

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Návrh systému úpravy vzduchu pro drážní vozidla

Bc. Tomáš Dostál

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky

Fakulta mechatroniky
a mezioborových inženýrských studií

Technická univerzita v Liberci
Studentská 2, 461 17 Liberec 1

Školitel: Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
Konzultant: Ing. Vladimír Smolík
Ing. Vladimír Šáfr

Rozsah diplomové práce:

Počet stran: 57

Počet obrázků: 20

Počet tabulek: 4

Zadání

– sem se dá ten list (ORIGINÁLNÍ) při vazbě!!!

Abstrakt

Návrh systému úpravy vzduchu pro drážní vozidla

Diplomová práce se zabývá systémem úpravy vzduchu brzdného systému kolejových vozidel, PSA adsorpcí a praktickým ověřením funkčnosti systému pomocí měření s daným adsorbentem. V práci je uveden koncept řešení nové sušičky, volba jednotlivých částí zařízení, výběr řídicího systému, program pro ovládání ventilů a návrh konstrukčního řešení.

Tomáš Dostál

Abstract

Project of air treatment system for railway vehicles

This thesis deals with the drying air treatment system, brake system of railway vehicles, PSA adsorption and practical verification of the functionality of the system, using measurements of an adsorbent. The thesis presents a new approach to tackling the dryer, the choice of the various parts, the selection of the control system and program for controlling valves and construction draft.

Tomáš Dostál

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 6.5.2010

Podpis

.....
Tomáš Dostál

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. a konzultantům Ing. Vladimíru Smolíkovi, Ing. Vladimíru Šádrovi a jejím kolegům z firmy MONDO s.r.o. za podněty a rady, které mi pomohly při řešení úkolů diplomové práce.

Obsah

<i>Obsah</i>	8
<i>Seznam použitých symbolů</i>	10
<i>Seznam obrázků</i>	11
<i>Seznam grafů a tabulek</i>	12
<i>Úvod</i>	13
1 Brzdňý systém kolejových vozidel	14
1.1 Historie brzdňých systémů kolejových vozidel	14
1.2. Současný brzdňý systém	14
2 Kompresa vzduchu	15
2.1 Základní rozdělení kompresorů	16
2.2 Porovnání křídlových kompresorů se šroubovými	16
2.2.1 Popis funkce křídlového kompresoru	16
2.2.2 Popis funkce šroubového kompresoru	16
2.2.3 Shodné části	17
2.2.4 Objemová účinnost	17
2.2.5 Spotřeba energie	17
2.2.6 Chlazení vzduchu během stlačování	18
2.2.7 Mechanické ztráty výkonu	18
2.3 Konstrukce křídlového kompresoru	19
3 Problematika úpravy stlačeného vzduchu	20
3.1 Filtry	21
3.2 Sušení	24
3.2.1 Princip sušení – adsorpce	24
3.2.2 Princip PSA adsorpce (Pressure swing adsorption)	27
3.2.3 Adsorpční materiály	27
3.2.4 Rosný bod	29
3.3 Sušička stlačeného vzduchu pro kolejová vozidla	30
3.3.1 Princip činnosti	30
3.3.2 Vlastnosti stávající sušičky	30
3.4 Výběr adsorbentu	31
4 Praktická měření	31

4.1 Popis použitých měřících snímačů a přístrojů	34
4.2 Vlastní měření	38
5 Koncept nové sušičky	46
5.1 Výběr ventilů a komponent pneumatického obvodu	46
5.1.1 Výběr solenoidových ventilů	47
5.1.2 Výběr filtrů pro ochranu ventilů	48
5.1.4 Výběr tlumiče odfuku	49
5.2 Řídicí systém – SIEMENS LOGO!	49
5.2.1 Program pro ovládání ventilů	51
5.3 Návrh konstrukčního řešení	53
Závěr	55
Literatura	56

Seznam použitých symbolů

Δp	[bar]	tlaková ztráta
p_1	[bar]	tlak před sušičkou
p_2	[bar]	tlak za sušičkou
p_a^*	[bar]	parciální tlak složky A
x_a	[g/m ³]	koncentrace složky A
t_d	[°C]	teplotní deficit
t_o	[°C]	teplota okolí
t	[s]	čas
Q	[Nm ³ /hod.]	průtok vzduchu
ϕ	[%]	relativní vlhkost
r_b	[°C]	teplota rosného bodu

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma rotačního kompresoru	20
Obrázek 2: Filtry Hankison	22
Obrázek 3: Hystereze adsorpční izotermy	25
Obrázek 4: Adsorpční vlna	26
Obrázek 5: Schéma zapojení měřících přístrojů do systému úpravy vzduchu pro brzdný systém	32
Obrázek 6: Skutečná měřící linka	33
Obrázek 7: Skutečná měřící linka	33
Obrázek 8: Měřicí ústředna HP 34970 A	34
Obrázek 9: Převodník Agilent 82357	34
Obrázek 10: Snímač ZPA UNIPRESS 81 11481	35
Obrázek 11: Snímač COMET T0213	36
Obrázek 12: Měřicí čidlo CRESSTO TMDG 518 Z3H	36
Obrázek 13: Průtokoměr KROHNE WFM 3100 W-T	37
Obrázek 14: Snímač teploty rosného bodu TESTO FA 200-2	37
Obrázek 15: Schéma zapojení komponent sušičky	47
Obrázek 16: Solenoidový ventil ASCO SCG287A004	48
Obrázek 17: Schéma zapojení řídicího obvodu SIEMENS LOGO! a jištění	50
Obrázek 18: Schéma programu v softwaru LOGO!soft spolu se zprávou o hodinách zbývajících do servisní kontroly	52
Obrázek 19: Konstrukční řešení rozvaděče s ventily a s řídicím obvodem	53
Obrázek 20: Vstupy a výstupy z rozvaděče	54

Seznam grafů a tabulek

Graf 1: Obsah vodních par ve vzduchu v závislosti na teplotě rosného bodu	29
Graf 2: Průběh teploty okolí v závislosti na čase	41
Graf 3: Průběh relativní vlhkosti v závislosti na čase	42
Graf 4: Závislost mezi relativní vlhkostí, teplotou a teplotním deficitem	43
Graf 5: Průběh tlaků v závislosti na čase	44
Graf 6: Průběh průtoku vzduchu v závislosti na čase	44
Graf 7: Průběh teploty rosného bodu v závislosti na čase	45
Tabulka 1: Jakostní třídy dle ČSN 8573-1	21
Tabulka 2: Naměřené hodnoty	39
Tabulka 3: Tabulka odhadů parametrů základního souboru a chyba přístrojů	41
Tabulka 4: Plán zapojení svorkovnice	51

Úvod

Předmětem diplomové práce je problematika sušení vzduchu používaného pro brzdňý systém kolejových vozidel, funkce brzdňého systému, funkce sušící jednotky a PSA adsorpce.

Úkolem je zjistit provozní parametry systému úpravy vzduchu. Sušící jednotka má za úkol vysušit vzduch na potřebnou teplotu rosného bodu, která je dána normou. V druhé části diplomové práce je uveden koncept řešení nové sušičky včetně konstrukčního návrhu a řídicího systému za účelem zlepšení provozně-servisních vlastností.

1 Brzdňý systém kolejových vozidel

1.1 Historie brzdňých systémů kolejových vozidel

První kolejová vozidla byla brzděna pouze brzdící silou lokomotivy, a to buď mechanickou ruční brzdou nebo pomocí páry tak, že lokomotiva zabírala na opačnou stranu. Postupem času, jak se zvětšovala délka a hmotnost vlaku, byly osazovány některé vozy mechanickou brzdou a brzdařem, který na signál z lokomotivy utáhl kliku mechanické brzdy na voze. Provazcová brzda bylo řešení, které umožňovalo strojvedoucímu samočinně brzdit celý vlak. Než se provazcová brzda stihla rozšířit, už se rozšiřovaly i jiné brzdové systémy. Nejprve to byla sací brzda, která využívala podtlaku jednoduchého parního ejektoru. Postupem času byla sací brzda vytlačena brzdou tlakovou, která umožňuje vyvinout větší brzdňou sílu. S nástupem tlakové brzdy bylo nutné vybavit lokomotivy kompresory a zásobníky na stlačený vzduch a samozřejmě brzdíčem, umožňujícím průběžňou tlakovou brzdu ovládat. Na vozy byly dosazovány brzdové rozvaděče a válce.

1.2. Současný brzdňý systém

V současné době musí být každé vozidlo vlaku spojeno pomocí tlakových spojek, hadic a brzdového potrubí s lokomotivou. Na každém vozidle vlaku musí být jeho tlaková brzda zapnuta. Pokud je nutno na některých vozidlech tlakovou brzdu vypnout, sníží se tím brzdící účinek, který musí odpovídat jeho délce, druhu vozů, rychlosti vlaku a sklonovým poměrům trati.

Brzdící účinek vlaku je určen jeho brzdícím procentem, které se stanoví tak, že se vypočítá brzdící váha vlaku, což je schopnost brzdy, kterou má každé vozidlo vypočteno už při schvalování do provozu. Brzdící váhy na jednotlivých vozidlech s funkční brzdou se sečtou a výsledek, který se uvádí s jednotkou tuna, se vydělí celkovou hmotností (součet hmotností všech vozidel v tunách) vlaku. Výsledné číslo se vynásobí sty procenty. Každá trať má v tabulkách určena pro jednotlivé rychlosti potřebná brzdící procenta, která se porovnají se skutečňými, vypočtenými brzdícími

procenty vlaku. Pokud jsou skutečná brzdící procenta pro danou rychlost vlaku nižší než potřebná, je nutné snížit jeho rychlost.

Strojvedoucí lokomotivy, který bude ovládat průběžnou brzdu, se o brzdícím účinku vlaku dozví ze zprávy o brzdění, která mu před jízdou musí být doručena. Je v ní uvedena hmotnost vlaku, druhy brzd vozů zapojených ve vlaku, počet vozů s vypnutou tlakovou brzdou, vypočtené brzdící procento vlaku a další údaje. Než vlak vyjede na trať, je ještě nezbytné, aby byla funkčnost brzdy celého vlaku ověřena při takzvané úplné zkoušce brzdy, kde strojvedoucí ověří její funkčnost na všech vozidlech a potvrdí vykonání zkoušky do zprávy o brzdění.

Po sestavení vlaku a spojení hlavního potrubí všech vozů může strojvedoucí pomocí brzdiče naplnit hlavní potrubí na provozní tlak. Hodnota provozního tlaku je 5 barů. Po vyrovnaní tlaku ve všech hlavních a pomocných vzduchojemech všech vozidel je brzda připravena k činnosti. Funguje na principu porovnávání tlaku v hlavním potrubí a řídicím vzduchojemu. Při poklesu tlaku v hlavním potrubí přepustí brzdový rozvaděč vzduch z pomocného vzduchojemu do brzdového válce. Výhodou tohoto systému je, že v případě poškození hlavního potrubí (přetržení vlaku), nebo poškození kompresoru lokomotivy se tlak v potrubí sníží a rozpojený vlak zastaví. [6]

Důvod, proč se k brzdění vlaku používá právě vzduch, je jeho volná dostupnost kdekoli na povrchu Země. Samozřejmě je možné použít i jiný plyn, ale nastává problém se získáváním takového plynu, jeho skladováním apod. Proto se ani jiný plyn než vzduch pro brzdění kolejových vozidel nepoužívá.

Volně dostupný vzduch pro použití v brzdovém systému je nutno komprimovat. Stlačeného vzduchu dosáhneme ve strojích zvaných kompresory. Současný brzdový systém sestává z kompresoru, filtrů, sušičky vzduchu a vzduchového zásobníku.

2 Komprese vzduchu

Kompresor je stroj, který je určen ke stlačování plynů a par. Z důvodu mnohostranného využití existuje mnoho různých druhů kompresorů.

Základními požadavky na komprimovaný vzduch jsou absence vody a oleje ve vzduchu. Tyto požadavky jsou podloženy normou ČSN 8573-1 (viz. Tabulka1).

2.1 Základní rozdělení kompresorů

Kompresory je možné rozdělit na křídlové, s kroužicím pístem, vodokružné, pístové, dvoupístové a šroubové.

Pro uvedenou technologii stlačování vzduchu pro brzdňý systém vlaku jsou nejvíce vhodné křídlové a šroubové kompresory.

2.2 Porovnání křídlových kompresorů se šroubovými

2.2.1 Popis funkce křídlového kompresoru

Křídlový kompresor je jednostupňově pracující vícekomorový kompresor. V okruhové komoře statoru se otáčí výstředně uložený ocelový válec (rotor) s podélnými kluznými drážkami. V těchto drážkách se pohybují ocelová křídla, která se přitlačují odstředivou silou vzniklou otáčením rotoru ke kruhové stěně statoru, čímž vznikají jednotlivé komory.

Stlačování probíhá v objemově proměnných komorách (viz. Obrázek 1). Přes sací filtr a ventilovou komoru se vzduch dostává do komor. Otáčením rotoru se pohybují tyto komory nahoru, nasátý vzduch se uzavře a objemovým zmenšováním se vzduch postupně stlačuje. Výstup stlačeného vzduchu se děje na horní straně statoru, kde je objem komory nejmenší a stupeň stlačení vzduchu největší.

2.2.2 Popis funkce šroubového kompresoru

Šroubové kompresory jsou dvou-hřídelové stroje s rotujícími písty, které pracují na základě vlačovacího principu. Na obou rotorech (hlavní a vedlejší) je několik zubových profilů, které jsou navinuty protiběžně a přesně spolu zabírají. Jsou uloženy s minimálními vůlemi štěrbin a pohyblivou vůlí ve dvou válcích.

Rotorové hřídele jsou uloženy na valivých ložiskách a pohon vedlejšího rotoru se většinou zajišťuje silovým stykem profilu hlavního rotoru. Je ale možný i synchronizovaný pohon obou rotorů přes vnější ozubené soukolí.

Při otáčení rotorů předchází dráhy profilů nasávací prostor a k uzavření vzduchu dojde tehdy, když vznikající nasávaný objem dosáhne maximální hodnoty.

Stlačování vzduchu a jeho odvádění na tlakové straně vypouštěcím otvorem probíhá tak, že do sebe během otáčení hlavní a vedlejší rotor vzájemně zapadnou.

2.2.3 Shodné části

Většina částí potřebných pro činnost kompresoru, jako například kombinovaný chladič oleje a stlačeného vzduchu, jemný odlučovač oleje, tlakový spínač apod., jsou shodné pro křídlové i šroubové kompresory.

2.2.4 Objemová účinnost

Objemovou účinností kompresoru se označuje poměr účinně stlačeného vzduchu za minutu ku teoreticky sestrojenému geometrickému objemu modelu. Objemová účinnost závisí na ztrátách způsobených netěsnostmi uvnitř kompresoru. Protože k těmto ztrátám dochází vždy, je účinnost menší než 100 %. Čím menší jsou ztráty vzniklé vnitřním zpětným prouděním, tím větší je objemová účinnost a o to je menší specifický příkon elektromotoru na 1 m³ stlačeného vzduchu.

Rotační křídlové kompresory mají objemovou účinnost větší než 90 % při stlačení na přetlak 7 barů. Tato mimořádně velká účinnost je velkou výhodou oproti šroubovému kompresoru.

2.2.5 Spotřeba energie

Podstatným kritériem při posuzování hospodárnosti kompresorů je specifická spotřeba energie (specifický příkon).

Specifická spotřeba energie udává, kolik energie musíme konkrétně vynaložit, abychom stlačili 1 m³ vzduchu z atmosferického tlaku na požadovaný přetlak. Jednotka je kW/m³.

Činitele ovlivňující specifickou spotřebu energie jsou:

- zpětné proudění uvnitř stroje, protože maří stlačovací práci
- optimální termodynamické uskutečnění stlačovacího pochodu
- mechanické ztráty energie při stlačování

2.2.6 Chlazení vzduchu během stlačování

Vynaložení mechanické energie při stlačování vzduchu je ovlivňováno i stupněm chlazení vzduchu během vlastního postupu stlačování. Při kompresi určitého množství vzduchu se zvyšuje zároveň s tlakem i teplota stlačeného vzduchu, což zpětně vede k dalšímu zvýšení tlaku (cyklický jev). Teoreticky nejlepší účinnosti mechanické stlačovací práce bude dosaženo, když teplota během stlačovacího procesu vlivem chlazení zůstává konstantní a zmenšení objemu přímo vede k příslušnému zvýšení tlaku. Chlazení vzduchu během fáze stlačování se děje zpravidla vstřikováním oleje do kompresní komory. Čím nižší je teplota oleje, tím účinnější je mechanický postup stlačování v kompresoru.

2.2.7 Mechanické ztráty výkonu

U šroubového kompresoru dochází z konstrukčních důvodů k nezanedbatelným ztrátám výkonu. Například vyššími otáčkami šroubů vznikají velké mechanické třecí síly a tím vzrůstá potřeba chlazení. Dále převod do rychla (ozubená kola, klínový řemen) spotřebovává až 5 % výkonu motoru.

Spolehlivost a hospodárnost při provozu křídlových kompresorů je dána:

- malým trvalým mechanickým namáháním vlivem malých otáček
- mimořádně vysokou provozní bezpečností díky jednoduchému principu činnosti s přímým pohonem a pouze jedinou rotující částí
- nízkými náklady na opravu a údržbu
- proporcionálním řízením sání s konstantním výstupním tlakem
- není potřeba tlaková nádoba [7]

Uvedené křídlové a šroubové kompresory se vyznačují svou plynulou, i když ne vždy rovnoměrnou dávkou stlačené vzdušiny. Při práci kompresoru vzniká otěrem a stlačováním vzduchu teplo. U křídlových kompresorů lze uskutečnit vnitřní chlazení vstřikováním oleje do válce a tím markantně snížit i ztráty netěsností, ovšem do značné míry na úkor ztrát hydrodynamických.

Pístový kompresor se v daném případě neuvažuje pro možné časté poruchy a pro jeho pracovní projev. Pro danou problematiku je šroubový kompresor velmi vhodný,

protože odpadají problémy s odstraňováním oleje. Jeho velkou nevýhodou je až pět krát vyšší cena než u křídlového kompresoru, který je výhodnou alternativou i přes problém v podobě vzduchu na výstupu obsahujícího olej a vlhkost. Křídlový kompresor se proto používá ve spojení s potřebnými filtry pro odstranění částeczek prachu a oleje.

2.3 Konstrukce křídlového kompresoru

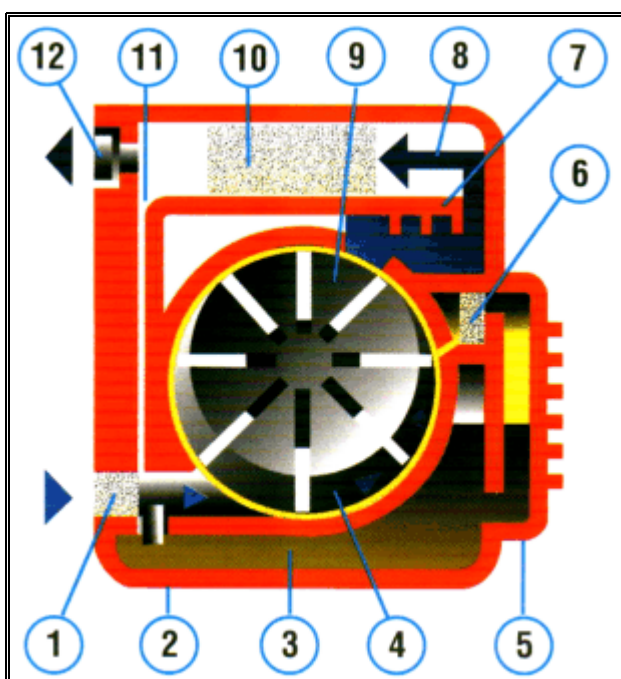
Rotační křídlový kompresor (viz. Obrázek 1) se skládá ze základních částí: válec, rotor a lamely.

Kompresor se skládá z válce, ve kterém se otáčí výstředně uložený rotor s několika podélnými, alespoň přibližně radiálními, hlubokými zářezy. Do těchto zářezů jsou zasunuty rovné obdélníkové desky (křídla – lamely), ty sledují po roztočení rotoru vnější hranou vnitřní obrys válce, protože jsou odstředivou silou puženy z rotoru ven. Prostor srpovitého průřezu mezi válcem a rotorem, ohraničený na každém konci víkem, je rozdělen obdélníkovými křídly na několik komůrek proměnné velikosti. Od místa, kde se rotor téměř dotýká válce, až k místu protilehlému, se při otáčení rotoru objem komůrek zvětšuje a do komůrek se nasává plyn hrdlem ve stěně válce. Při dosažení největšího objemu se přeruší spojení mezi komůrkou a sacím hrdlem a objem komůrek se začne zmenšovat a plyn v nich uzavřený stlačovat. Stlačování ve stroji končí přejetím předního křídla (ve směru otáčení) přes tzv. výstupní hranu, která otvírá výstup plynu do výtlačného hrdla. Při dalším zmenšování komůrky se z ní plyn vytlačuje, a to až k místu, kde zadní křídlo komůrky přejede přes druhou hranu označující výstupní otvor. Utěsnění výtlačného prostoru oproti prostoru sacímu je závislé na vůli mezi rotorem a válcem v místě jejich největšího přiblížení, na počtu křídel vzájemně je oddělujících a na vůlích mezi rotorem a víky. Je u nich malá závislost dodávaného množství plynu na změně kompresního poměru se zřetelem na mizivý škodlivý prostor křídlových kompresorů. [8]

Schéma křídlového kompresoru:

1. Sací filtr
2. Sací klapka
3. Olejová komora

4. Kompresní komora
5. Olejový chladič
6. Olejový filtr
7. Labyrint hrubého odloučení olejových kapek
8. Stlačený vzduch
9. Rotor
10. Jemný separátor oleje
11. Zpětný ventil
12. Zpětný ventil minimálního tlaku



Obrázek 1: Schéma rotačního kompresoru [8]

3 Problematika úpravy stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch je nepostradatelným zdrojem energie, který se používá v řadě průmyslových oborů. Toto bezpečné, účinné a spolehlivé médium bývá často nejdůležitější součástí výrobního procesu. Stlačený vzduch obsahuje vlhkost, prach, částice uvolněné otěrem, bakterie a také opotřebovaný mazací olej. Vodní kondenzát společně s nečistotami vytváří nežádoucí abrazivní kal, který je často kyselé povahy a

který rychle opotřebovává pneumatické nářadí i stroje, ucpává ventily a clony. Je také příčinou vysokých výdajů na údržbu a nákladných ztrát vzduchu. Navíc způsobuje korozi potrubí a může zapříčinit i mimořádně nákladnou odstávku celého výrobního procesu. [9]

Aby bylo zamezeno výše zmíněným problémům, je zapotřebí použití vhodných filtračních a sušících mechanismů.

U kolejových vozidel je zapotřebí filtrovat a sušit stlačený vzduch, který je používán pro brzdňý systém. Stlačený vzduch je potřeba upravit dle požadavků systému. Stlačený vzduch se dělí dle kvality na několik tříd ISO 8573-1 (viz. Tabulka 1), kde jsou hlavními parametry: obsah pevných částic (prachu), tlakový rosný bod, obsah oleje.

Třída:	Tuhé nečistoty		Voda	Olej
	max. velikost částic [μm]	Max. koncentrace [mg/m^3]	Max. tlakový rosný bod [$^{\circ}\text{C}$]	Max. koncentrace oleje [mg/m^3]
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1
4	15	8	3	5
5	40	10	7	25
6	-	-	10	-
7	-	-	nestanoven	-

Tabulka 1: Jakostní třídy dle ČSN 8573-1

3.1 Filtry

V uvažovaném systému úpravy vzduchu je zapotřebí odstranit ze vzduchu negativní složky. Jsou jimi drobné částičky vody, prachu a oleje ve vzduchu, který vychází z kompresoru a pokračuje dále směrem k sušičce. Tam je důležité odstranit tyto složky, aby nedošlo k zanášení a opotřebování sušky, které může vést k poruchám nebo dokonce ke zničení. Jsou použity následující filtry Hankison HF9, Hankison HF7, Hankison HF6 a Hankison HF5. Jejich popis je uveden níže.



Obrázek 2: Filtry Hankison [10]

Jsou uspořádány dle obrázku (viz. Obrázek 5). Filtr HF 5 je vestavěn v sušičce.

Filtr Hankison HF9

odlučovač/filtr pro velká množství kapalin

Vlastnosti: odstraňuje olejové a vodní aerosoly do max. 5 mg/m^3

Umístění:

- za dochlazovačem
- do místa spotřebiče, a to v případě, že není instalován dochlazovač/odlučovač

Dvoustupňová filtrace:

1. stupeň: dvě nerezové síťové trubky zaručí mechanické odloučení až do 10 mikronů
2. stupeň: stupňovitě uspořádaný filtrační materiál, filtrující kapalně a pevné částice až do 3 mikronů

Filtr Hankison HF7

standardní filtr pro kapaliny a oleje

Vlastnosti: odstraňuje olejové, vodní aerosoly a pevné částice do max. 1 mikronu (zbytkový obsah oleje $\leq 1,0 \text{ mg/m}^3$)

Umístění:

- před vysoce výkonný olejový filtr pro jemné olejové a kapalinové aerosoly
- do místa spotřebiče, když je předřazen dochlazovač / odlučovač

Dvoustupňová filtrace:

1. stupeň: větší částice jsou odstraňovány více vláknovými vrstvami a sítím
2. stupeň: aerosoly jsou odstraňovány, pevné částice jsou odfiltrovány vrstvenou membránou z vláken, která jsou zesílena epoxidem.

Filtr Hankison HF5

vysokovýkonný filtr pro jemné olejové a kapalinové aerosoly

Vlastnosti: odstraňuje pevné částice, jakož i olejové a vodní aerosoly do 0,01 mikronu (zbytkový obsah oleje $\leq 0,01 \text{ mg/m}^3$)

Umístění:

- před adsorpčním nebo membránovým sušičem
- za kondenzačním sušičem stlačeného vzduchu
- do místa spotřebiče, v případě existence sebemenší vlhkosti

Dvoustupňová filtrace:

1. stupeň: větší částice jsou odstraňovány vrstvami vláken různých druhů a sítím, vzduch je předfiltrován pro druhý stupeň
2. stupeň: aerosoly jsou odlučovány, pevné částice jsou filtrovány vícevrstvou membránou z vláken zesílenou epoxidem, která je uzpůsobena speciálně pro nejjemnější aerosoly

Po průchodu těmito filtry je vzduchu dostatečně zbaven nežádoucích částic prachu, oleje a vody ve vzduchu. Tyto látky z filtrů vytékají přes vestavěný automatický hladinově řízený odvaděč kondenzátu ve formě emulze.

Po průchodu sušičkou a vysušení vzduchu na požadovaný rosný bod prochází vzduch přes poslední filtr Hankison HF 6, který zbaví vysušený vzduch možného prachu, který se může v sušičce vytvořit vzájemným otěrem kuliček adsorbentu při průchodu vzduchu.

Filtr Hankison HF6

standardní filtr pro prach a pevné částice

Vlastnosti: pro odstranění suchého prachu a špíny až do 1 mikronu

Umístění:

- za adsorpčním sušičem
- za adsorberem s aktivním uhlím

Dvoustupňová filtrace:

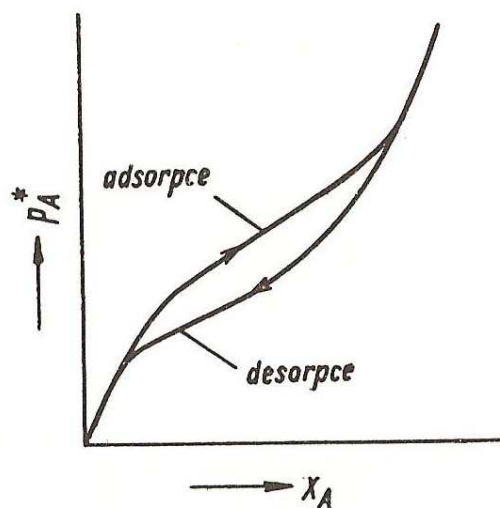
1. stupeň: částice jsou odstraňovány více vláknovými vrstvami a sítí
2. stupeň: jemné částice jsou odfiltrovány vrstvenou membránou z vláken, která jsou zesílena epoxidem [10]

Takto ošetřený vzduch se poté vpouští do sušičky a následně se uchovává ve vzdušníku, z kterého je dále distribuován do brzdného systému.

3.2 Sušení

3.2.1 Princip sušení – adsorpce

Adsorpce je difúzní proces, který je založen na sdílení hmoty mezi tekutinou a pevnou látkou. Adsorbující pevnou látku označujeme jako adsorbent, adsorbovanou jako adsorbát. Adsorpcí se odstraňují z plynů, par nebo kapalin některé složky v nich obsažené. Stejnými zákony jako adsorpce se řídí opačný pochod, zvaný desorpce, kdy hmota přechází z pevné látky do tekutiny. Tyto dva procesy na sebe obvykle navazují. Průběh adsorpce a desorpce se liší (viz. Obrázek 3).

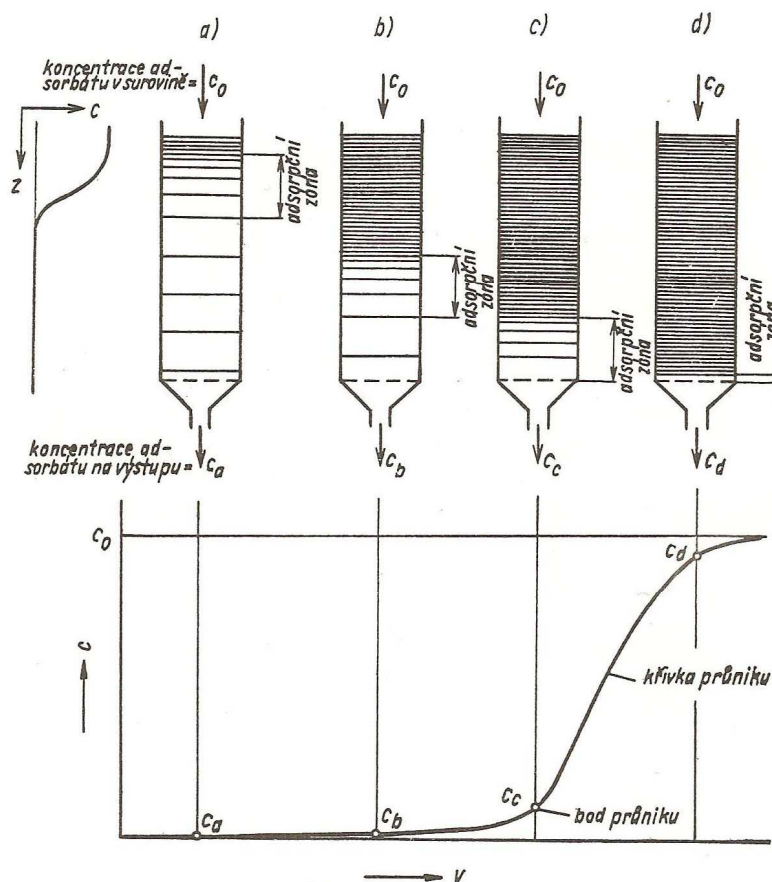


Obrázek 3: Hystereze adsorpční izotermy [1]

Rozlišujeme na adsorpci fyzikální, při níž se adsorbovaná látka zachycuje na povrchu pevné látky vlivem van der Waalsových sil a děj je vratný, a na chemisorpci (aktivovanou adsorpci), kdy se stav adsorbované látky výrazně liší od jejího stavu před adsorpcí a děj obvykle bývá nevratný.

Fyzikální adsorpci vyvolávají síly přitažlivosti mezi molekulami pevné látky a molekulami adsorbované látky. Když například budou přitažlivé síly mezi molekulami páry samotné, pára bude kondenzovat na povrchu pevné látky, i když její parciální tlak bude nižší než tlak nasycených par při dané teplotě. Tento děj je provázen vývojem tepla, jehož množství je poněkud větší než při kondenzaci a zhruba odpovídá sublimačnímu teplu. Nazývá se adsorpční teplo. Adsorbovaná látka neproniká do krystalové mřížky pevné látky a nerozpouští se v ní, nýbrž zůstává zcela na povrchu. Je-li však pevná látka velmi pórovitá (obsahuje velké množství jemných kapilárních kanálků), proniká adsorbovaná látka až do pórů, pokud pevnou látku smáčí. Rovnovážný tlak par nad konkávní hladinou s velmi malým poloměrem křivosti je nižší než nad rovnou hladinou, a tím se zvyšuje adsorbované množství látky. Při rovnováze se parciální tlak adsorbované látky (adsorbátu) rovná jejímu parciálnímu tlaku v tekutině (plynu). Snížením parciálního tlaku látky v tekutině (plynu) nebo zvýšením parciálního tlaku adsorbátu se vyvolá desorpce a látku opět získáváme v původním stavu. Tato vratnost pochodu je typická pro fyzikální adsorpci a týká se plynů i kapalin.

Adsorpce probíhá tím způsobem, že zpracovávaná tekutina protéká nehybnou vrstvou částic (viz Obrázek 4). Adsorpce je pak neustálená. Nejhořejší část vrstvy začne velmi rychle a účinně adsorbovat součást vstupující tekutiny, která podléhá adsorpci. Koncentrace adsorbující se součásti ve směsi tedy rychle klesá z původní hodnoty na hodnotu obvykle zanedbatelnou v poměrně krátkém úseku vrstvy, zvaném adsorpční zóna. Když se nejvyšší vrstva nasytí, posunuje se adsorpční vlna níže, až dosáhne dolního konce vrstvy. Přitom stále z vrstvy odchází tekutina se zanedbatelnou koncentrací adsorbované součásti. Teprve při dalším posunu adsorpční zóny začne koncentrace adsorbované složky na výstupu růst. Stav, kdy čelo adsorpční zóny dosáhne konce vrstvy adsorbentu, se nazývá průnik. Závislost koncentrace adsorbentu na množství tekutiny prošlé vrstvou, která je znázorněna ve spodní části obrázku (viz. Obrázek 4), je adsorpční vlna. Jakmile dosáhne koncentrace adsorbentu ve vystupující tekutině (plynu) dovolené meze, adsorpce se přeruší a tekutina (plyn) se vede do jiného aparátu. Adsorbující vrstva se pak regeneruje.[1]



Obrázek 4: Adsorpční vlna [1]

3.2.2 Princip PSA adsorpce (Pressure swing adsorption)

Jedná se o fyzikální proces, při kterém dochází k pohlcování vody do pórů adsorbentu (jen na povrchu) za zvýšeného tlaku přibližně 10 bar.

Dvě kolony sušičky pracují střídavě v režimu sušení (adsorpce) a regenerace (desorpce).

Během fáze adsorpce dochází k zachytávání částecek vody na adsorbentu. (viz. kapitola 3.2.1) V momentě nasycení adsorbentu dochází k přepnutí kolon a začne pracovat druhá kolona. První (nasycená) kolona se odtlakuje a dojde ke snížení tlaku (fáze regenerace). Tím se z adsorbentu uvolní až 80% vlhkosti. Zbytková vlhkost z kolony se dostane profouknutím cca 10 – 15 % z celkového množství regenerovaného vzduchu. Množství stlačeného vzduchu pro regeneraci činí asi 10% z celkového množství u jednotek s automatickým ovládáním nastavení řídicího ventilu a asi 15% u zařízení bez automaticky ovládaného ventilu regeneračního vzduchu.

Pokud je průtok stlačeného vzduchu sušičkou velmi nízký, vypouští se pouze konstantní minimální množství regeneračního vzduchu. Fáze regenerace je kratší než fáze sušení, a to z toho důvodu, aby se kolona, která byla v režimu regenerace mohla vrátit do stavu s plným pracovním tlakem ještě před tím, než začne nový cyklus sušení. Doba pro adsorpci a desorpci je odvozována od požadavků na kvalitu vzduchu (rosný bod), od chemického složení použitých adsorbentů a jejich vlastností, od velikosti kolon, apod.

Výhodou PSA adsorpce je i její rychlá regenerace v řádech minut. Oproti tomu adsorpce ve velkých kolonách, například v kyslíkárnách, mohou jednotlivé intervaly přepínání být v řádech dnů.

3.2.3 Adsorpční materiály

V současné době jsou používány tyto adsorpční materiály:

Silicagel

Silicagel je granulovitá, pórovitá forma oxidu křemičitého (SiO_2) vyráběná synteticky z křemičitanu sodného. Má vysokou porezitu, která umožňuje snadno adsorbovat vodu. Silicagel může snížit relativní vlhkost uzavřeného systému až na 40 %. Po nasycení vodou může být regenerován (vysušen) ohřátím na 150° C. Silicagel je netoxický, nehořlavý a chemicky vysoce inertní. Někdy je silicagel dodáván s příměsí

indikátoru vlhkosti, který změni barvu poté, když je silicagel vlhký. Běžný silikagel pojme množství vody odpovídající přibližně 20 % jeho hmotnosti.

Alumina

Oxid hlinitý (Al_2O_3) je krystalická látka, obvykle bílé barvy, která vzniká při spalování hliníku nebo dehydratací hydroxidu hlinitého. Oxid hlinitý se v přírodě vyskytuje jako velmi tvrdý nerost zvaný korund. Používá se při výrobě porcelánu, zubních cementů, barev, nejvíce však k výrobě hliníku a v neposlední řadě pro sušení vzduchu.

Nalzit 5A (molekulové síto)

V současné době se jako nejlepší materiál uvažují molekulová síta. Jejich vysoká adsorpční schopnost předčila v minulosti hojně užívaný oxid hliníku a silicagel.

Nejvýraznější vlastností molekulových sít je rozměrová uniformita vstupních otvorů a primárních pórů, které vstupují do velkých dutin. Pro molekulová síta je charakteristická selektivní adsorpce, při které se z plynné nebo kapalné směsi adsorbují ve velkých dutinách jen ty složky, které mají kritický průměr molekul menší než je efektivní průměr pórů. Molekuly směsi se ve styku se zeolitovým adsorbentem „prosívají“ a selektivně adsorbují podle rozměrů a tvaru. Od této specifické vlastnosti se odvodil i název: Molekulová síta.

Další vlastností je přednostní adsorpce polárních a polarizovatelných molekul. Názorným příkladem je přednostní adsorpce vody téměř na všech typech zeolitových molekulových sít, což je důsledek vysoké polarizability této molekuly.

Molekulová síta se granulují s přidavkem inertního pojiva do tvaru kuliček nebo válečků. Ve speciálních případech se dodávají v práškovém stavu jako čistý zeolit bez pojiva. Barva granulovaných molekulových sít je šedobílá, žlutohnědá nebo světle růžová. Práškové zeolity jsou bílé nebo šedobílé. [12]

Aktivní uhlí

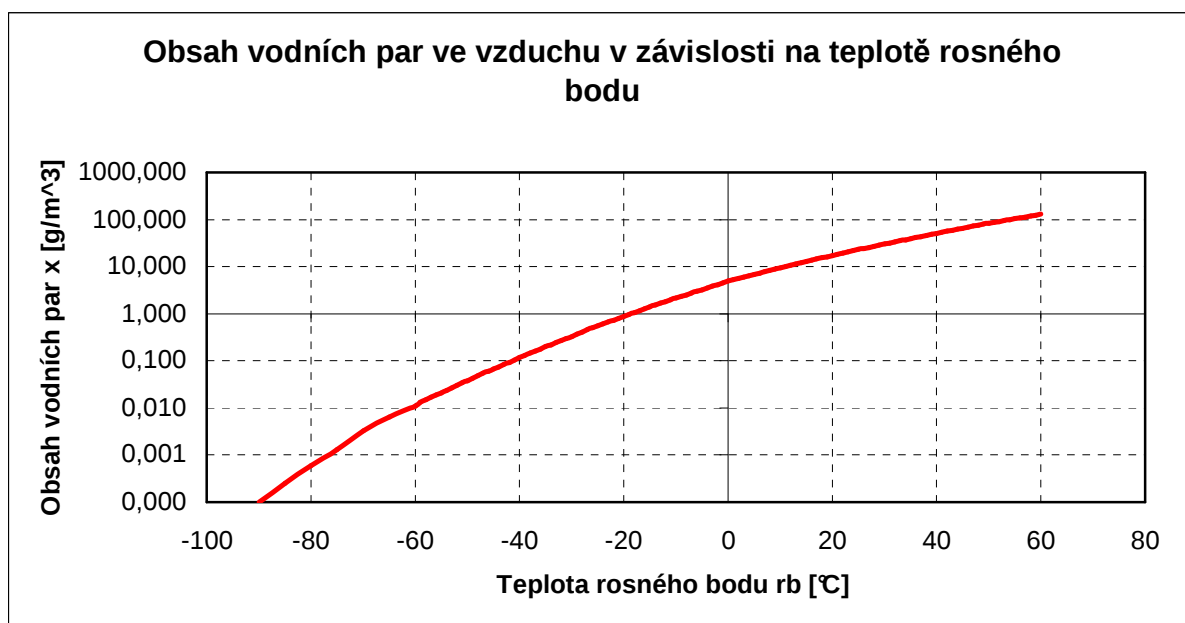
Aktivní uhlí se dodává ve třech základních modifikacích - prachové, zrnité - granulované a extrudované - válečky, dále potom jako tkanina z uhlíkových vláken nebo ve formě hotových výrobků - například filtrů. Podle účelu použití se vyrábí z

dřevěného uhlí, černého uhlí, kokosových skořápek, bambusu a z dalších surovin různými způsoby aktivace. Vzniká tak mnoho variant s různými fyzikálně chemickými parametry. [14] Aktivní uhlí se nepoužívá pro PSA adsorpci. Aktivní uhlí má spoustu možných aplikací, mezi nejtýpější patří aplikace ve filtračním systému vzduchu pro nemocnice.

3.2.4 Rosný bod

Základní parametr pro sušení vzduchu je teplota rosného bodu.

Rosný bod je hodnota teploty, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami. Relativní vlhkost vzduchu je v takovém případě 100%. Platí, že čím větší je obsah vodní páry ve vzduchu, tím vyšší je teplota rosného bodu. Při teplotě, která je nižší než hodnota rosného bodu, dochází ke kondenzaci.



Graf 1: Obsah vodních par ve vzduchu v závislosti na teplotě rosného bodu

3.3 Sušička stlačeného vzduchu pro kolejová vozidla

3.3.1 Princip činnosti

Stlačený vlhký vzduch se z kompresoru převádí do předřazeného filtru přes horní rozvodné potrubí. V tomto filtru se zachycují na principu shlukování částice oleje a vody. Kondenzát tvořený vodou a olejem se vypouští pomocí automatického ventilu pro odvod kondenzátu. Ventil pro odvod kondenzátu se periodicky otevírá na základě příkazů z řídicí jednotky. Originální konstrukční řešení odvodňovacího ventilu umožňuje vypouštět kondenzát ve stálých dávkách a tak minimalizovat ztráty stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch pak prochází přes vstupní přepínací ventil do jedné ze sušících kolon. Sušící kolona je naplněna aktivovaným oxidem hliníku, který pohlcuje vodní páry obsažené ve stlačeném vzduchu a z kolony pak vychází suchý stlačený vzduch o teplotě rosného bodu dle specifikace. Jemný prášek oxidu hliníku, který se může do vzduchu dostat z náplně v pracovní koloně, se zachycuje ve výstupním filtru. Čistý a suchý stlačený vzduch vychází ze sušičky přes výstupní přepínací ventil a přes ovládací ventil regeneračního vzduchu. Sušící kolona pracuje na principu PSA adsorpce.

Membrána s jemnými otvory, která je uvnitř ovládacího ventilu proplachovacího vzduchu, snímá výstupní průtok stlačeného vzduchu a odpovídajícím způsobem mění velikost průtokového otvoru, kterým prochází proplachovací vzduch. Tato činnost mění objem proplachovacího vzduchu během regenerace aktivní látky v pracovní koloně v poměru přímo úměrnému průtoku stlačeného vzduchu sušičkou. Tento objem je zároveň také závislý na vstupním tlaku a tím se tedy používá jen takové množství regeneračního vzduchu, které je přímo úměrné zatížení sušičky vlhkostí obsaženou ve stlačeném vzduchu.

3.3.2 Vlastnosti stávající sušičky

Sušička je navržena pro použití pro železniční vozidla. Splňuje veškeré požadavky na ochranu životního prostředí a funkční specifikace pro provoz na železnici. Sušička je odolná proti vibracím, proti teplotám, kterým může být vystavena na podlaze lokomotivy i vně vlastní lokomotivy. Sušičku lze používat na různá napájecí napětí. V řídicím obvodu je paměť, která uchovává poslední stav, ve kterém se nacházela sušička před vypnutím napájení. Po opětovném spuštění je sušička uvedena

do provozu na místě, ve kterém se nacházela těsně před vypnutím. Automatický vypouštěcí ventil odvodu kondenzátu s pevným objemem odvádí kondenzát, aniž by docházelo k nadbytečným ztrátám stlačeného vzduchu. Konstrukčně je vyřešen tak, že při jeho selhání nemůže dojít k závadě. Každá z pracovních kolon je vybavena indikátorem stavu adsorpční látky. Předřazený filtr je vybaven indikátorem stavu filtračního elementu. Nízký poměr doby nutného intervalu údržby/opravy. Sušička má dále velmi dlouhou střední dobu mezi nutnými opravami. Celo-hliníková konstrukce zajišťuje dlouhou životnost bez nebezpečí vzniku koroze. Montáž umožňující nasunutí/vysunutí jednotky namontované v osazovacím rámu. Sušičku je možné nasunout a vysunout při běžné údržbě a montáži během několika minut. Pokles teploty rosného bodu je 30°C při návrhovém průtoku vzduchu a 15°C v nejhorším případě kombinace průtoku stlačeného vzduchu a teploty okolního prostředí. Nízká tlaková ztráta je 3% vstupního tlaku při jmenovitém průtoku stlačeného vzduchu. [11]

3.4 Výběr adsorbentu

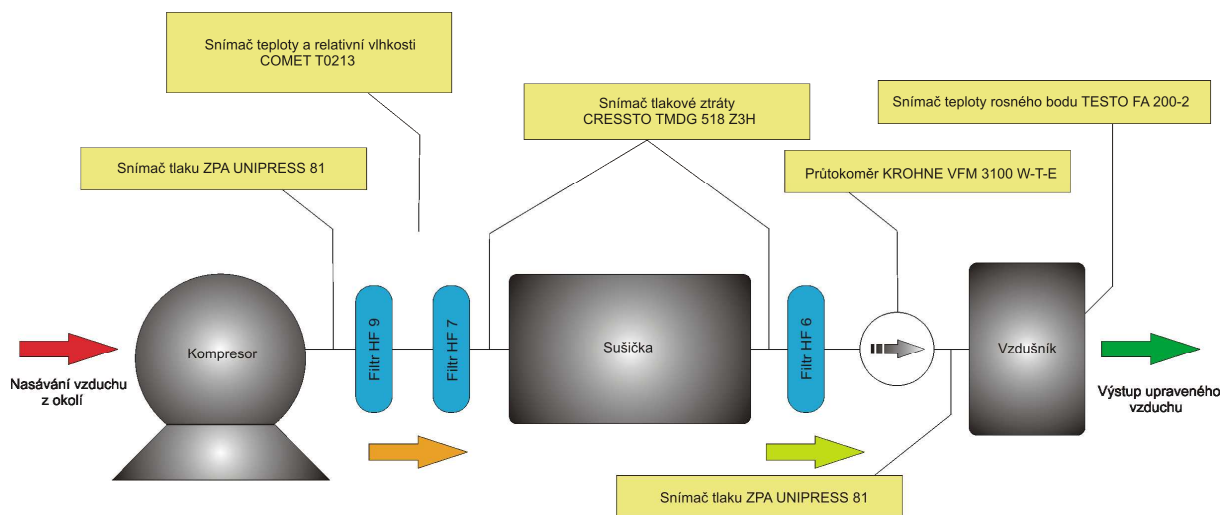
V reálném případě byl vybrán adsorbent v podobě molekulového síta. Jeho využití se nabízelo s ohledem na modernizaci a zkvalitnění práce systému. Zároveň byly použity inovované pytlíky na adsorbent, které mají plnění z boku, nikoli na vrchu pytlíku. Předejde se tak odporu vzduchu, který způsobuje otvor na vrchu pytlíku a uzávěr zabezpečený suchým zipem.

4 Praktická měření

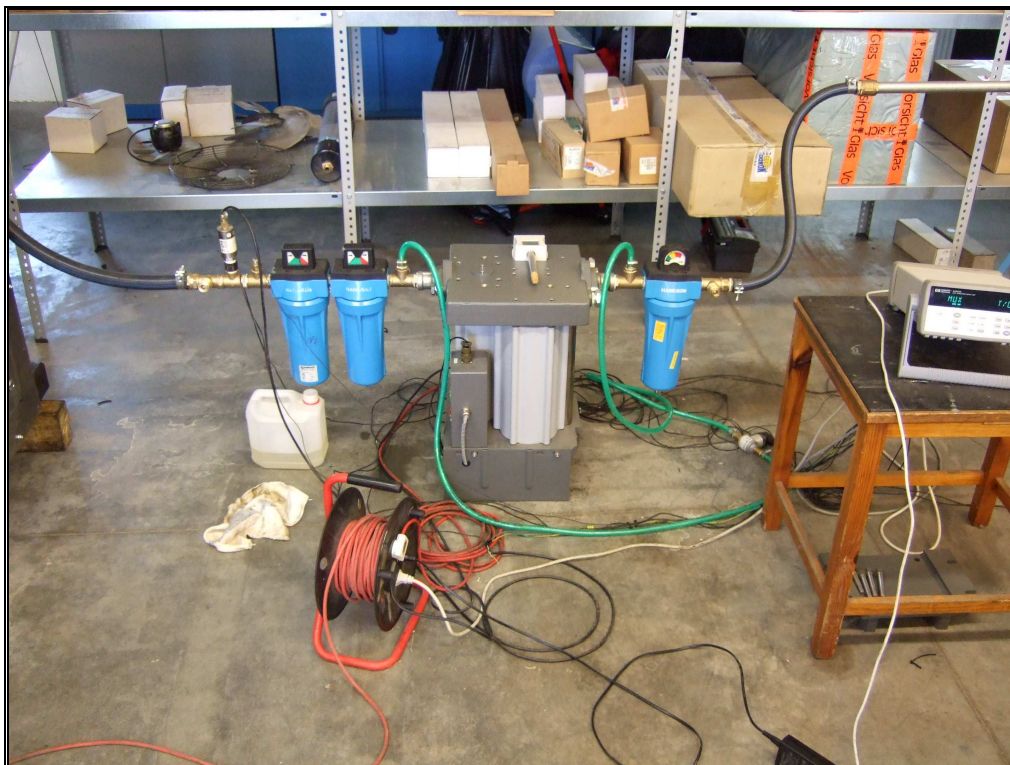
Úkolem bylo ověřit, jak se v praxi sušička vzduchu chová a prověřit její parametry. Při měření na sušičce je potřeba sledovat teplotu okolí, relativní vlhkost okolí, tlak vzduchu jdoucí z kompresoru, tlakovou ztrátu na sušičce, průtok vzduchu a tlak v potrubí za sušičkou a teplotu rosného bodu ve vzdušníku.

K tomuto měření posloužila měřící linka (viz. Obrázek 6 a Obrázek 7) zkonstruovaná v areálu firmy, na které byla požadovaná měření provedena. Tato měření zároveň prověřují celý systém úpravy vzduchu (kompresor, filtry a především sušičku) jako celek.

Měřicí linka se skládala z rotačního křídlového kompresoru Mattei M86J, filtrů Hankison HF 9, HF 7, HF 6, HF5, sušičky vzduchu, vzdušníku a potřebných snímačů a přístrojů (viz. Obrázek 5).



Obrázek 5: Schéma zapojení měřících přístrojů do systému úpravy vzduchu pro brzdný systém



Obrázek 6: Skutečná měřicí linka



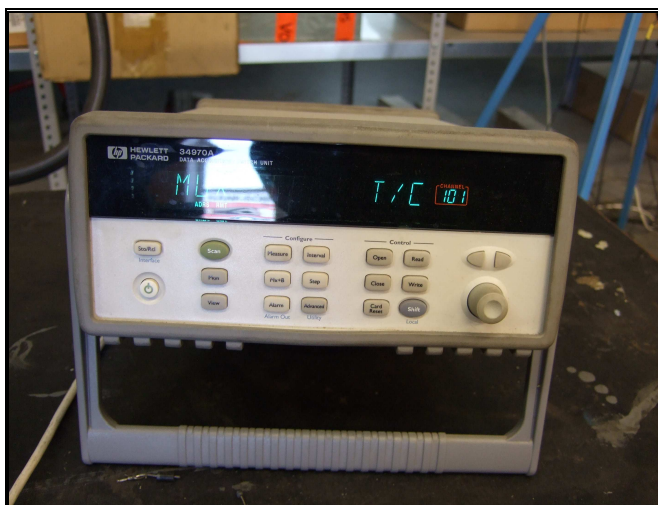
Obrázek 7: Skutečná měřicí linka

4.1 Popis použitých měřících snímačů a přístrojů

Výstupy ze snímačů byly vedeny do měřící ústředny Hewlett-Packard 34970A (viz. Obrázek 8), přes měřící kartu a převodník Agilent 82357 (viz. Obrázek 9) do počítače s měřícím programem Agilent 34970A IntuiLink. Ten umožňuje:

1. nastavit typ snímače
2. nastavit výstup ze snímače (napětí, proud nebo přímo požadovaná hodnota měřené veličiny)
3. nastavit počet desetinných míst
4. provést i tzv. monitorovací měření, kdy se ověří správná funkce čidla a programu.

Data byla z měřící karty exportována do tabulky v Excelu a po naměření bylo třeba nechat je přepočítat určitou maskou pro dosažení skutečných hodnot z proudu a napětí z čidel.



Obrázek 8: Měřící ústředna HP 34970 A



Obrázek 9: Převodník Agilent 82357 [15]

Pro měření tlaku v potrubí za kompresorem a před vzdušníkem byly použity snímače **ZPA UNIPRESS 81 11481** (viz. Obrázek 10).



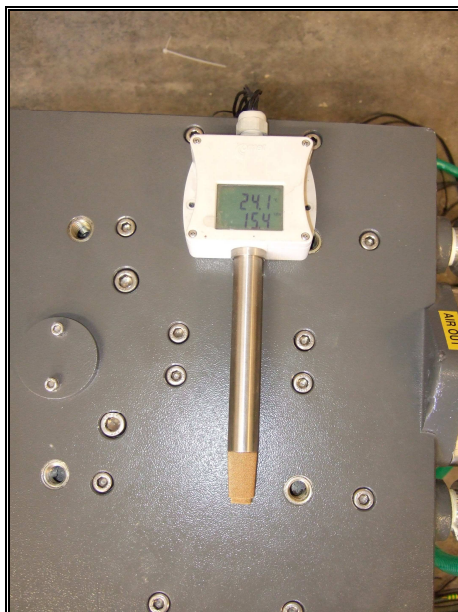
Obrázek 10: Snímač ZPA UNIPRESS 81 11481

Měřený vzduch vstupuje do vstupní komory zakončené nerezovou oddělovací membránou. Vstupní tlak se přes tuto membránu a oddělovací kapalinu (silikonový olej) přenáší na vlastní čidlo s křemíkovou membránou. Všechny vstupní díly jsou vyrobeny z nerezové oceli.

U snímačů relativního tlaku je tlak okolní atmosféry k čidlu přiváděn dutou žilou v připojovacím kabelu.

Snímač pracuje na piezorezistivním principu. Tlak na vstupu snímače způsobí průhyb křemíkové měřicí membrány a tím změnu délky rezistorů. Vlivem piezorezistivních vlastností těchto rezistorů dojde ke změně jejich odporu. Výstupní napětí čidla se poté v počítači přepočítá na tlak.

Pro měření okolní teploty vzduchu a relativní vlhkosti byl použit měřicí snímač **COMET T0213**. (viz. Obrázek 11)



Obrázek 11: Snímač COMET T0213

Snímač je určen pro měření teploty ve °C nebo °F a relativní vlhkosti vzduchu. Je dále možné spočítat teplotu rosného bodu, absolutní vlhkost, měrnou vlhkost, směšovací poměr nebo specifickou entalpii. Výstupem přístroje jsou přímo hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu v okolí měřící linky.

K měření tlakové ztráty na sušičce bylo použito měřící čidlo **CRESSTO TMDG 518 Z3H** (viz. Obrázek 12).



Obrázek 12: Měřící čidlo CRESSTO TMDG 518 Z3H

Pro měření průtoku vzduchu byl použit průtokoměr **KROHNE WFM 3100 W-T** (viz. Obrázek 13).



Obrázek 13: Průtokoměr KROHNE WFM 3100 W-T

Vírový průtokoměr Krohne se používá pro měření rychlosti proudění plynů a kapalin v potrubí. Je použita uklidňující trubice, aby nedocházelo k odečítání chybných hodnot vlivem turbulentního proudění apod.

Pro měření rosného bodu byl použit snímač **TESTO FA 200-2** (viz. Obrázek 14). Tento snímač byl přímo namontován na vzdušníku a ukazoval přímo hodnotu teploty rosného bodu ve °C a zároveň posílal tento údaj do měřicí ústředny.



Obrázek 14: Snímač teploty rosného bodu TESTO FA 200-2

4.2 Vlastní měření

Měření probíhalo v prostorách výrobní haly, kde byl pomocí frekvenčního měniče napájen kompresor Mattei M86J poháněný 22kW stejnosměrným motorem. Stlačený vzduch dále procházel hadicemi, dalšími komponenty linky, až do vzdušníku (viz. Obrázek 5). Měření bylo načasováno ihned po sepnutí celé linky. Celá měřicí linka představovala věrnou kopii skutečného systému na lokomotivě. Zde byl odběr stlačeného, vysušeného vzduchu pro brzdění simulován ručně ovládaným ventilem na vzdušníku. Při náběhu systému byl odpouštěcí ventil úplně zavřený. Když se hodnota tlaku v systému dostala k 9 barům, bylo ručním ventilem nastaveno konstantní množství odpouštěného vzduchu. Poté se jen případnými drobnými zásahy korigovala hodnota tlaku v systému co nejpřesněji okolo hodnoty 9 barů.

Podmínky pro měření jsou patrné z průběhů relativní vlhkosti ϕ a teploty vzduchu t_0 v okolí sušičky závislých na čase t . Jak bylo již zmíněno výše, byly sledovány průběhy teploty a relativní vlhkosti v okolí, tlaku před a za sušičkou, tlakové ztráty na sušičce, průtoku vzduchu linkou a teploty rosného bodu ve vzdušníku. Naměřená data jsou uvedena v následujících tabulkách a grafech.

čas měření t [hh:mm:ss]	relativní vlhkost ϕ [%]	teplota t_o [°C]	" p_1 " tlak před sušičkou [bar]	Δp [bar]	" p_2 " tlak za sušičkou [bar]	průtok vzduchu Q [Nm ³ /hod]	teplota rosného bodu r_b [°C]
11:59:21	50,2	20,4	0,2	0,0	0,0	0,0	-59,4
11:59:51	50,0	20,4	6,1	0,2	5,4	104,3	-60,0
12:00:21	50,2	20,4	9,4	0,1	8,9	104,2	-60,0
12:00:51	50,1	20,4	9,4	0,1	8,9	103,8	-59,4
12:01:21	49,5	20,4	9,3	0,2	9,0	127,6	-59,4
12:01:51	49,6	20,5	9,2	0,1	8,6	101,1	-59,4
12:02:21	48,9	20,6	9,6	0,1	9,1	117,3	-60,0
12:02:51	47,8	20,7	9,4	0,1	8,9	104,1	-59,4
12:03:21	48,2	20,8	9,5	0,1	8,9	115,0	-60,0
12:03:51	48,1	20,9	9,2	0,2	8,6	100,9	-60,0
12:04:21	47,7	21,0	9,1	0,1	8,7	101,1	-60,0
12:04:51	46,3	21,2	9,0	0,2	8,4	109,6	-59,4
12:05:21	45,9	21,3	8,8	0,2	8,2	96,6	-60,0
12:05:51	46,6	21,5	9,1	0,2	8,5	99,3	-60,0
12:06:21	46,7	21,6	8,6	0,2	8,1	105,6	-60,0
12:06:51	45,8	21,8	8,8	0,2	8,3	117,9	-60,0
12:07:21	46,1	21,9	8,9	0,2	8,3	96,7	-60,0
12:07:51	44,8	22,1	9,4	0,1	8,9	125,4	-59,4
12:08:21	43,6	22,3	9,0	0,1	8,5	98,7	-60,0
12:08:51	44,0	22,5	9,3	0,1	8,8	123,6	-60,0
12:09:21	43,4	22,6	9,2	0,2	8,7	100,5	-60,0
12:09:51	42,8	22,9	9,2	0,2	8,6	121,7	-60,0
12:10:21	42,0	23,1	9,2	0,1	8,6	99,5	-59,4
12:10:51	42,2	23,3	9,0	0,1	8,4	97,5	-59,4
12:11:21	40,5	23,5	9,3	0,2	8,7	99,7	-60,0
12:11:51	40,2	23,8	9,2	0,2	8,5	97,7	-60,0
12:12:22	40,2	24,0	9,2	0,1	8,7	99,9	-59,4
12:12:52	39,8	24,2	9,0	0,1	8,4	97,0	-59,4
12:13:22	39,4	24,4	9,4	0,2	8,8	100,2	-59,4
12:13:52	38,7	24,6	9,0	0,2	8,5	97,8	-59,4
12:14:22	38,2	24,8	9,4	0,1	8,8	100,9	-59,4
12:14:52	38,0	25,1	9,0	0,1	8,5	97,6	-59,4
12:15:22	37,9	25,3	9,4	0,2	8,8	122,7	-60,0
12:15:52	37,4	25,5	9,1	0,2	8,6	108,7	-42,6
12:16:22	37,2	25,7	9,2	0,2	8,6	120,3	-47,1
12:16:52	37,0	25,9	9,1	0,1	8,6	98,0	-35,8
12:17:22	35,4	26,1	9,0	0,1	8,5	107,8	-38,1
12:17:52	35,1	26,3	9,2	0,2	8,6	98,2	-31,9
12:18:22	35,2	26,5	9,0	0,2	8,4	96,2	-31,9
12:18:52	34,7	26,7	9,3	0,1	8,7	98,3	-29,6

Tabulka 2: Naměřené hodnoty

Dále byly stanoveny odhady parametrů podle vzorců:

Odhad aritmetického průměru základního souboru:

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2.1)$$

Příklad výpočtu odhadu aritmetického průměru základního souboru pro relativní vlhkost (hodnoty použité pro příklad výpočtu jsou v tabulce naměřených hodnot zvýrazněny tučně (viz. Tabulka 2)):

$$\begin{aligned} \hat{\mu} = \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} x_i = \frac{1}{40} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{39} + x_{40}) = \\ &= \frac{1}{40} (50,2 + 50,0 + 50,2 + \dots + 35,2 + 34,7) = \underline{\underline{43,1\%}} \end{aligned}$$

Odhad směrodatné odchylky základního souboru:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2.2)$$

Příklad výpočtu odhadu směrodatné odchylky základního souboru pro relativní vlhkost:

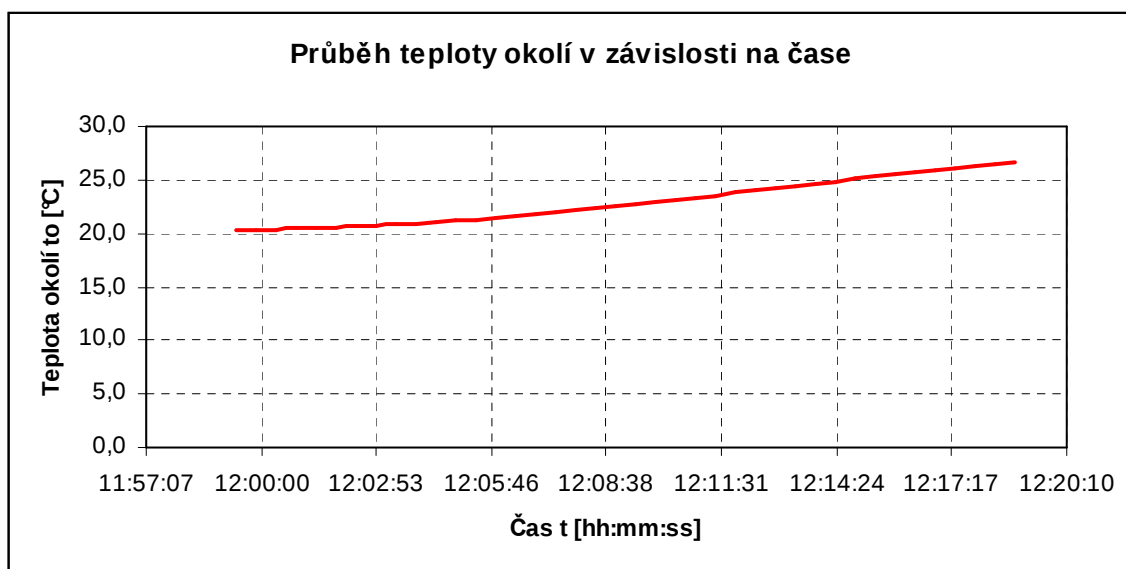
$$\begin{aligned} \hat{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{40-1} ((x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_{39} - \bar{x})^2 + (x_{40} - \bar{x})^2)} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{40-1} ((50,2 - 43,1)^2 + (50,0 - 43,1)^2 + (50,2 - 43,1)^2 + \dots + (35,2 - 43,1)^2 + (34,7 - 43,1)^2)} = \\ &= \underline{\underline{5,0\%}} \end{aligned}$$

Odhady u všech měřených veličin byly stanoveny tímto způsobem a jsou uvedeny v následující tabulce (viz. Tabulka 3). Je zde uvedena i chyba měřících snímačů. Chyba měřící ústředny byla zanedbána.

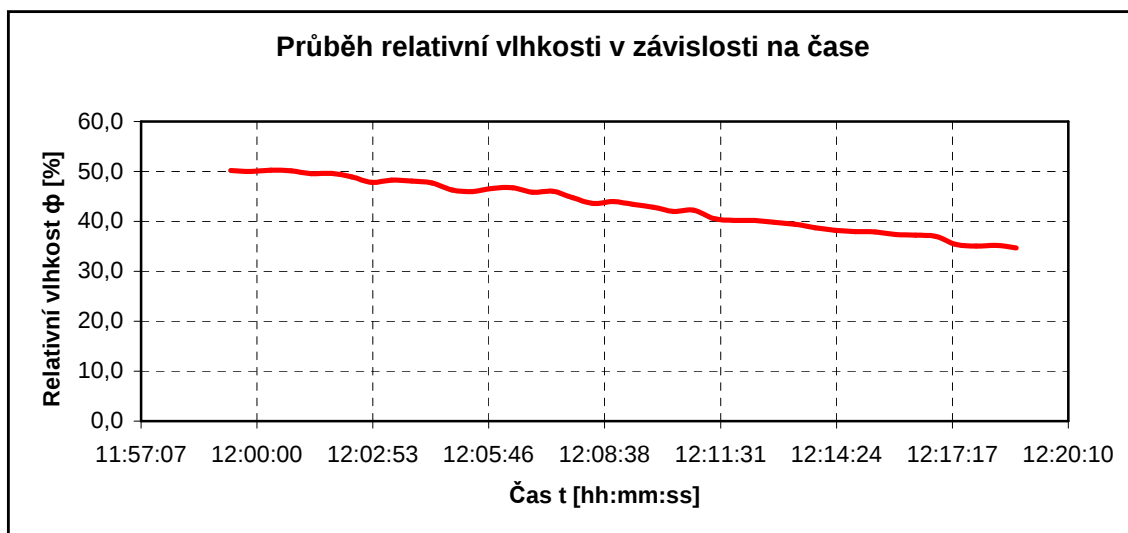
Odhady parametrů základního souboru	relativní vlhkost ϕ [%]	teplota t_o [°C]	" p_1 " tlak před sušičkou [bar]	Δp [bar]	" p_2 " tlak za sušičkou [bar]	průtok vzduchu Q [Nm ³ /hod]	teplota rosného bodu r_b [°C]
odhad aritmetického průměru	43,1	22,9	8,9	0,1	8,3	102,8	-55,7
odhad směrodatné odchylky	5,0	2,1	1,5	0,0	1,5	19,2	9,2
Chyba přístrojů	± 2,50	± 0,40	± 0,02	± 0,3 %	± 0,02	± 1,03	± 2,00

Tabulka 3: Tabulka odhadů parametrů základního souboru a chyba přístrojů

Na grafu průběhu teploty okolí t_o v hale v závislosti na čase (viz. Graf 2) je patrný vliv práce celého systému. Teplota nepatrně stoupala. Je patrné i snižování relativní vlhkosti (viz. Graf 3). Tato skutečnost může být způsobena jak zvyšováním teploty, tak vypouštěním vysušeného vzduchu do nevětrané haly.



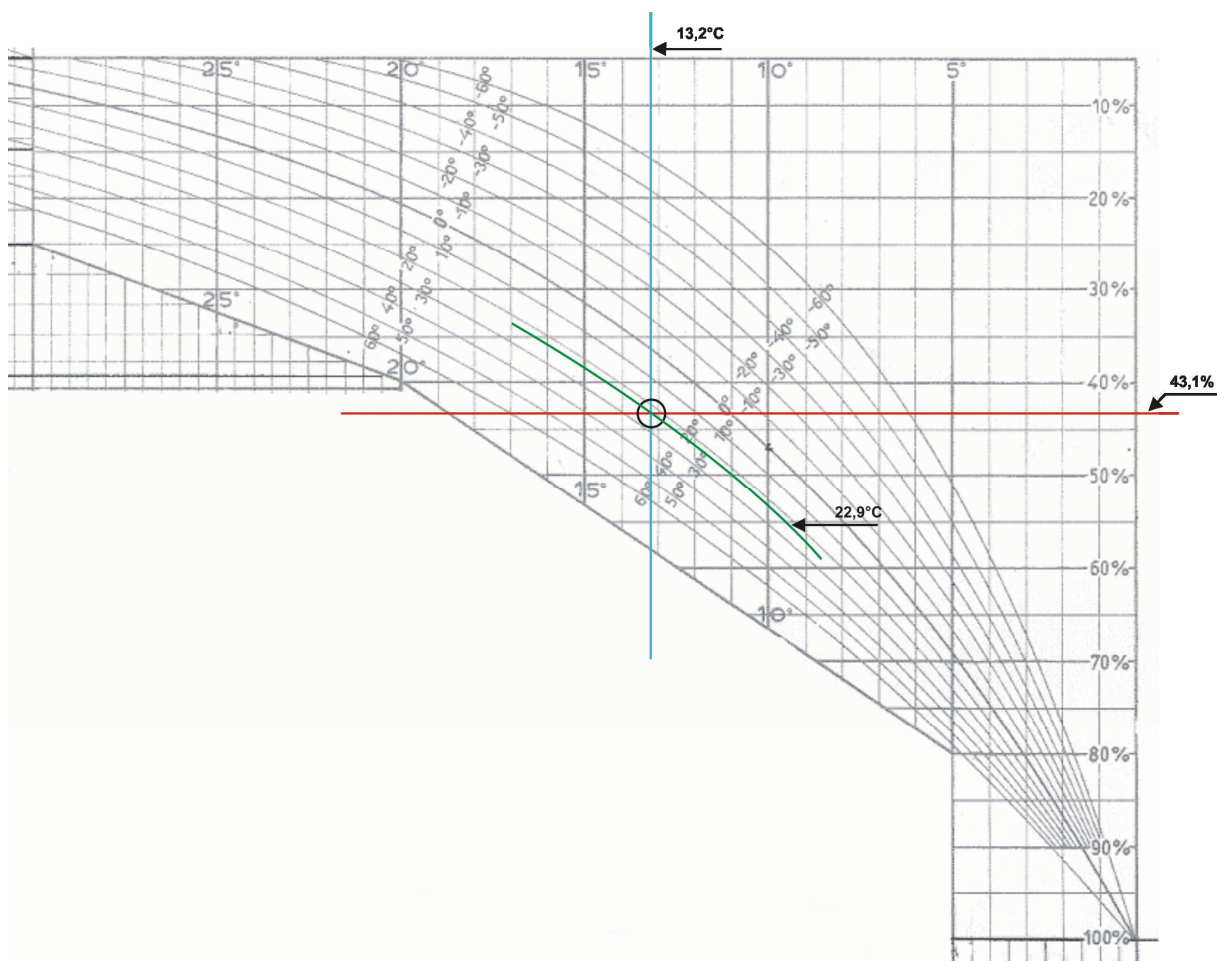
Graf 2: Průběh teploty okolí v závislosti na čase



Graf 3: Průběh relativní vlhkosti v závislosti na čase

Tyto naměřené parametry byly použity pro stanovení přibližné hodnoty rosného bodu v měřící hale. Byl použitý následující způsob.

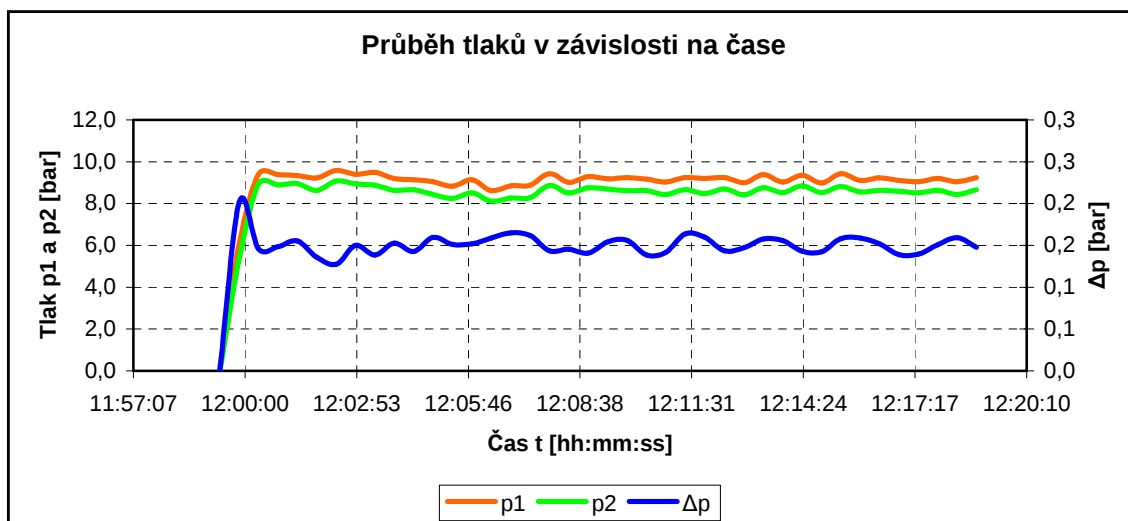
Byly změřeny a následně spočítány hodnoty aritmetického průměru relativní vlhkosti $\phi = 43,1 \%$ a teploty okolí $t_o = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tyto hodnoty byly použity pro stanovení teplotního deficitu t_d z grafu (viz. Graf 4). Nejprve byla vynesena hodnota relativní vlhkosti $\phi = 43,1 \%$ (viz. Graf 4 červená osa), poté hodnota teploty okolí $t_o = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ (viz. Graf 4 zelená křivka). Z jejich průsečíku byl odečten teplotní deficit $t_d = 13,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (viz. Graf 4 tyrkysová osa). Dále byla stanovena teplota rosného bodu (rb) v měřící hale: $\text{rb}_{\text{hala}} = 22,9^\circ\text{C} - 13,2^\circ\text{C} = \underline{\underline{9,73^\circ\text{C}}}$



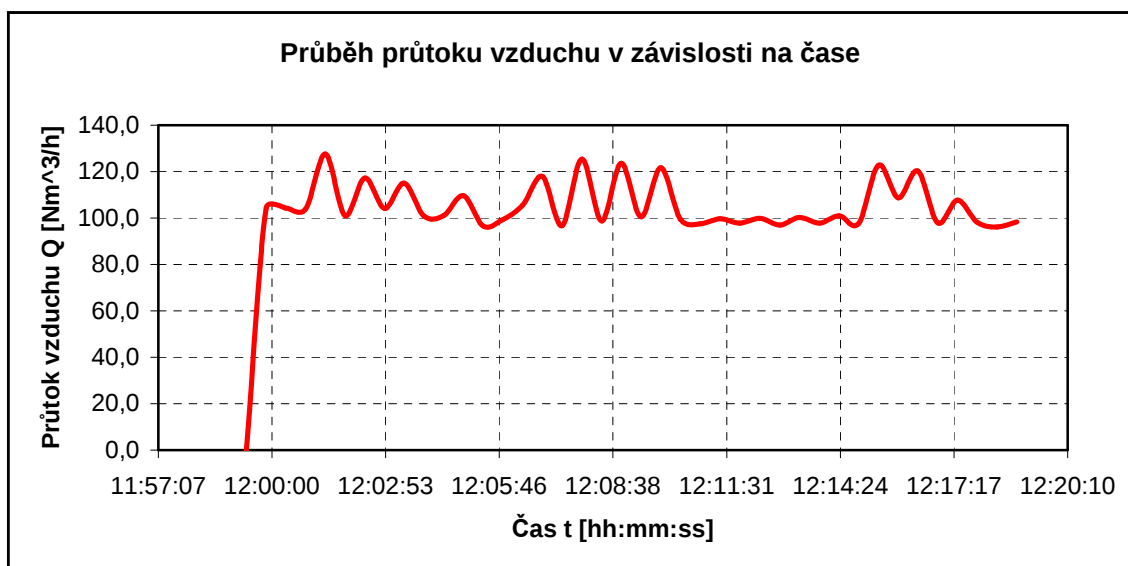
Graf 4: Závislost mezi relativní vlhkostí, teplotou a teplotním deficitem [13]

Další měřenou veličinou byl tlak před sušičkou p_1 , tlak za sušičkou p_2 a tlaková ztráta na sušičce Δp . Jejich průběh závislosti na čase je uveden v grafu (viz. Graf 5). Tlak je další důležitá veličina, kterou bylo potřeba kontrolovat, protože je známo, že adsorpce nejlépe probíhá za vysokého tlaku a nízké teploty. Hodnota tlaku p_1 a p_2 se pohybovala v okolí požadovaných 9 barů. Tlaková ztráta Δp se pohybuje kolem hodnot 0,1 a 0,2 baru. Tato hodnota je přijatelná a znamená malé ovlivnění vzduchové tratě sušičkou.

Průběh průtoku vzduchu je ověřením dodávky potřebného množství vzduchu pro brzdny systém (viz. Graf 6). Kolísání hodnot průtoku vzduchu je příčinou profukování kolony, která je v režimu desorpce. Používá se 15 % vysušeného vzduchu. Po 15 sekundách se odfuk uzavře a hodnota průtoku vzduchu opět vzroste.

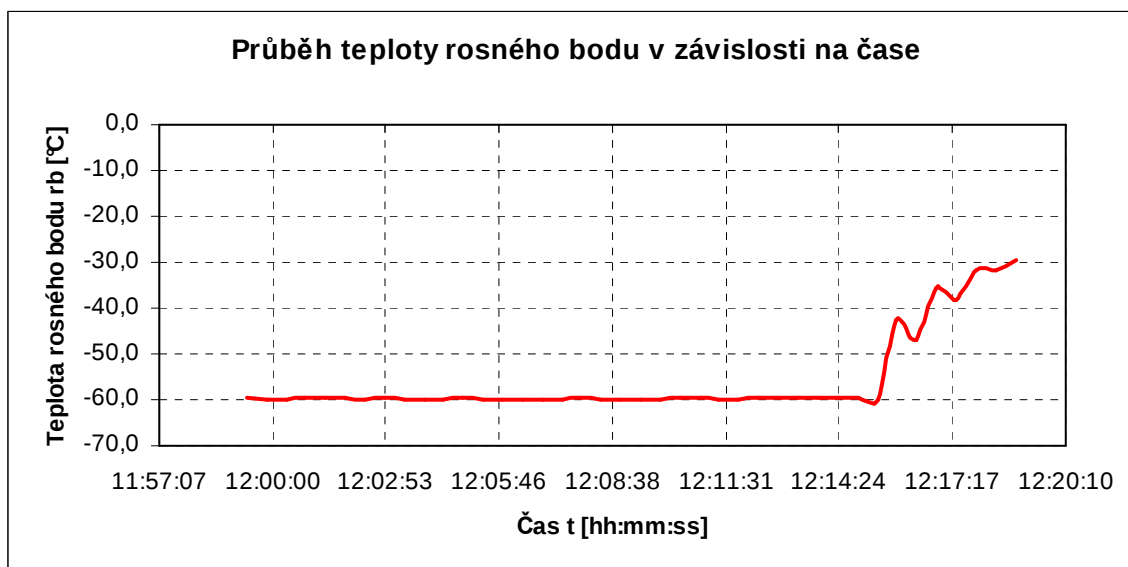


Graf 5: Průběh tlaků v závislosti na čase



Graf 6: Průběh průtoku vzduchu v závislosti na čase

Průběh teploty rosného bodu (viz. Graf 7) byl po většinu doby měření konstantní (-60°C). Ke konci měření začala hodnota teploty rosného bodu stoupat. Možnou příčinou je rostoucí teplota v hale.



Graf 7: Průběh teploty rosného bodu v závislosti na čase

5 Koncept nové sušičky

Druhým úkolem práce bylo navrhnout koncept nového řešení konstrukce sušičky vzduchu. Pro to, aby nová sušička pracovala dle požadavků na vysoušení vzduchu pro brzdny systém drážních vozidel, je třeba zajistit přívod vzduchu do dvou kolon naplněných adsorbentem a následné přepínání mezi kolonami (cyklické přepínání mezi procesem adsorpce a desorpce – princip PSA). Tím pádem bylo zapotřebí vybrat ventily, potrubí a řídicí systém. Dále vytvoření příslušného ovládacího programu a potřebné dokumentace. Tyto úkoly bylo třeba splnit tak, aby byla zaručena správná funkce sušičky.

5.1 Výběr ventilů a komponent pneumatického obvodu

Jako prvním bodem konceptu bylo potřeba vybrat vhodné ventily. Ty musí být zapojeny dle následujícího schématu a splňovat uvedené požadavky, aby systém sušičky vykonával potřebnou práci.

Základní požadavky:

Médium: vzduch

Množství vzduchu: 150-300 Nm³/h

Rozměr potrubí: 1“

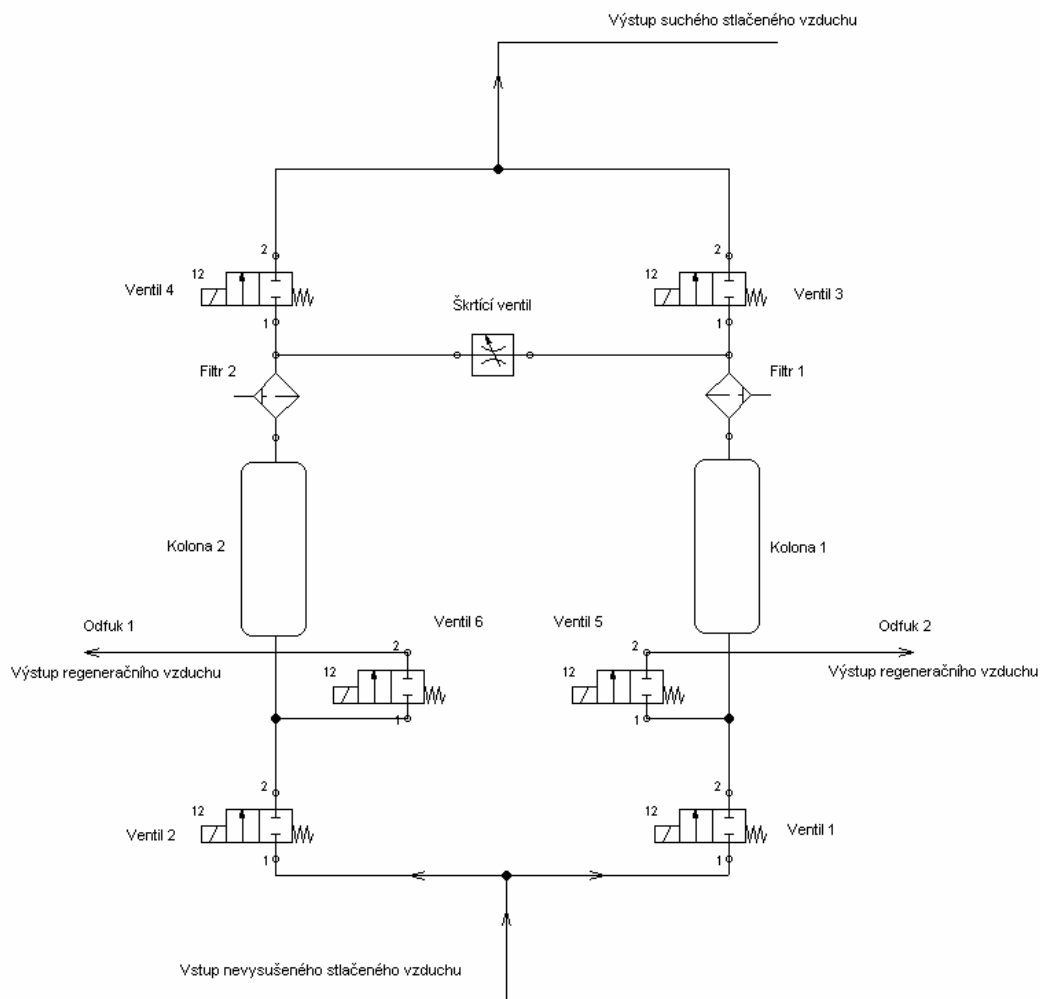
Absolutní tlak: 10 bar

Teplota vzduchu: teplota okolí (umístění na lokomotivě)

Napětí: 24 V / DC

Intervaly:

- sušení: 1 min.
- regenerace: 15 sec.
- odtlakování: 15 sec.



Obrázek 15: Schéma zapojení komponent sušičky

5.1.1 Výběr solenoidových ventilů

Byly zvoleny solenoidové ventily **ASCO SCG287A004** (viz. Obrázek 16). Důvodem jsou jejich vhodné parametry pro toto použití (viz. katalogový list [16]). Zároveň se jeví jako vhodné použít jeden stejný typ ventilů, v celém systému. Ventily se uvažují normálně zavřené.



Obrázek 16: Solenoidový ventil ASCO SCG287A004 [16]

SCG287A004 24VDC

(koaxiální solenoidový ventil, vnitřní závity G 1", světlost 25 mm, funkce NC, konstrukce 2/2, max. provozní tlak 40 / 12 (zpětný) bar, ventil funguje od 0 bar, tělo ventilu: mosaz, těsnění FPM / PTFE (viton / teflon), teplotní rozsah -20 -:- 100°C, připojení cívky konektorem, konektor je standardní součástí dodávky, další informace (viz. katalogový list [16])

5.1.2 Výběr filtrů pro ochranu ventilů

Dále je v systému nutné ošetřit vzduch vystupující z kolon pro možný únos částeczek prachu. Ty mohou vzniknout otěrem adsorbentu při průchodu regenerovaného vzduchu a následně poškodit funkci navazujících ventilů. Požadavku oddělení prachových částeczek za kolonou vyhovuje na doporučení techniků z firmy ASCO filtr **ASCO 34207094**.

Filtr ASCO 34207094

(filtr stlačeného vzduchu, vnitřní závity G1", velikost 160, max. tlak 17,5 bar, filtrace 30 mikronů, poloautomatické odpouštění kondenzátu)

5.1.3 Výběr škrtícího ventilu

Škrtící ventil ASCO Inline 1“

Dále navazující komponentou, kterou bylo potřeba zvolit, byl škrtící ventil, který reguluje množství zpětného regeneračního vzduchu. Zvolil jsem ventil ASCO Inline 1“. Je vybaven aretační matičkou, kterou se zajistí nastavovací šroub. Nedojde tak k možné změně průtoku z důvodu samovolného přestavení zpětného ventilu, například vibracemi apod.

5.1.4 Výběr tlumiče odfuku

Tlumič odfuku ASCO 1“

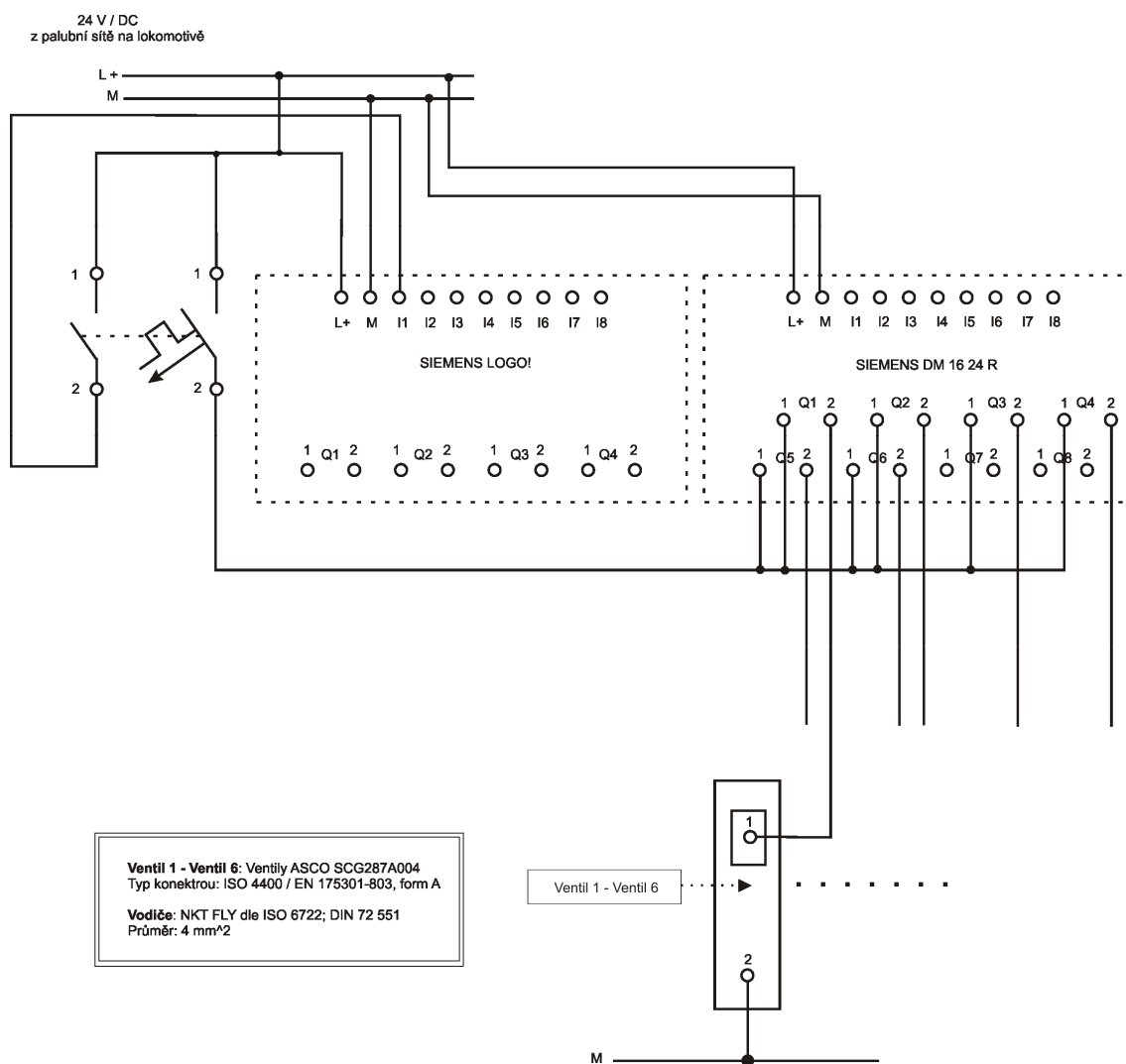
Poslední prvkem systému sušičky bylo vybrání tlumiče odfuku. Opět jsem volil ze sortimentu ASCO a vybral tlumič s přípojem 1“ závitem.

5.2 Řídicí systém – SIEMENS LOGO!

Při výběru řídicího obvodu byl brán zřetel na kompaktnost a robustnost systému a schopnost práce v nejrůznějších podmínkách. Proto byl vybrán systém SIEMENS LOGO. Základní požadavky na řídicí systém byly: 6 digitálních výstupů (pro šest ventilů), možnost drobných úprav programu bez složitých operací, spínání proudů 2,5 A.

Na těchto základech byl vybrán základní modul SIEMENS LOGO! Basic 24 RC DC ve spojení s rozšiřujícím modulem DM 16 24 R, který disponuje 8 digitálními reléovými výstupy (5A).

Další část řešení obvodu bylo použití jištění. V tomto případě se v praxi obvykle používá jistič B16 (charakteristika typu zátěže: B, max. proud: 16A). Jištění bylo realizováno, aby nedošlo k případnému zničení řídicího obvodu a mechanismu sušičky při poruše nějakého z ventilů. Při poruše jednoho nebo více ventilů a zvýšení proudu, se vypne jistič B16. Tím se sepne pomocný kontakt a na vstupu I1 se tak objeví 24 V. Tím dostane řídicí obvod signál o poruše. K tomuto účelu jsem vybral jistič MOELLER PL7 B16 v kombinaci s pomocným kontaktem MOELLER Z-AHK. Všechny komponenty jsem doporučil propojit vodiči NKT FLY o průměru 4 mm² dle následujícího schématu (viz. Obrázek 17 a Tabulka 4). Celý návrh je dostatečně kompaktní.



Obrázek 17: Schéma zapojení řídicího obvodu SIEMENS LOGO! a jištění

SIEMENS LOGO!	vstup:	připojit:
řídící systém	L+	L+
	M	M
	I1	svorka 2 Z-AHK

SIEMENS DM 16 24 R	vstup:	připojit:	výstup:	připojit:
rozšiřující modul	L+	L+	Q1 svorka 2	ventil 1 svorka 1
	M	M	Q2 svorka 2	ventil 3 svorka 1
			Q3 svorka 2	ventil 2 svorka 1
			Q4 svorka 2	ventil 4 svorka 1
			Q5 svorka 2	ventil 6 svorka 1
			Q6 svorka 2	ventil 5 svorka 1

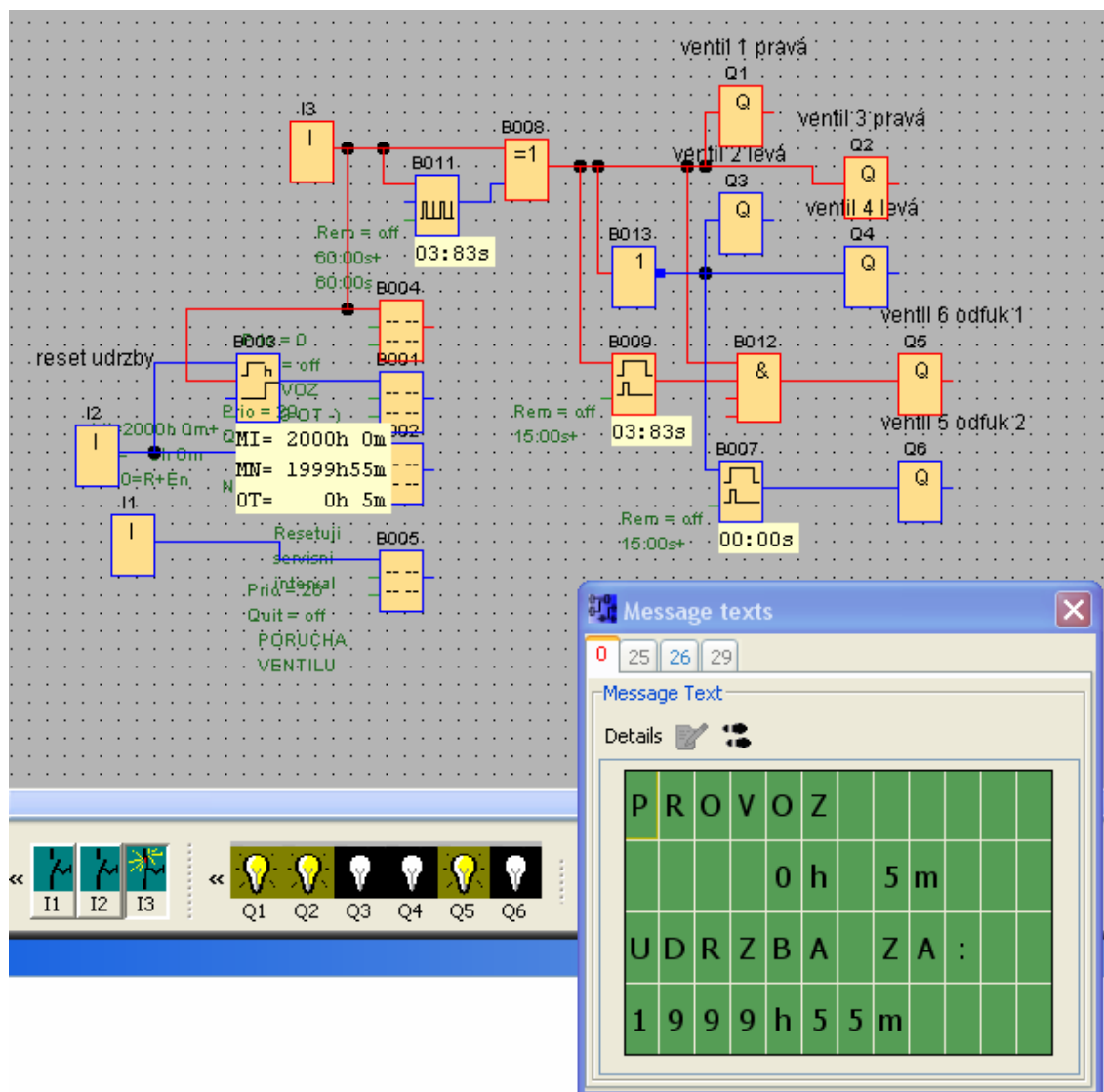
MOELLER PL7 B16	vstup:	připojit:	výstup:	připojit: DM1624R
jistič	svorka 1	L+	svorka 2	Q1 svorka 1
			svorka 2	Q2 svorka 1
			svorka 2	Q3 svorka 1
			svorka 2	Q4 svorka 1
			svorka 2	Q5 svorka 1
			svorka 2	Q6 svorka 1

MOELLER Z-AHK	vstup:	připojit:	výstup:	připojit:
pomocný kontakt	svorka 1	L+	svorka 2	I1 LOGO!

Tabulka 4: Plán zapojení svorkovnice

5.2.1 Program pro ovládání ventilů

Po návrhu obvodu bylo potřeba vytvořit program, kterým bude možné ventily ovládat dle požadavků na práci sušícího systému. Program byl vytvořen softwarem LOGO!soft. Program byl tvořen blokovým schématem a je uveden na obrázku (viz. Obrázek 18).

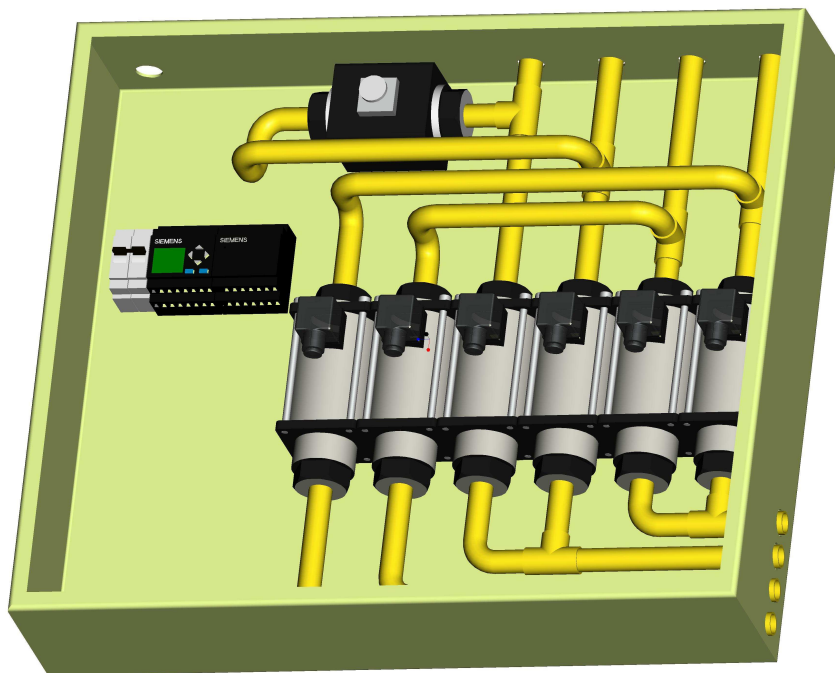


Obrázek 18: Schéma programu v softwaru LOGO!soft spolu se zprávou o hodinách zbývajících do servisní kontroly

Program pracuje takto: přepíná se po minutě mezi ventilem 1 + ventil 3 a ventilem 2 + ventil 4. Takto se rozděluje stlačený vzduch střídavě do kolony 1 a do kolony 2, jak je tomu v principu PSA adsorpce. Jsou ovládány i ventily 5 a 6, kterými se provádí odtahování. Doba otevření těchto ventilů je dle základního požadavku 15 sekund. Dále byla realizována informační zpráva na displeji řídicího systému, která určuje dobu provozu v hodinách a minutách a byl zobrazen i čas do další servisní kontroly. Čas servisní kontroly musí být upraven pro každou aplikaci zvlášť s ohledem na prostředí provozu, kde se s různými prostředími zásadně mění doba mezi nutnými údržbami.

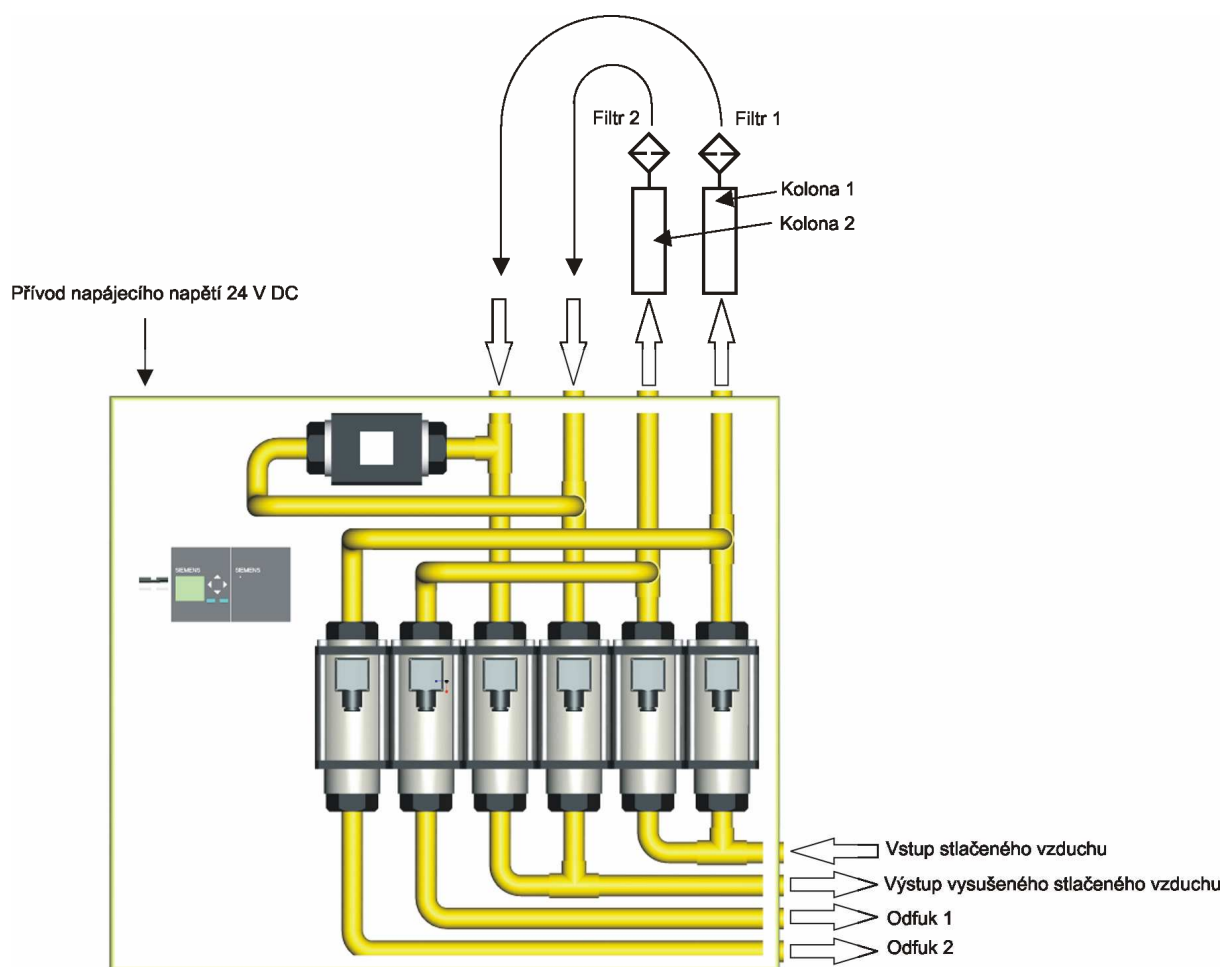
5.3 Návrh konstrukčního řešení

Nakonec bylo potřeba navrhnout možné konstrukční řešení celého sušicího systému a uspořádání do rozvaděče. Bylo kladeno kritérium na kompaktní velikost a smysluplné uspořádání vstupů a výstupů rozvaděče. Byla navržena tato konstrukce (viz. Obrázek 19).



Obrázek 19: Konstrukční řešení rozvaděče s ventily a s řídicím obvodem

Byl kladen důraz na konstrukční jednoduchost a možnost výměny porouchaných komponent a snadnou údržbu. Ventily ASCO SCG287A004 24VDC byly v rozvaděči montovány v pořadí zprava: ventil 1, ventil 2, ventil 4, ventil 3, ventil 6, ventil 5. Byly propojeny 1“ trubkami dle schématu funkce (viz. Obrázek 15). Dále bylo navrženo umístění řídicího obvodu a jističů na lištu DIN 35. Vstupy a výstupy z rozvaděče jsou popsány na obrázku (viz. Obrázek 20). Po složení modelu zařízení z komponent o reálné velikosti, bylo třeba určit rozměry rozvaděče. Byl uvažován plech tloušťky 3 mm. Rozměry jsou: šířka: 815 mm, výška 700 mm, a hloubka 170 mm. Při těchto rozměrech se zařízení bez problémů vejde do rozvaděče.



Obrázek 20.: Vstupy a výstupy z rozvaděče

Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjištění základních provozních parametrů při práci systému úpravy brzdného vzduchu pro drážní vozidla. K odzkoušení parametrů byla použita linka složená z křídlového kompresoru, filtrů, sušičky a vzdušníku. V provedené zkoušce se pohybovala tlaková ztráta na sušičce (0,1 - 0,2 baru) a ostatní měřené veličiny (průtok, tlak) ve vyhovujících mezích. Dále byla zaznamenána konstantní hodnota teploty rosného bodu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, která ke konci měření vzrostla až na teplotu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, může to být důsledek proudění ve vzdušniku. V současné době je tato skutečnost předmětem šetření. Rozhodující pro hodnocení sušičky je teplota rosného bodu hned za sušičkou. Požadovaná teplota rosného bodu pro použití v brzdových systémech drážních vozidel je $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zanedbání posledních zvyšujících se hodnot teploty rosného bodu sušička pracovala v nadprůměrném výkonu (teplota rosného bodu byla o $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší, než požadovaná hodnota), především zásluhou vysoké sorpční schopnosti použitého adsorbentu. Měřením základních provozních parametrů byla ověřena správná funkce celého zařízení.

Dalším úkolem bylo vytvoření konceptu nového řešení sušičky vzduchu pro drážní vozidla. Podle hlavních veličin (tlak, teplota, průtok pracovního média, rozměry potrubí, napájení) a principu funkce byla vybrána tato zařízení: solenoidové ventily ASCO SCG287A004, škrťací ventil ASCO Inline 1“, filtry pro ochranu ventilů ASCO 34207094 a tlumiče odvodu ASCO 1“. K řízení solenoidových ventilů byl použit řídicí obvod SIEMENS LOGO! Basic 24 RC DC ve spojení s rozšiřujícím modulem SIEMENS DM 16 24 R. Obvod byl jistěn přístrojem MOELLER PL7 B16 a pomocným kontaktem MOELLER Z-AHK. Vše bylo propojeno vodiči NKT FLY o průřezu 4 mm^2 . Pro řízení byl vytvořen program v softwaru LOGO!soft. Nakonec byla navržena konstrukce nové sušičky. Samostatný modul s ovládanými ventily a řídicím obvodem je výhodný jak z hlediska umístění celého systému na lokomotivě, tak z hlediska operativní údržby.

V budoucnosti se plánuje výroba sušičky pro testovací a praktické účely.

Literatura

- [1] MÍKA, Vladimír. *Základy chemického inženýrství*. Vydání druhé, nezměněné. Praha : SNTL, 1981. 872 s. 04-605-81.
- [2] HAASZ, Vladimír; SEDLÁČEK, Miloš . *Elektrická měření : Přístroje a metody*. vydání druhé. ČVUT Praha : Vydavatelství ČVUT Praha, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [3] KALČÍK, Josef; SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*. Vydání první. Academia Praha : Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1973. 540 s. 104-21-825.
- [4] MOORE, Walter J. *Fyzikální chemie*. První vydání ze čtvrtého přepracovaného vydání anglického originálu Physical Chemistry (1972), vydaného nakladatelstvím Prentice Hall. Praha : SNTL Praha, 1979. 976 s. 04-609-79.
- [5] PECHOČ, Vladimír. *Vyhodnocování měření a početní metody v chemickém inženýrství*. Vydání první. Praha : SNTL Praha, 1961. 301-05-113.
- [6] *Vagony* [online]. 2000 [cit. 2010-03-04]. Jak brzdí vlak. Dostupné z WWW: <<http://www.vagony.cz/pojezdy/brzda/brzda.html>>.
- [7] Křídlové kompresory. *Firemní dokumentace Mondo s.r.o.*. Únor 2000, s. 3-16.
- [8] *Mondo* [online]. 2006 [cit. 2010-03-06]. Princip činnosti rotačních křídlových kompresorů. Dostupné z WWW: <<http://www.mondo.cz/editor/index.php?oid=5d8cfa71c2768347f9634f27c733e943>>.
- [9] *2e* [online]. 2007 [cit. 2010-04-08]. Adsorpční sušiče stlačeného vzduchu. Dostupné z WWW: <http://www.2e.cz/download/pros/pneudri_midiplus.pdf>.
- [10] *Hankison* [online]. 2010 [cit. 2010-05-02]. Filter Elements. Dostupné z WWW: <http://www.hankisonintl.com/products_filter_elements.aspx>.
- [11] Sušičky stlačeného vzduchu pro železniční vozidla. *Firemní dokumentace Mondo s.r.o.*.
- [12] Přehled vlastností molekulových sít. *Firemní dokumentace Mondo s.r.o.*. Únor 2000, s. 1.
- [13] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2004 [cit. 2010-05-2]. Výpočet teploty rosného bodu. Dostupné z WWW: <http://www.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/Pojmy_soubory/ukazky.htm>.

- [14] *Aktivní uhlí* [online]. 2005 [cit. 2010-05-16]. Info. Dostupné z WWW: <<http://www.aktivni-uhli.cz/>>.
- [15] *Agilent Technologies* [online]. 2000 [cit. 2010-05-16]. Technical Support:82357B USB/GPIB Interface High-Speed USB 2.0. Dostupné z WWW: <http://cp.home.agilent.com/upload/cmc_upload/82357B_800x447.jpg>.
- [16] *ASCO JOUCOMATIC* [online]. 2006 [cit. 2010-05-16]. Solenoidové ventily 287. Dostupné z WWW: <<http://www.ascojoucomatic.cz/data/dokumenty/V272-00036cz.pdf>>.