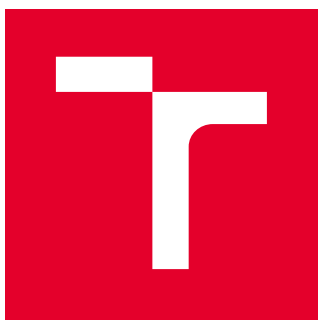


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

REGULACE TEPLoty

TEMPERATURE CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Soviš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jiří Soviš

ID: 198589

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Regulace teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Nastudujte problematiku regulace teploty v místnosti
- 2) Definujte vaši úlohu a stanovte požadované vlastnosti, parametry a jejich hodnoty.
- 3) Seznamte se s typy regulátorů, čidel a akčních členů využívaných při regulaci teploty. Srovnajte jejich vlastnosti a zvolte vhodné pro vaši úlohu.
- 4) Navrhněte možná řešení a zhodnoťte jejich vlastnosti. Popište konkrétní řešení a důvody jeho volby.
- 5) Pro zvolené řešení navrhněte a realizujte algoritmus řízení a popište dosažené výsledky, a srovnání s původním řešením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Intelligent Building Control Systems, Springer International Publishing, 2018, ISBN 978-3-319-68461-1

Haines R., Wilson L.: HVAC Systems Design Handbook, McGraw Hill Professional, 2003, ISBN 9780071500999

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou regulace teploty pomocí neřízeného zdroje odpadního tepla přístroje v uzavřeném objektu. Cílem práce je seznámení se s danou problematikou a technologickými prostředky, využívaných v oblasti HVAC. Součástí práce je návrh řešení regulace teploty, ve které se využívá ztrátové teplo z kompresoru na vytápění kompresorovny a dále jako doplňkový zdroj tepla do výrobní haly, za účelem snížení nákladů. V rámci řešení algoritmu byl vytvořen tepelný model v prostředí Matlab/Simulink, na základě provedeného měření, který byl použit pro návrh PI regulátoru pomocí integrálního kritéria kvality regulace ITAE a metody Nelder-Mead simplex.

KLÍČOVÁ SLOVA

Využití ztrátového tepla, technologické prostředky, regulace teploty, návrh algoritmu řízení, regulátor PI, kritérium ITAE, Nelder-Mead simplex

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of temperature control by means of an uncontrolled source of waste heat in a closed room. The main purpose of this thesis is to get acquainted with problematics and technology used in the field of HVAC. Part of the thesis is a solution design of temperature control in which the heat loss from the compressor is used to heat the compressor room and as a supplementary heat source to the production hall to reduce costs. As part of the algorithm solution, was created a temperature model, developed in Matlab / Simulink, which was used to design a PI controller using integral quality control criterion ITAE and Nelder-Mead simplex.

KEYWORDS

Waste heat utilization, technological means, temperature control, the design of the control algorithm, PI controller, ITAE criterion, Nelder-Mead simplex

SOVIŠ, Jiří. *Regulace teploty*. Brno, 2019, 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Miloslav Richter, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Regulace teploty“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Miloslavu Richterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále děkuji firmě Tronic Control, s.r.o., která mi umožnila proniknout do dané problematiky a vypracovat úlohu na reálném zařízení v provozu

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Problematika regulace teploty v místnosti	11
1.1 Regulace teploty	11
1.2 Přenos tepla, rozptýlení vzduchu	13
1.2.1 Přenos tepla	13
1.2.2 Rozptýlení vzduchu	15
1.2.3 Měření v místnosti	16
2 Definice úlohy	18
3 Technologické prostředky	19
3.1 Regulátory	19
3.1.1 T2032CX	19
3.1.2 T2032EX	20
3.1.3 Expanzní moduly	20
3.1.4 Nastavování vstupní periferie	21
3.2 Snímače	22
3.2.1 Teplota	22
3.2.2 Vlhkost	23
3.2.3 Tlak	25
3.3 Akční členy	25
3.3.1 Servopohony	25
3.3.2 Ventilátory	26
3.3.3 Ohřev	27
3.3.4 Chlazení	28
3.4 Kompresory	29
3.4.1 Popis funkce	29
4 Výpočty v oblasti větrání	31
4.1 Ohřívání a chlazení	32
4.2 Směšování	33
4.3 Psychrometrický diagram	33
5 Měření dat	35
5.1 ModBus	35
5.1.1 Protokol TCP	36
5.2 Dataloger	37

5.2.1	Program datalogeru	38
6	Návrh řešení úlohy	40
6.1	Kompresorovna	40
6.1.1	Revize	42
6.1.2	Řešení vzduchotechniky	43
6.2	Tepelný model kompresorovny	44
6.2.1	Implementace regulátoru	47
7	Algoritmus řízení	50
7.1	Návrh regulátoru	51
7.1.1	Integrální kritéria kvality regulace	51
7.1.2	Metoda Nelder-Mead	52
7.1.3	Syntéza regulátoru	52
8	Závěr	54
	Literatura	56
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	60
	Seznam příloh	61

Seznam obrázků

1.1	Rozptýlení vzduchu v místnosti	15
1.2	Gradient teploty vzduchu v místnosti	17
2.1	Nákres 1 kompresorovny	18
2.2	Nákres 2 kompresorovny	18
3.1	T2032CX	19
3.2	T2032EX	20
3.3	Přídavný modul	21
3.4	Unifikační modul	22
3.5	Ventilatory	27
3.6	Průtokové schéma kompresoru	30
4.1	hx-diagram	34
5.1	Modbus zpráva	36
5.2	TCP-handshake	37
5.3	Diagram funkce Modbus-TCP	38
5.4	Diagram programu Datalogeru	39
6.1	Výkres - pohled ode dveří	40
6.2	Výkres - pohled shora	41
6.3	Naměřené teploty 5. 3. 2019	42
6.4	Naměřené teploty v závislosti na směšovací klapce 18. 3. 2019	43
6.5	Výkres - pohled shora	44
6.6	Model místnosti	45
6.7	Výpočet předávaného tepla	46
6.8	Model směšovací klapky	46
6.9	Převodní charakteristika směšovací klapky	47
6.10	Konstanty PID regulátoru Tronic	47
6.11	Schéma PID regulátoru Tronic	48
6.12	Porovnání hodnot teplot v místnosti	49
6.13	Průběh nastavování klapky a ventilátoru	49
7.1	Vývojový diagram	50
7.2	Úpravy Nelder-Mead simplexu	52
7.3	Odezva na jednotkový skok teploty	53
7.4	Akční zásah regulátorů pro odezvu na jednotkový skok teploty	53

Seznam tabulek

3.1	Unifikační moduly	21
3.2	Vlastnosti kompresorů	29
5.1	Výběr kódů funkcí	36
5.2	Adresace dat	36
5.3	Adresace dat Tronic	36
5.4	Signály SPI	38

Úvod

Výroba v oblasti sváření a lakování se neobejde bez spolehlivého systému dodávání stlačeného vzduchu. Součástí takového systému je vhodný zdroj, který dokáže dostatečně plnit požadavky výroby. Aby bylo možné udržet tento zdroj - kompresor, popřípadě kaskádu kompresorů v provozu, ve spolehlivém chodu, je nutné udržovat určitou vnitřní teplotu samotného kompresoru (chladících okruhů) a okolí. Vzhledem k tomu, že ztrátové teplo na chladícím okruhu je velké (desítky kW), je nutné ho odvést. Jedná se tedy o potenciální zdroj, který lze využít různým způsobem. Způsobem, jak využít teplo z kompresorů se zabývá tato bakalářská práce.

Jelikož se jedná o již určitým způsobem fungující řešení aplikované ve firmě, je součástí práce zhodnocení dosavadního stavu. Díky běžícímu provozu je neustále stlačený vzduch odebírán ze systému. Je proto možné provádět měření, které při prvotní realizaci většinou nejsou možná. Měření je možné blíže zanalyzovat, jakým způsobem se chová místnost v závislosti na chodu neřízených průmyslových kompresorů firmy Atlas Copco (kompresory mají vlastní řídicí elektroniku, proto z pohledu odvádění tepla neřízené).

Pro pochopení celé problematiky je v práci popsána problematika udržení požadovaného klimatu v místnosti, což zahrnuje způsoby regulace teploty, dopady vlhkosti na okolí a termodynamiku vzduchu v podobě rozptylu vzduchu, výpočtů přenosů tepla a veličin definující vlastnosti vlhkého vzduchu. Dále je seznámení s veškerým hardware, který se používá v oblasti vzduchotechniky. To jsou regulátory, snímače a akční členy v podobě ohřivačů, chladičů, servopohonů apod.

Součástí práce je tepelný model vypracovaný v programu Matlab/Simulink, který je porovnán s reálně naměřenými daty. Model je následně použit pro vypracování algoritmu regulace teploty v místnosti v podobě přírůstkového PI regulátoru za použití integrálních kritérií a metody Nelder-Mead simplex.

Motivací pro realizaci této práce je proniknutí do dané problematiky a možnost pracovat na reálném zařízení v provozu firmy. Dalším důvodem je zlepšení kvality stávající regulace teploty.

1 Problematika regulace teploty v místnosti

Úkolem veškeré regulace klimatu v uzavřených místnostech, je zajistit příznivé podmínky pro pobyt, či práci člověka v něm. Vzhledem k různorodosti klimatických podmínek ve střední Evropě (roční období) je vytápění a větrání velmi důležité z hlediska zajištění těchto požadavků. Tepelná pohoda člověka závisí na souboru různých činitelů (oblečení, aktuální činnost, věk, zdravotní stav, psychické vlivy, aklimatizace na určité tepelné poměry), které mohou být u různých osob odlišné. Předpokladem tepelné pohody je tedy rovnováha tepelného toku mezi člověkem a prostředím bez viditelného pocení nebo pocitu chladu. Rovnováha nastává mezi teplem, které člověk vyprodukuje a teplem sdíleným do okolí.

Tepelný stav místnosti je určen teplotou, vlhkostí a tlakem, které ovlivňují výsledný fyzický a duševní stav člověka (tepelnou pohodu). Cílem analýzy tepelného stavu místnosti je definice podmínek, které jsou pro lidi optimální, případně stanovení únosných podmínek (teplota nebude ve všech místech stejná na $\pm 1^\circ\text{C}$, šíření tepla vzduchem díky velké místnosti nebude tak rychlé), které lze do jisté míry zohlednit.

Požadovaného tepelného stavu v budovách lze docílit systémy HVAC (system vyhřívání, chlazení a výměny vzduchu v místnostech), které jsou řízeny systémem MaR. Regulování teploty vzduchu je základní úloha MaR obecně. Dalšími parametry regulace jsou vlhkost a rychlost proudění samotného vzduchu nuceným oběhem. Docílení tepelné pohody je energeticky náročné, proto je nutné najít kompromis mezi finančními náklady a tepelným klimatem.

1.1 Regulace teploty

Manuální řízení

Manuální řízení spočívá v ručním ovládním zdroje tepla, pomocí například manuálních termostatických hlavice, přikládáním do krbu, otevírání oken, k docílení subjektivního pocitového tepla. Výhodou je např. termostatické hlavice je nízká pořizovací cena a vysoká spolehlivost. Nevýhodou manuálního řízení je právě závislost na uživateli, který zajišťuje obsluhu. Nelze vytápět podle přednastavených programů, což v dnešní době pro komfort uživatele není dostačující. Často se stává, že člověk z důvodu pohodlnosti zapomene např. u radiátoru, že má nějakou termostatickou hlavici, která tak zůstane celou topnou sezónu ve stejné poloze a případné očekávané úspory se nedostaví. Dalším příkladem může být situace, kdy přes noc nebude nikdo přikládat do krbu. Naakumulované teplo se bude v čase odevzdávat do okolí (skrz zdi do okolních místností, exteriéru domu) a ráno bude mít uživatel pocit chladu.

Ovládání termostatem

Termostat je zařízení, které snímá teplotu a umožňuje jednoduchou regulaci zdrojů tepla. Termostatem lze označit zařízení hlídající teplotu např. v přímotopu (mechanický, na bázi bimetalového pásku), pokročilou termostatickou hlavici, která ovládá ventil v závislosti na okolní teplotě. Existují však i programovatelné termostaty, na kterých lze nastavit požadovanou teplotu v místnosti na týden dopředu. Činnost spočívá v nespojitě regulaci teploty na nastavenou teplotu s hysterezí ($22 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

Tento systém regulace ale může zapříčinit u zdroje tepla s velkou časovou konstantou překmitý v regulovaném systému. Tato situace nastane kdy už místnost dosáhla horní hranice nastavené teploty, regulátor vypne termostatickou hlavici, která s časovou konstantou (typicky 1 min.) zavře ventil na radiátoru, ale radiátor bude mít stále určitou teplotu i po delší době, než vychladne. To se děje i v opačném případě při minimální hodnotě teploty. U systémů jako jsou přímotopy, budou překmitý o poznání menší, jelikož mají menší tepelnou kapacitu.

Nevýhodou použití tohoto systému je decentralizace bez přímých vazeb. Každý zdroj tepla/chladu má svůj vlastní samostatný termostat, což vylučuje spolupráci mezi nimi. Systém nelze automaticky vypnout (např. při otevření okna, se větrací, či klimatizační jednotky vypínají), nelze automaticky uvést do útlumového režimu, kdy se sníží požadovaná teplota na vytápění, v důsledku neobsazenosti místnosti. Další problém nastává např. v nízkorozpočtových instalacích v rodinných domech, kdy vytápění celého domu je závislé pouze na jednom termostatu. Tímto způsobem nelze zajistit dostatečnou tepelnou pohodu ve všech prostorech.

IRC - Individuální regulace teplot v místnostech

Jedná se o složitější řídicí systém, kterým lze regulovat klima v jednotlivých místnostech na základě informací z nich. Systém IRC je založen na řídicí jednotce (PLC), ovládacím rozhraním s většinou vestavěným snímačem teploty (případně separátní řešení, kdy je ovládací panel a snímač oddělen) v každé místnosti a akčních členů (ventily, ohřívače, chladiče, ventilátory). Systém je plně programovatelný a umožňuje hlubší vazby systému, na základě měřených veličin v jednotlivých místnostech. Naměřené data lze i uchovávat a použít např. pro vyšší formy regulace (např. u podlahového topení lze ze znalosti dlouhodobých dat zajistit včasné zahájení vytápění z důvodu časové náročnosti vyhřátí podlahy). Lze nastavit i časové programy, obsazenost místnosti apod. Systém poté může automaticky připravit klima místnosti s předstihem.

1.2 Přenos tepla, rozptýlení vzduchu

Teplu je energie vyměněná mezi systémem a okolím v důsledku teplotního rozdílu mezi nimi. Protože teplo, stejně jako práce, je přenesená energie, má tudíž jednotku Joule [10].

1. Stavové veličiny - vnitřní energie, teplota
2. Dějové veličiny - teplo, práce

Šíření tepla je pro větrání a vytápění jeden ze základních fyzikálních jevů. V zimní období, kdy prostupující teplo z místnosti stěnami do venkovního prostředí způsobuje tepelné ztráty a naopak v letních měsících prostupující teplo z venkovního prostředí zvyšuje teplotu v interiéru. Intenzitu výměny tepla je v řadě případech snaha zvětšit, do co největší míry, čímž se zvýší účinnost odvádění tepla z něj (výhřevné plochy kotlů, otopné tělesa, různé chladiče). Jsou i případy, kdy se naopak snažíme přenosu tepla zabránit nebo alespoň snížit na únosnou míru termoizolačními materiály (polystyrén, vata), např. u obvodových stěn a střechy budov, chladničky, různé typy potrubí.

Tepelná kapacita vyjadřuje, jak velké teplo Q dodané tělesu zvýší jeho teplotu z počáteční T_i na konečnou T_f :

$$C = \frac{Q}{T_f - T_i} \quad [J/K] \quad (1.1)$$

Měrná tepelná kapacita vyjadřuje, jak velké teplo Q dodané hmotnostní jednotce tělesa zvýší jeho teplotu z počáteční T_i na konečnou T_f :

$$c = \frac{Q}{m(T_f - T_i)} \quad [J/kg \cdot K] \quad (1.2)$$

1.2.1 Přenos tepla

Vedení

Přenos tepla vedením probíhá mezi atomy předmětů s rozdílnou teplotou. Z oblasti s vyšší teplotou se ve směru teplotního spádu šíří teplo skrze atomy s vyšší amplitudou kmitání (větší energie), které srážkami s atomy v chladnější části s menší energií (menší amplituda) předávají energii, dokud nedojde k rovnováze. Teplo, přenášené z oblasti s vyšší teplotou $T_2(K)$ do oblasti s nižší teplotou $T_1(K)$ prostřednictvím desky o tloušťce $d(m)$, ploše $S(m^2)$ a součinitelem tepelné vodivosti $\lambda(Wm^{-1}K^{-1})$ za jednotku času, je definováno jako tepelný tok H (množství tepla za jednotku času) [10] [14]:

$$H = \frac{Q}{t} = \lambda S \frac{T_2 - T_1}{d} \quad [J/s] \quad (1.3)$$

Proudění

Teplo se předává přemístováním částí hmoty v plynech a kapalinách. Tento jev nastává tehdy, pokud je tekutina (plyn, kapalina) ve styku s povrchem obtékaného předmětu vyšší teploty. Teplota tekutiny roste a rozpíná se, čímž mění hustota, objem, vlhkost (u vzduchu). Teplejší tekutina se stává lehčí, než okolní chladná a vlivem vztlaku začne stoupat vzhůru. Část chladnější tekutiny se vlivem přirozeného proudění dostane na její místo a proces se opakuje. Přirozené proudění lze umocnit nuceným prouděním (intenzivnější pohybem tekutiny - laminární, turbulentní) např. ventilátorem, čerpadlem. Tepelný tok mezi plochou S o teplotě t_p a tekutinou o teplotě t_m je dáno vztahem:

$$H = \frac{Q}{t} = \alpha \cdot S(t_p - t_m) \quad [J/s] \quad (1.4)$$

$\alpha [J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C]$ - součinitel přestupu tepla prouděním, který závisí na tlaku, teplotě, rychlosti a druhu proudění (laminární, turbulentní) a na vlastnostech tekutiny. Z parametrů na kterých závisí α lze tedy usoudit, že teoretické řešení přestupu tepla je značně obtížné, proto lze zjišťovat pouze experimentálně [10] [14].

Záření

Přenos tepla zářením (sáláním), je prostřednictvím elektromagnetických vln v rozsahu infračervené části spektra (čím větší teplota, tím kratší vlnová délka). Teplo záření absorbují především kapaliny a tuhá tělesa. Výkon tepelným zářením je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

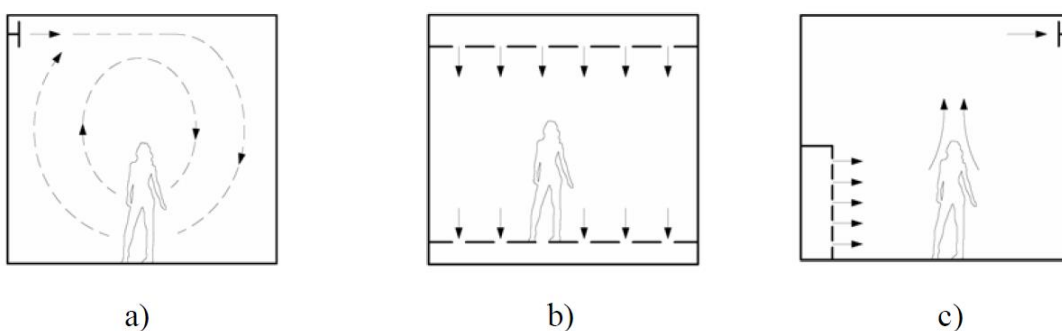
$$P = \sigma \epsilon S t^4 \quad [J/s] \quad (1.5)$$

Výkon závisí na velikosti povrchu předmětu $S [m^2]$, teplotě $t [K]$, $\sigma [W m^{-2} K^{-4}]$ Stefan-Boltzmannově konstantě a ϵ - emisivitě povrchu předmětu [10].

1.2.2 Rozptýlení vzduchu

V místnostech vždy bude fungovat termodynamický jev, kdy teplejší vzduch bude stoupat nahoru a chladnější vzduch bude klesat dolů. Pokud tedy nebude v prostoru místnosti aktor, který by vzduch dostatečně promíchal, bude teplota v každém místě různá. Principy rozptýlení vzduchu nuceným oběhem (obr. 1.1).

- a) mísení - nejčastější případ rozptýlení vzduchu výustí. Vzduch se díky své rychlosti průtoku samovolně rozptýlí a promíchá se se vzduchem, který je již v místnosti obsažen. Výust vzduchotechniky se nachází na stěnách u stropu nebo svěšená ze stropu. K řízení tohoto principu rozptylu vzduchu je nutno přistupovat obezřetně, aby byla zajištěna tepelná pohoda (např. v kancelářích, pro sedícího člověka přímo pod výstí, nebude příjemné, pokud priváděný vzduch bude příliš chladný)[11].
- b) vytěšňování - rovnoměrný přívod vzduchu stropem nebo stěnou do větraného prostoru. Je to v prostorech s vysokými nároky na kvalitu ovzduší (operační sály, laboratoře, lakýrnické boxy). U tohoto principu je také důležité udržet čistotu vzduchu, například pomocí filtrů. Nedochozí zde k víření, snahou je udržet laminární proudění, které mimo jiné tvoří vzduchovou zábranu proti vniknutí prachových částic z okolí. [11].
- c) zaplavování - uplatnění v halových i kancelářských prostorech. Využívá se neizotermičnosti přiváděného vzduchu. Vzduch se přivádí velkými výustěmi u zemi s malou rychlostí o teplotě o 3-5 °C nižší, než je teplota vnitřního vzduchu prostoru. Chladnější vzduch se udržuje u podlahy a provětrává pásmo pobytu osob. Malý rozdíl teplot a nízká rychlost proudění je z důvodu narušení tepelného komfortu osob v blízkosti výustí [11].



Obr. 1.1: Rozptýlení vzduchu v místnosti [11]

1.2.3 Měření v místnosti

Rozptýlením vzduchu v místnosti se snažíme docílit, kvalitního klimatu v prostředí budov. Samotný návrh fyzického zařízení nestačí, proto tento systém doplňují regulační prostředky. Ke správnému řízení je potřeba měření stavových veličin, v případě vzduchu to jsou: teplota a vlhkost, popřípadě přítomnost CO_2 . Při měření zmíněných veličin musí být brán ohled na vhodné umístění snímačů, aby nedošlo ke znehodnocení jakéhokoliv snažení o udržení požadovaného klimatu.

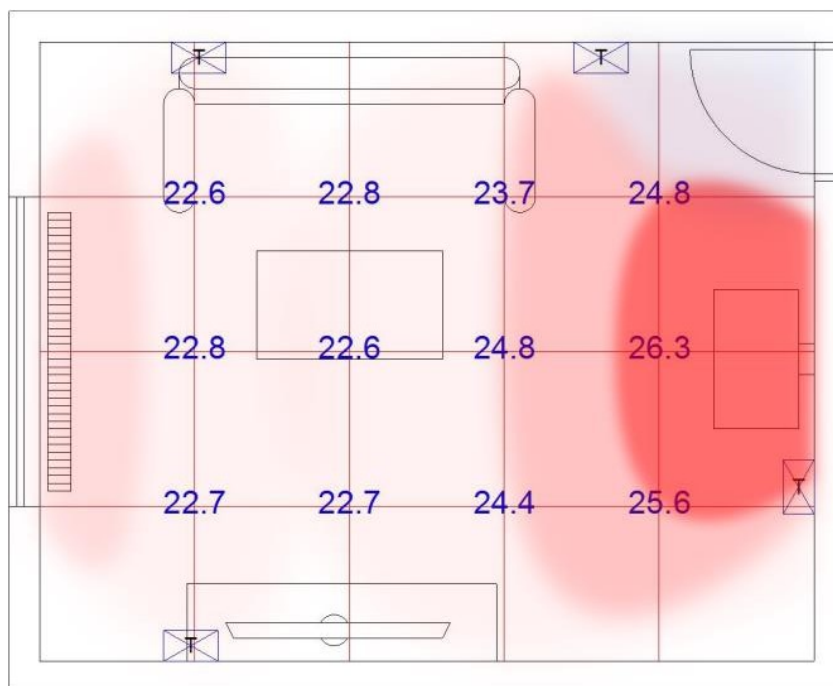
Problémem celého měření je, nehomogenita teploty v celé místnosti. Obrázek 1.2 znázorňuje gradient šíření tepla od zdrojů a přibližné teploty v matici bodů. Při umístění snímače na zeď tedy záleží na způsobu rozptylování vzduchu, pozici, ale i na výšce, jelikož teplota se mění ve vodorovných vrstvách.

Na obrázku 1.2 je možné umístění snímačů teploty (označení T). V případě zatápění kamny bude na snímači nad nimi naměřena značně vyšší teplota, až o 8 °C, než pocitová teplota na pohovce, kde se budou nejčastěji vyskytovat lidé. Snímač přímo u dveří bude problémový, pokud se otevřou dveře do vedlejší místnosti. Vliv bude mít pronikající teplý/chladný vzduch z vedlejší místnosti smíchaný s teplem od krbu. Nejvhodnější varianta se nabízí umístit snímač za pohovkou, jelikož je to nejbližší zóny, kde se budou vyskytovat lidé. Měření budou samozřejmě ovlivňovat i samotní lidé v místnosti, jelikož i oni jsou zdrojem tepla (sedící člověk asi 100W [14]). Tento popis je pro volnou expanzi vzduchu. Pokud bude na krbu např. samočinný větrák, teplo se bude šířit do místnosti rychleji a rovnoměrněji se rozprostře. V případě použití vzduchotechniky se situace změní a bude záležet na umístění výustí, teplotě dodávaného vzduchu a samotné rychlosti proudění.

Vlhkost vzduchu je dalším parametrem pro tepelnou pohodu člověka v místnosti. Tělo člověka reaguje na vlhkost vzduchu odpařováním vody z pokožky, což může zapříčinit např. její vysoušení, praskání rtů, pálení očí a změnu tělesné teploty. Pokud je vlhkost vzduchu příliš nízká, dochází například k vysychání sliznic horních, dolních cest dýchacích a k pocitu únavy. Proto je vhodné udržovat relativní vlhkost ve správné hodnotě, ta je v rozmezí 40 až 60 % (relativní vlhkost se mění v závislosti na teplotě - kap. 4). Vysoká vlhkost může způsobit problémy tzv. rosením, tedy vzniku kondenzátu na nejchladnějších plochách a může vzniknout problém např. s plísněmi na zdech.

Hlídaní koncentrace CO_2 je důležité v prostorách s větším množstvím lidí bez dalšího zdroje znečištění, jako jsou školy, kanceláře, divadla, zdravotnická zařízení. Oxid uhličitý je neviditelný plyn bez zápachu, avšak zvýšená úroveň, zapříčiňuje únavu a pokles schopnosti koncentrace lidí. Minimální dosažitelná koncentrace odpovídající čistému venkovnímu vzduchu je asi 300 ppm. Zároveň však platí, že na celkovou pohodu uživatelů v interiéru mají kromě koncentrace CO_2 vliv již zmíněné

veličiny, ale i intenzita osvětlení, hluk atd. [17][18]



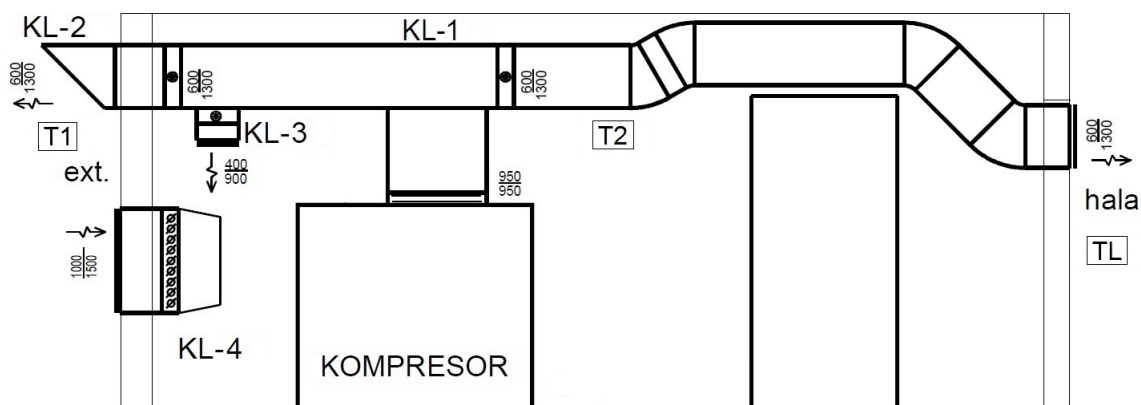
Obr. 1.2: Gradient teploty vzduchu v místnosti rozptylu tepla volnou expanzí

Z výše uvedených situací lze odvodit soubor doporučení k umístování snímačů v místnostech [15][16]:

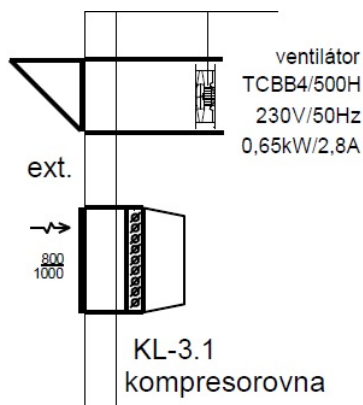
- Umístění ve výšce 1,5 m v oblasti pobytu osob
- Minimální vzdálenost 50 cm od rohu místnosti
- Vyhnout se montáži na osluněná místa (během dne i ročních období)
- V případě masivních stěn (ocel, kámen, beton) použijte termoizolační podložku (aby nedocházelo k měření teploty stěny, ale vzduchu v místnosti)
- Nemontovat na obvodovou vnější zeď (působící vnější vlivy - slunce, mráz, zapříčinují rozdílnou teplotu od stěn orientovaných do domu)
- Neumístovat do výklenků, nesmí být bráněno v cirkulaci vzduchu
- Vyhnout se montáži blízko radiátoru, lamp a ledniček (i malý zdroj tepla může zapříčinit rozdíl od reálné teploty až 1.5 °C)
- Vyhnout se průvanům v bezprostřední blízkosti dveří
- Nemontovat na stěny, za kterými je rozvod teplé vody nebo jimi prochází komín
- Pokud je kabel tažen v instalační trubce, je nutné ji dobře utěsnit, jelikož studený vzduch z podhledů může čidlo ochlazovat

2 Definice úlohy

K chodu výrobních linek a lakovny je nutný stlačený vzduch. V technické místnosti se nachází dva průmyslové kompresory firmy Atlas Copco (GA75VSD FF, GA55+ FF), které dodávají stlačený vzduch do výroby. Kompresory jsou mimo jiné i velkým zdrojem tepla (desítky kW), které je nutné pomocí instalovaného větracího ústrojí usměrnit. Principiální návrh kompresorovny je na obr. 2.1, který znázorňuje řešení pro jeden kompresor. Řešení pro druhý kompresor je totožné. Na výkresu 2.2 je znázorněn doplňkový systém odvětrávání s axiálním ventilátorem, který po spuštění zajišťuje přímé větrání místnosti.



Obr. 2.1: Nákres 1 kompresorovny



Obr. 2.2: Nákres 2 kompresorovny

Úkolem je zrevidovat stávající stav, navrhnout vylepšení systému po stránce hardwarové (přidání snímačů) a softwarové, pro lepší využití ztrátového tepla.

3 Technologické prostředky

3.1 Regulátory

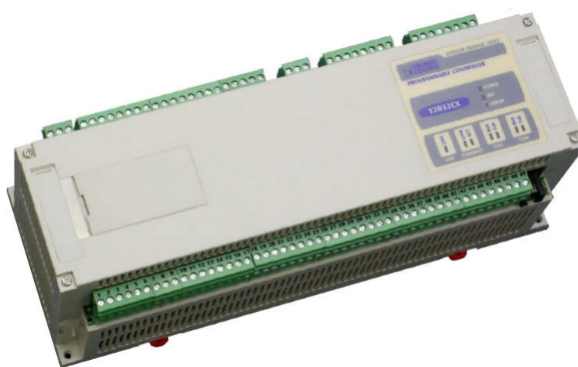
Řídicí stanice TRONIC 2000 se používají pro řízení vytápění, větrání, klimatizace a řízení technologických procesů. Jedná se o modulární systém, který lze založit na stanicích T2032CX nebo T2032EX s doplněním o přídatné moduly.

3.1.1 T2032CX

Programovatelná řídicí stanice ze skupiny systémů s 32-bitovým procesorem. Je určena pro rozsáhlejší aplikace, hlavně z důvodu přítomnosti více vstupních a výstupních periférií. Tato stanice nemá v sobě grafické ovládací rozhraní. Je nutné ho doplnit zvláště na dveře rozvaděče.

Technická specifikace stanice [1]:

1. Varianty provedení stanice
 - T2032CX - bez síťového napájecího zdroje (napájení 12 V)
 - T2032 CXP1, CXP3 - vestavěný síťový napájecí zdroj (napájení 230 V)
2. Vstupy a výstupy
 - 10 analogových vstupů (použití unifikačních článků)
 - 10 analogových napěťových výstupů (0 - 10 V)
 - 10 dvouhodnotových vstupů (24 V aktivní signál)
 - 16 releových výstupů (8-spínací, 8-přepínací)
3. Komunikační vybava stanice
 - RS232, RS422, RS485, CAN, Ethernet, USB 1.1



Obr. 3.1: Programovatelná řídicí stanice TRONIC 2032CX

3.1.2 T2032EX

Hlavní výhodou této stanice je přítomnost ovládacího rozhraní. Moduly se připojují systémovou sběrnici LBEX. Výhodou sběrnice je možnost připojovat přídavné moduly jak místně v rozvaděči s regulátorem, tak jako vzdálenou v/v stranu, umístěnou např. poblíž řízené technologie. Regulátor obsahuje jeden univerzální konfigurovatelný sériový komunikační kanál. Připojením přídavného komunikačního modulu lze počet sériových kanálů zvýšit.

Technická specifikace stanice [3]:

1. Vstupy a výstupy
 - 6 analogových vstupů
 - 4 analogových napěťových výstupů (0 - 10 V)
 - 8 dvouhodnotových vstupů (24 V aktivní signál)
 - 8 releových výstupů (6-spínací, 2-přepínací)
2. Komunikační výbava stanice
 - RS232, RS422, RS485, CAN, Ethernet, USB 1.1
3. Terminál



Obr. 3.2: Programovatelná řídicí stanice TRONIC 2032EX

3.1.3 Expanzní moduly

Počet vstupů a výstupů (analogových a digitálních) základního modulu systému (3.1), vyhovuje pouze menším aplikacím. Připojením přídavných vstupních a výstupních modulů k regulátoru lze vytvořit systém se stovkami v/v bodů. Moduly se připojují systémovou sběrnici LBEX. Výhodou sběrnice je možnost připojovat přídavné moduly jak místně v rozvaděči s regulátorem, tak jako vzdálenou v/v stranu umístěnou např. poblíž řízené technologie [4]. Nastavování analogových vstupů je totožné jako u regulátoru 2032EX, viz. podkapitola 3.1.4.



Obr. 3.3: Přídavný modul

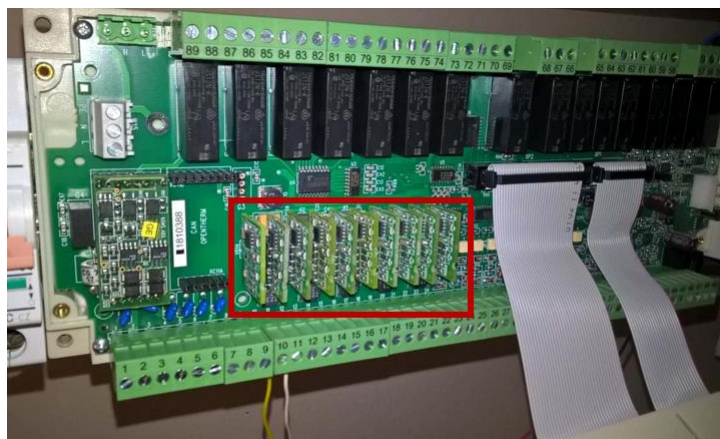
3.1.4 Nastavování vstupní periferie

Programovatelné stanice T2032 umožňují hardwarově nastavit analogové vstupy. U stanice T2032CX se toto nastavení provádí za pomoci unifikačních modulů. Každý článek definuje vstupní veličinu - napětí, proud, odpor. Moduly TINI jsou určeny pro měření odporovými kovovými teploměry, CINIA proudový, VINI napěťový vstup. Typ článku dále označuje písmeno A,B,C ..., které definuje různý měřicí rozsah viz.[2].

Unifikační článek	Signál	Informace
CINIA50	proud	0 - 20 mA
TINI50A,B,C,D,E	PT100	-30°C - 600°C, 4W
TINI50H,I,J,K	PT1000	-30°C - 300°C, 2W
TINI50M,N,P	NI1000	-30°C - 150°C, 2W
VINI50A,B,C	napětí	0-1,2.5,5,10 V

Tab. 3.1: Unifikační moduly k systému T2032CX

Vstupní periferie se u generačně novějšího regulátoru T2032EX a přídavných modulů nastavuje již mechanickými jumpery. Je tak zvýšená kompaktnost, při změně nastavení vstupů. Možnosti nastavení měřených veličin jsou podobné jako u unifikačních článků (tab. 3.1) [1]. Po změně nastavení je nutné vždy provést kalibraci (připojení referenčního signálu a kompenzaci chyby pomocí konstanty v inicializačním souboru). Specifikace rozsahu měřené veličiny se poté nastavuje v programovacím prostředí WinLeda.



Obr. 3.4: Stanice TRONIC 2032CX s osazenými analogovými vstupy

3.2 Snímače

Snímače tvoří vazební členy mezi technickým zařízením a jeho řídicím systémem. Snímače převádějí zvolenou vstupní technickou veličinu na tzv. měronosnou veličinu na svém výstupu. Nejvhodnější výstupní veličina pro zpracování je elektrická (napětí, odpor, proud, kapacita, indukčnost apod.), jelikož ji lze přesně zpracovávat v analogové, tak v digitální podobě [5].

3.2.1 Teplota

Teplota je primární stavová veličina, která popisuje vnitřní stav systému. Je to jedna ze 7 základních jednotek SI, základní jednotka Kelvin, odvozená stupeň Celsia. Jedná se o veličinu, kterou nelze měřit přímo, tudíž je nutné využít jiné fyzikální jevy v důsledku změny teploty: změna elektrického odporu, délková roztažnost, termoelektrický jev, tepelné záření, objemová roztažnost kapalin.

Nejčastěji využívané teplotní snímače:

- Dotykové - odporové (kovové, polovodičové), termočlánky, dilatační
- Bezdotykové - pyrometry

Výběr typu teplotního snímače a jeho vlastností má zásadní dopad na kvalitu měření. Na každý proces je vhodné použít specifický typ, který se bude lišit přesností (u teploty motoru bude stačit přesnost $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, u hlídání teploty inkubátoru to bude $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$), časovou konstantou (pro měření změny venkovní teploty bude dostatečná časová konstanta $\tau = 30\text{s}$, u měření změny teploty chemického procesu bude potřeba $\tau = 1\text{s}$), měřicím rozsahem, citlivostí a hodnotou odporu při 0°C .

Rozdělení odporových snímačů [8]

- Podle druhu odporového materiálu
 - kovové - Pt, Ni, Cu

- polovodičové - NTC, PTC, monokrystalické
- Podle rozsahu teplot
 - nízké (-200 až 100 °C)
 - pokojové (-30 až 100 °C)
 - nižší střední (-50 až 650 °C)
 - vyšší střední (0 až 1000 °C)
- Z hlediska přesnosti a použití
 - Přesné (etalonové, laboratorní)
 - Průmyslové (pracovní, provozní)
- Z hlediska aplikace
 - Interiér, exteriér
 - Příložené, do jímky, se závitem

Kovové snímače

V oblasti vzduchotechnik se hojně využívá odporových snímačů teploty, zejména kovových (platinové, niklové). Nejčastější volbou jsou Pt1000 a Ni1000, z důvodu dostatečně vysokého odporu a citlivosti. Vztah pro odporové kovové snímače:

$$\Delta R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

α - teplotní součinitel odporu [K^{-1}], R_0 - odpor při 0 °C [Ω]

Tato obecná závislost je ale výrobci často uváděna v polynomiálním tvaru, například pro snímač Ni1000 $\alpha = 5,000 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ s rozsahem -60 až 250 °C od firmy Sensit s.r.o. [8]:

$$R = 1000(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad [\Omega] \quad (3.2)$$

$$A = 4,427 \cdot 10^{-3} \text{ } [^\circ\text{C}^{-1}], B = 5,172 \cdot 10^{-6} \text{ } [^\circ\text{C}^{-2}], C = 5,585 \cdot 10^{-9} \text{ } [^\circ\text{C}^{-3}] \quad (3.3)$$

Programovatelné stanice Tronic mají již z výroby unifikacním článkem předem definované, jaký teploměr bude připojen na vstup. Převod měřené veličiny na teplotu je poté proveden v softwarové části. V programu se v nastavení vstupů definuje článek a rozsah. Poté se lineární interpolací přesně změřených 10 a více bodů vypočítá měřená hodnota teploty.

3.2.2 Vlhkost

Vlhkost plynů je daná množstvím vodních par, které jsou v něm obsaženy. Množství vody, které je schopen vzduch pojmout ve formě páry nebo vodních kapiček, je závislá na dvou veličinách: teplotě a tlaku. Definujeme čtyři veličiny, které se používají pro vyjádření vlhkosti vzduchu: absolutní/relativní/měrná vlhkost a rosný bod.

Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost plynu je hmotnost vodní páry m_p obsažené v objemu $1 m^3$.

$$\Phi = \frac{m_p}{V} \quad [kg/m^3] \quad (3.4)$$

Relativní vlhkost

Udává poměr absolutní vlhkosti daného plynu v momentě měření Φ k absolutní vlhkosti plynu Φ_{max} , kdy by byl daný plyn plně nasycen vodními parami. Jinými slovy: procentuální obsah vlhkosti v plynu z maxima, které je při dané teplotě schopen pojmout, aby byl nasycen. Jiné vyjádření lze provést pomocí tlaků: p_v - parciální tlak vodních par, p_{vs} - parciální tlak sytých vodních par.

$$\phi = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad [-] \quad (3.5)$$

Využívá se elektrochemických vlhkoměrů, které jsou založeny na změně vodivosti vhodného hydroskopického materiálu. Snímač tohoto typu je na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3). Na povrchu destičky tvořící jednu elektrodu je nanesena pár μm tenká pórovitá vrstva Al_2O_3 . Ta je překryta tenkou vrstvičkou zlata propouštějící vodní páru a tvořící druhou elektrodu. Vlhkost měřeného prostředí difunduje zlatou vrstvou do pórovitého Al_2O_3 až k vytvoření rovnovážného stavu. Vodivost hydratovaného Al_2O_3 je mírou vlhkosti plynu [5].

Měrná vlhkost

Při tepelných úpravách vlhkého vzduchu (vlhčení, odvlhčování) se nemění hmotnost suchého vzduchu, ale hmotnost vodních par. Hmotnost vodní páry (m_{H_2O}) se vztahuje na 1 kg suchého vzduchu m . Měrná vlhkost je vypočítávána ze znalosti teploty, tlaku a relativní vlhkosti.

$$x = \frac{m_{H_2O}}{m} \cdot 100 \quad [g/kg] \quad (3.6)$$

Rosný bod

Rosný bod je teplota, při které by vlhký vzduch dosáhl bodu nasycení za stálého tlaku (Relativní vlhkost by byla 100 %), takže dalším ochlazováním by přebytečná vodní pára začala kondenzovat.

Vlhkoměry na principu rosného bodu vychází z kondenzační metody. Princip metody spočívá v obtékání plynu podél ochlazovaného zrcátka, které při orosení mění odraz dopadajícího světla ve smyslu snížení světelného toku. Ochlazování zrcátka se řídí Peltierovým článkem tak, aby se teplota ustálila na hranici orosování. Při

tomto pokusu se měří teplota vzduchu a teplota rosného bodu (zrcátka). Z těchto údajů je vypočtena relativní vlhkost. Většinou je situace opačná, kdy rosný bod je výpočítáván z údajů o relativní vlhkosti a teploty.

3.2.3 Tlak

Měření tlaku u vzduchotechnických jednotek se využívá nejčastěji v podobě dvouhodnotových snímačů difference tlaku. Tyto snímače umožňují kontrolu např. zanesení filtru, kdy se úměrně znečištění zvětšuje tlaková ztráta na něm. Tlakovou ztrátu lze nastavit otočným kolečkem v rámci 20 - 5000 Pa. Tento typ snímače funguje čistě mechanicky a pouze přepíná kontakt [9]. Používají se i analogové snímače tlakové difference, kdy tlaková ztráta na klapce je úměrná rychlosti proudění.

3.3 Akční členy

Vytváření cesty uvnitř potrubí, kterým dopravujeme vzduch na dané místo, lze pomocí klapek různých tvarů a rozměrů osazenými daným technologicky určeným servopohonem. Servopohony jsou dále využívány i pro ovládání ohřevu, chlazení a zvlhčování, kde servopohony sehraávají důležitou roli v nastavení průtoku vody v chladiči/ohřívači pomocí ventilů. Úprava rychlosti proudění v potrubí je prováděna pomocí ventilátorů.

3.3.1 Servopohony

Průtok vzduchu nebo vody lze ovlivňovat klapkami, či ventilů používající tři typy servopohonů: uzavírací, regulační, havarijní. Výběr daného mechanismu je zcela zásadní na spolehlivost regulování. Například u horké páry, při jakékoliv poruše servopohonu je nutné uzavřít její přívod, aby nedošlo například k prudkému zvýšení teploty v místnosti (havarijní). Každý servopohon lze ovládat signálově nebo ručně, pomocí aretačního tlačítka a kličky (využívá se při seřizování nebo nastavení nouzové, dočasné polohy pro částečný chod.

Uzavírací

Servopohon je vybaven dvouhodnotovým řízením. Je možné zvolit směr otáčení, ale už není možné zvolit úhel natočení. Pro přesné nastavení polohy je určen regulační pohon. Uzavírací servopohon funguje stejně jako relé, s tím rozdílem, že má časovou konstantu mezi přenastavením z jedné do druhé koncové polohy. Po nastavení polohy servopohon zůstává na poslední pozici, kdy byl připojen řídicí signál/napájení.

Regulační

Lze ovládat spojitě natočení ventilu, či klapky pomocí napětového (běžně 0 - 10 V), či proudového výstupu (běžně 0-20 mA). Servopohon lze použít stejně jako uzavírací tak, že se využijí pouze krajní polohy. Ovládání natočení je lineární, avšak často v otevřené smyčce.

Havarijní

Veškeré servopohony lze vyrobit i ve verzi havarijní. Tato verze navíc zajišťuje spolehlivé uzavření/otevření (záleží na výchozí pozici) v případě odpojení napájení. Bezpečné uvedení servopohonu do výchozí polohy je docíleno použitím energie ve zpětné pružině.

3.3.2 Ventilátory

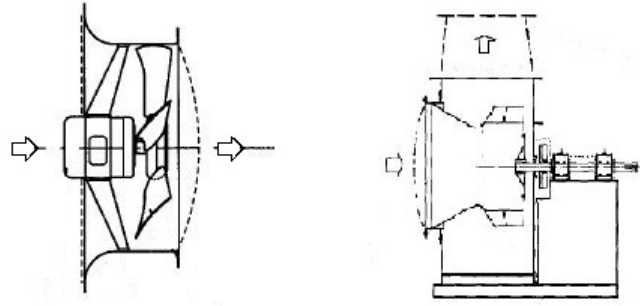
Součástí každého nuceného větracího nebo klimatizačního systému je ventilátor, který umožňuje změnit průtok vzduchu v potrubí. Hlavními parametry ventilátorů jsou celkový dopravní tlak, objemový průtok a příkon. Ventilátory můžeme rozdělit podle směru průtoku vzduchu na radiální a axiální. [13]

Radiální

Součástí oběžného kola jsou lopatkové kanály, které otáčením zajišťují nasávání vzduchu v axiálním směru a výtlaček ve směru kolmém na osu rotace (radiální). Úkolem celého uložení je přeměna kinetické rotační energie na energii tlakovou. Nejpoužívanější jsou nízkotlaké ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami. Jako střednětlaké a vysokotlaké ventilátory se používají z dozadu zahnutými lopatkami. Disponují i vyšší účinností [13].

Axiální

U axiálních ventilátorů proudí vzduch ve směru osy otáčení oběžného kola. Jejich uplatnění je tam, kde je požadovaný velký průtok vzduchu bez vysokých nároků na dopravní tlak. Zejména v průmyslu se používají ventilátory rovnotlaké, které mají statický tlak za ventilátor stejný jako před ním (ve ventilátoru se vzduch urychluje). Za oběžným kolem je umístěn difusor, ve kterém při poklesu dynamického tlaku roste tlak statický [13].



Obr. 3.5: Axiální a radiální ventilátor [13]

3.3.3 Ohřev

K ohřevu dochází ve výměnících tepla, zpravidla ze žebrovaných nebo lamelových trubek. Teplonosnou látkou je voda, pára, kondenzující páry chladiva, specifickou formu mají ohřivače elektrické. Ve všech případech se jedná o povrchové ohřivače, jejichž teplota povrchu je vyšší, než teplota vzduchu přiváděného do ohřivače. Při ohřívání nedochází ke změně měrné vlhkosti ve vzduchu.[11]

Vodní ohřivače

Nejrozšířenější typ ohřivače, využívající vodu jako teplonosnou látku, v větracích a klimatizačních zařízeních. Při předávání tepla vody do přiváděného vzduchu platí následující vztah:

$$Q = M_A \cdot c_A \cdot \Delta t_A = M_W \cdot c_W \cdot \Delta t_{Ws} = U \cdot S \cdot \Delta t_m \quad [W] \quad (3.7)$$

Index $_A$ je pro vzduch a $_W$ je pro vodu, M - hmotnostní průtok (kg/s), c - měrná tepelná kapacita ($Jkg^{-1}K^{-1}$), Δt - rozdíl teplot (K), U - součinitel prostupu tepla výměníkem, S - teplosměnná plocha (m^2), Δt_m - střední teplotní rozdíl (K).

Na výkon tohoto typu ohřivače má zásadní vliv teplosměnná plocha a teplotní rozdíl mezi vodou a vzduchem. Proto musí být teplota vody dostatečně vysoká, aby byl velký i teplotní rozdíl, díky tomu může být teplosměnná plocha menší a ohřivače mají potom jednu, max. dvě řady. V případě malých teplotních rozdílů (nízkoteplotní zdroje tepla) zejména u kapalinových okruhů jsou teplotní rozdíly malé a ohřivače musí mít více řad (velkou teplosměnnou plochu).

Při dostatečně rozdílných teplotách vody a vzduchu lze počítat střední teplotní rozdíl jako by byla teplota vody ve výměníku stála a rovnala se aritmetickému průměru t_{Wm} vstupní a výstupní teplé vody.

$$\Delta t_m = \frac{t_{A2} - t_{A1}}{\ln\left(\frac{t_{Wm} - t_{A1}}{t_{Wm} - t_{A2}}\right)} \quad [K] \quad , \text{ kde } t_{Wm} = \frac{t_{W1} + t_{W2}}{2} \quad [K] \quad (3.8)$$

Index $_1$ - vstupní teploty, $_2$ - výstupní teploty.

Z hlediska úpravy stavu vzduchu dochází k ohřevu bez změny měrné vlhkosti, roste teplota a klesá relativní vlhkost. Další parametr ohříváče je tlaková ztráta na straně vody i na straně vzduchu. Ohříváč je v komoře osazený kolmo k proudu vzduchu. V komoře ohříváče musí být osazeno čidlo protimrazové ochrany, pokud do ohříváče může přijít studený vzduch (např. venkovní), který by zapříčinil zamrznutí vody v ohříváči a jeho zničení.

Regulace vody v ohříváči je možná kvalitativní (směšování vody), kdy se mění teplota vody za stálého průtoku a kvantitativní s konstantní teplotovou vody a škrcení, či rozdělením průtoku.[12]

Parní ohříváče

Používají se zejména v průmyslu, z důvodu schopnosti dodávat velké výkony, pro ohřev na vysoké teploty. Hlavní podmínkou pro použití je zdroj horké páry. Charakter parního ohříváče je stejný jako je to u vodního, avšak je nutné brát v úvahu vyšší tlaky, teplotu a namáhání. Regulace průtoku páry se provádí škrcením na vstupu do ohříváče (výměníku). K regulaci páry jsou často používané kombinované ventily s pneumatickým pohonem, protože běžné el. servopohony reagují pomalu z důvodu větší časových konstant(až 15 s na přestavení ventilu z jedné do druhé krajní polohy), avšak není to podmínkou, záleží na daném ohříváči a jeho časové konstantě. [12]

Elektrické ohříváče

Tento typ ohříváče by měl být instalován jen tam, kde není možné použít jiný zdroj tepla nebo by se to nevyplatilo finančně. To znamená v malých zařízeních nebo jako doplňkové, či havarijní ohříváče. Pro ohřev vzduchu se používá různých typů topných tyčí, či spirál. Regulaci lze provádět změnou napětí, či proudu. Velkou výhodou tohoto ohříváče je, že nepotřebují protimrazovou ochranu.[12]

3.3.4 Chlazení

Chlazení slouží primárně k snižování teploty vzduchu. Základním rozdílem oproti ohříváčům je u chladičů nižší teplotní rozdíl mezi teplotou látkou a vzduchem a to, že ve většině případů dochází při chlazení ke kondenzaci vodních par ze vzduchu. Díky tomu se chladiče mírně liší od ohříváčů konstrukcí i provedením. Chladiče potřebují větší teplosměnnou plochu, proto mívají více řad než ohříváče. U chladičů

pro chlazení s kondenzací musí být ošetřeno zachytávání vodních kapek a odvod kondenzátu.

3.4 Kompresory

Šroubové kompresory Atlas Copco GA75 VSD FF a GA55+ FF jsou stacionární, vzduchem chlazené, jednostupňové kompresory s olejovým vstřikováním. Jsou vhodné pro nepřetržitý provoz v náročnějších podmínkách díky vysoké spolehlivosti. Kompresory jsou poháněné vzduchem chlazeným 3 fázovým elektrickým motorem.

Systém VSD (Variable Speed Drive) zajišťuje plynulou regulaci výkonnosti kompresoru změnou otáček elektromotoru pomocí frekvenčního měniče dle požadovaného tlaku v systému s následným vypnutím při min. otáčkách. Úspora elektrické energie, podle charakteru spotřeby stlačeného vzduchu až 35%. Kompresory bez tohoto systému umožňují pouze dvoustupňovou regulaci zatížením-odlehčením.

Verze Full Feature (FF) označuje kompresory vybavené kondenzačním sušičem stlačeného vzduchu zabudovaným ve společně odhlučněné karoserii s kompresorem. Díky tomu distribuovaný vzduch neobsahuje vlhkost a aerosoly [29].

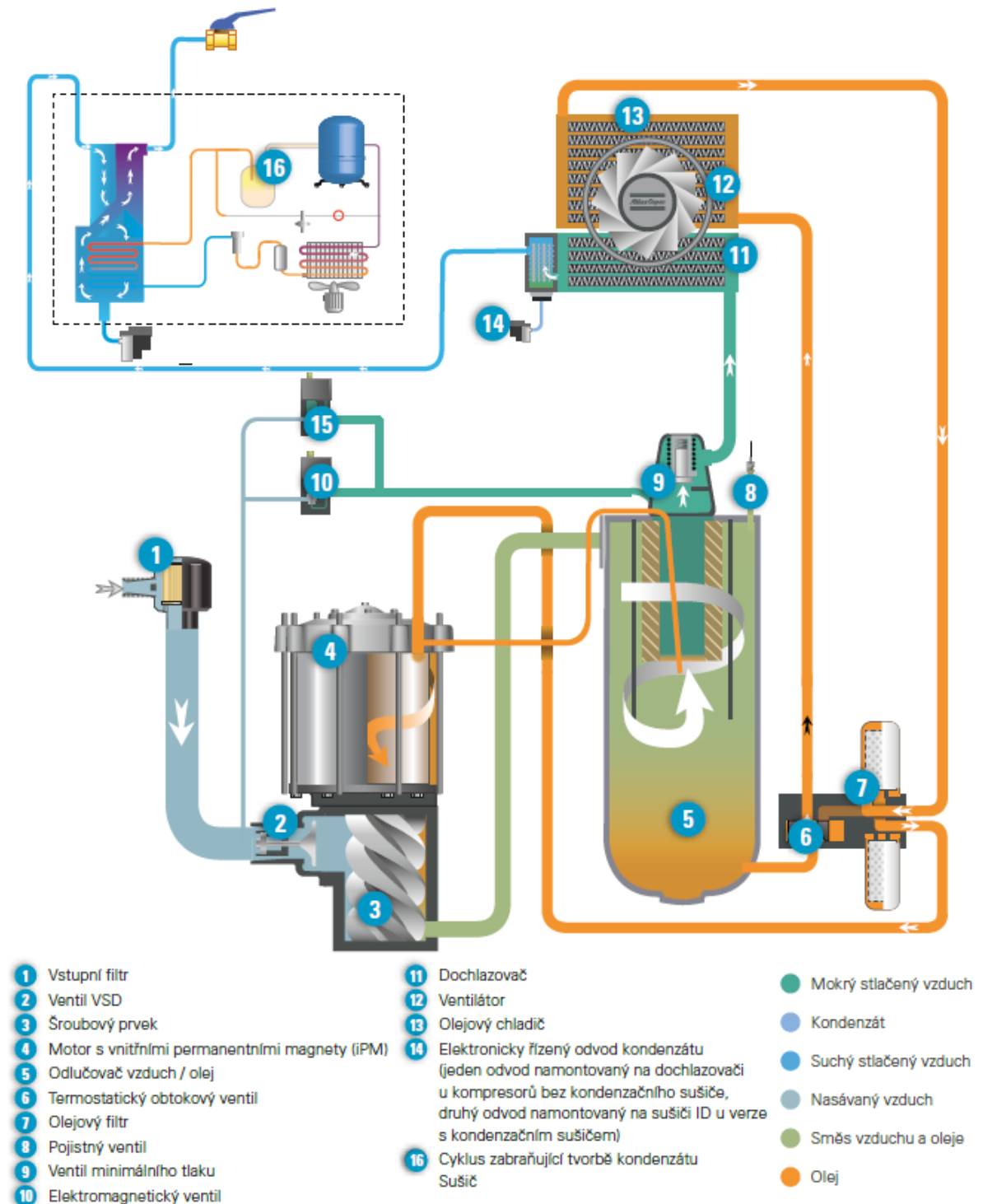
3.4.1 Popis funkce

Kompresor (průtokové schéma je na obrázku 3.6) nasává vzduch skrze vstupní filtr (1) a ventil VSD (2) do šroubovitého elementu (3). Společně se vzduchem je vstřikován i olej z důvodu mazání. Výkon komprese je řízen elektromotorem (4) na požadovaný výkon (VSD - frekvenční měnič, bez VSD - přepínání stykačů). V odlučovači (5) dochází k oddělení vlhkého stlačeného vzduchu od oleje do samostatných větví. Olej je vrácen zpět ke vstřikování do šroubovitého elementu skrze olejový filtr (7) přímo nebo přes chladič (13) v závislosti na teplotě. Stlačený vzduch je veden skrze ventil minimálního tlaku (9) do dochlazovacího ústrojí (11), kde se odvede část kondenzátu (25). Zbytek vlhkosti ve vzduchu se odstraní v kondenzačním sušiči (16). Odtud je vzduch veden do tlakových nádob (vzdušníků).

Typ	výkon motoru (kW)	výkonnost při výtlačném přetlaku 9.5 bar l/s	θ okolí	
			min °C	max °C
GA75 VSD	75	48,1 - 219,4	0	46
GA55 +	55	158,3	0	46

Tab. 3.2: Vlastnosti kompresorů [29],[30]

Kompresor v této úloze nahrazuje ohřívač svým zabudovaným olejovým chladičem a dochlazovačem skrz které nasává vzduch pro chlazení. Ventilátor (13) řídí průtok vzduchu v okruhu pro odvod odpadního tepla. Průtok nastavuje řídicí jednotka kompresoru.



Obr. 3.6: Průtokové schéma kompresoru [28]

4 Výpočty v oblasti větrání

Relativní vlhkost udává do jaké míry je nasycen vzduchu vodními parami (3.2.2)[13]:

$$\phi = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (4.1)$$

ρ_v	hmotnostní koncentrace vodních par ve vzduchu	(g/l)
ρ_{vs}	hmotnostní koncentrace sytých vodních par ve vzduchu	(g/l)
p_v	parciální tlak vodních par	(Pa)
p_{vs}	parciální tlak sytých vodních par	(Pa)

Parciální tlak sytých vodních par lze vypočítat dle vylepšené magnusovy formy aproximace (AEGR_{-80,50°C}) s relativní chybou < 5%. [20]:

$$p_{vs} = 610.37 \cdot \exp \frac{17.67 \cdot \theta}{243.27 + \theta} \quad Pa \quad (4.2)$$

Při výpočtech s vlhkým vzduchem je výhodné sledovat měrnou vlhkost. Při úpravách takového vzduchu zůstává hmotnost suchého vzduchu stejná a mění se množství vodních par. Ze znalosti parciálního tlaku sytých vodních par a relativní vlhkosti, lze tuto veličinu vypočítat dle následujícího vztahu [13]:

$$x = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{\phi p_{vs}}{p - \phi p_{vs}} \quad g/kg \quad (4.3)$$

p_v	parciální tlak vodních par	(Pa)
p_a	tlak suchého vzduchu	(Pa)

Pro výpočet hmotnostního průtoku lze vycházet z objemového průtoku, který lze spočítat z převodní charakteristiky ventilátorů, popřípadě měřením střední rychlosti vzduchu v potrubí, jeho příčnou plochu a aktuální hustotu vzduchu. Hustota vzduchu má závislost za normálního tlaku na teplotě a vlhkosti vzduchu. Při výpočtu je možné vyjít z výpočtu rosného bodu vzduchu θ_s :

$$\alpha = \log(\phi) + \frac{a \cdot \theta}{b + \theta}; \quad (4.4)$$

$$\theta_s = \frac{b \cdot \alpha}{a - \alpha} \quad [^\circ C] \quad (4.5)$$

a	konstanta	17.62
b	konstanta	243.12 °C

Výpočet hustoty vzduchu ze znalosti relativní vlhkosti, tlaku a rosného bodu [26]:

$$\rho = \frac{p_a}{R_d \cdot T_s} + \frac{p_v}{R_v \cdot T_s} \cdot 100 \quad \text{kg/m}^3 \quad (4.6)$$

p_a	tlak suchého vzduchu	hPa
p_v	parciální tlak vodních par	hPa
R_d	konstanta pro suchý vzduch	287.058 J/(kg · K)
R_v	konstanta pro vlhký vzduch	461.495 J/(kg · K)
T_s	rosný bod	K

Entalpie (tepelná energie uložená v termodynamickém systému) nenasyceného vzduchu ($p_v < p_{vs}$) [13]:

$$h = [1.01 \cdot \theta + x(2500 + 1.84 \cdot \theta)] 10^3 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.7)$$

Hmotnostní průtok suché části vlhkého vzduchu lze vypočítat ze znalosti měrné vlhkosti x a hmotnostního průtoku vlhkého vzduchu M :

$$M_{H_2O} = M \cdot x \quad (4.8)$$

$$M_a = M - M_{H_2O} \quad (4.9)$$

4.1 Ohřívání a chlazení

Pro výpočet tepla dodaného (graf 4.1 stavy 1 a 2) nebo odebraného (graf 4.1 stavy 3 a 4) lze použít následující vztah, za předpokladu, že relativní vlhkost bude menší, než 100%, kdy vodní páry obsažené ve vzduchu nekondenzují, tudíž měrná vlhkost (dále x) zůstává stejná [13]. Při ohřívání ohřívačem nedochází ke změně x , avšak u chlazení můžeme dosáhnout rosného bodu (graf 4.1 stav 9) stav, kdy se x zmenší, popřípadě použitím rotačního rekuperátoru, ve kterém dochází při výměně vzduchu částečně ke změnám x . Ve výpočtech však tato situace není uvažována [13].

$$Q = M_a \cdot (h_2 - h_1) \quad \text{J/s} \quad (4.10)$$

M_a	hmotnostní průtok suchého vzduchu	(kg/s)
h_1	entalpie počáteční	(J/kg K)
h_2	entalpie konečná	(J/kg K)

4.2 Směšování

Dva proudy vlhkého vzduchu (různá měrná vlhkost, teplota a rychlost proudění), zpravidla venkovní a oběhový vzduch, se směšují ve směšovacím prostoru. Výsledný stav směsi je dán tepelnou a vlhkostní bilancí. M_{a1} je hmotnostní průtok suchého vzduchu - stav 4, M_{a2} - stav 5 z diagramu 4.1 [13].

$$M_{a1} \cdot x_1 + M_{a2} \cdot x_2 = (M_{a1} + M_{a2}) \cdot x_3 \quad (4.11)$$

$$M_{a1} \cdot h_1 + M_{a2} \cdot h_2 = (M_{a1} + M_{a2}) \cdot h_3 \quad (4.12)$$

M_{ax}	hmotnostní průtok suchého vzduchu	kg/s
x_x	měrná vlhkost	g/kg
h_x	entalpie	J/kg K

Koeficient směšování proudů vzduchu je dán poměrem objemových průtoků:

$$k_{smes} = \frac{M_{a2}}{M_{a3}} = \frac{M_{a2}}{M_{a1} + M_{a2}} \quad (4.13)$$

Výsledná entalpie, teplota a měrná vlhkost je úměrná rozdílu počátečních stavů, koeficientu směšování a stavu prvního proudu:

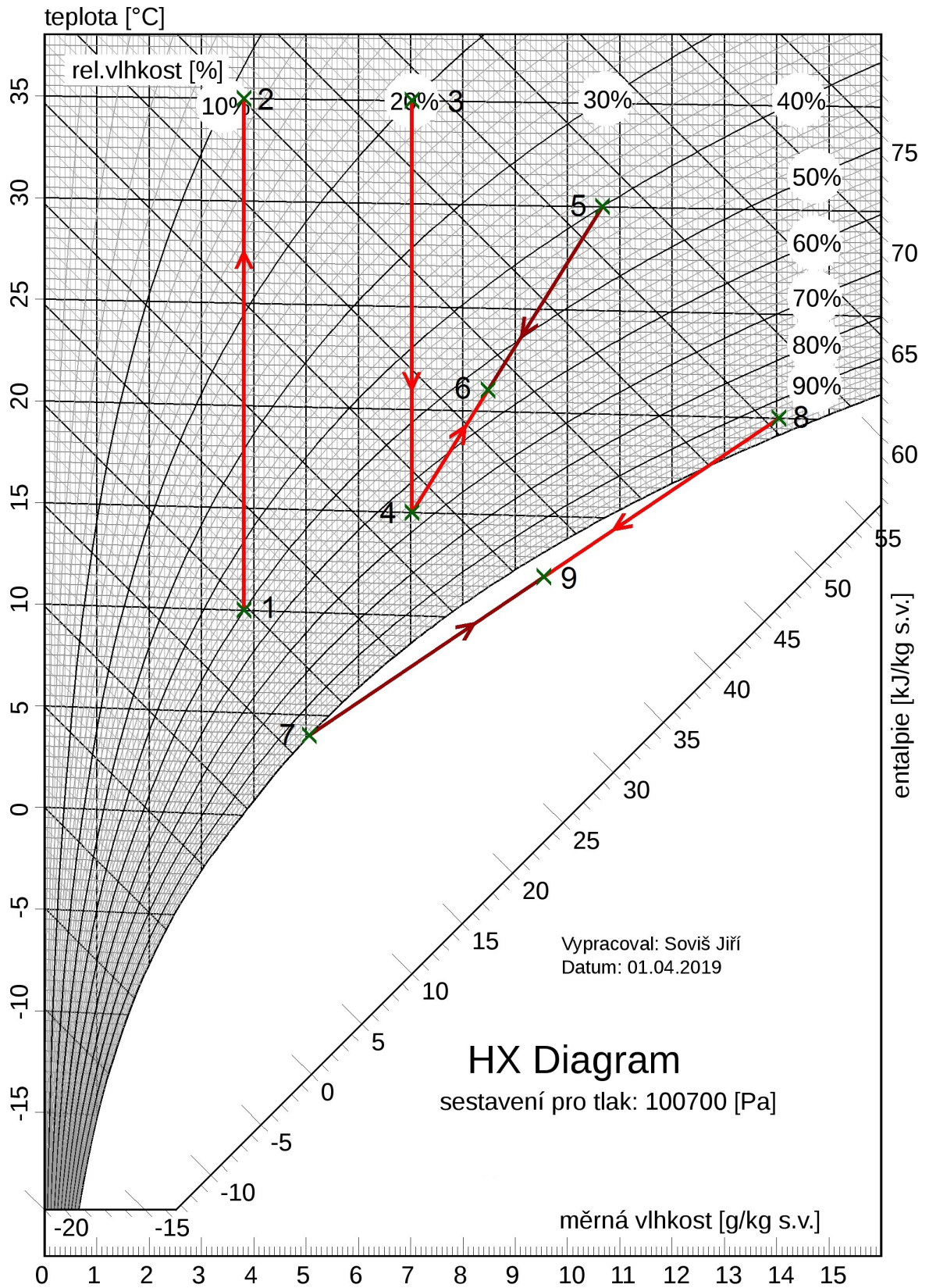
$$h_3 = h_1 + (h_2 - h_1) \cdot k_{smes} \quad (4.14)$$

$$x_3 = x_1 + (x_2 - x_1) \cdot k_{smes} \quad (4.15)$$

$$t_3 = t_1 + (t_2 - t_1) \cdot k_{smes} \quad (4.16)$$

4.3 Psychrometrický diagram

Jiným označením h-x diagram podle Molliera se rozumí grafická reprezentace závislosti mezi teplotou, relativní, měrnou vlhkostí a entalpií za stanoveného atmosférického tlaku [27]. Diagram je konstruován na kosoúhlých souřadnicích h-x(entalpie-měrná vlhkost). Entalpii lze určit přímo z diagramu a vytvořit si tak lepší představu o aktuálním stavu vzduchu. Pro automatizovaný výpočet to však není vhodná varianta. Proto jsou použity rovnice v této kapitole. V grafu 4.1 jsou vyneseny závislosti pro ohřev (stav 1,2), chlazení (3,4) a směšování (4,5,6), ze kterých lze zjistit, jakým způsobem se změnila relativní a měrná vlhkost, entalpie, teplota a zda bylo dosaženo rosného bodu.



Obr. 4.1: Hx-diagram ohřev, chlazení a směšování

5 Měření dat

V této kapitole je seznámení se způsobem měření dat v kompresorovně. Samostatné regulátory (kapitola 3.1) firmy Tronic Control totiž neumožňují záznam dat v delším časovém úseku (>1hod). Systém to umožňuje pouze s doplněním o počítač s vizualizačním programem. Tento způsob však nebyl zvolen, z důvodu instalace samostatného počítače, nastavování vizualizačního programu apod. Jelikož nebylo nutné mít přesnou periodu vzorkování, ale pouze orientační data, byla zvolena varianta vlastního datalogeru. Komunikační protokol se stanicí TX2032CX byl použit Modbus TCP/IP.

5.1 ModBus

Komunikační protokol vyvinutý firmou Modicon v roce 1979 uzpůsobený k přenášení dat mezi zařízeními (HMI, PLC, IO rozhraní) na různých sběrnících (Ethernet, RS485). Komunikace probíhá na základě odesílání žádostí a přijímání odpovědí na principu klient/server (master/slave). Protokol je navržen na aplikační vrstvě ISO OSI modelu. Existují varianty protokolu:

- Modbus TCP/IP - Ethernet, port 502
- Modbus RTU - asynchronní sériový přenos (RS485, RS232)

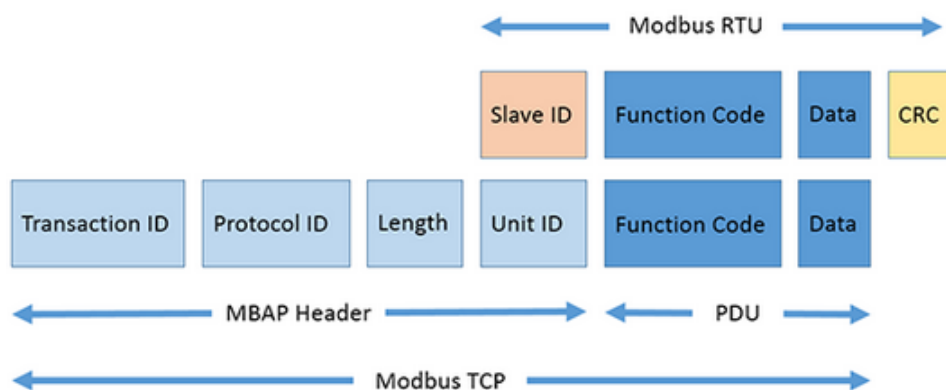
Zpráva protokolu Modbus TCP/IP se skládá z části zprávy protokolu Modbus RTU (odstraní se SlaveID a kontrolní součet CRC) a speciální hlavičky viz. obr. 5.1 [22].

- **TransactionID** - master nastaví 2 byty pro identifikaci požadavku. Mohou být libovolné. Zařízení slave vrací stejnou hodnotu bytů
- **ProtokolID** - master nastaví 2 byty (Modbus 0x0000)
- **Length** - master nastaví 2 byty (počet bajtů v následující zprávě). Počítá se od identifikátoru jednotky do konce zprávy.
- **UnitID** - master nastaví 1 bytovou adresu. Zařízení slave ho zopakuje.
- **FunctionCode** - Kód funkce, adresa prvního registru, počet registrů
- **Data** - data vrací slave vždy jako 2-bytovou hodnotu. Pro přenos 4-bytovou typu je možné hodnotu rozdělit do dvou registrů a poté je spojit zpět. Modbus však nedefinuje přesně, jakým způsobem je hodnota uložena v paměti (Little/Big endian).

Toto oficiální číslování registrů (tab. 5.2) není dodrženo u programovatelných stanic Tronic. Při nastavování komunikace na stanicích Tronic, jsou vybrány proměnné, vstupy a výstupy, které budou dostupné pro komunikaci. Číslování registrů je podle datových typů viz. tab. 5.3. Paměťový typ BOOL se chová jako coil (funkce 0x01, 0x05, 0x0F), ostatní se chovají jako registry (0x03, 0x06, 0x10).

kód	Název funkce	bitů	R/W	
0x01	readCoil	1	čtení	diskrétní výstup
0x03	readHoldingRegister	16	čtení	analogový výstup
0x05	writeSingleCoil	1	zápis	diskrétní výstup
0x06	writeSingleRegister	16	zápis	analogový výstup
0x0F	WriteMultipleCoils		zápis	více diskrétních výstupů
0x10	WriteMultipleRegisters		zápis	více analogových výstupů

Tab. 5.1: Výběr kódů funkcí [22]



Obr. 5.1: Modbus zpráva

Coil/Reg číslo	Typ	Název
1 - 9999	Read-Write	Diskrétní výstup (Coil)
10001 - 19999	Read-Only	Diskrétní vstup (Input)
30001 - 39999	Read-Only	Analogový vstup (Input register)
40001 - 49999	Read-Write	Analogový výstup (Holding register)

Tab. 5.2: Adresace dat [23]

Číslo registru	Typ	Název typu
0 - 1023	Read-Write	BOOL (1-bit)
1024 - 2047	Read-Write	FIXP (16-bit)
2048 - 3070	Read-Write	FLTP (32-bit)

Tab. 5.3: Adresace dat Tronic

5.1.1 Protokol TCP

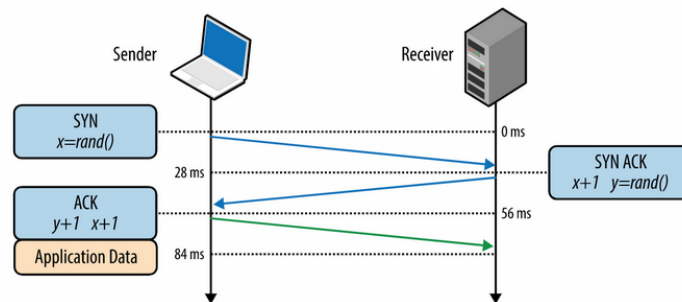
Transmission control protocol vytváří abstrakci spolehlivé sítě, která běží přes nespolehlivý kanál. Pracuje na 4. vrstvě ISO OSI modelu (Transportní vrstva), která

zajišťuje přenos dat mezi koncovými uzly. Protokol zajišťuje opakovaný přenos ztracených dat (integrita dat), kontrolu přetížení sítě apod, tzn. bude zaručeno, že odesílané byty budou identické s přijatými byty, a že dorazí ve stejném pořadí jako byly odeslány. Upřednostňuje se přesnost a spolehlivost dat, za cenu nižší rychlosti na rozdíl od protokolu UDP, který zajišťuje rychlý přenos s možností ztráty části dat.

3-way handshake

Pro navázání spojení mezi klientem a serverem musí proběhnout sekvence požadavků pro navázání spojení a potvrzení z obou stran, než lze začít s přenosem dat viz. 5.2.

- SYN - Klient vybere náhodné číslo x a odešle packet SYN obsahující příznaky a možnosti TCP (flag)
- SYN ACK - Server inkrementuje x o jeden, vybere vlastní pořadové číslo y , připojí vlastní sadu příznaků a možností (flag), odešle odpověď
- ACK - Klient zvýší x, y o jeden a dokončí navázání spojení odesláním zprávy ACK



Obr. 5.2: 3-way handshake [21]

5.2 Dataloger

Dataloger je vytvořený pomocí vývojového kitu Arduino mega2560, ethernetový shield s čipem w5100 a I^2C převodník pro znakový lcd displej. Byly využity standardní knihovny (Ethernet, Wire, SPI, SD), doplněné o LiquidCrystal_I2C [25], ModbusTCP [24].

Arduino je propojeno s ethernetovým shieldem pomocí rozhraní SPI (Serial peripheral interface). Jedná se o master/slave rozhraní, pro komunikaci mezi hlavním mikročipem a ostatními perifériemi. Rozhraní definuje 4 signály viz. tab 5.4. Na shieldu je kromě čipu i slot pro microSD kartu. Karta slouží jako úložiště měřených dat ve formátu CSV a RJ45 konektor pro připojení do lokální sítě (Dataloger - programovatelná stanice T2032CX). Nadstavbou knihovny Ethernet.h je knihovna

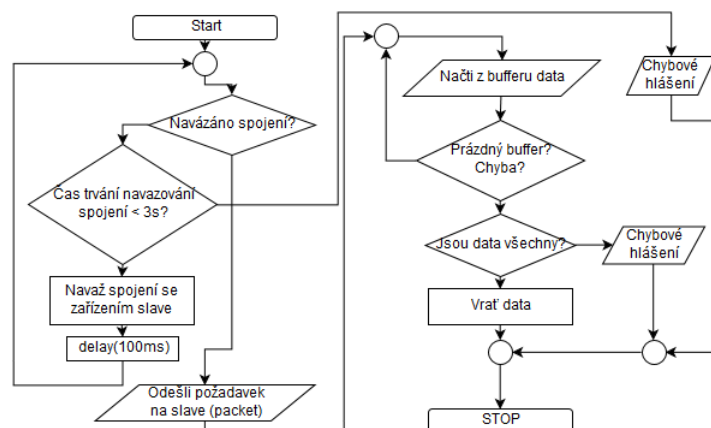
ModbusTCP.h, která implementuje veškeré části standartu Modbus TCP/IP. Pro komunikaci s LCD displejem, 4x20 znaků s paralelním 8-bit portem, byl použit I^2C převodník s čipem PCF8574T. V programu pro komunikaci byla využita knihovna LiquidCrystal_I2C.

MISO	Master in slave out	Dat ze slave na master
MOSI	Master out slave in	Data od master na slave
SCK	Serial clock	Hodinový signál generovaný mastrem
SS	Slave select	Signál pro každé zařízení k uvolnění komunikace

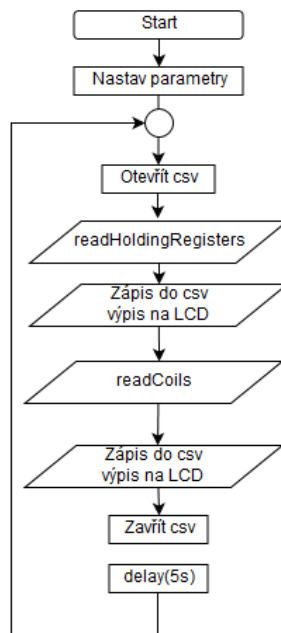
Tab. 5.4: Signály SPI

5.2.1 Program datalogeru

Na obrázku 5.4 je vývojový digram programu běžícím na Arduino. Program má inicializaci knihoven a hlavní smyčku, v které jsou prováděny dotazy na T2032CX, ukládání dat a výpis na LCD displej. V prvním kroku je otevřen soubor csv na microSD kartě, potom je volána funkce readHoldingRegisters(první registr, počet). Data z T2032CX jsou poté uložena do csv souboru. Pokud dojde k jakékoliv chybě v přenosu dat nebo chybě navázání spojení, vypíše se chybový kód na LCD. Co přesně znamená je k nalezení v hlavičkovém souboru ModbusTCP.h. V dalším kroku je volána funkce readCoils(první coil, počet). Provede se stejná procedura jako po funkci readHoldingRegisters, avšak na LCD se vypíše i zda byl celý průchod smyčkou v pořádku nebo ne. Zavře se soubor csv a následuje 5 sekund uspání mikroprocesoru. Poté se smyčka se opakuje. Diagram volaných funkcí knihovny ModbusTCP je na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Diagram funkce Modbus-TCP



Obr. 5.4: Diagram programu Datalogeru

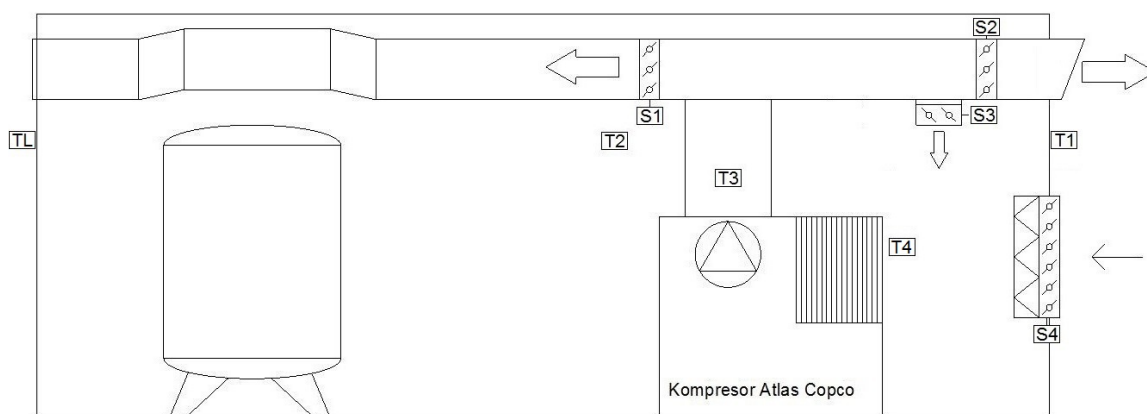
Veškeré naměřené data jsou probírána v kapitole 6.

6 Návrh řešení úlohy

Tato kapitola se zabývá popisem možností, jak využít odpadního tepla k udržení stálé vnitřní teploty kompresorovny s ohledem na provozní teplotu kompresoru, respektive návrhem na vylepšení stávajícího systému.

6.1 Kompresorovna

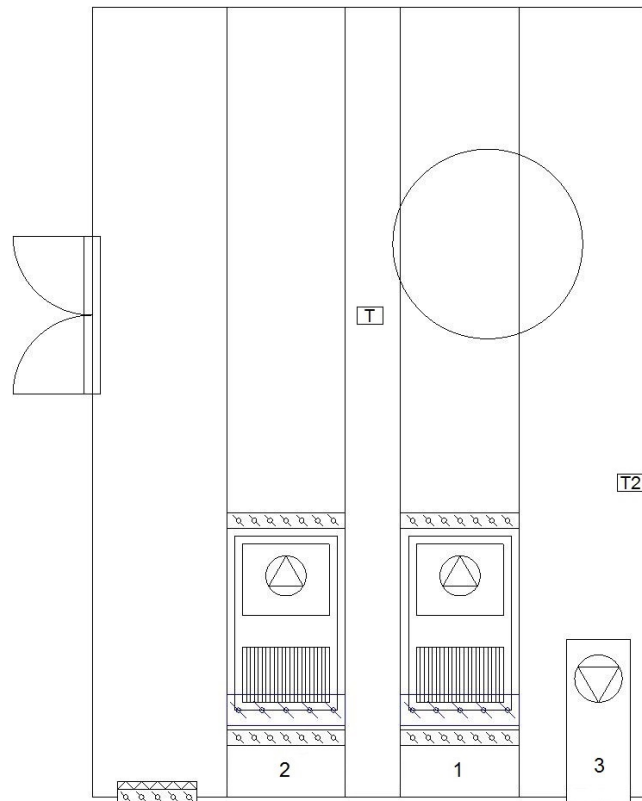
Jedná se o technickou místnost (10x7x4 m), ve které jsou umístěny dva průmyslové kompresory Atlas Copco (kompresor č.1 - GA55+ FF, č.2 - GA75VSD FF) a vzdušník (tlaková nádoba), viz. obr. 6.2. Jelikož kompresory v chodu, jsou značným zdrojem tepla, mají již z výroby vývod pro připojení obdélníkového potrubí (950x950 mm). V této práci nebude brán v úvahu, z důvodu dlouhodobého malého vytížení, slabší kompresor GA55+FF, jelikož nebylo možné změřit jeho parametry (při měření nebyl v chodu).



Obr. 6.1: Výkres - pohled ode dveří

Odpadní teplo je v tomto případě nezanedbatelný zdroj, se kterým je potřeba určitým způsobem naložit. Při dané situaci se nabízí možnost využít teplo ve prospěch vytápění samotné místnosti (klapka S3), popřípadě jej odvádět do výrobní haly (klapka S1), kde ale většinou není potřeba z důvodu velké výrobní linky, která produkuje svou činností značné množství tepla. Pokud se však linka rozjíždí po delší odstávce, popřípadě v zimním období, lze podpořit vytápění i teplem z kompresoru.

Vedení vzduchu je realizováno využitím standardních čtvercových plechových rour (rozměry obr. 2.1). Do vytvořeného vzduchového okruhu, je vyveden mazací olejový okruh a dochlazovač kompresoru (obr. 3.6 - zařízení 11,13). Roury jsou dostatečně izolovány standardním termoizolačním materiálem, proto po celém vedení dochází k velmi malým ztrátám tepla.



Obr. 6.2: Výkres - pohled shora

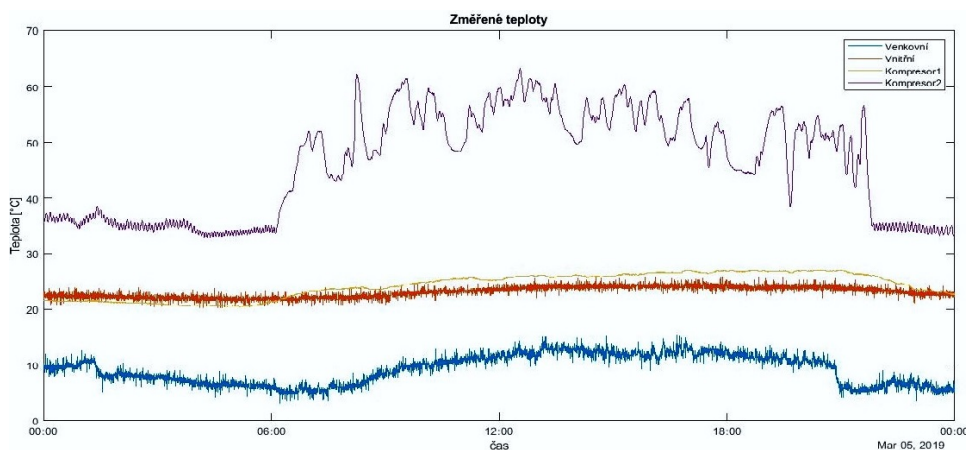
Na vzduchovém vedení jsou umístěny akční členy v podobě regulačních klapek (označení S), které jsou osazeny regulačními servopohony (lineární ovládání 0-10 V Belimo LM24A). Vyjímkou je přívodní klapka vzduchu z exteriéru (S4), která je osazena uzavíracím havarijním servopohonem (Belimo LF24). Na vstupních klapkách do místnosti jsou pytlivé filtry. Teplota je měřena snímači Ni1000 od firmy Sensit se strmostí 6180ppm, parametry viz. [8]. Původní snímače teploty jsou T1 a T2, ostatní označení je umístění až při provádění měření.

Přívodní vzduch je veden do chladiče kompresoru ze strany, společně s ohřátým (klapka S3). Směšovací část tvoří velký žebrovaný chladič kompresoru. Toto místo je hlavní aktor pro vnitřní teplotu kompresorovny (probíhá zde předávání tepla) a chlazení kompresoru. Odběrem tepla z rozhraní chladiče dochází k přírůstku teploty vzduchu a zároveň snížení teploty média v chladiči. Ohřátý vzduch je dále odváděn pomocí ventilátoru (obr. 3.6 - zařízení 12) do potrubí. Takto obohacený vzduch je dále distribuován podle potřeby na odvod (lakovna (S1), exteriér (S2)), popřípadě zpětně do místnosti (klapka S3). V místnosti je i přímý větrací okruh (obr. 6.2 - 3), který lze spustit v nouzových případech, kdy nebude možné udržet dostatečně nízkou teplotu na výstupu kompresoru nebo teplotu v místnosti.

6.1.1 Revize

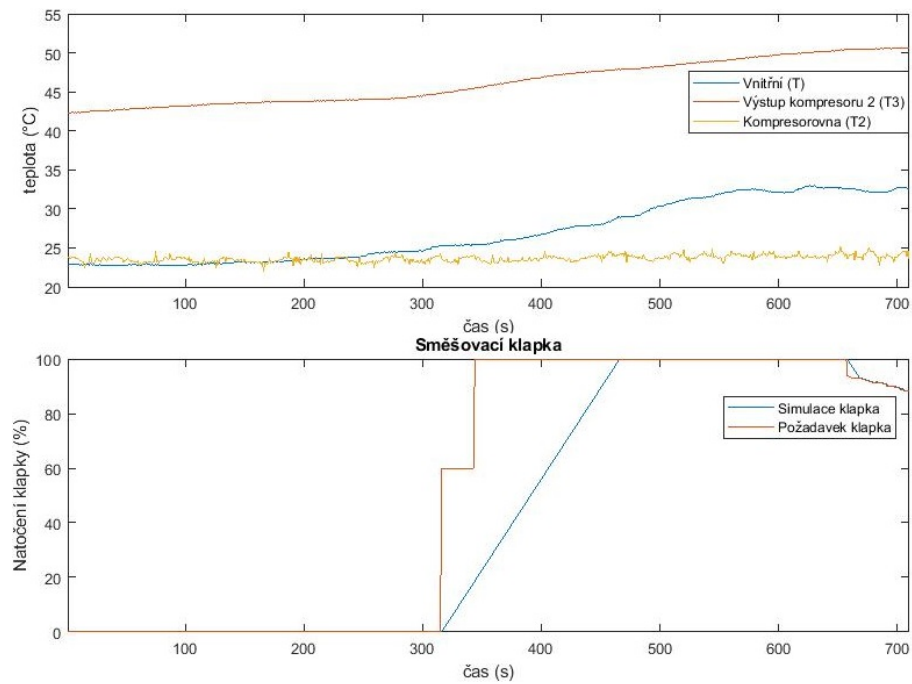
U stávajícího stavu byla shledána závada na vstupní klapce (S4 - kompresor č.1), kde byl uvolněn servopohon, tudíž vstupní klapka nebyla otvírána. Vzhledem k nižší četnosti chodu kompresoru č.1, nebyl tento problém tak velký, ale i přesto se jedná o havarijní stav. Dalším problémem byly vstupní pytlivé filtry, které nejsou osazeny snímačem diference tlaku, proto systém neupozornil na nadměrné zanesení veškerých vstupních filtrů. Díky těmto závadám vznikly kolem dveří prachové stopy v důsledku přísávání vzduchu z místnosti za dveřmi (lakovna). Netěsnost dveří však v havarijním stavu zajistila snížení podtlaku.

Ve dne 5.3. 2019 proběhlo měření pomocí datalogeru, které zmíněné problémy dokazuje, obr. 6.3. Směšovací klapka nebyla za celou dobu otevřena více než na 2%, což znamená, že veškerý nasávaný vzduch by měl být z venku a mělo by docházet ke snižování vnitřní teploty. To se však neděje, protože veškerý vzduch je nasáván přes dveře z prostor lakovny, kde je teplota $\pm 2^{\circ}\text{C}$ stejná, jako v kompresorovně. Dále graf ukazuje nadměrný šum superponovaný na průběhu vnitřní a venkovní teploty. Toto rušení však není způsobené vedením, jelikož nové teploměry (Kompresor1,2) byly připojeny na původní rezervní kabel JITY 4*1 mm, ve stejné trase. Ten žádné rušení nevykazuje. Teploměry ztratily své původní vlastnosti (stáří 5 let) a je nutné je vyměnit (minimálně vnitřní teploměr). Tento šum má návaznosti na regulovanou směšovací klapku, která díky minimálním změnám vnitřní teploty např. $0,5^{\circ}\text{C}$ vytváří mikropohyby servomotoru, který se tak rychleji opotřebovává.



Obr. 6.3: Naměřené teploty 5. 3. 2019

Nevhodné je i umístění teploměru (T2) pro měření vnitřní teploty. Pro ověření toho tvrzení byl přidán teploměr s označením T do středu místnosti (obr 6.2). Graf na obr. 6.4 ukazuje vliv otevření směšovací klapky na teplotu nově umístěného teploměru (T). Průběh teploty na původním teploměru T2 nemá téměř žádnou odezvu.



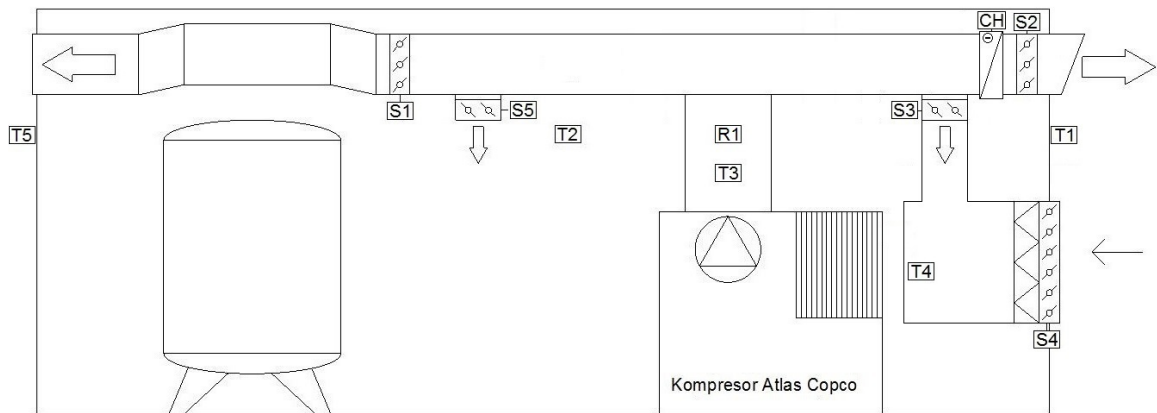
Obr. 6.4: Naměřené teploty v závislosti na směšovací klapce 18. 3. 2019

6.1.2 Řešení vzduchotechniky

Nynější řešení vzduchotechnického okruhu (obr. 6.1) je koncipováno pro využití odpadního tepla v rámci samotné místnosti. Návrh předpokládá nasávání venkovního vzduchu o teplotě T_1 smíšeného s výstupním vzduchem z kompresoru T_3 . Poměr je nastavován směšovací klapkou (S3). Minimální pracovní teplota kompresoru je 0°C (tab. 3.2). Proto je nutné udržet vstupní vzduch (T_4) na co nejnižší teplotě pro dostatečné chlazení avšak vyšší, než minimální pracovní. Pro regulaci vnitřní teploty je umístění směšovací klapky (S3) nevhodné, protože s otevíráním klapky bude nejenom stoupat teplota v místnosti, ale bude růst i teplota vstupujícího vzduchu do kompresoru, což zapříčiní zvyšování teploty elementů v kompresoru. Tento problém lze vidět na grafu obr. 6.4. Nahřívání vzduchu do kompresoru má smysl, pokud je velmi studený (mohlo by nastat namrzání částí kompresoru), ale popsáním řešením se ovlivňují dva systémy najednou, což znesnadňuje jejich optimální regulování.

Vhodnějším řešením je obr. 6.5. Přidáním klapky S5 lze ovlivňovat přímo teplotu místnosti (T_2) bez přímé vazby na kompresor (T_4), jako je to u výše popsaného řešení. Přidáním vzduchotechnického vedení za klapku S3 by došlo ještě k menším vazbám na teplotu místnosti a zároveň k lepšímu připravení vstupního vzduchu do kompresoru. Dalším využitím tepla z kompresoru je chladič (CH) na výstupu do exteriéru, který zužitkuje nevyužité teplo, převážně v období mimo zimy, na ohřívání vody do zásobníku pro např. sprchování v šatnách, umývání rukou. Snímač rychlosti R1 by nebyl pro chod tak důležitý, jako spíše při vytváření modelu, kdy

by dal přesnou představu o aktuálním průtoku. Snímač vlhkosti by byl vhodný pro přesnější výpočty, ale není danou úlohu klíčový. Docházet ke kondenzaci v zimě nebude, protože nahříváním vzduchu ke kondenzaci nedojde.



Obr. 6.5: Výkres - pohled shora

6.2 Tepelný model kompresorovny

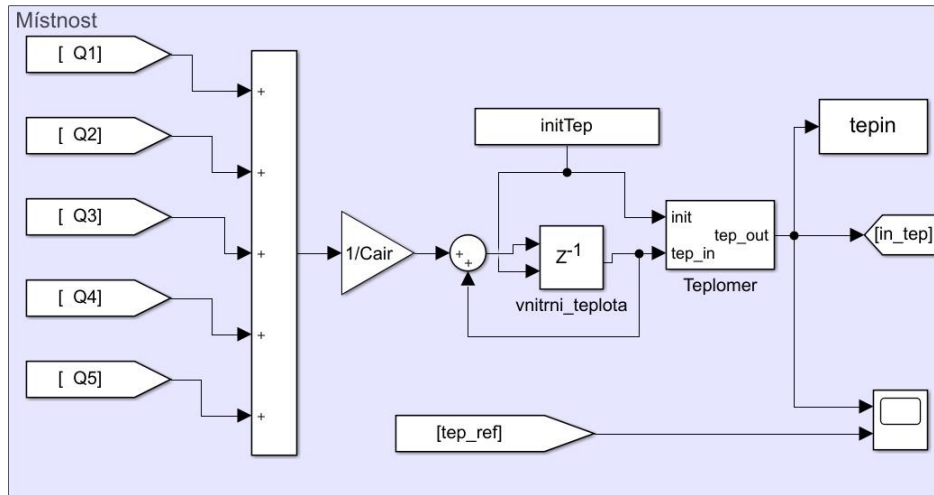
Model místnosti je vytvořen v prostředí Matlab/Simulink. Celý model je založen na standardních komponentech Simulinku. Bylo zváženo i použití rozšíření Simscape - Foundation library - Thermal, které je vhodné pro modelování základních přenosů tepla (vedení, proudění, záření), definovaných v kapitole 1.2.1. Jelikož v tomto modelu základní rovnice pro přenos tepla, zmíněné v uvedené kapitole, nejsou využívány, není toto rozšíření použito. Model se opírá hlavně o rovnice z kapitoly 4.

V modelu nebudou uvažovány ztráty tepla zdmi, vzduchotechnickým potrubím tak detailně, aby byly modelovány přesně po vrstvách, protože kompresor je velký zdroj tepla, kterým lze v místnosti během 10 minut zvednout teplotu o 7 °C. Model je tedy zaměřen na hlavní toky vzduchu, které dodávají největší množství tepla.

Problémem výpočtu dodávaného tepla je kompresor, který funguje samostatně na základě tlaku v tlakové nádobě. Kompresor č. 2 disponuje funkcí VSD, což umožňuje plynule regulovat množství stlačovaného vzduchu (kap. 3.4). Množství stlačovaného vzduchu, které je v čase proměnlivé. V modelu je provedena idealizace stálým průtokem 14 m^3/min . Průtok chladicího vzduchu skrz chladiče zajišťuje ventilátor, který je spínán v závislosti na teplotě v chladicím okruhu. O stavu kompresoru jsou však z původní instalace pouze tři signály: CHOD, STOP a PORUCHA. Chybí signál o chodu zmíněného ventilátoru, což znemožňuje mít informaci o aktuálním průtoku vzduchu. Proto byl průtok stanoven na hodnotu 15 m^3/min . Tato hodnota byla zprůměrována z měřených dat ručním anemometrem (GM8908 s přesností měření

hodnoty 5%) na směšovací plně otevřené klapce (S3) po dobu nárůstu teplot při měření průběhů, pro srovnání reálného chování s modelovým, obr. 6.12.

Základním prvkem modelu je samotná místnost (obr. 6.6). Je tvořena sumačním členem dílčích tepelných zisků a úbytků, násobené reciprokou hodnotou tepelné kapacity místnosti. Výstup ze zavazbeného bloku delay, který tvoří paměť pro teplotu, je přiveden do teploměru (tyčové provedení), který je modelován filtrem 1. řádu s časovou konstantou 5s (výrobce udává 1-9s [8]).



Obr. 6.6: Model místnosti

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{C_{místnost}} \{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5\} \quad (6.1)$$

$$Q_1 = M_{kompresor} \{V_k(t) (h_{vystupKomp} - h_{místnost}) + (1 - V_k(t)) (h_{místnost} - h_{exterier})\} \quad (6.2)$$

$$Q_2 = M_{kompres} (h_{místnost} - h_{exterier}) \quad (6.3)$$

$$Q_3 = M_{ventilator} (h_{exterier} - h_{místnost}) \quad (6.4)$$

$$Q_4 = M_{chlazeni} Reg(t) (h_{kompresor} - h_{místnost}) \quad (6.5)$$

$$Q_5 = \frac{T_{místnost} - T_{exterier}}{R_1} + \frac{T_{místnost} - T_{lakovna}}{R_2} \quad (6.6)$$

1...chladič kompresoru a výměna vzduchu z exteriéru, 2...vzduch pro kompresi, 3...ventilátor (3), 4...chlazení frekvenčního měniče odvod, 5...ztráty, $V_k(t)$

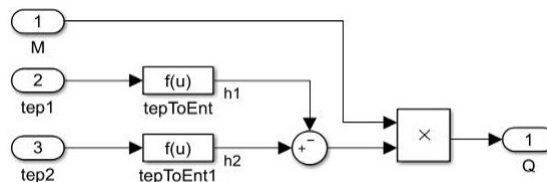
... natočení směšovací klapky, $Reg(t)$... logická hodnota regulátoru u frekvenčního měniče, h... entalpie.

$$\frac{dT_{kompresor}}{dt} = \frac{1}{C_{kompresor}} \{kQ_1 + kQ_2 - Q_4\} \quad (6.7)$$

$$Q_{kQ_1} = M_{chlazeni} Reg(t) (h_{mistnost} - h_{kompresor}) \quad (6.8)$$

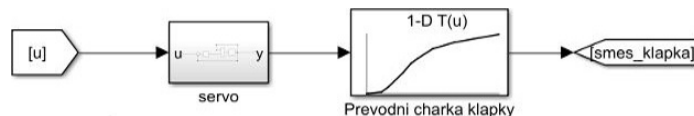
1... chlazení frekvenčního měniče přívod, 2... teplo frekvenčního měniče.

Hlavními prvky je subsystém pro výpočet dodaného tepla (obr. 6.7). Subsystém odpovídá rovnici ohřev, která je popsána v podkapitole 4.1.



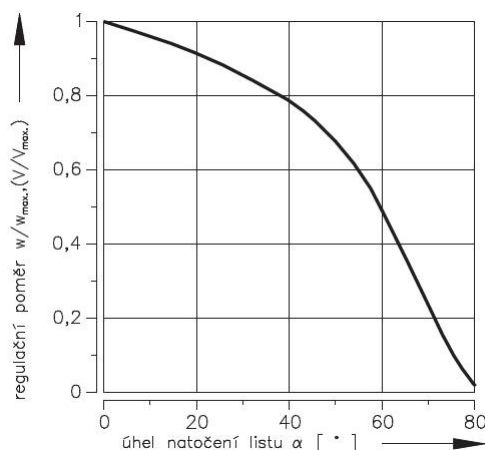
Obr. 6.7: Výpočet předávaného tepla

Model směšovací klapky je proveden pomocí vstupního subsystému servo, který modeluje lineární natočení klapky s časovou konstantou 150s pro přenastavení z jedné do druhé krají polohy [31]. Programovatelné stanice T2032 mají reprezentaci napěťového signálu 0-10V signálem 0-8000, resp. 0-100%. Z tohoto důvodu je v modelu zařazen i převod (1-D Lookup Table), který převádí natočení serva na poměr aktuálního a maximálního objemové průtoky (stanoveným průtokem chladičem 15 m^3/s), obr. 6.9.



Obr. 6.8: Model směšovací klapky

Veškeré průběhy teplot jsou v modelu realizované blokem Repeating Sequence Stair, který načítá vektor dat. Data byly měřené se vzorkovací periodou 1 sekunda. Změna teploty je tudíž nespojitá. Bylo možné využít blok Repeating Sequence Interpolated, který by nespojitost mezi hodnotami dopočítal metodou "Interpolating-Use End Values", ale vzorkovací perioda je dostatečně malá s ohledem na změny teploty, proto nebyl tento blok použit. Simulace byla nastavena na krok 1 sekunda.



Obr. 6.9: Převodní charakteristika směšovací klapky [32]

6.2.1 Implementace regulátoru

Programovatelné stanice T2032 implementují funkci pro diskretní verzi PID regulátoru. Při programování se volá jen funkce s parametry. Jedná se o verzi paralelního přírůstkového regulátoru popsaného rovnicí 6.11. Algoritmus tedy počítá diferenci akčního zásahu, kterou je potřeba na výstupu sumarizovat, viz obr 6.11. Tento princip regulátoru umožňuje omezovat rychlost prudkého nárůstu akčního zásahu díky saturaci difference. Lze tak dosáhnout plynulejší a pozvolnější přechod. Nicméně je tímto vložena do regulačního obvodu nelinearita, která znesnadňuje syntézu. Antiwind-up jev je řešen omezením akčního zásahu a saturací sumarizační složky.

$$de(k) = e(k) - e(k - 1) \tag{6.9}$$

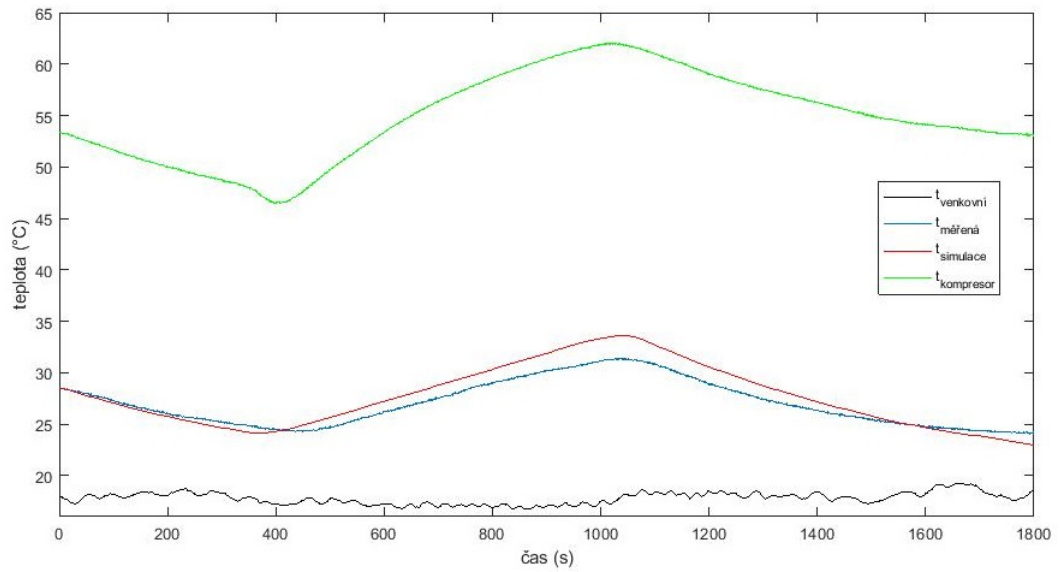
$$d2e(k) = e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2) \tag{6.10}$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) = Kde(k) + K \frac{T_{vz}}{T_i} e(k) + K \frac{T_d}{T_{vz}} d2e(k) \tag{6.11}$$

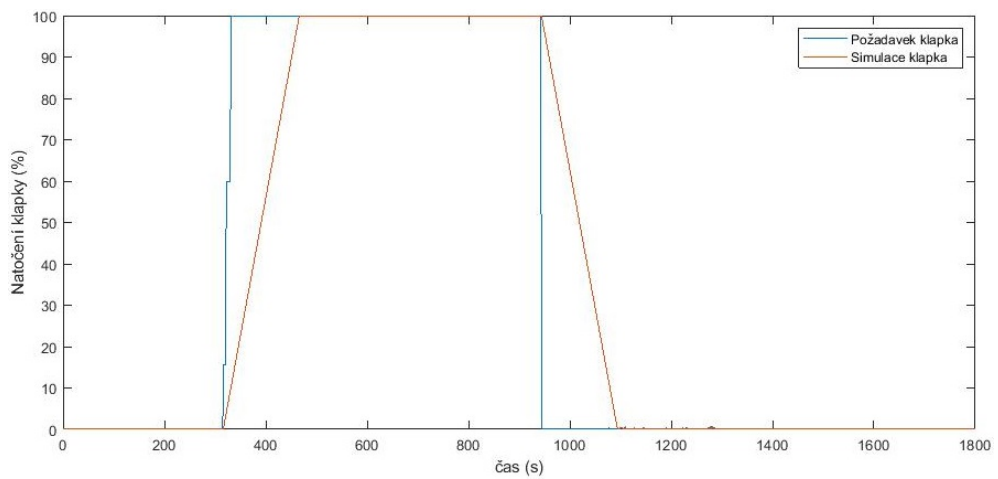
Reprezentace hodnot parametrů

označení parametru vnitřní reprezentace	implicitní reprezentace	označení řetězce vnější reprezentace	fyzikální rozměr
Kc(t)	Kc(t) < K	K	[1]
Ki(t)	Ki(t) < Kc(t)*Tv/Ti	Ti	[s]
Kd(t)	Kd(t) < Kc(t)*Td/Tv	Td	[s]

Obr. 6.10: Konstanty PID regulátoru Tronic



Obr. 6.12: Porovnání hodnot teplot v místnosti

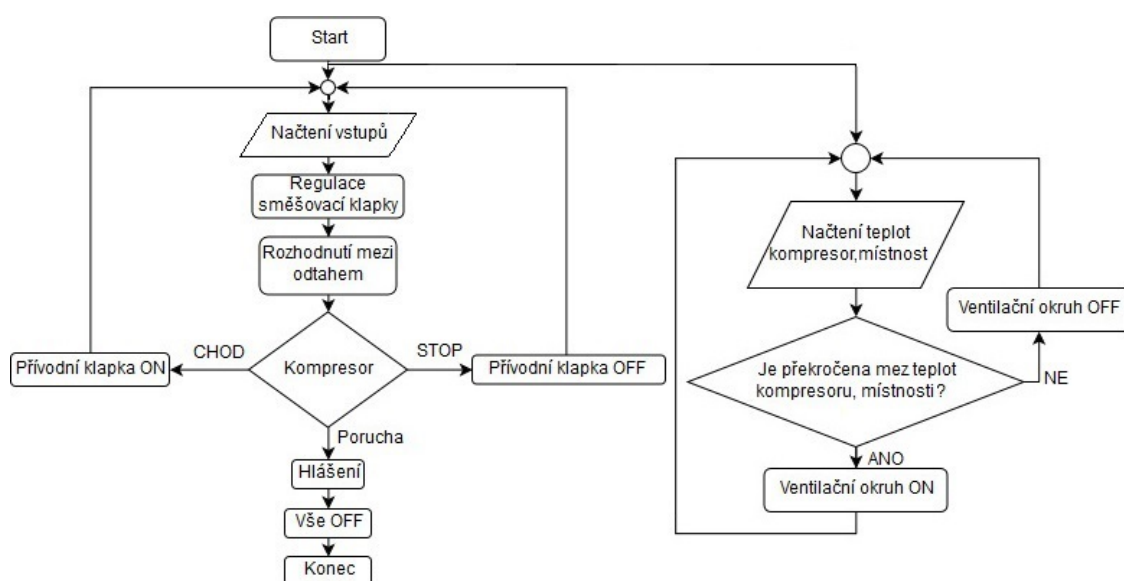


Obr. 6.13: Průběh nastavování klapky a ventilátoru

7 Algoritmus řízení

Kompresor samostatně ovládá množství stlačeného vzduchu na základě tlaku ve vzdušníku a průtok vzduchu skrz chladicí okruh. Funguje tedy samostatně. O stavu kompresoru jsou do řídicího systému přivedeny informační signály: CHOD, STOP a PORUCHA. Na základě aktuální teploty místnosti probíhá regulace na požadovanou teplotu. Teplotu místnosti ovlivňuje přímo směšovací klapka S3. Proto bude regulátor ovládat její natočení. To bude prováděno neustále, bez ohledu na chod kompresoru. Zařídí se tak částečná regulace teploty i mimo CHOD kompresoru. Z venku bude pronikat chlad zpětně skrz klapku S2 a S3. Proti směšovací klapce bude regulovaná inverzně klapka na odtah vzduchu (S1 a S2) (směšovací - 67%, odtah - 33%). O cestě vzduchu do exteriéru nebo do lakovny rozhoduje program řízení vzduchotechniky přímo pro lakovnu implementovaný na stejné programovatelné stanici. Vstupní klapka S4 bude otevírána se signálem CHOD. Při otevírání je časová rezerva daná objemem vzduchu v kompresorovně, aby nedošlo k velkému snížení tlaku v místnosti, což by kompresory vyhodnotili jako poruchu.

V případě vysoké teploty v místnosti bude spouštěn větrací okruh (3). Spouštění bude závislé na překročení nastavené teploty v místnosti nebo výstupní teploty kompresoru.



Obr. 7.1: Vývojový diagram

7.1 Návrh regulátoru

Součástí algoritmu je regulátor teploty prostoru kompresorovny (místnosti). Regulátor obsluhuje natočení směšovací klapky. Jelikož byl vypracován model, nabízí se použít k analýze regulátoru jedno z Integrální kritérií společně s metodou Nelder-Mead pro nalezení vhodných parametrů. Struktura regulátoru byla zvolena PI, jelikož je jednoduchá a nebude problém s derivační složkou. Implementovaný regulátor v programovatelných stanicích T2032 je bez filtrace derivační složky, tudíž by docházelo k zesilování rušivého signálu na vyšších frekvencích, které by zapříčinilo mikropohyby serva. Přechodový děj při použití PI regulátoru bude pomalejší, než s použitím D složky, ale stále dostatečný vzhledem k řešenému problému.

7.1.1 Integrální kritéria kvality regulace

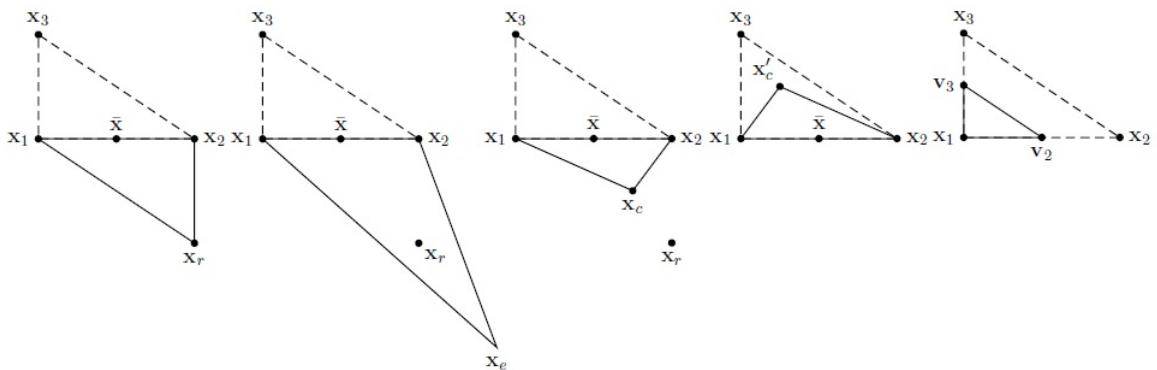
Při návrhu regulátorů je důležitá především ustálená odchylka po odeznění přechodného děje. Jedná se však o statickou vlastnost regulačního obvodu. Parametry, které charakterizují dynamické vlastnosti systému jsou rychlost odeznění, maximální překmit a kmitavost přechodného děje. Snahou je zvolit parametry regulátoru, které by dosáhly optimálních dynamických vlastností. K nalezení těchto vlastností jsou použity matematické kritériální funkce. Zvolené kritéria budou posuzovat dynamické vlastnosti pouze z hlediska odezvy v časové oblasti.

Vychází se z průběhu regulační odchylky $e(t)$, kterou získáme z odezvy regulačního obvodu na skokovou změnu žádané hodnoty. Z palety možných kritérií se nabízejí: lineární, usměrněné lineární, kvadratické a ITAE kritérium. Pro lineární kritérium je nutné aby byl systém aperiodický, což není vždy splněno. Docházelo by k situaci, kdy plochy pod osou $e(\infty)$ by se odečítali v případě záporných odchylek, čímž by se nesprávně snižovala hodnota kritéria. Tento problém řeší usměrněné kritérium, které používá místo rozdílu $[e(t)-e(\infty)]$ jeho absolutní hodnotu, tím se plochy pod osou $e(\infty)$ přičítají a logicky zhoršují hodnotu kritéria. Kvadratické kritérium zohledňuje váhu větších odchylek, které jsou vždy z počátku přechodného děje. Při minimalizaci kritéria dojde k tomu, že se systém snaží co nejrychleji vyeliminovat právě odchylky na počátku, což následně přináší relativně velký překmit a kmitavost odchylky, což je považováno jako nevýhoda toho kritéria. Tuto nevýhodu odstraňuje kritérium ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute value of Error), rovnice 7.1. Kritérium patří mezi váhová kritéria. Váha odchylky narůstá lineárně s časem. Díky této vlastnosti se jedná o vhodné kritérium pro tento úkol [6].

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t) - e(\infty)| t dt \quad (7.1)$$

7.1.2 Metoda Nelder-Mead

Metoda pro hledání minima funkce, která je založená na úpravách simplexu (útvary v n -rozměrném prostoru, složený z $n+1$ vrcholů) v prostoru parametrů funkce. Ve dvojrozměrném prostoru má útvar podobu trojúhelníka. Před započítím výpočtu je nutné vytvořit počáteční simplex. Ten je vytvořen zadáním odhadovaných parametrů. Během iterací se pak provádí úpravy simplexu - reflexe, expanze, kontrakce a smrštění. Iterace se opakují, dokud není dosaženo ukončovacích podmínek (velikost simplexu klesne pod zvolenou velikost). Tato metoda nezajišťuje nalezení globálního minima. Z toho důvodu je nutné zvolit počáteční minimum blízko skutečného minima funkce, jinak funkce nemusí dokonvergovat k minimu. Metoda Nelder-Mead je v prostředí Matlab implementována pod názvem funkce `fminsearch` [7].



Obr. 7.2: Úpravy Nelder-Mead simplexu [7]

reflexe (x_r), expanze (x_e), vnější kontrakce (x_c), vnitřní kontrakce (x_c'), smrštění

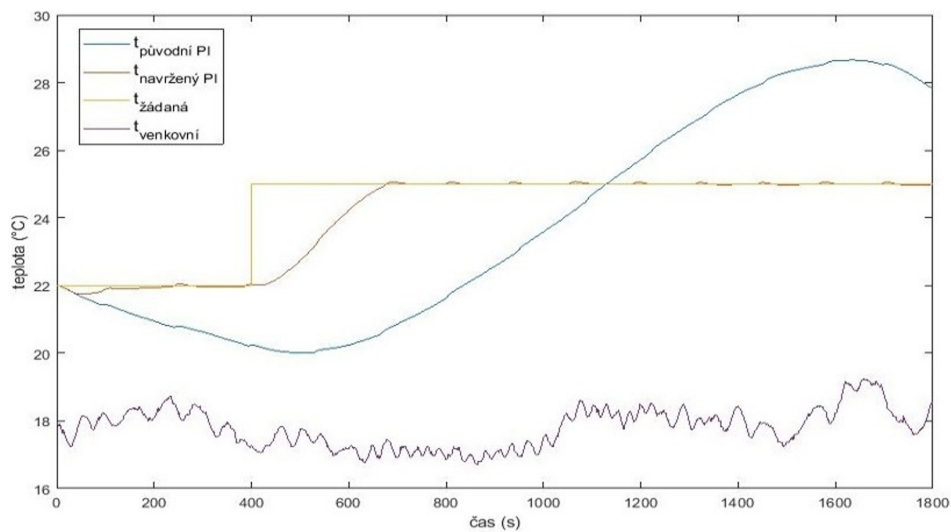
7.1.3 Syntéza regulátoru

Použitím naprogramovaných funkcí v Matlabu `regulator.m` a `kriteria.m` byla provedena simulace na vytvořeném modelu. Jádru PI regulátoru je implementován podle rovnic 7.2, 7.3. Pro prvotní odhad byly zvoleny konstanty $K = 100$ a $T_i = 30$, protože při volbě $K = 1$ metoda selhala. Výsledný regulátor má podle ITAE kritéria parametry $K = 142.8$, $T_i = 88.7$. Navržený regulátor podle předpokladu vykazuje řádově lepší odezvu na jednotkový skok, než je tomu u původního s konstantami $K = 1$, $T_i = 30$. Vzorkovací perioda v obou případech je 1 sekunda.

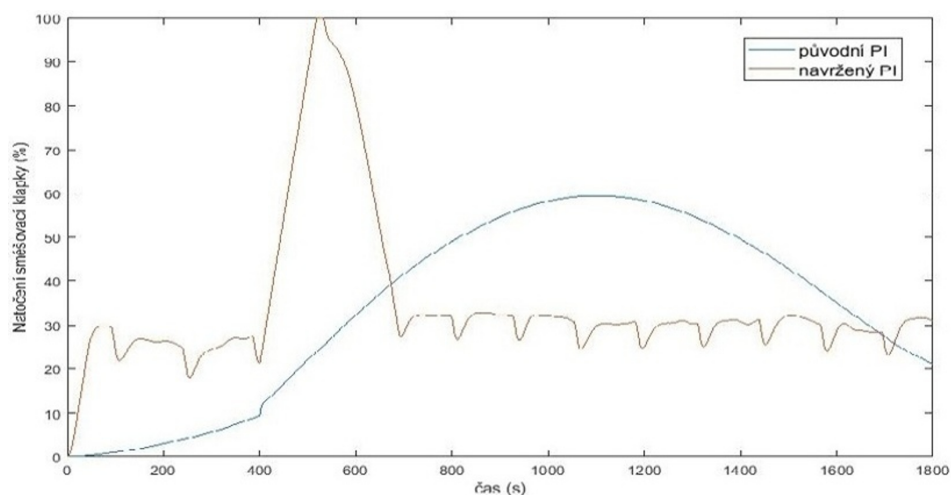
$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = Kde(k) + K \frac{T_v z}{T_i} e(k) \quad (7.2)$$

$$u(k) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u(k) \quad (7.3)$$

Porovnáním odezev regulátorů na jednotkový skok lze sledovat výrazné zlepšení regulačního děje, obr. 7.3, 7.4. Původní regulátor vykazuje řádově horší kvality z důvodu malého zesílení regulační odchylky, což má za následek pomalou integraci regulační odchylky. Výsledný průběh je pomalý a vykazuje velký překmit, protože se integrační složka nestihne rychle odintegrovat. Původní návrh regulátoru byl proveden odhadem na základě předpokladu chování soustavy, a poté doladěním podle odezvy. Jelikož se ale ukázalo nevhodné umístění původního snímače vnitřní teploty, viz. kapitola 6.1.1, návrh byl už tehdy velmi zkreslený. Nový regulátor vykazuje velmi rychlý přechodový děj, bez znatelného překmitu. Je daleko agresivnější, což naznačuje přechodový děj obr. 7.3.



Obr. 7.3: Odezva na jednotkový skok teploty



Obr. 7.4: Akční zásah regulátorů pro odezvu na jednotkový skok teploty

8 Závěr

Práce se zabývá problematikou regulace teploty v uzavřených místnostech, termodynamikou ve smyslu výpočtů, které jsou popsány v kapitolách 1 a 4, rozptylováním vzduchu a měřením veličin v místnosti potřebných pro udržení optimálního klimatu. K měření veličin je v podkapitole 1.2.3 část, věnující se doporučení pro umístění snímačů.

Z hlediska technologických prostředků používaných v oblasti řešené úlohy je část práce věnovaná rešerši. Obsahem jsou programovatelné regulátory firmy Tronic Control s.r.o., snímače (teploty, vlhkosti, tlaku), akční členy (Servopohony, ventilátory, ohřev, chlazení a vlhčení), kompresory Atlas Copco.

U návrhu řešení regulace teploty v místnosti pomocí ztrátového tepla kompresoru je podrobně popsáno původní řešení instalovaných technologií. Jsou zmíněny vlastnosti, které instalované řešení přináší. V návaznosti na problematické místa původní instalace bylo vypracováno řešení druhé, viz. kapitola 6.1.2. Zlepšuje využití ztrátového tepla, přidáním chladiče a okruhu pro ohřev vody, do které je možné teplo ukládat. Toto vylepšení bude nejvíce efektivní zejména v období léta, kdy je venkovní teplota vyšší a není potřeba vytápět místnost. Podobné řešení jsou již v jiných firmách využívána a dokáží vytvořit úsporu, během životnosti dané instalace, která investici pokryje. Vylepšení se však do takové míry neuskutečnilo. V rámci této práce došlo k odstranění vad nynější instalace. Proběhla kontrola všech komponentů instalace, výměna filtrů a oprava přichycení zmíněného servopohonu na vstupní klapce (S4 kompresor č.1). Byl přemístěn snímač teploty místnosti a přidán teploměr T3. Dále byl technik poučen o pravidelných výměnách filtrů, aby nedocházelo ke vzniku podtlaku v místnosti. Zásadní úpravy v podobě přepracování vzduchotechnického vedení neproběhly, protože by se musela omezit výroba, což zákazník neschválil. Nicméně vylepšené řešení systému pro zužitkování odpadního tepla poslouží v budoucnu jako podklad v dalších instalacích podobného systému.

Pro měření dat byl vytvořen vlastní Dataloger na vývojovém kitu Arduino Mega 2560. Protokol ModBusTCP umožnil navázat komunikaci na rozhraní Ethernet se stanicí T3032CX a měřit tak dlouhodobě průběhy veličin v kompresorovně. Použití datalogeru bylo v rané fázi této práce, tudíž ukázalo problémové části místní instalace, ale nebylo možné data dále použít pro návrh modelu, z důvodu zmíněných vlastností kompresoru. Pro další měření tudíž nebyl dataloger použit. Na místo toho bylo použito programovací prostředí WinLeda, které umožnilo měřit průběhy po dobu maximálně 1 hodiny.

Při návrhu algoritmu řízení byl vytvořen tepelný model v prostředí Matlab/-Simulink s použitím nabytých znalostí v popsáních kapitolách termodynamiky. Model byl vytvořen na základě provedených měření. Vzhledem k tomu, že kompresory

obsahují vlastní řídicí elektroniku a není do systému vzduchotechniky přivedeno dostatečné množství informací o průtocích vzduchu, nebylo možné model detailně sestavit, proto je do jisté míry idealizovaný. Hlavně ze strany dynamiky proudění v místnosti, gradientu teploty v místnosti (předpokládá se všude stejná teplota) a objemových průtoků, které byly nastavovány podle místního měření příručními přístroji. I přes to však simulované průběhy rámcově odpovídá reálnému měření. Model obsahuje veškeré významné zdroje tepla a chladu, které ovlivňují klima v místnosti. Na základě tohoto modelu byl pomocí váhového kritéria ITAE a metody Neelder-Mead navržen nad implementovanou strukturou přírůstkového regulátoru v programovatelných stanicích PI regulátor.

Nově navržený regulátor vykazuje očekávané řádově lepší dynamické vlastnosti oproti původnímu. Původní regulátor díky malému zesílení vykazuje velmi pomalý přechodový děj, z důvodu pomalých změn integrační složky. Dále se objevuje i značný překmit, protože se integrační složka nestihne rychle odintegrovávat. Původní návrh regulátoru byl proveden odhadem na základě vlastností soustavy a poté doladěním podle odezvy. Jelikož se ale ukázalo nevhodné umístění původního snímače vnitřní teploty, viz. kapitola 6.1.1, návrh byl podle odezvy na jednotkový skok velmi zkreslený. Nový regulátor vykazuje velmi rychlý přechodový děj bez znatelného překmitu. Je daleko agresivnější, což naznačuje přechodový děj. Mírné kmitání v modelu však vyregulovává spolehlivě.

Tato práce nabídla pohled do reálného prostředí a na způsob jakým se přistupuje k úlohám tohoto typu. Byla to velmi dobrá zkušenost, hlavně z pohledu, robustnosti provedení, s ohledem na dlouhou vydrž, bez jakékoliv nutnosti zásahu. Úloha byla vypracovávána u zákazníka firmy Tronic Control s.r.o.

Literatura

- [1] Tronic Control, s. r. o. *Uživatelská příručka, Programovatelná řídicí stanice T2032CX* [online],[cit. 22. 10. 2018]. Dostupné z URL:
<<http://tronic.cz/file/541/T2032CX-UM.pdf/>>.
- [2] Tronic Control, s. r. o. *Ceník T2032CX*. [online]. Vestec u Prahy [cit. 2018-12-30]. Dostupné z:
<<http://tronic.cz/TRONIC-T2032CX>>
- [3] Tronic Control, s. r. o. *Uživatelská příručka, Programovatelná řídicí stanice T2032EX* [online],[cit. 22. 10. 2018]. Dostupné z URL:
<<http://www.tronic.cz/file/d51/T2032EX-UM-1.pdf/>>.
- [4] Tronic Control, s. r. o. *Uživatelská příručka, Přídavné moduly* [online],[cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z URL:
<<http://tronic.cz/file/441/1413742538wpdm-T32EX-pm-UM-1.pdf>>
- [5] BENEŠ,Pavel a spol. *Automatizace a automatizační technika: prostředky automatizační techniky*. 5. rozšířené a aktualizované vydání. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-3747-8
- [6] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní*. Brno, 2017 [cit. 2019-01-14]. Vysoké učení technické Brno, fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] ŠOLC, František, Pavel VÁCLAVEK a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace II: Analýza a řízení nelineárních systémů*. Brno, 2011 [cit. 2019-01-14]. Vysoké učení technické Brno, fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [8] SENSIT s.r.o. *Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřící a regulační techniky*. [online]. 8. vydání, Červenec 2017 [cit. 23. 10. 2018] Dostupné z URL:
<<http://www.sensit.cz/cz/download/1404047381/?at=1/>>.
- [9] DWYER INSTRUMENTS, INC. *HVAC DIFFERENTIAL PRESSURE SWITCHES: With Dual Scale Field Adjustable Set Point Knob* [online]. 2018 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z:
<http://www.dwyer-inst.com/PDF_files/ADPS_EDPS_i_2019.pdf>
- [10] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.

- [11] DRKAL, František, Miloš LAIN a Vladimír ZMRHAL. *Vzduchotechnika* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2009 [cit. 2018-12-23].
- [12] DRKAL, František, Miloš LAIN, Jan SCHWARZER a Vladimír ZMRHAL. *Klimatizace a průmyslová vzduchotechnika* [online]. Praha: Evropský sociální fond, 2009 [cit. 2018-12-28].
- [13] DRKAL, František a Vladimír ZMRHAL. *Větrání* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2013 [cit. 2018-12-30]. ISBN 978-800-1051-818.
- [14] CIHELKA, Jaromír, Jaroslav BRADNA a Jan ČERMÁK. *Vytápění a větrání*. 1969. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1969.
- [15] Jan Vidim. *Měření prostorové teploty a instalace čidel* [online]. In: . Bratislava: Domat Control System, 2010, s. 3 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: https://domat-int.com/wp-content/uploads/2010_07_IDB_Mereni_prostorove_teploty.pdf
- [16] *Montáž čidel: Landis&Gyr spol. s.r.o.* [online]. In: . 1992, s. 43 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: https://w5.siemens.com/web/sk/sk/produkty_sluzby/technologie-budov/katalogove-listy/Ostatnenavody_na_obsahu_montaz/montaz_snimacov.pdf
- [17] VIDIM, Jan. *Měření kvality vzduchu a CO₂ v interiérech: Řídící, měřicí a regulační technika* [online]. 2013 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: https://domat-int.com/wp-content/uploads/2013_05_TZB_Haustechnik_Mereni_kvality_vzduchu.pdf
- [18] PROTRONIX, S.R.O. *Měření oxidu uhličitého v budovách. Tzbinfo: větrání* [online]. 2009, 10.8.2009 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitřni-prostredi/5827-pracujete-ve-zdravem-prostredi>
- [19] LAJČÍKOVÁ, Ariana a Zuzana MATHAUSEROVÁ. *Vytápění a tepelná pohoda* [online]. Státní zdravotní ústav, 2009 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/czzp/edice/plne_znani/plakaty/VYTAPENI_A_TPELNA_POHODA_verze_pro_web_SZU.pdf
- [20] ESKRIDGE, R.E. a O.A. ALDUCHOV. *Improved Magnus' form approximation of saturation vapor pressure* [online]. Department of Commerce, Asheville, NC (United States), 1997, 1997-11-01 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/548871>

- [21] GRIGORIK, Ilya. *Three-Way Handshake*. In: High Performance Browser Networking [online]. 2013, [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <<https://hpbn.co/building-blocks-of-tcp/>>
- [22] *Podrobný popis protokolu modbus tcp*. In: Ipc2u [online]. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <<https://ipc2u.cz/articles/simple-decisions/podrobny-popis-protokolu-modbus-tcp-s-priklady-prikazu/>>
- [23] *Frequently Asked Questions*. In: Simply modbus [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <<http://www.simplymodbus.ca/FAQ.htm>>
- [24] DEHURY, Narendra. *Modbus-TCP: Modbus TCP client library to interact with Modbus servers such as PLCs*. In: GitHub [online]. 2017 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <<https://github.com/goddlan16/Modbus-TCP>>
- [25] BRABANDER, Frank. *Arduino-LiquidCrystal-I2C-library: Library for the LiquidCrystal LCD display connected to an Arduino board*. In: GidHub [online]. 2018 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <<https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library>>
- [26] *Air density*. In: Omnicalculator [online]. Omni Calculator sp. z o.o. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <<https://www.omnicalculator.com/physics/air-density#how-to-calculate-the-air-density>>
- [27] *Mollier Diagram*. In: Engineering ToolBox [online]. 2003 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html>
- [28] *Leták GA 75-110 VSD+*. In: Atlas Copco [online]. 2017 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.stlactenaklady.cz/download/405/letak_ga_75-110_vsd.pdf>
- [29] *Atlas Copco GA37 - GA90 VSD*. In: Januška kompresory [online]. 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <<https://www.kompres.cz/kompresor/sroubove-kompresory/sroubove-kompresory-atlas-copco/rada-ga37-ga90-vsd-37-90-kw>>

- [30] *Atlas Copco GA55 - GA90*. In: Januška kompresory [online]. 2015 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z:
<<https://www.kompres.cz/kompresor/sroubove-kompresory/sroubove-kompresory-atlas-copco/rada-ga55-90-55-90-kw>>
- [31] *Klapkový pohon LM24A: Technický list*. In: Belimo [online]. 2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z:
<https://www.belimo.cz/store/lm24a_cz_v1_2.pdf>
- [32] *RKTM 400x1000: čtyřhranná regulační těsná klapka*. In: Ventilatory.cz [online]. 2016 [cit. 2019-04-9]. Dostupné z:
<<https://www.ventilatory.net/media/catalog/product/data/rktm-regulacni-klapka.pdf>>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

MaR	Měření a regulace – Measurement and control
T	Teplota v kelvinově stupnici - K
θ	Teplota v celsiově stupnici - °C
2W	Dvou vodičové měření
4W	Čtyřvodičové měření
ppm	Částic na jeden milion – Parts per million
HVAC	heating, ventilation and air conditioning
PDU	Protokolová datová jednotka – Protocol data unit
R./W	čtení/zápis – read/write

Seznam příloh

1. Elektronická verze bakalářské práce
2. Tepelný model místnosti v programu Matlab, včetně inicializačních souborů
3. Zdrojové kódy úprav v kontroléru
4. Zdrojový kód datalogeru
5. Původní projekt řešení kompresorovny