



PROVOZ CHLADÍCÍCH ZAŘÍZENÍ PRO KLIMATIZACI BUDOV S OHLEDEM NA DOSAŽENÍ MAXIMÁLNÍHO CELKOVÉHO CHLADÍCÍHO FAKTORU.

Ing. Karel Matějčík

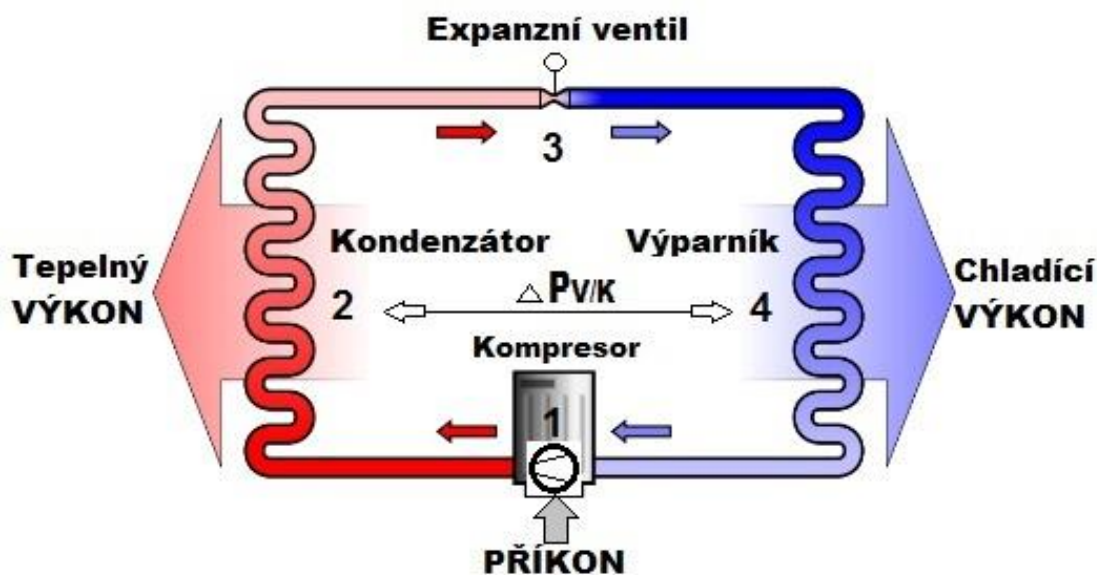
Inženýrská činnost
karel@ingmatejicek.cz

ANOTACE

Příspěvek pojednává o různých systémech distribuce chladu po budově pro klimatizační zařízení v objektech a jejich vliv na chladicí faktor zdroje chladu. Nabízí možná řešení, při kterých je minimalizována celková energetická náročnost na výrobu a distribuci chladu pro klimatizaci v budovách.

ÚVOD

Stále častěji se setkáváme s budovami, u kterých v celoroční bilanci převažuje spotřeba chladu nad spotřebou tepla. Je značná část budov, jejichž fasády jsou z velké části prosklené, vybavené množstvím technologických zařízení s tepelnými zisky, obsazované značným množstvím lidí, kteří jsou sami zdrojem tepla, a navíc je nutné pro ně zajistit dostatečné množství čerstvého vzduchu o požadované teplotě. To vše zvyšuje nároky na spotřebu energií, které je nutné vynakládat na výrobu a distribuci chladu pro zajištění požadovaného mikroklima v budovách. Jako zdroj chladu se nejčastěji používají kompresorové chladicí stroje.



Obr. 1 Okruh kompresorového chladicího stroje

Celkovou spotřebu energie vynaloženou v klimatizovaných budovách na chlazení je možné rozdělit na dvě základní oblasti

a) Spotřeba elektrické energie vlastního chladicího stroje

Tato spotřeba se vyjadřuje pomocí „Chladicího faktoru“. Chladicí faktor EER (Energy Efficiency Ratio – česky koeficient energetické efektivity) je bezrozměrné číslo a vyjadřuje poměr chladicího výkonu a elektrické energie (příkon) vydané na dosažení tohoto výkonu za určitých teplotních podmínek. Hodnota EER se běžně pohybovala mezi hodnotami 2,0 až 4,0.

V současné době je možné docílit i hodnoty dvojnásobné. Čím je tento koeficient vyšší, tím nižší jsou náklady na chlazení a tím je efektivnější i celý systém klimatizace.

- Chladicí faktor chladicího zařízení EER

$$\text{EER} = \frac{\text{Chladicí VÝKON}}{\text{PŘÍKON}}$$

Požadavek na projektanty a provozovatele chladicího zařízení musí být:

- „PROVOZOVAT CHLADÍČÍ ZAŘÍZENÍ V OBLASTI MAXIMÁLNÍHO CHLADÍČÍHO FAKTORU“

b) Spotřeba pomocné energie pro pohon čerpadel a ventilátorů, které zajišťují distribuci chladu v budově.

- Spotřeba pro pohon čerpadel systémů okruhů chlazené vody. Řešení
 - regulace na „OTEVŘENÝ VENTIL“
- Spotřeba vlastních vzduchotechnických zařízení – je nutno realizovat:
 - „OPTIMALIZACI PROVOZU KLIMATIZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ“

PROVOZNÍ STAVY CHLADÍČÍCH ZAŘÍZENÍ

Každý výrobce dodává s chladicím zařízením tabulku doporučených provozních stavů daného chladicího zařízení, ze které je možné vyčíst, jakým způsobem je vhodné daný chladicí stroj provozovat s cílem dosahovat MAXIMÁLNÍ CHLADÍČÍ FAKTOR. Je vhodné si nechat od výrobce propočítat provozní stavy i pro jiné, než základní provozní parametry. Např. pro teplotu chlazené vody vystupující z výparníku v rozsahu od 6°C do 12°C, pro teplotu chladicí vody vstupující do kondenzátoru od 16°C do 28°C. Tomu odpovídají vždy doporučené příslušné průtoky chlazené a chladicí vody. Tyto tabulky je vhodné důkladně prostudovat a následně jak projekt, tak realizace celého díla a budoucí provoz se musí podřídit podmínkám provozních stavů s maximálním chladicím faktorem.

Chladicí výkon		Výparník				Kondenzátor				Příkon kW	Chladicí faktor EER
		Teplota Vstup	Teplota Výstup	Průtok	Tlaková ztráta	Teplota Vstup	Teplota Výstup	Průtok	Tlaková ztráta		
%	kW	°C	°C	l/s	kPa	°C	°C	l/s	kPa		
100	931,8	12	6	37,1	73,8	28	34	42,4	21,5	154,8	6,03
80	745,5	12	6	29,6	46,3	28	32,8	42,4	21,7	115,1	6,47
60	559,1	12	6	22,2	27,3	28	31,6	42,4	21,7	83,6	6,69
40	372,7	11,2	6	17	17,5	28	30,4	42,4	21,8	61,1	6,09
20	186,4	8,6	6	17	17,5	28	29,3	42,4	21,8	38,8	4,81

Příklad běžných provozních stavů chladicího zařízení se šroubovým kompresorem a frekvenčním měničem pro pohon kompresoru

20	200	8,6	6	18,3	19	18	19,3	42,4		20	10
----	-----	-----	---	------	----	-----------	------	------	--	----	-----------

Výběr z jiných provozních stavů stejného chladicího zařízení se šroubovým kompresorem (pro chladicí vodu 18°C)

V provozu bylo ověřeno, že i provozní stav s EER= cca10 je reálný a dlouhodobě dosažitelný.

ZÁSADY PROVOZU V OBLASTI MAXIMÁLNÍHO CHLADÍČÍHO FAKTORU

Pro zajištění provozu chladících strojů s maximálním chladícím faktorem se musí přehodnotit stávající kritéria pro návrh a provoz celého chladícího systému. V současné době je ve většině případů navržen a dodán „nějaký“ chladící stroj (někdy dokonce rozhoduje jen pořizovací cena), pro který jsou požadovány pouze parametry stavů a výkonů pro maximální tepelnou zátěž soustavy. Hlavní důraz bývá kladen na hydraulický návrh a stabilitu soustavy rozvodů chlazené a chladící vody s tím že, „chladící stroj si s tím musí poradit“. Toto je zásadně chybné. Jako první se musí řešit hydraulika a parametry potřebné pro zajištění optimálního chodu chladícího stroje a následně těmto podmínkám se musí přizpůsobit celý systém regulace rozvodů chlazené a chladící vody.

Základní podmínky pro jednotlivé dílčí části chladícího stroje, které se musí dodržovat pro max. provozní EER jsou

- Výparník
 - Zajištění požadovaného optimálního průtoku chlazené vody výparníkem – nutno měřit a následně regulovat řízením otáček čerpadla
 - Regulovat (přestavovat žádanou) výstupní teplotu chlazené vody dle požadavku provozu
 - žádaná teplota chlazené vody je přestavována na hodnotu dle „požadavku na chlazení“ z jednotlivých provozních celků provozu. Např. požadovaná teplota 6°C chlazené vody (pro výpočtové parametry) může mít po značnou část roku i hodnotu až do 12°C. Požadavek na 6°C je pro výpočtové letní parametry. Není ve většině případů žádný důvod tuto hodnotu udržovat po celý rok – je to v podstatě ekvivalent teplotní ekvitermy, která je běžně využívána pro systémy ústřední vytápění.
 - Dodržení min. požadovaného teplotního spádu mezi teplotou chlazené vody vstupující a vystupující z výparníku. Po poklesu na tuto min. teplotní diferenci chladící stroj odstavit. Většina chladících strojů má možnost tuto hodnotu nastavit do vnitřních parametrů stroje. Aby toto bylo možné a nedocházelo po krátkém čase k opětovnému požadavku na chod chladícího stroje, je nutno v systému rozvodů chlazené vody realizovat řízenou akumulaci chlazené vody. A to hlavně do rozvodů chlazené vody, event. do navíc instalované akumulární nádrže. Takže další podmínka je:
 - Akumulace chladu do rozvodů chladu a vypínání chladícího zařízení při dosažení stanovené min. teplotní difference přírodní a vratné chlazené vody dané požadovanou hodnotou chladícího faktoru.
- Kondenzátor
 - Zajištění požadovaného optimálního průtoku kondenzátorem
 - Regulace teploty chladící vody vstupující do kondenzátoru „Na optimální diferenční tlak mezi výparníkem a kondenzátorem $\Delta P_v/k$ “ – tuto hodnotu udává výrobce v technických podmínkách stroje. Je snaha, aby tato difference (stlačení provozního plynu kompresorem) byla co nejmenší. Na druhé straně tato difference zajišťuje proudění dalších medií v okruhu – např. mazacího oleje Pro chladící kompresor, u kterého jsou výše uvedeny provozní stavy, byl požadavek výrobce regulovat teplotu vstupující chladící vody do kondenzátoru tak, aby hodnota tlakové difference byla 180 kPa ($\Delta P_v/k=180$ kPa). Tato tlaková difference mezi výparníkem a kondenzátorem $\Delta P_v/k$ je ve většině chladících

zařízení k dispozici jako analogová výstupní hodnota AO z výstupu řídicího systému chladicího stroje. U starších strojů je to hodnota, která je vypočítávána z teplot výparníku a kondenzátoru. U novějších chladicích strojů je tato hodnota měřena přímo snímači tlaku. Pokud tato hodnota není k dispozici, je možné pro regulaci teploty vstupující chladicí vody do kondenzátoru použít teplotní diferenci mezi výstupní teplotou chlazené vody a vstupní teplotou chladicí vody. Např. při požadavku teplotní diference 14°C (většina výrobců má požadavek na tuto teplotní diferenci od 12°C do 14°C), regulujeme při výstupní teplotě chlazené vody 6°C vstupní teplotu chladicí vody do kondenzátoru na hodnotu 20°C. (např. při teplotním spádu na výparníku 12/6°C, bude teplotní spád na kondenzátoru 18/22°C)

- Chladicí věže
 - Regulace teploty chladicí vody v chladicích věžích řízením otáček ventilátorů dle požadavku řídicího systému chladicího stroje na „Optimální tlakovou diferenci $\Delta P_v/k$ “, event. na požadovanou vstupní teplotu chladicí vody do kondenzátoru
 - Pokud je víc jak jedna chladicí věž, propojit vany těchto věží potrubím a provozovat trvale všechny věže současně. Sníží se tak spotřeba surové vody na odpar a odluh. Zvětší se tak podíl ochlazené vody přestupem s menším odparem.
 - Při „přestávce“ chladicího stroje „doběhem“ zchladit „věžovou vodu“ na hodnotu teploty menší než požadovanou vstupní teplotu chladicí vody do kondenzátoru, event. dle entalpie venkovního vzduchu se stojícími ventilátory - s minimálním odparem.

Základní provozní podmínky pro systémy rozvodů chlazené vody a jejich alternativy s dopadem na celkovou spotřebu el. energie

- Regulace otáček na „Otevřený ventil“ – úspora el. energie.

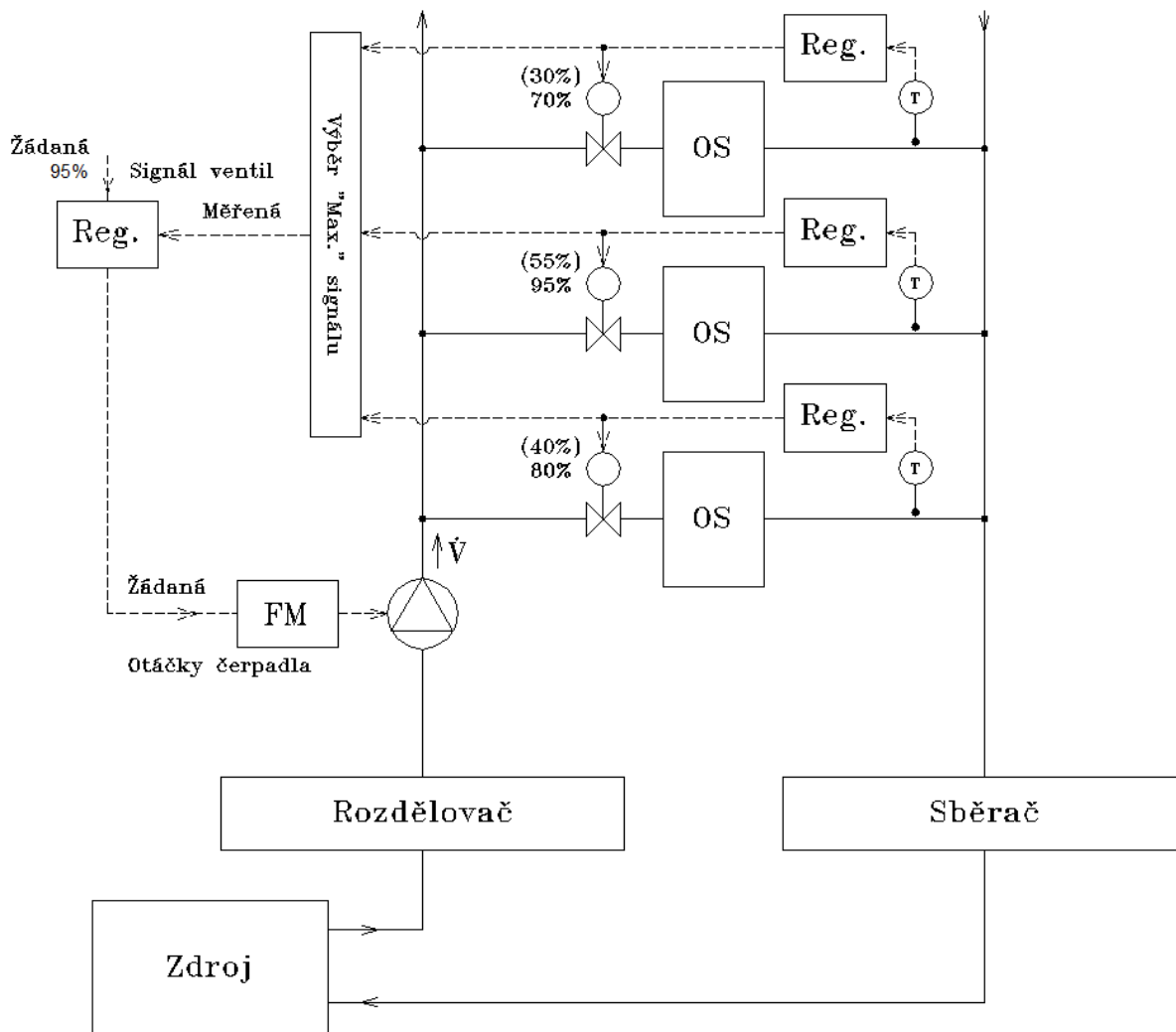
Otáčky čerpadla jsou přestavovány na takovou hodnotu, aby vždy aspoň jeden ventil byl v poloze „OTEVŘENO“ se signálem 95%. Pokud by byl ventil otevřen např. na 50%, má čerpadlo zbytečně veliký diferenční tlak, pokud by byl ventil otevřen na 100%, není možné z tohoto signálu zjistit, zda není diferenční tlak malý. Pokud je v soustavě více regulačních ventilů, signál pro jejich otevření se softwarově zavede do modulu pro výběr maxima, z kterého dál vystupuje signál s největším požadavkem a dle toho se regulují otáčky čerpadla. Pokud se regulují otáčky čerpadla na požadovaný diferenční tlak dle požadavku projektanta, jsou po většinu roku regulační ventily značně přivřeny a čerpadlo vykonává práci, která je pak na regulačních ventilech mařena - celý výpočet soustavy je počítán na výpočtové parametry, které jsou jen několik dnů v roce. Výhod tohoto systému:

NEDOCHÁZÍ K MAŘENÍ čerpací práci čerpadla škrcením na regulačních ventilech.

MINIMÁLNÍ ČERPACÍ PRÁCE ZAJISTÍ požadovaný průtok regulačními ventily.

SYSTEM REGULACE ELIMINUJE drobné nedostatky v systému rozvodů.

Podmínka: NUTNÁ komunikace mezi regulátory teploty a regulátorem čerpadla.



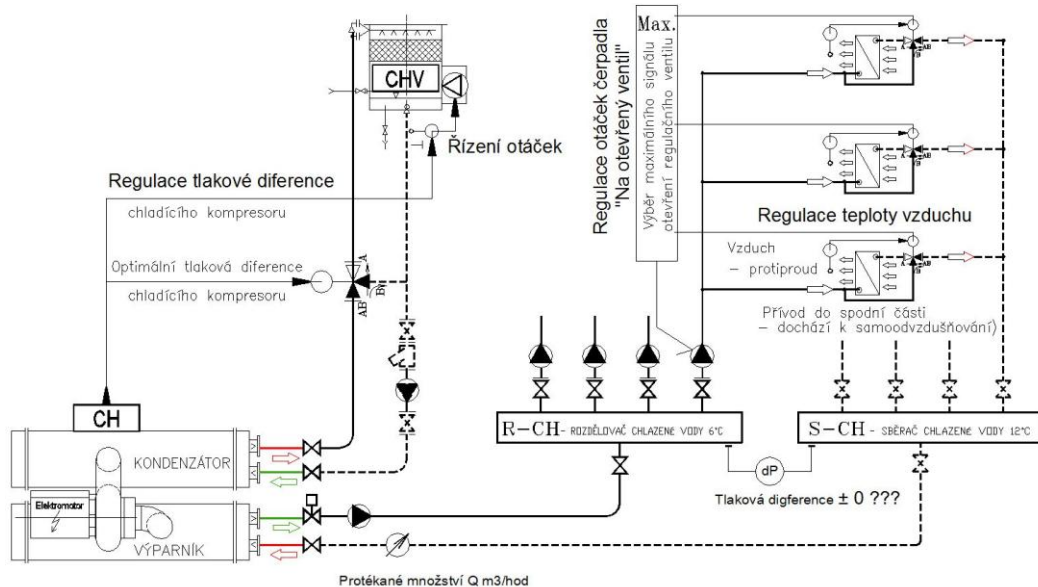
Obr. 2 Regulace otáček na „OTEVŘENÝ VENTIL“

Základní provozní podmínky pro systémy rozvodů chlazené vody a jejich alternativy s dopadem na hodnotu chladicího faktoru

- Rozvody chlazené vody s trojcestnými regulačními ventily u spotřeby (např. u chladičů VZT zařízení)

Tento systém zajišťuje konstantní průtočné množství chlazené vody v hlavních okruzích chladu. Hojně se používal v minulém století, kdy byl problém regulovat množství vody dopravované čerpadly a byl požadavek na konstantní průtok chlazené vody výparníky. Tento systém má tři základní nedostatky:

- Celý rozvodný systém chlazené vody musí být navržen na průtočné množství se současností 100%, vč. protékajícího množství vody výparníkem.
- Nadměrná spotřeba energie na čerpací práci.
- Ze systému rozvodů chlazené vody „se vrací studená zpátečka“, která velmi negativně ovlivňuje hodnotu chladicího faktoru stroje

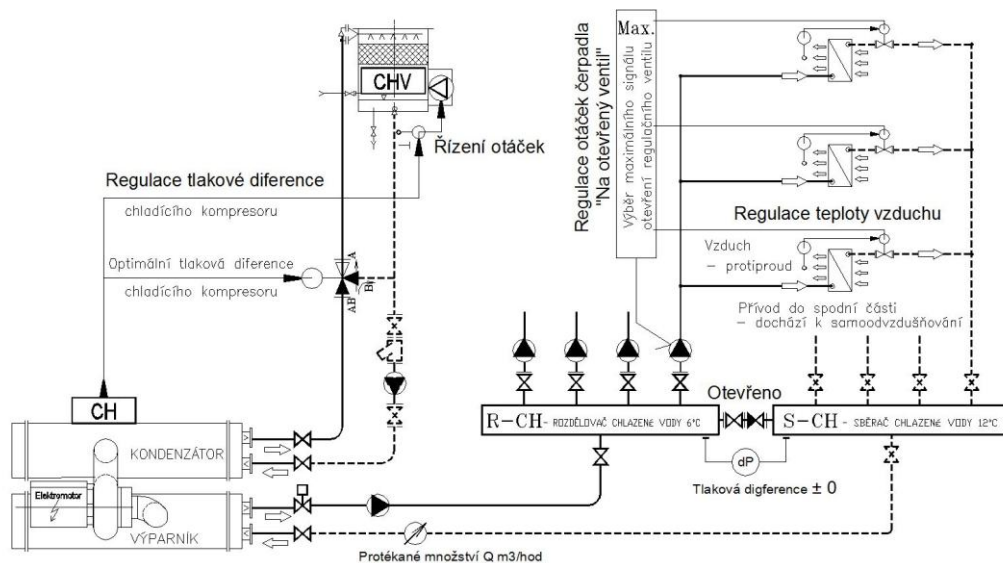


Obr. 3 Rozvody chlazené vody s trojcestnými regulačními ventily u spotřeby

- Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby a s propojovacím potrubím mezi rozdělovačem a sběračem. Ve většině případů i s vloženou zpětnou klapkou v tomto propojovacím potrubí.

Tento systém zajišťuje konstantní průtočné množství chlazené vody výparníkem. Propoj svou funkcí zajišťuje po většinu provozní doby nulovou tlakovou diferencí mezi sběračem a rozdělovačem, takže ve většině případů nedochází k tlakovému ovlivňování čerpadel jednotlivých větví. Tento systém se dost používá i v současné době. Má dva základní nedostatky:

- Po většinu provozní doby je nízká teplota zpátečky – negativní vliv na chladicí faktor.
- Malý objem chlazené vody pro akumulaci vyrobeného chladu. Při malé spotřebě se zařízení provozuje buď na velmi malý teplotní spád výparníku, s velmi nízkým chladícím faktorem nebo nastává problém s četností odstavování chladicího stroje - většina výrobců udává max. počet startů v hodině, event. požadovanou prodlevu mezi vypnutím a startem. V mnoha případech udává podmínky obě.

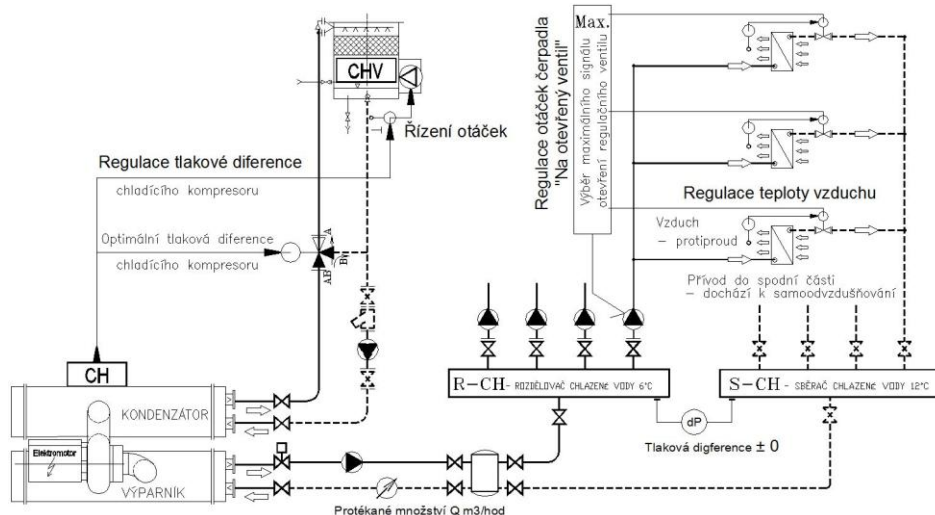


Obr. 4 Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby a propojovací potrubí mezi rozdělovačem a sběračem

- Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby a s termohydraulickým rozdělovačem.

Tento systém zajišťuje vyrovnané tlakové poměry mezi zdrojem chladu a rozvody chlazené vody za všech stavů. Na druhé straně degraduje teplotní parametry v obou vystupujících připojených větvích. Termohydraulický rozdělovač v podstatě nahrazuje řídicí systém regulace průtoků a diferenčních tlaků systému za cenu zbytečně vložené čerpací práce a degradace obou vystupujících teplot. Systém s termohydraulickým rozdělovačem je nejméně efektivní systém ze všech uváděných systémů a je nevhodné ho instalovat k moderním zdrojům chladu i tepla. Jeho náhrada i velmi jednoduchou regulací, přináší okamžité provozní úspory v řádu procent až desítky procent provozních výdajů. Základní nedostatky:

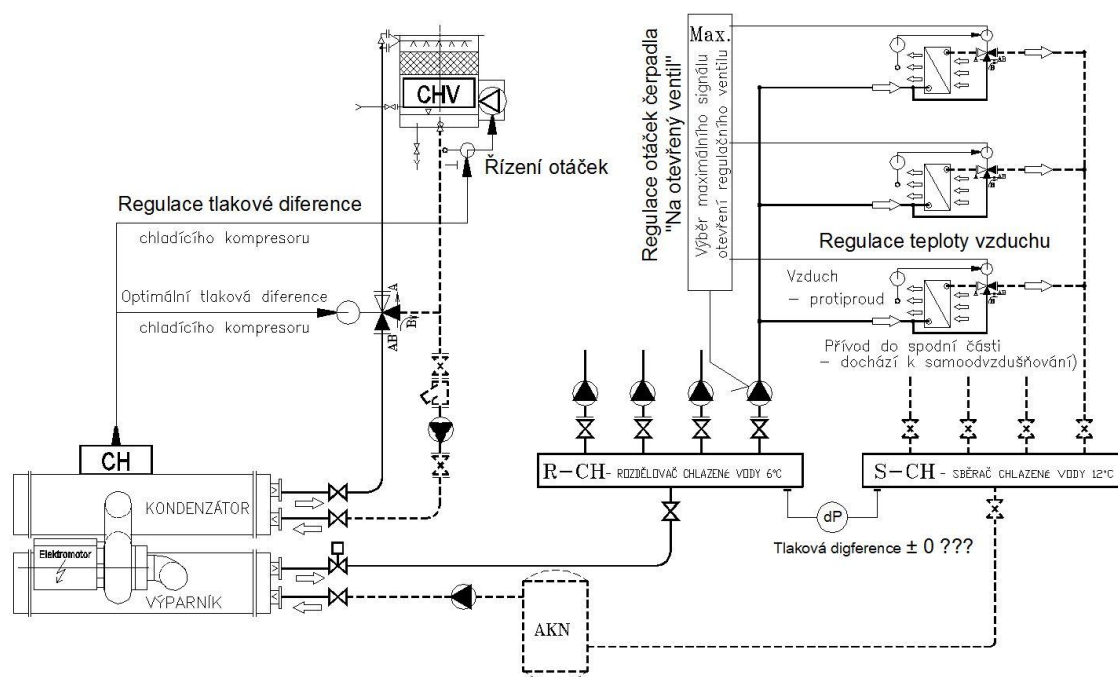
- Po většinu provozní doby degraduje vlivem rozdílných množství průtoků zdrojem a soustavou a svou vlastní konstrukcí, jak výstupní teplotu ze zdroje chladu (za rozdělovačem), tak teplotu vratné vody do zdroje chladu (za rozdělovačem). Je-li výstupní teplota z chladicího stroje např. 6°C, bývá teplota chladicí vody do soustavy rozvodů vždy větší jak 6°C. V mnoha případech i 9°C, a více. Pokud má tato teplota 9°C bude dostačovat pro běžný provoz mimo „letní špičku“, mohou provozovat chladicí stroj s požadavkem na výstupní teplotu 9°C a je okamžitě podstatně větší chladicí faktor stroje. Stejně to je i s teplotou zpátečky, která bude např. 12°C ze soustavy, ale do stroje se bude vracet po většinu času podstatně chladnější, např. i 7°C.
- Po většinu provozní doby dochází k maření čerpací práce jak čerpadel na zdroji, tak čerpadel v soustavě rozvodů chlazené vody. V několika případech jsem upravoval systémy s termohydraulickým rozdělovačem, kdy se provoz snažil řídit otáčky čerpadel na zdroji, event. v systému pomocí měření teplot všech čtyř větví a porovnáváním jejich diferencí. Měli na to realizované velmi složité výpočetní algoritmy, a přesto jediné spolehlivé řešení jejich provozních problémů bylo odstavení termohydraulického rozdělovače (stačí uzavření dvou stejných větví a jejich překlenutí propojkou) a realizace jednoduché regulace na nulovou tlakovou diferencii s instalací jednoho propojovacího regulačního okruhu ve zkratu.
- Malý objem chlazené vody pro akumulaci vyrobeného chladu. Při malé spotřebě se zařízení provozuje buď na velmi malý teplotní spád výparníku s velmi nízkým chladicím faktorem, nebo je problém s četností odstavování chladicího stroje - většina výrobců udává max. počet startů v hodině, event. požadovanou prodlevu mezi vypnutím a startem. V mnoha případech udává podmínky obě.



Obr. 5 Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby a termohydraulickým rozdělovačem – nejméně vhodná varianta

- Rozvody chlazené vody s trojcestnými regulačními ventily u spotřeby a akumulární nádobou ve vratné větvi – následky tohoto řešení.

Tento systém zajišťuje konstantní průtočné množství chlazené vody v hlavních okruzích chladu – viz první popisovaný okruh tohoto článku. Navíc má nainstalovanou akumulární nádobu ve vratné větvi. Představa byla taková, že trojcestné regulační ventily u VZT zařízení přepouštěním vychlazené vody do zpátečky naakumulují tuto oteplenou z části vychlazenou vodu do akumulární nádrže pro období klidu chladicího stroje. Problém je, že naakumulovaná vychlazená voda nemá provozní parametry teploty výstupní vody a při odstávce stroje dojde ve velmi krátké době k chlazení ve VZT zařízení chlazenou teplejší vodou o teplotě zpátečky. Tento problém jsem řešil, když jsem byl požádán o zjištění příčiny problému v jedné nemocnici, kde v letním období vždy několikrát denně docházelo v operačních sálech k orosení stěn těchto sálů. Z vizualizace trendu vlhkosti v operačních sálech bylo zjištěno, že při venkovních teplotách nad 30°C došlo vždy na relativně krátký čas k nárůstu relativní vnitřní vlhkosti z 60% na 95% a zpět poklesu na 60%. Když se tento průběh porovnal s průběhem chodu chladicího stroje, bylo jednoznačné, že k nárůstu relativní prostorové vlhkosti došlo vždy při provozní odstávce zdroje chladu (bylo vychlazen). Po hlubší analýze bylo zjištěno, že příčinou je vyšší teplota chlazené vody naakumulované zpátečky v akumulární nádobě. Řešení bylo změna zapojení rozvodů. Akumulární nádrž umístít za výstup zdroje, zaslepit třetí cesty regulačních ventilů u VZT zařízení a nainstalovat dva přepouštěcí regulační okruhy na koncích stávajících větví.



Obr. 6 Rozvody chlazené vody s trojcestnými regulačními ventily u spotřeby a akumulární nádrží ve zpátečce

- Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby a regulovaným přepouštěním na koncích větví.

Tento systém zajišťuje prioritně podmínky pro chladicí stroj a následně pro rozvod chlazené vody.

Výparník

- Regulace min. průtoku.
- Regulace výstupní teploty chlazené vody dle požadavku provozu.
- Dodržení min. požadovaného teplotního spádu.

- Akumulace chladu do rozvodů chladu

Kondenzátor

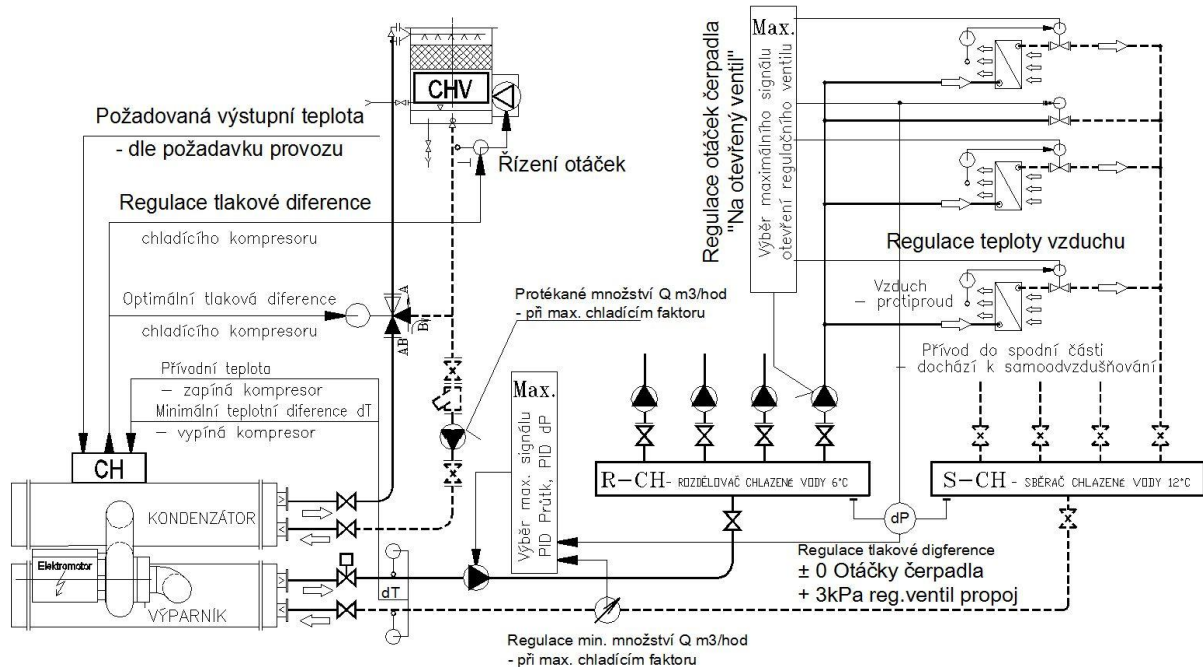
- Zajištění požadovaného optimálního průtoku kondenzátorem
- Regulace teploty chladicí vody vstupující do kondenzátoru dle $\Delta P_v/k$

Chladicí věže

- Regulace teploty chladicí vody v chladicích věžích řízením otáček dle $\Delta P_v/k$.

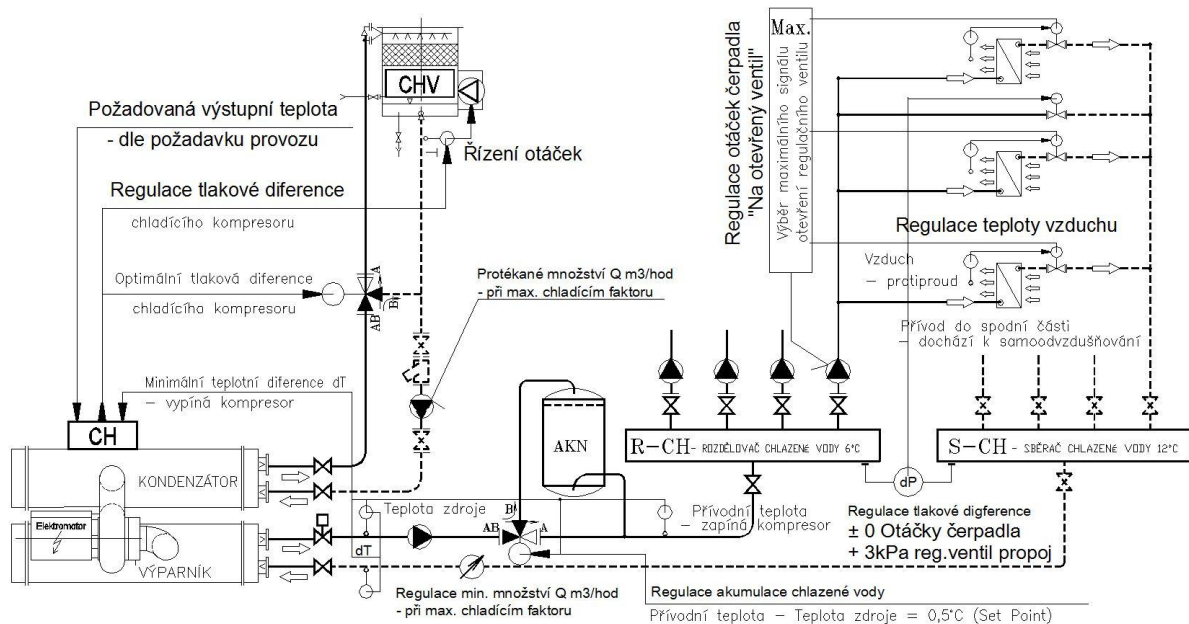
Rozvody

- Regulace na „Otevřený ventil“.
- Regulace ΔP Rozdělovač/Sběrač = ± 0
- Regulace přepouštěním na koncích větví pro:
 - Zajištění min průtoku výparníkem: ΔP Rozdělovač/Sběrač = 3kPa
 - Naakumulování vyrobeného chladu do zpátečky



- Obr. 7 Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily a regulovaným přepouštěním na koncích větví
- Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily u spotřeby, regulovaným přepouštěním na koncích větví a akumulací nádrží v přívodní větvi.

Pokud je předpoklad, že minimální chladicí výkon zdroje bude při určitých provozních stavech větší jak požadovaná potřeba chladu, následkem toho by mohlo docházet k nedodržení min. teplotní diference chlazené vody na výparníku a je riziko častého vypínání stroje, je vhodné nainstalovat do přívodní větve chlazené vody akumulací nádrž pro prodloužení odstávky chladicího stroje. Další důvod může být požadavek na dodržení teploty výstupní chlazené vody.



Obr. 8 Rozvody chlazené vody s dvojcestnými regulačními ventily, regulovaným přepouštěním na koncích větví a akumulační nádrží v přívodní větvi

Závěr: Pro efektivní a ekonomické provozování zařízení nestačí pouze nakoupit a nainstalovat špičkové technologie. Neméně důležitá je i jejich vzájemná spolupráce a provázanost.