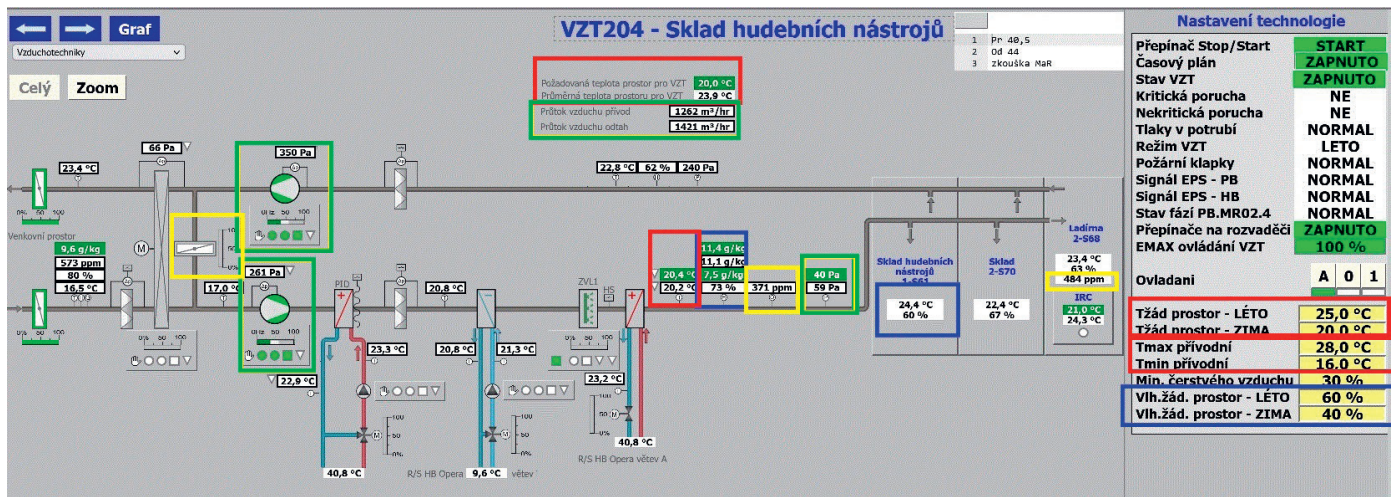
Na obr. 4 je zobrazena vizualizace VZT zařízení s regulací teploty, vlhkosti a množství vzduchu dle CO₂. Jsou zobrazeny následující údaje:

Červené orámování

- ❑ Měřená/žádaná teplota prostor LÉTO (25,0 °C), žádaná teplota prostor ZIMA (20,0 °C).
- ❑ Vypočítaná žádaná teplota prostor (20,0 °C), průměrná měřená teplota prostor (23,9 °C). Mezi spodní hranicí teploty pro ZIMU a horní pro LÉTO je NULOVÉ PÁSMO odběru energie (tepla a chladu) pro VZT zařízení.
- ❑ Žádaná (20,4 °C) a měřená teplota přiváděného vzduchu (20,2 °C).
- ❑ Žádaná minimální (16,0 °C) a maximální (28 °C) hodnota teploty přiváděného vzduchu.

Modré orámování

- ❑ Měřená/žádaná relativní vlhkost v prostoru LÉTO (60 %), ZIMA (40 %).
- ❑ Měřená/žádaná měrná vlhkost přiváděného vzduchu vypočítaná z aktuální průměrné teploty prostoru (23,9 °C). Běžná žádaná měrná vlhkost přiváděného vzduchu LÉTO (11,4 g/kg), ZIMA (7,5 g/kg).
- ❑ Relativní vlhkost přívod – aktivace ALARM při překročení.



Obr. 4 Vizualizace provozu VZT zařízení pro sklad hudebních nástrojů ve Státní opeře Praha
Fig. 4 Visualization of HVAC system operation for the musical instrument storage facility at the Prague State Opera

Zelené orámování

- Žádaný přetlak přívod (40 Pa), měřený přetlak přívod (59 Pa).
- Regulace otáček ventilátoru a množství vzduchu přívod (1262 m³/h), jako žádaná pro odtah (1421 m³/h).

Žluté orámování

- Koncentrace CO₂ přívod (371 ppm) – limit 700 až 800 ppm, prostor (484 ppm) – limit 1000 až 1200 ppm, ALARM 1400 ppm.

Algoritmus protimrazové ochrany ohřivače – ideální řešení s jedním regulátorem

Pokud vzduchotechnická jednotka nasává vzduch, jehož teplota je pod bodem mrazu, zajišťuje tento návrh možné řešení protimrazové ochrany ohřivače a plynulé „přecházení“ z regulace dle teploty přiváděného vzduchu na regulaci dle min. teploty vratné vody z ohřivače, příp. na regulaci dle teploty vzduchu za ohřivačem. Stačí zadat žádané hodnoty:

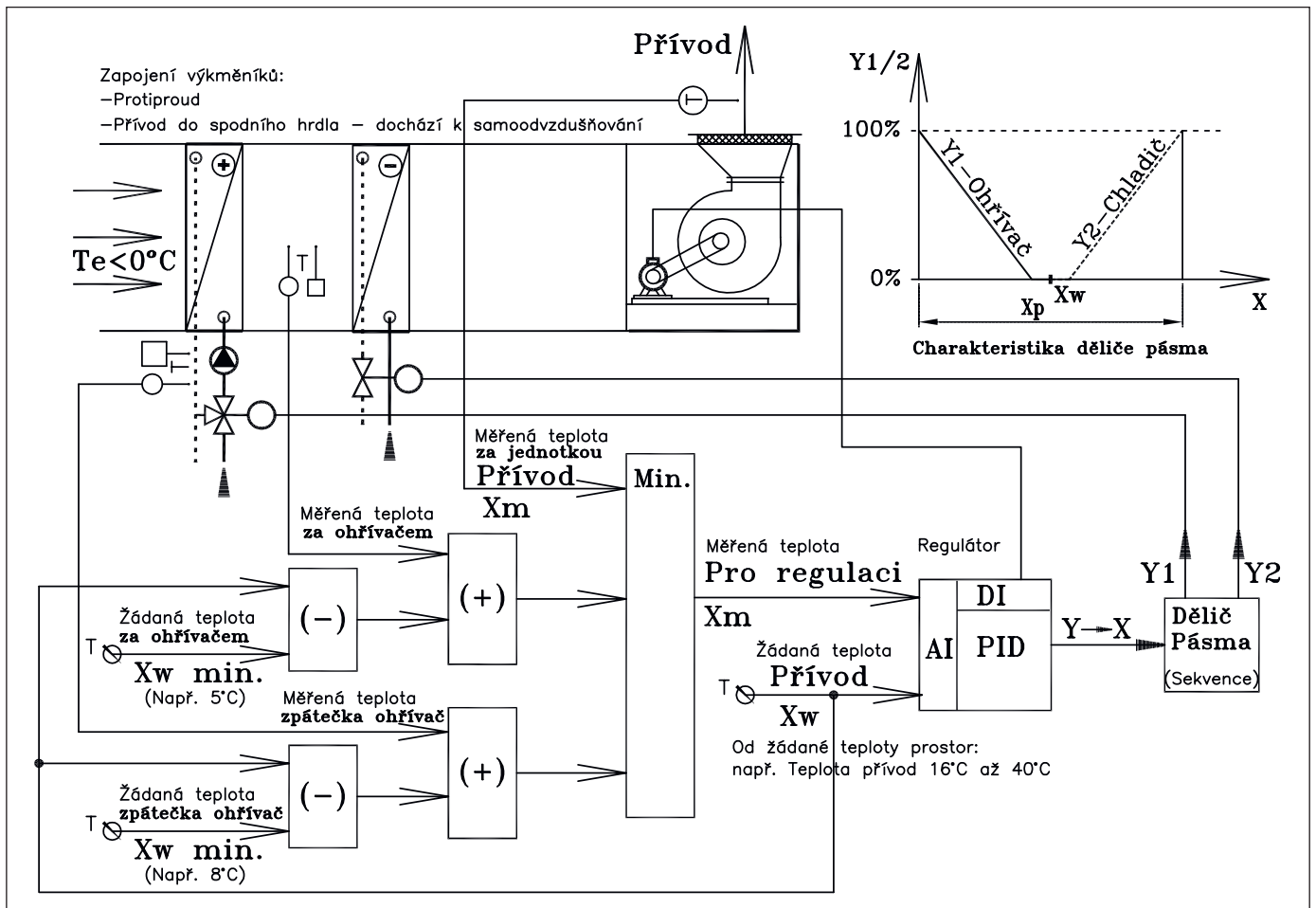
- žádaná teplota přiváděného vzduchu,
- žádaná minimální teplota vratné vody z ohřivače,
- žádaná minimální teplota vzduchu za ohřivačem.

Popis funkce: Základní algoritmus je regulace teploty přiváděného vzduchu. Tato teplota může být buď zadaná jako parametr (při požadavku na zadanou teplotu přiváděného vzduchu), nebo jako výsledek PID regulátoru z požadavku, že teplota přiváděného vzduchu je výsledek žádané teploty přiváděného vzduchu, z požadavku na žádanou a měřenou teplotu v prostoru – tzv „vlečná regulace“. Měřená hodnota teploty přiváděného vzduchu se přivede do modulu výběru minima „Min.“, společně s měřenou teplotou na zpátečce ohřivače a teplotou

vzduchu za ohřivačem. K těmto dalším dvěma teplotám se ale přičte rozdíl mezi žádanou teplotou přiváděného vzduchu, žádanou teplotou vratné vody ohřivače a žádanou teplotou vzduchu za ohřivačem. Výsledkem je, že ta teplota, která je menší než žádaná teplota, „přebírá“ vždy řízení celého systému.

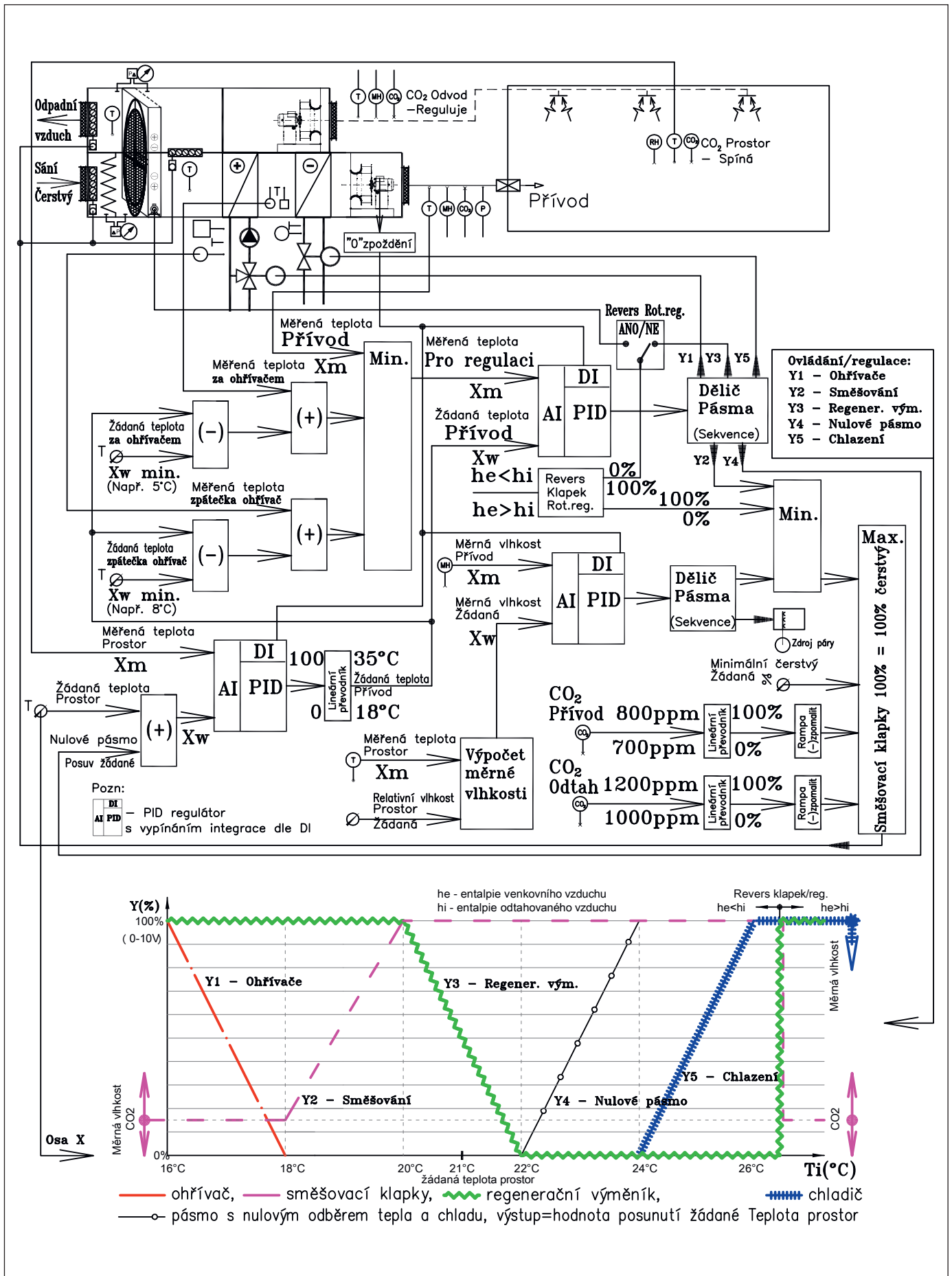
Regulační algoritmus řízení VZT jednotky pro žádanou teplotu, relativní vlhkost a koncentraci CO₂ dle zadané regulační charakteristiky je zobrazen na obr. 6. Je to příklad regulačního algoritmu VZT jednotky s filtrační komorou, rotačním regeneračním výměníkem (Y3), směšováním (Y2), ohřivačem (Y1), chladičem (Y5), ventilátorem řízeným dle přetlaku (P), CO₂, měrné vlhkosti přiváděného vzduchu, která je počítaná z relativní vlhkosti prostoru, s použitím PID regulátorů (Xw – žádaná hodnota, Xm – měřená hodnota, AI – analogový vstup, DI – digitální vstup, Yx – analogový výstup). Tento regulační algoritmus je vypracován na základě výše uvedených požadavků a zadané regulační charakteristiky, doplněné o protimrazovou ochranu, revers klapky a regeneračního výměníku pro letní období, mezní hodnoty teplot přiváděného vzduchu a nulové pásmo energie (Y4). Nulové pásmo energie, v našem případě pro teplotu vnitřního vzduchu od 22 do 24 °C, umožňuje provozovat zařízení s přívodem vzduchu bez dodávky tepla a chladu. Navíc nebude docházet k překmitávání regulace mezi požadavkem na ohřev a chlazení přiváděného vzduchu.

Ke každému schématu VZT zařízení by měl projektant vzduchotechniky přikládat mimo jiné podrobný popis, co a jak požaduje regulovat, regulační charakteristiku, kde je znázorněna funkcionality jednotlivých komponent schématu a požadavky na jednotlivé parametry a funkce (obr. 7).



Obr. 5 Vývojový diagram algoritmu regulace teploty přiváděného vzduchu s protimrazovou ochranou

Fig. 5 Flowchart of the supply air temperature control algorithm with frost protection logic



Obr. 6 Regulační algoritmus kompletní VZT jednotky

Fig. 6 Control algorithm of a complete air-handling unit (AHU)

A		B		C		D		E				F		G		H		I		J		K		L		M		N		O		P		Q		R		S		T		U		V		W	
Zařízení		Množství min./max [m3/hod]				Regulace teploty přívodního vzduchu (IR - Individuální regulace prostoru)								Teplota prostor [°C]		Teplota přívod [°C]		Vlhkost prostor [%]		Obsah CO2 [ppm]				°O"Energie		Reku perace		Směšování																			
Číslo	Název	Přívod	Odtah	Kons tantní	Prostor	Odtah	IR	Od zon	zima	leto	min	max	Zima - Léto	Přívod	Prostor	Odtah	Alarm	Diference od žádané	ekonom ické	min. čerstvého	CO2																										
1	Sál	600/1500	500/1400	-	ano	-	-	-	22	25	18	35	30-70	700-500	1000-1200		1400	3°C	ano	ano	ano	ano																									

X		Y		Z		AA		AB		AC		AD		AE		AF		AG		AH		AI		AJ		AK		AL		AM		AN		AO		AP		AQ		AR		AS	
Ohřev		Chlazení		Dohřev		Vlhčení		CO2		Zony		Protizámraz [°C]		Vlhčení pára		Regulace množství od				Start zařízení				Předběh				Teplota nižší než		Teplota vyšší než		Časový program											
												Voda		Vzduch		AL [%RV]		teploty		CO2		vlhkosti		kaskáda		časový progr.		optima lizace		událost		Zátop		Předchl azení		Větrání minut		°C		°C		Od-do	
ano		ano		-		ano		ano		-		8		5		98		ano		ano		ano		CO2/tep		-		ano		ano		ano		ano		30		18		28			

Obr. 7 Příklad požadavků a parametrů pro řídicí algoritmus VZT zařízení

Fig. 7 Example of requirements and parameters for the control algorithm of HVAC system

ZÁVĚR

Doporučuje se, aby projektanti vzduchotechnických zařízení v souladu s požadavky ČSN EN 16798-1, ČSN EN 13053 a souvisejících technických norem jednoznačně specifikovali v projektové dokumentaci:

- ❑ Požadované parametrické podmínky pro jednotlivé prostory, zejména:
 - požadované množství vzduchu pro prostor (min./max. množství, intenzitu výměny vzduchu),
 - teplotu vnitřního vzduchu (zimní i letní režim) – nutné nulové pásmo,
 - relativní vlhkost vnitřního vzduchu (zimní i letní režim),
 - požadovanou kvalitu vnitřního prostředí (kategorie IEQ/IDA dle ČSN EN 16798-1),
 - požadavky na přetlak a podtlak v chráněných nebo technologických prostorách apod.
- ❑ Parametry přiváděného vzduchu pro jednotlivé VZT jednotky a jejich provozní režimy, včetně:
 - minimálních a maximálních průtoků v režimu komfort/útlum,
 - min. množství čerstvého venkovního vzduchu,
 - teploty přiváděného vzduchu (min. i max.),
 - relativní vlhkosti (pokud je parní – alarm od překročení),
 - požadovanou kvalitu přiváděného, příp. odváděného vzduchu,
 - požadavků na filtraci dle ČSN EN ISO 16890,
 - účinnosti zpětného získávání tepla (ZZT) dle ČSN EN 308/ČSN EN 13053.
 - min. teploty protimrazové ochrany (vzduch, voda) apod.
- ❑ Detailní popis funkcí a provozních vazeb jednotlivých komponent VZT, který slouží jako jednoznačný podklad pro zpracování projektu měření a regulace (MaR/BMS), zejména:
 - funkce ohřivačů, chladičů, zvlhčovačů a výměníků ZZT – formou regulační charakteristiky,
 - regulace ventilátorů (přívod/odvod), včetně typů regulace (např. konstantní tlak, konstantní průtok, variabilní průtok),
 - řízení směšovacích a uzavíracích klapek,
 - alarmy/hlášení o nedosažení nastavených/požadovaných parametrů,
 - bezpečnostní a havarijní funkce (protimrazová ochrana, havarijní vypnutí, limitní stavy),
 - požadavky na komunikaci a integraci do nadřazeného systému řízení (MaR/BMS) apod.

Takto zpracovaný popis slouží jako podklad pro návrh algoritmů řízení MaR/BMS, zajišťuje jednoznačný výklad funkce systému a umožňuje správné nastavení regulačních procesů v souladu s normativními požadavky.

Kontakt na autora: <https://www.ingmatejcek.cz/>