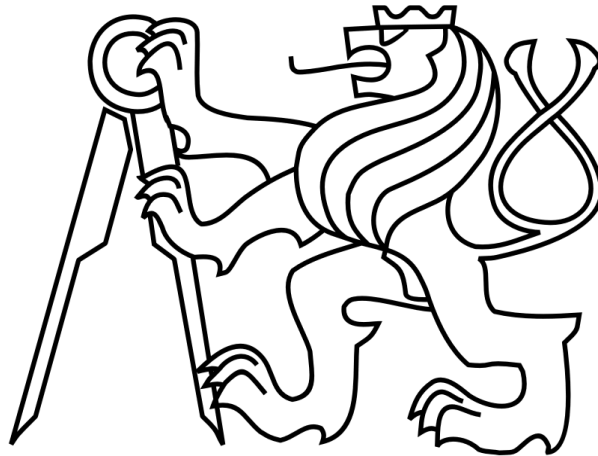


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Vyhodnocení energetické náročnosti výroby tlakového vzduchu pro
obráběcí stroj

2015

Michal Stejskal

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 14.6.

.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Machylovi, Ph.D. za vedení, odborné konzultace a podnětné připomínky při jejím vypracování.

Chtěl bych také poděkovat svým rodičům a přítelkyni za podporu a trpělivost, se kterou mě podporovali při studiu a tvorbě této bakalářské práce.

Anotace

Autor:	Michal Stejskal
Název BP:	Vyhodnocení energetické náročnosti na výrobu tlakového vzduchu pro obráběcí stroj
Rozsah práce:	45 str., 35 obr., 6 tab.
Školní rok vyhotovení:	2015
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Jan Machyl, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Vyroubal, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT, FS, Ú12135
Využití:	měření spotřeby kompresoru a obráběcího stroje
Klíčová slova:	kompresory, šroubový kompresor, pístový kompresor, energetická náročnost na výrobu tlakového vzduchu, Atlas Copco, Schneider, Orlík Optimal
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá zjišťováním energetické náročnosti na výrobu jednoho litru stlačeného vzduchu pro obráběcí stroj. Nejprve je rozbor kompresorů používaných pro zásobování tlakovým vzduchem obráběcí stroje. Následuje experimentální měření na čtyřech kompresorech v různých režimech. Výsledkem je koeficient určující spotřebu elektrické energie na výrobu jednoho litru stlačeného vzduchu.

Annotation

Author:	Michal Stejskal
Title:	Evaluation of the energy consumption in production of compressed air for machine tool
Extent:	45 p., 35 fig., 6 tab.
Academic year:	2015
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12135 Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Machyl, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jiří Vyroubal, Ph.D.
Submitter of the theme:	ČVUT, FS, Ú12135
Application:	measurement of compressor and machine tool consumption
Key words:	compressor, spiral compresor, piston compresor, energy consumption in production of compressed air, Atlas Copco, Schneider, Orlik Optimal
Annotation:	Bachelor thesis deals with energy consumption in production of one liter of compressed air for machine tool. Firstly there is analysis of compressors used for supply of compressed air to machine tools. Following by experimental mesurments by four compressors in different modes. The result is determing factor of energy consumption for production of one liter of compressed air.

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Cíl.....	9
3.	Termodynamické děje v kompresorech	10
3.1	Ideální kompresor.....	10
3.2	Izotermická komprese	11
3.3	Skutečný kompresor.....	12
4.	Kompresory	13
4.1	Šroubové kompresory	13
4.2	Pístové kompresory	14
4.3	Obecné porovnání pístových kompresorů se šroubovými kompresory	16
5.	Měřicí aparatura.....	17
5.1	Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus	17
5.2	Set pro měření tlakového vzduchu	18
6.	Postup měření	18
6.1	Postup při režimu při plnění vzdušníku	19
6.2	Postup při konstantním průtoku vzduchu.....	19
6.3	Postup při měření denního režimu a nočního režimu.....	19
7.	Popis zapojení měřicí aparatury.....	19
8.	Měření na kompresorech	21
8.1	Měření na pístovém kompresoru Orlík Optimal	21
8.2	Měření na pístovém kompresoru Schneider.....	24
8.3	Měření na šroubovém kompresoru Schneider.....	28
8.4	Měření na šroubovém kompresoru Atlas Copco.....	33
9.	Kolísání průtoku v jednotlivých režimech.....	37
10.	Závěr	38
11.	Seznam obrázků.....	40
12.	Seznam tabulek.....	42
13.	Použitá literatura	43
14.	Seznam Příloh	44

Přehled použitých veličin a jednotek

I [A]	proud
U [V]	napětí
P [W]	výkon
t [s]	čas
V [l]	objem
p [Pa]	tlak
Q [l/min]	průtok
n [min ⁻¹]	otáčky
r [J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]	měrná plynová konstanta
u [J*kg ⁻¹]	měrná vnitřní energie
h [J*kg ⁻¹]	měrná entalpie
T [K]	teplo
w [J]	termodynamická práce
q [J]	termodynamické teplo

1. Úvod

Na výrobu tlakového vzduchu pro obráběcí stroje se používají kompresory. Kompresory zajišťují nepřetržitou dodávku tlakového vzduchu buď přímo do obráběcího stroje, a nebo většinou do rozvodu tlakového vzduchu. Rozvod tlakového vzduchu může měřit až desítky metrů a mít několik výstupů. Do výstupu tlakového rozvodu můžou být zapojeny různé spotřebiče např. obráběcí stroje, ofukovací pistole a pneumatické utahováky.

V dnešním strojírenství se bez tlakového vzduchu žádný moderní počítačem řízený obráběcí stroj neobejde. Proto výroba tlakového vzduchu pro obráběcí stroje je nezbytnou, ale i energeticky náročnou operací. S energetickou náročností přicházejí nepříjemné vysoké finanční náklady. Náklady na stlačený vzduch jsou jedny z největších ve strojírenských podnicích. Z tohoto důvodu bych se rád pokusil v této bakalářské práci experimentálně zjistit energetickou náročnost na výrobu stlačeného vzduchu pro obráběcí stroj.

Tato hodnota bude použita v projektu Ecodesign. Mohla by být také důležitá pro podniky při přesném měření spotřeby tlakového vzduchu obráběcího stroje, neboť v podnicích není většinou možné měřit přímo na patě kompresorů, ale pouze na patě obráběcích strojů, které jsou zapojeny do rozvodů. Obráběcí stroje zapojené do rozvodu jsou zatíženy chybou netěsnostmi potrubí a armatur, kterými proudí stlačený vzduch.

2. Cíl

Cílem této bakalářské práce je stručně popsat kompresory používané ve strojírenství a popsat termodynamické děje. Zvolit vhodnou metodu měření a zapojení měřící aparatury.

Hlavním bodem této práce je experimentálně vyvodit koeficient závislosti energetické náročnosti na výrobu jednoho litru stlačeného vzduchu [Wh/l] pro jednotlivé typy kompresorů – pístové a šroubové kompresory. Kompresory budou měřeny v různých pracovních režimech. Bude se zjišťovat, zda nelze použít jeden koeficient na jednu celou kategorii kompresorů např. pístové kompresory. Tento koeficient by mohl být důležitý a potřebný pro podniky při počítání a měření spotřeby vynaložené na výrobu stlačeného vzduchu pro obráběcí stroje.

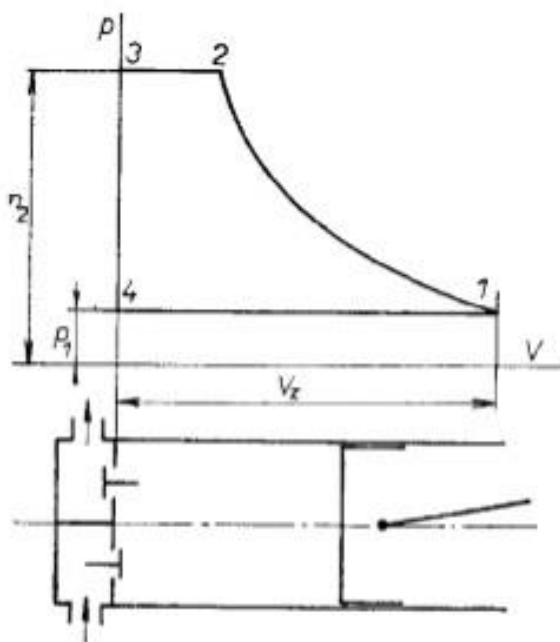
Následně budeme sledovat míru kolísání průtoku v závislosti na tlaku a velikosti vzdušníku.

3. Termodynamické děje v kompresorech

3.1 Ideální kompresor

Základní teorie je stejná pro všechny objemové kompresory. Ideální kompresor nemá škodlivý prostor, pracuje s ideálním plynem, nemá žádné ztráty a pracuje, aniž by sdílel teplo s okolím. Pro popis dějů v kompresorech je použit pístový jednostupňový kompresor. V pístovém kompresoru se plyn stlačuje z počátečního (sacího) tlaku na konečný (výtlačný) tlak v jednom prostoru při jednom zdvihu pístu. Pracovní cyklus je znázorněn v p - V diagramu pro objemové kompresory viz (Obr. 1). Cyklus začíná z bodu čtyři do bodu jedna, to kompresor nasává plyn do pracovního prostoru. Z bodu jedna do bodu dva vzniká komprese nasávaného plynu z důvodu zmenšování se pracovního prostoru. Mezi body dva a tři je výtlačný tlak stlačeného vzduchu z pracovního prostoru. A z bodu tři do bodu čtyři je okamžitý pokles tlaku v kompresoru na tlak sací, poté cyklus opět začíná.

Komprese u ideálního objemového kompresoru se může považovat za izotermický děj. [1]



Obr. 1 - p-V diagram ideálního kompresoru [1]

3.2 Izotermická komprese

Izotermická komprese probíhá pomalu, proto se teplota plynu dokáže vyrovnat s teplotou okolí, která je neměnná. Vztah mezi počátečním a koncovým bodem určuje Boyleův zákon. [1]

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = p v = konst.$$

Boyleův zákon

(1)

$$du = c_v dT = 0, \quad dh = c_p dT = 0$$

Diferenciál měrné energie a diferenciál měrné entalpie.

(2)

Z prvního a druhého tvaru věty termodynamické odvodíme rovnici (3).

$$dq = 0 + dw = 0 + dw_t, q = w = w_t$$

(3)

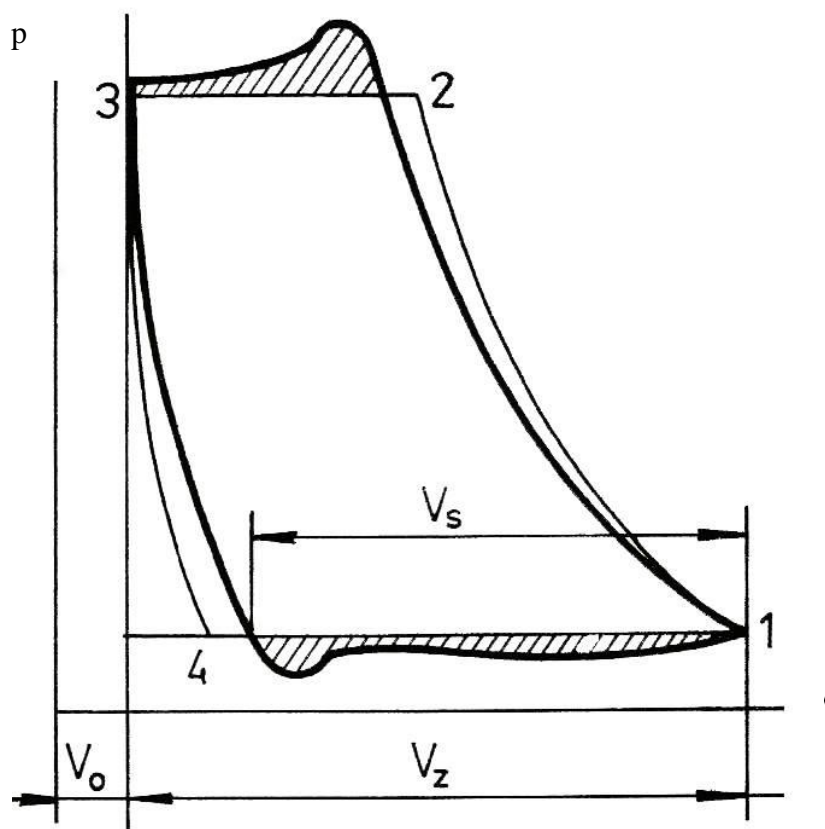
Dostaneme objemovou práci při izotermické kompresi.

$$\int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = rT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

(4)

3.3 Skutečný kompresor

Skutečný kompresor na rozdíl od ideálního kompresoru se vyznačuje tím, že má škodlivý prostor, netěsnosti ve ventilech, nasávaný plyn se ohřívá a je nutné překonávat mechanické odpory. Tyto rozdíly se řeší mnoha opravnými koeficienty. Ukázka skutečného $p - V$ diagramu viz (Obr.2). Skutečný $P-V$ diagram je deformován vlivem plynu, který zůstal ve škodlivém prostoru. Vyšrafované oblasti ukazují tlakové ztráty při sání a výtlaku. U pístových kompresorů jsou charakteristické vystouplé hrboly mezi body 4-1 a mezi body 2-3. [1]

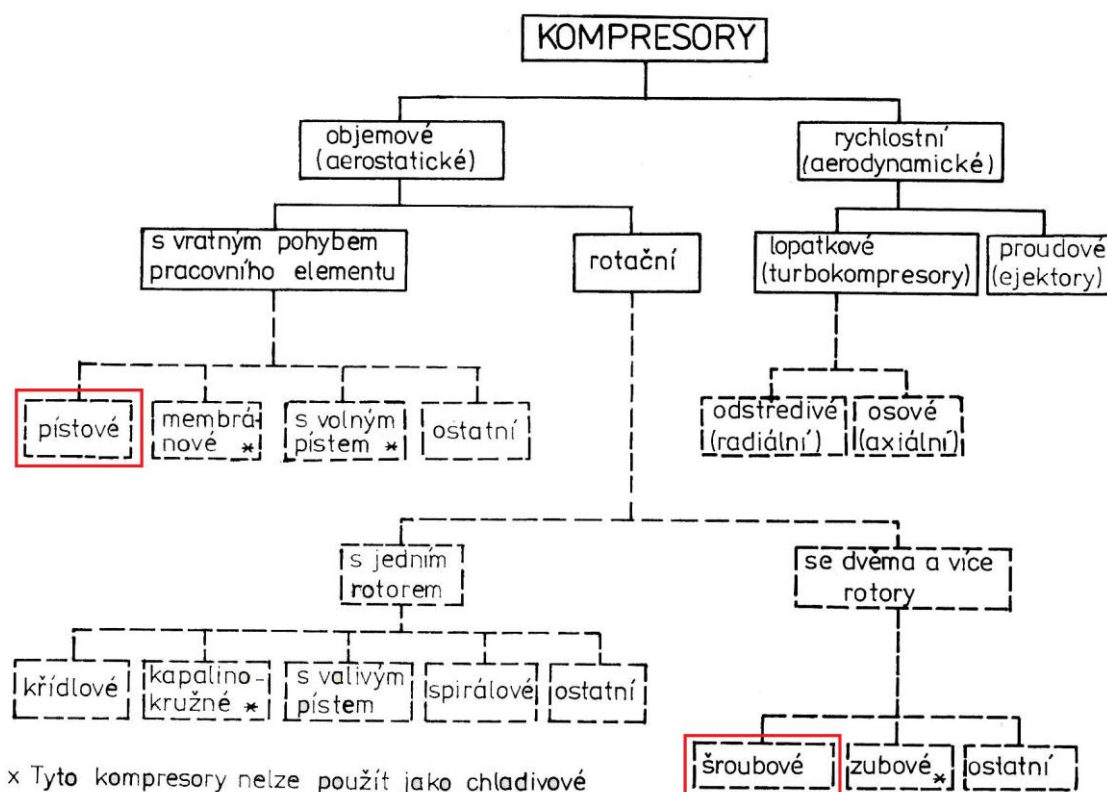


Obr. 2 - $p-V$ diagram skutečného pístového kompresoru [1]

4. Kompresory

Nejpoužívanějšími kompresory ve strojírenských podnicích jsou kompresory pístové a kompresory šroubové. Proto se zaměříme na tyto druhy kompresorů.

Přehled všech kategorií kompresorů viz (Obr. 3) s červeně vyznačenými pístovými a šroubovými kompresory. [1]

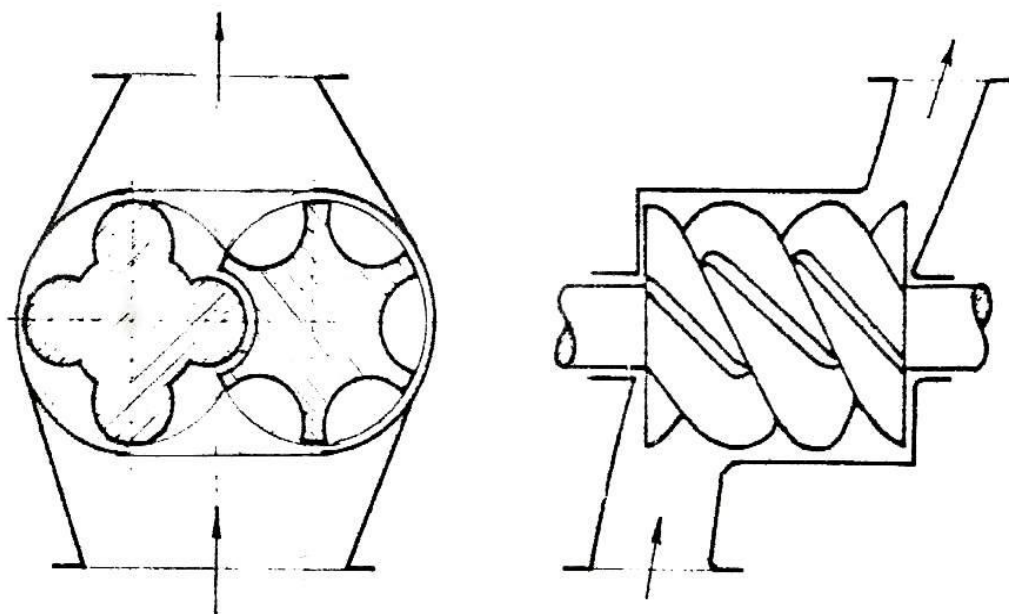


Obr. 3 - Rozdělení kompresorů [1]

4.1 Šroubové kompresory

Šroubové kompresory patří do kategorie objemové kompresory rotační. Stlačením plynu se u kompresoru dosáhne zmenšením objemu párových komor mezi šroubovými zuby rotorů viz (Obr. 4). Rotory jsou navrženy jako šroubová tělesa s nestejným počtem zubů a se závity o velkém stoupání. Hnací (hlavní) rotor má nejčastěji čtyři zuby s vyklenutými boky. Hnaný (vedlejší) rotor má obvykle šest zubů s vydutými boky. U některých novějších konstrukcí šroubových kompresorů je počet zubů vyšší i na 5 a 7. Rotory se navzájem otáčejí v opačných směrech, z toho důvodu se objem

pracovních komor na sací straně postupně zvětšuje a na straně výtlačné se postupně zmenšuje. Plyn je neustále nasáván sacím kanálem do komor mezi rotory a trvale dopravován do výtlačného potrubí otevřeným výtlačným kanálem. [1]



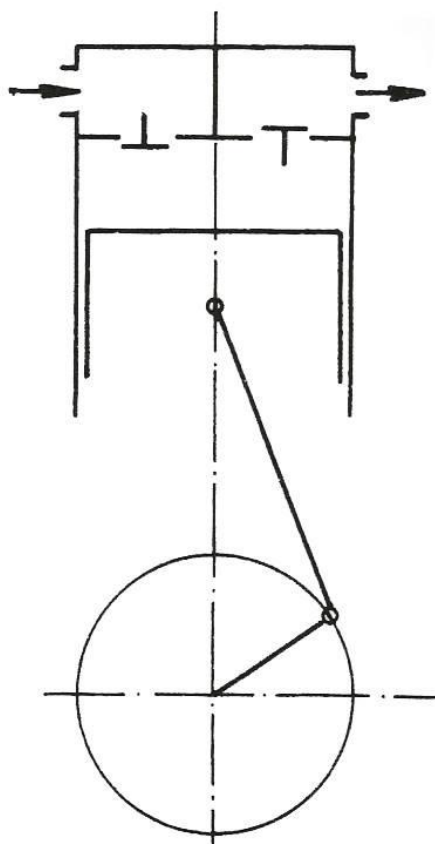
Obr. 4 - Šroubový kompresor [1]

4.2 Pístové kompresory

Pístové kompresory patří do kategorie objemových kompresorů s vratným pohybem pracovního elementu viz (Obr. 5).

Konstrukce pístových kompresorů: stojaté, ležaté, boxerové, úhlové jednostupňové až úhlové sedmistupňové, jednočinné nebo dvojčinné, s odstupňovaným pístem, s

křížákem nebo bez křížáku, chlazené vzduchem nebo vodou, mazané nebo bezmazné, ucpávkové otevřené, ucpávkové polohermetické, ucpávkové hermetické. [1]



Obr. 5 - Pistový kompresor [1]

Jednostupňové kompresory malých a středních výkonností bývají stojaté řadové nebo s válci usprádanými do V nebo W. Mají jednočinný trubkový píst, který plní také funkci křížáku. Tyto kompresory mají jednoduchou konstrukci. Při použití více válců menších rozměrů se značně zhorší mechanická účinnost kompresoru, alelepší se vyvážení sil. To umožní zvýšit otáčky až na $2\,500\text{ min}^{-1}$, zmenšit velikost setrvačníku, rozměry kompresoru i hmotnost celého stroje. Větší počet válců umožňuje účelnou typizaci kompresorů a rozsáhlou normalizaci součástí, která zaručuje levnější sériovou výrobu a tím snižuje cenu kompresoru. [1]

Dvojčinné kompresory křížákové jsou používány pro střední a vysoké výkony, výjimečně pak i pro malé výkony. Ve srovnání s jednočinnými kompresory mají nižší

ztráty zapříčiněné třením a jsou mnohem těsnější. Konstruují se nejčastěji ležaté, nebo s uspořádáním válců do V či L. Nejčastěji jsou chlazeny vodou či vzduchem. Mazání válců jde jednoduše oddělit od mazání klikového mechanismu. [1]

Dvoustupňové a několikastupňové kompresory umožňují mnoho možností uspořádání válců. U jednočinných kompresorů je pro jednotlivý stupeň jeden či více válců. U válce vyšších stupňů se při stejném zdvihu postupně zmenšují průměry. Dvočinné kompresory mají také i odstupňování pístu. [1]

4.3 Obecné porovnání pístových kompresorů se šroubovými kompresory

Přednosti šroubového kompresoru oproti pístovému kompresoru jsou: vyšší spolehlivost, jednoduchá a robustní konstrukce, nenáročná obsluha, lepší regulovatelnost výkonnosti, životnost je až 3x vyšší, rotory nejsou v kontaktu. [1]

Přednosti pístového kompresoru oproti šroubovému kompresoru jsou: lepší účinnost, menší ztráty netěsnostmi, výroba je jednodušší (rotory u šroubových kompresorů potřebují vysokou přesnost výroby a uložení), tišší chod, vyšší rychlost proudění. [1]

5. Měřicí aparatura

5.1 Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus

Třífázový analyzátor od firmy Chauvin Arnoux viz (Obr.6) s klešťovými převodníky proudu MN 71 s uzavřeným magnetickým obvodem umožňujícím měření střídavých proudů viz (Obr.7). Pro měření byla použita funkce měření příkonu ve W. Naměřená data byla ukládána do počítače přes USB v souboru Microsoft Excel.

Technické údaje

Fázové napětí 10 – 1000 V, sdružené napětí 10 – 2000 V s rozlišením 0,1 V, přesností $\pm 0,5$ %. Klešťové převodníky mají měřicí rozsah 0,01 – 12 A, výstup 1V AC, v převodovém poměru 1 A/100 mV, přesnost ≤ 1 %. [2]



Obr. 6 - Třífázový analyzátor C.A. 8335 [2]



Obr. 7 - Klešťový převodník [2]

5.2 Set pro měření tlakového vzduchu

Zařízení na měření tlakového vzduchu viz (Obr. 18) je poskládáno ze čtyř samostatných segmentů firmy FESTO. Skládá se z tlakoměru MS6-FRM-1/2, snímače průtoku SFAM 62- 3000L-TG12-2SV-M12 a ze dvou filtrů 5 μ m a 1 μ m, MS6-LF-1/2-C-R-M a MS6-LFM-1/2-B-R-M. Naměřená data byla ukládána přes USB ve formátu Microsoft Excel. [3]



Obr. 8 - Set pro měření tlakového vzduchu

6. Postup měření

Měření bude probíhat na patě kompresoru. Tento způsob měření byl zvolen z důvodu, že žádný rozvod stlačeného vzduchu není naprosto těsný, a ztráty únikem by vnášely nežádoucí chyby do vyhodnocení měření energetické náročnosti na výrobu stlačeného vzduchu. Měření na patě kompresoru zajišťuje zanedbatelné ztráty únikem stlačeného vzduchu. Další výhodou měření na patě kompresoru je, že známe přesný objem vzdušníku, který je důležitý pro vyhodnocování energetické náročnosti kompresoru na výrobu stlačeného vzduchu.

Měření bylo rozděleno na různé režimy – plnění vzdušníku, režim při konstantním průtoku vzduchu a kde to bylo možné, tak i na denní režim.

6.1 Postup při režimu při plnění vzdušníku

Měření začíná vždy po úplném vypuštění vzdušníku tj. $p=0$ kPa. Škrťací ventil musí být zcela uzavřen. Průtokoměr musí být vynulován. Spustí se zaznamenávání měření na počítačích, a kompresor se nechá tlakovat do svého vypnutí. Poté se naměřené hodnoty uloží, vzdušník se nechá vyprázdnit otevřením škrťacího ventilu a zaznamená se hodnota naakumulovaného vzduchu z průtokoměru.

6.2 Postup při konstantním průtoku vzduchu

Měření začíná vynulováním průtokoměru a spuštěním kompresoru spolu se zaznamenáváním do počítačů. Nastaví se požadovaný průtok pootočením škrťacího ventilu. Po ukončení měření se naměřené hodnoty uloží do počítačů a odečte se celková hodnota naakumulovaného vzduchu z průtokoměru.

6.3 Postup při měření denního režimu a nočního režimu

Měření probíhá obdobně jako měření při konstantním průtoku vzduchu s tím rozdílem, že na místo škrťacího ventilu je set pro měření tlakového vzduchu přímo napojen do rozvodu stlačeného vzduchu. Je důležité podotknout, že výsledné množství vyprodukovaného vzduchu obsahuje i úniky rozvodu tlakového vzduchu.

Měření nočního režimu probíhá stejně jako měření denního režimu.

7. Popis zapojení měřící aparatury

Třífázový analyzátor C.A. 8335 Qualistar plus s klešťovými převodníky je zapojen na přívod elektrické energie do kompresoru, buď na kabelový přívod viz (Obr.9), nebo do rozvodné skříně na fáze viz (Obr.10) .

Set pro měření tlakového vzduchu je na vstupu zapojen co nejbližší patě kompresoru. Na výstup je připojen škrťací ventil pro případ měření režimu při

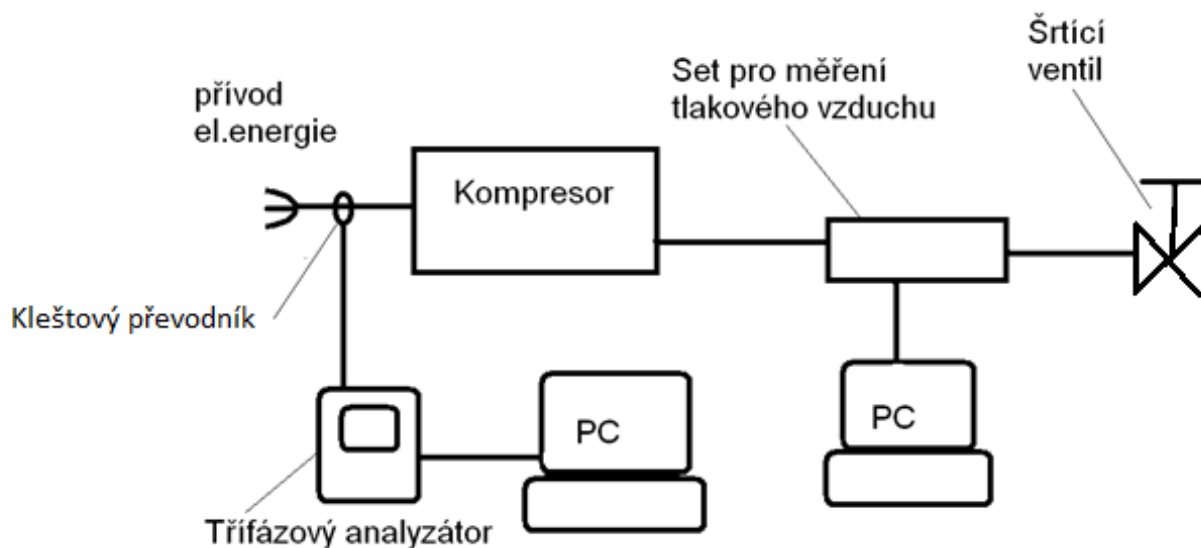
konstantním průtoku a při plnění vzdušníku. V případě měření denního režimu je výstup setu na měření tlakového vzduchu napojen do rozvodné sítě tlakového vzduchu.



Obr. 9 - Měření na fázi kabelového přívodu



Obr. 10 - Měření na fázích v rozvodné skříní



Obr. 11 - Schéma zapojení měřící aparatury

8. Měření na kompresorech

8.1 Měření na pístovém kompresoru Orlík Optimal

Měření bylo prováděno na malém pístovém kompresoru Orlík Optimal s označením ORFI 240/50 viz (Obr.12).

Kompresor Orlík Optimal je jednostupňový, jednoválcový, bezolejový pístový kompresor, který je výrobcem doporučován pro použití v malých dílnách, kde není potřeba trvalé dodávky stlačeného vzduchu.

Měření kompresoru bylo rozděleno na dvě fáze – režim plnění vzdušníku a režim při konstantním průtoku. Zaznamenává se aktuální spotřeba elektrické energie, přetlak vzdušníku, množství naakumulovaného vzduchu a průtok vzduchu.

Technické parametry:

Výkon elektromotoru 1,5 kW, Objem vzdušníku 50 l, maximální tlak 800 kPa, nasávané množství 240 l/min, váha 45 kg, napětí 230 V.[3]

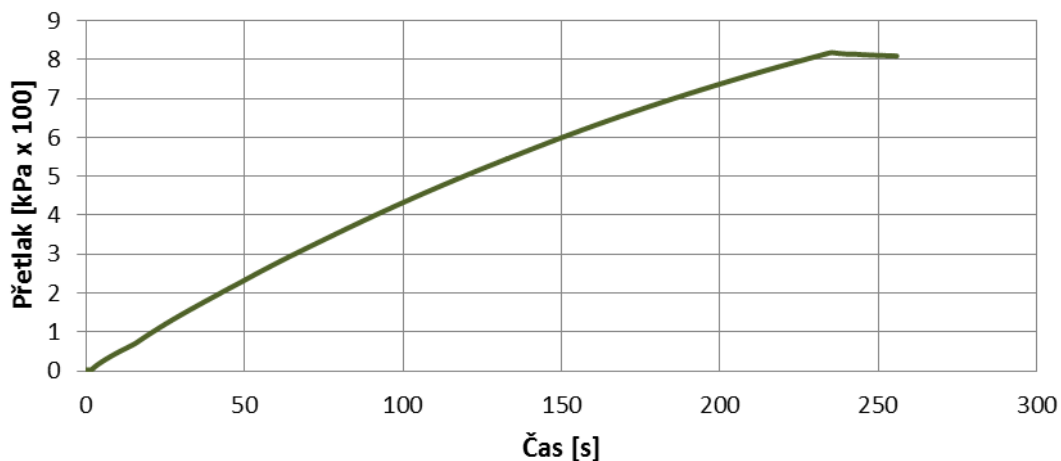


Obr. 12 - Kompresor Orlík Optimal [3]

Režim plnění vzdušníku:

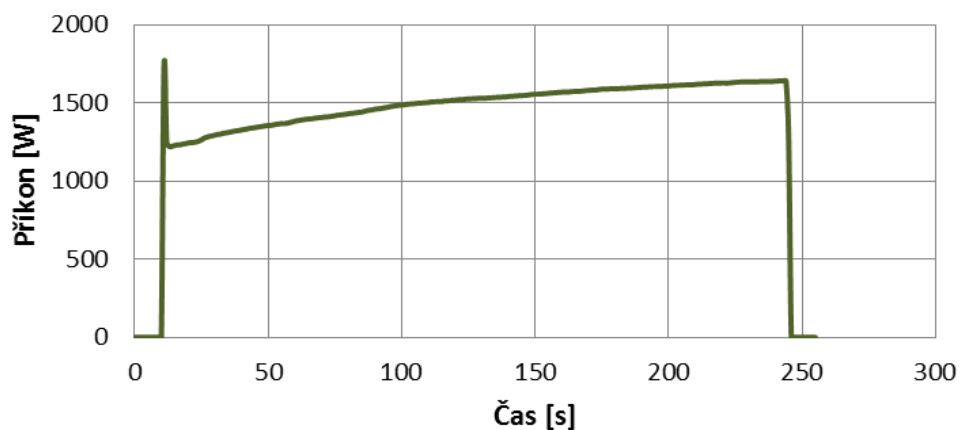
Při plnění vzdušníku je škrtící ventil zcela uzavřen. Měření začíná po vyprázdnění vzdušníku tj. $p = 0$ kPa.

Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku



Obr. 13 - Graf průměrného nárustu tlaku ve vzdušníku

Průměrná aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušníku



Obr. 14 - Graf průměrné spotřeby elektrické energie

Průměrné plnění vzdušníku trvalo 234 sekund. Za tuto dobu bylo naměřeno 284 litrů naakumulovaného vzduchu ve vzdušníku. Spotřeba elektrické energie byla 97,17 Wh. Po vydělení elektrické energie množstvím naakumulovaného vzduchu vychází hodnota 0,34 Wh/l pro plnění vzdušníku.

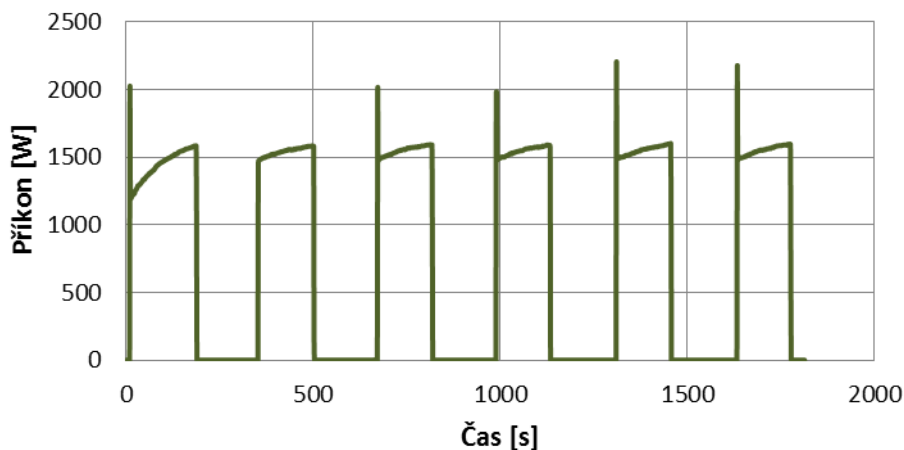
Režim při konstantním průtoku

Při režimu konstantního průtoku je škrtícím ventilem nastaven požadovaný průtok na cca 40 l/min.



Obr. 15 - Průtok a tlak v pracovním režimu

Aktuální spotřeba elektrické energie



Obr. 16 - Aktuální spotřeba elektrické při průtoku 40 l/min

Shrnutí

Měření při režimu konstantního průtoku trvalo 1813 sekund. Množství vyprodukovaného vzduchu bylo 1330 litrů a spotřeba elektrické energie 590,16 Wh. Z toho plyne hodnota 0,44 Wh/l pro režim s konstantním odběrem vzduchu. Celková hodnota vyjadřující průměrnou spotřebu elektrické energie na jeden litr stlačeného

vzduchu pro kompresor Orlik Optimal je **0,39 Wh/l**. Odchylka při průtoku 40 l/min byla 14,7 l/min.

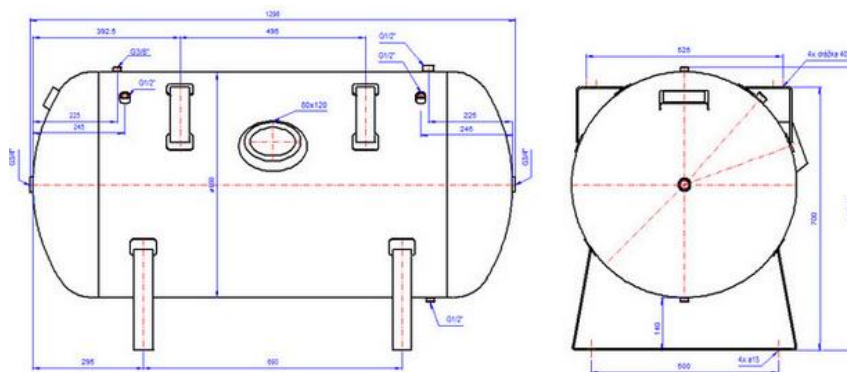
8.2 Měření na pístovém kompresoru Schneider

Měření bylo prováděno na pístovém kompresoru Schneider s označením UNM STS 660-10-90 viz (Obr. 17). Jedná se o dvou válcový kompresor s dvoustupňovou kompresí. Tento kompresor je napojen na druhý vzdušník od firmy VANĚK, s.r.o. Trutnov s označením VLM SB 300/11 SB viz (Obr. 18).

Měření kompresoru bylo rozděleno na tři fáze – Režim plnění vzdušníku, režimy při konstantních průtocích a denní režim. Zaznamenává se aktuální spotřeba elektrické energie, přetlak vzdušníku, množství naakumulovaného vzduchu a průtok vzduchu. [5]



Obr. 17 - Kompresor Schneider UNM STS 660-10-90 [5]



Obr. 18 - Vzdušník VLM SB 300/11 [6]

Technické parametry kompresoru Schneider

Výkon elektromotoru 4 kW, objem vzdušníku 90 l, maximální tlak 1 000 kPa, váha 123 kg, nasávané množství 660 l/min, napětí 400 V/50 Hz. [5]

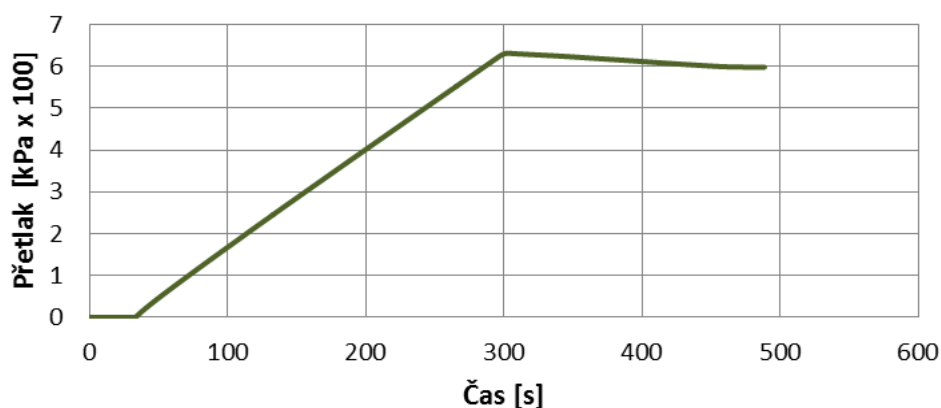
Technické parametry vzdušníku VLM SB 300/11 SB

Maximální tlak 11 000 kPa, objem vzdušníku 300 l. [6]

Režim plnění vzdušníku

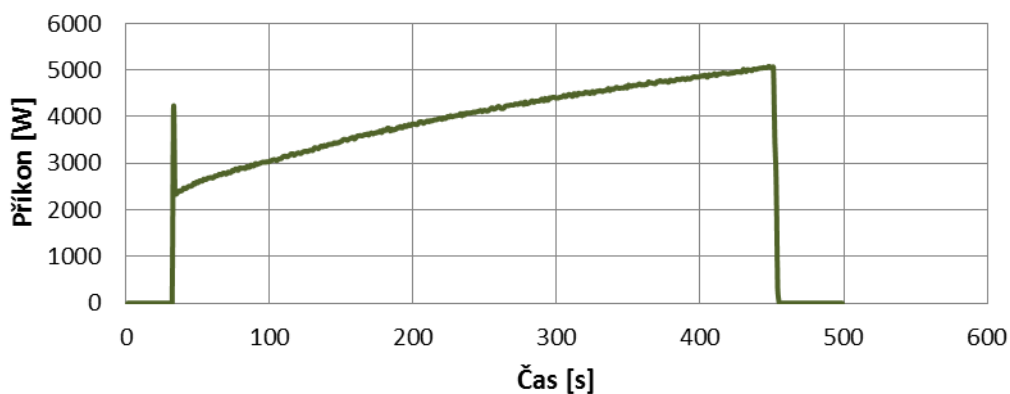
Při plnění vzdušníku je škrtkící ventil zcela uzavřen. Měření začíná po vyprázdnění obou vzdušníků tj. $p = 0$ kPa.

Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku



Obr. 19 - Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku

Průměrná aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušníku



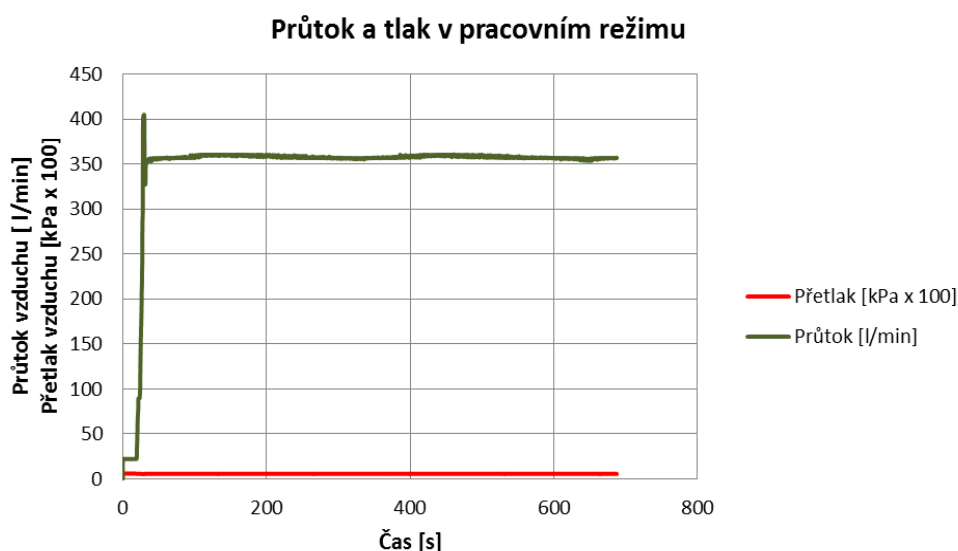
Obr. 20 - Průměrná aktuální spotřeba elektrické energie

Průměrné plnění vzdušníků trvalo 420 sekund. Za tuto dobu, bylo naměřeno 3974 litrů naakumulovaného vzduchu ve vzdušníku. Spotřeba elektrické energie byla 463,68 Wh. Po vydělení elektrické energie množstvím naakumulovaného vzduchu vychází hodnota 0,14 Wh/l pro plnění vzdušníku.

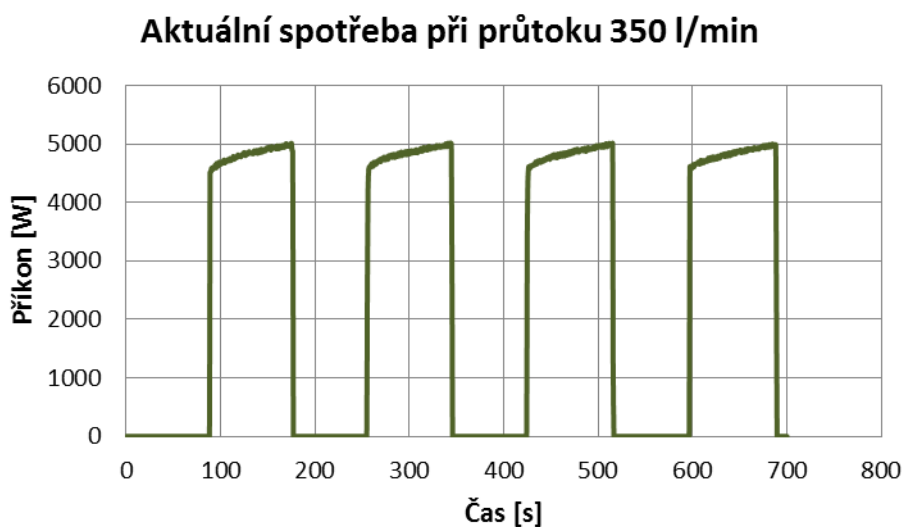
Režim při konstantních průtocích vzduchu

Při měření režimu konstantního průtoku byl škrticí ventil nastavován na 50, 100, 150, 250, 350 l/min.

Pro ukázkou byly vybrány grafy při konstantním odběru vzduchu 350 l/min.



Obr. 21 - Průtok a tlak v pracovním režimu



Obr. 22 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min

Všechny režimy při konstantním odběru vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 1.

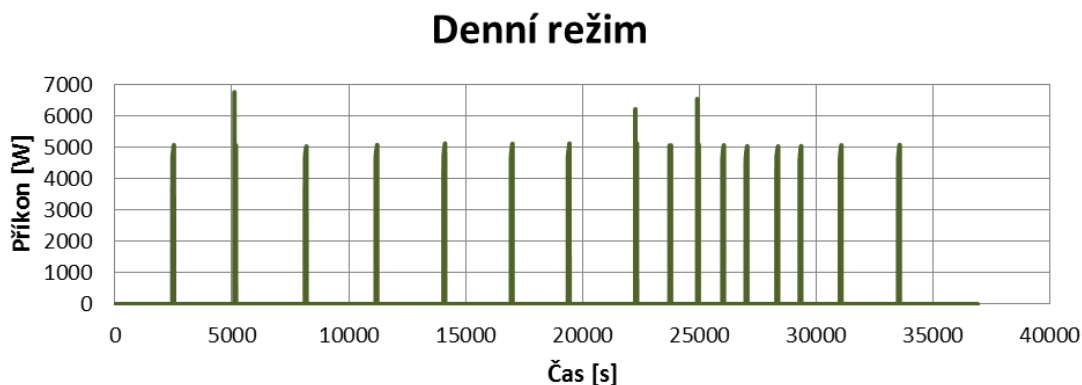
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
50 l/min	2691	2166	377,26	0,17
100 l/min	1500	2434	217,65	0,10
150 l/min	1223	2785	424,51	0,15
250 l/min	1020	3874	401,78	0,10
350 l/min	700	3529	483,89	0,14

Tab. 1 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku

Měřením režimů při konstantních odběrech vzduchu byla zjištěna průměrná hodnota vynaložené energetické hodnoty na jeden litr stlačeného vzduchu **0,13 Wh/l**.

Denní režim

Při měření denního režimu je set naměření tlakového vzduchu připojen do rozvodu tlakového vzduchu.



Obr. 23 - Denní režim

Měření Denního režimu trvalo 37 020 sekund. Za tuto dobu bylo vyprodukováno 8 886 litrů stlačeného vzduchu. Spotřeba byla 1475,12 Wh. Výsledná hodnota energetické spotřeby na jeden litr stlačeného vzduchu je 0,17 Wh/l.

Shrnutí

Na kompresoru Schneider s označením UNM STS 660-10-90 bylo provedeno celkem osm měření – 2 x režim plnění vzdušníku, 5 x režimy při konstantních průtocích a 1x denní režim. Výsledná průměrná hodnota energetické náročnosti na výrobu

jednoho litru stlačeného vzduchu na tomto kompresoru je 0,15 Wh/l. Odchylka při průtoku 350 l/min byla 4,36 l/min.

8.3 Měření na šroubovém kompresoru Schneider

Měření bylo prováděno na šroubovém kompresoru Schneider s označením AM 5-10S1 viz (Obr. 24). Kompresor je šroubový, jednostupňový, a je poháněn třífázovým motorem. Kompresor je určený pro nepřetržitou dodávku tlakového vzduchu.

Měření kompresoru bylo rozděleno na tři fáze – Režim plnění vzdušníku, režimy při konstantních průtocích a denní režim. Zaznamenává se aktuální spotřeba elektrické energie, přetlak vzdušníku, množství naakumulovaného vzduchu a průtok vzduchu. [5]

Technické parametry kompresoru Schneider:

Výkon elektromotoru 5,5 kW, objem vzdušníku 270 l, maximální tlak 1 000 kPa, váha 168 kg, nasávané množství 630 l/min, napětí 400 V/50 Hz, hluchnost 65 db. [5]

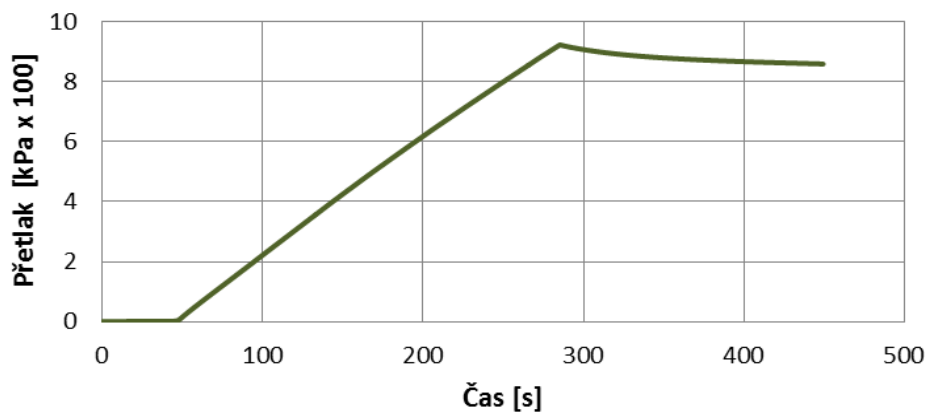


Obr. 24 - Kompresor Schneider AM 5-10S1 [5]

Režim plnění vzdušníku

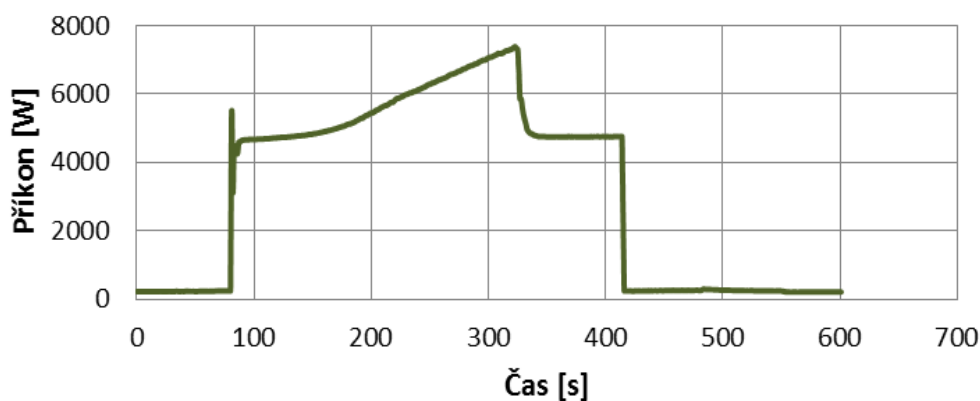
Při plnění vzdušníku je škrtící ventil zcela uzavřen. Měření začíná po vyprázdnění vzdušníku tj. $p = 0$ kPa.

Nárůst tlaku ve vzdušníku



Obr. 25 - Nárůst tlaku ve vzdušníku

Aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušníku

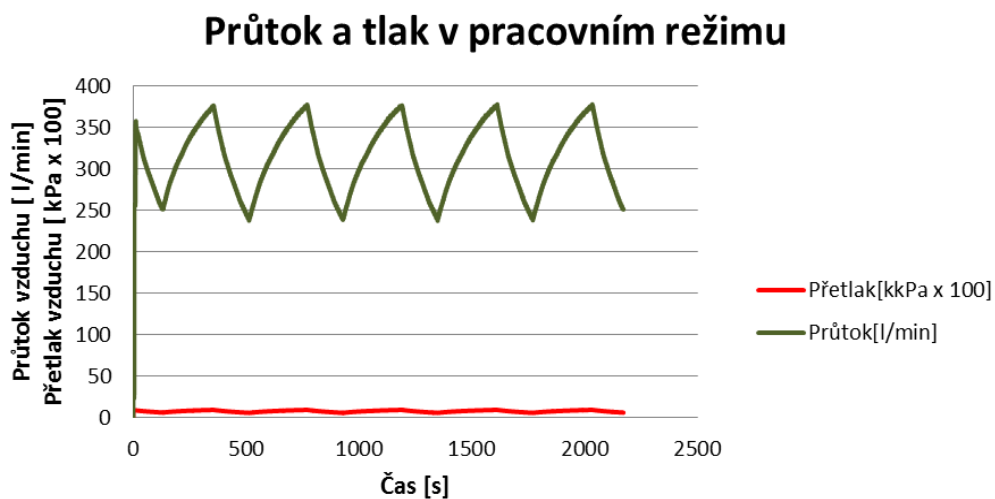


Obr. 26 - Aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušníku

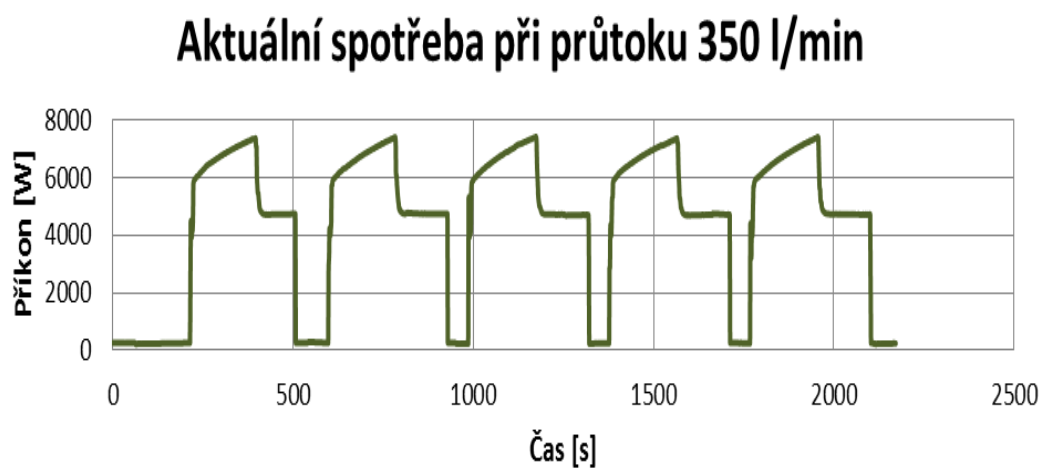
Plnění vzdušníků trvalo 200 sekund. Za tuto dobu bylo naměřeno 1345 litrů naakumulovaného vzduchu ve vzdušníku. Spotřeba elektrické energie byla 302,42 Wh. Po vydělení elektrické energie množstvím naakumulovaného vzduchu vychází hodnota 0,22 Wh/l pro plnění vzdušníku.

Režim při konstantních průtocích vzduchu

Při měření režimu konstantního průtoku byl škrtící ventil nastavován na 250 a 350 l/min. Pro ukázkou byly vybrány grafy při konstantním odběru vzduchu při 350 l/min.



Obr. 27 - Průtok a tlak v pracovním režimu



Obr. 28 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min

Všechny režimy při konstantním odběru vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 2.

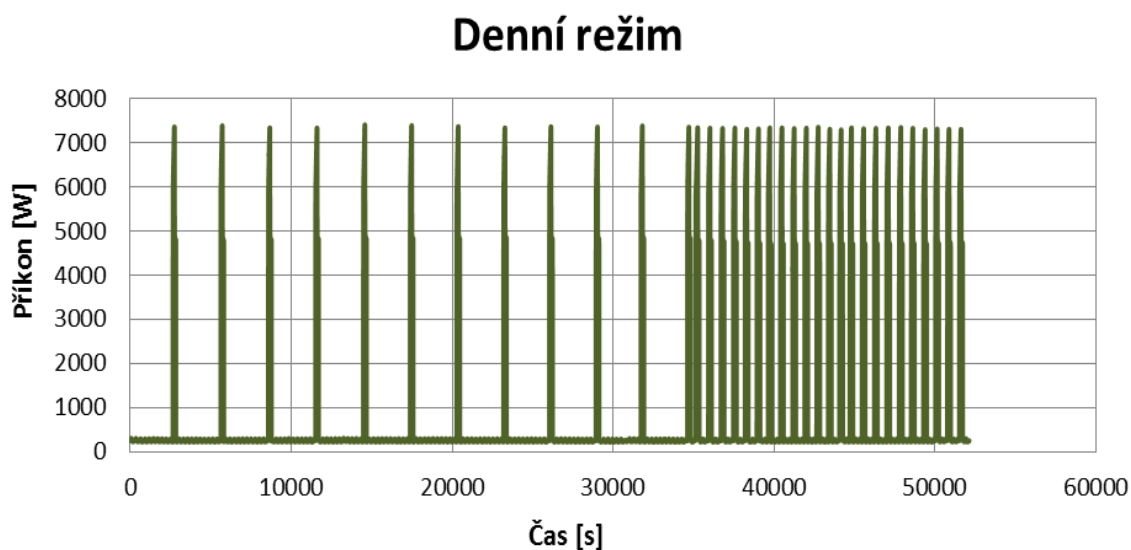
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
250 l/min	1754	5902	1591,93	0,27
350 l/min	2267	10027	2844,39	0,28

Tab. 2 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku

Měřením režimů při konstantních odběrech vzduchu byla zjištěna průměrná hodnota vynaložené energetické hodnoty na jeden litr stlačeného vzduchu **0,28 Wh/l**.

Denní režim

Při měření denního režimu je výstup setu na měření tlakového vzduchu připojen do rozvodu tlakového vzduchu.



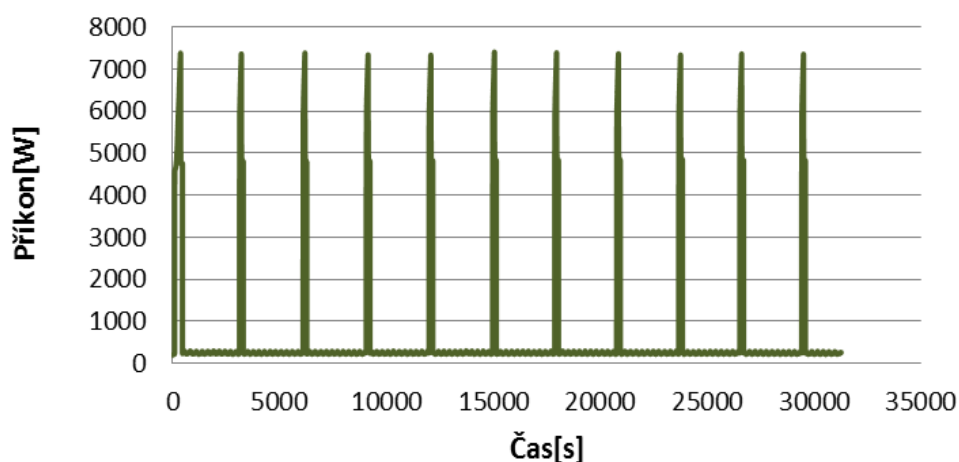
Obr. 29 - Denní režim

Měření denního režimu trvalo 52 122 sekund. Za tuto dobu bylo vyprodukováno 15 240 litrů stlačeného vzduchu. Spotřeba byla 13 099,57 Wh. Výsledná hodnota energetické spotřeby na jeden litr stlačeného vzduchu je 0,86 Wh/l.

Noční režim

Připojení průtokoměru je pouze informativní, protože při nočním režimu není žádný odběr tlakového vzduchu. Všechny sepnutí kompresoru jsou zapříčiněné úniky. Z měření nočního režimu bylo získáno informaci o ztrátách zapříčiněných netěsnostmi tlakového rozvodu a samotného kompresoru. Celková hodnota spotřebované energie při nulovém odběru tlakového vzduchu je 529,9 Wh. Měření trvalo 3126 sekund.

Aktuální spotřeba při nočním režimu



Obr. 30 Aktuální spotřeba při nočním režimu

Shrnutí

Na kompresoru Schneider s označením AM 5-10S1 byly provedeny celkem čtyři měření zjišťující energetickou náročnost na výrobu jednoho litru stlačeného vzduchu – 1 x režim plnění vzdušníku, 2 x režimy při konstantních průtocích a 1x denní režim. Výsledná průměrná hodnota na tomto kompresoru je **0,41 Wh/l**. Odchylka při průtoku 350 l/min byla 125,2 l/min.

8.4 Měření na šroubovém kompresoru Atlas Copco

Měření bylo prováděno na šroubovém kompresoru Atlas Copco s označením GX15FF viz (Obr. 31). Kompresor je šroubový, jednostupňový, a je poháněn třífázovým motorem. Kompresor je určený pro nepřetržitou dodávku tlakového vzduchu.

Měření kompresoru bylo rozděleno na dvě fáze – Režim plnění vzdušníku a režimy při konstantních průtocích. Zaznamenává se aktuální spotřeba elektrické energie, přetlak vzdušníku, množství naakumulovaného vzduchu a průtok vzduchu. [7]

Technické parametry kompresoru Atlas Copco:

Výkon elektromotoru 11 kW, objem vzdušníku 500 l, maximální tlak 1 300 kPa, váha 257 kg, nasávané množství 1140 l/min, napětí 400 V/50 Hz, hlučnost 68 db. [7]

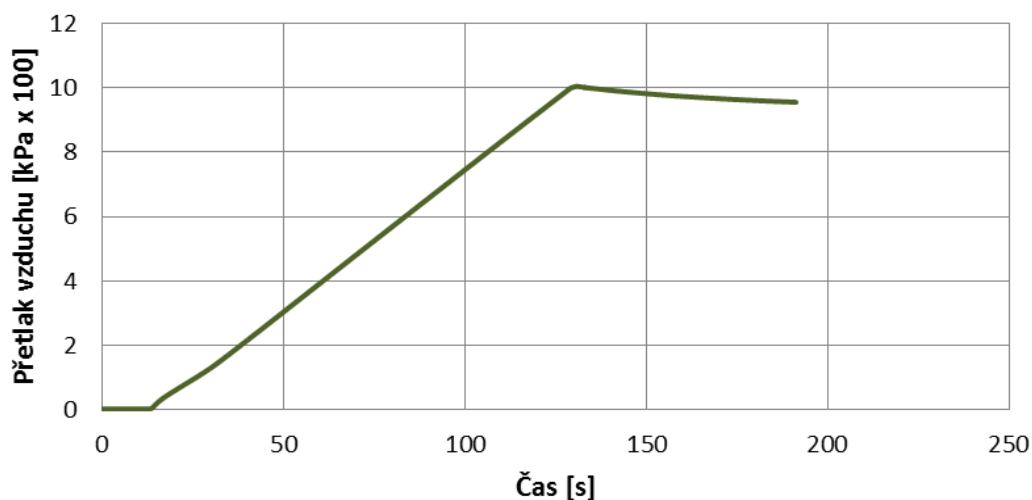


Obr. 31 - Kompresor Atlas Copco [7]

Režim plnění vzdušníku

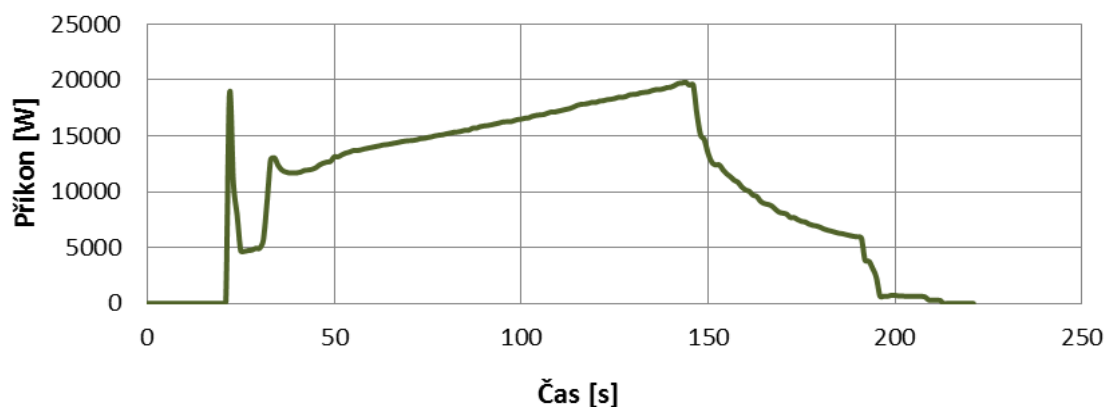
Při plnění vzdušníku je škrťací ventil zcela uzavřen. Měření začíná po vyprázdnění vzdušníku tj. $p = 0$ kPa.

Průměrný nárůst tlaku vzduchu ve vzdušníku



Obr. 32 - Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku

Průměrná aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušníku



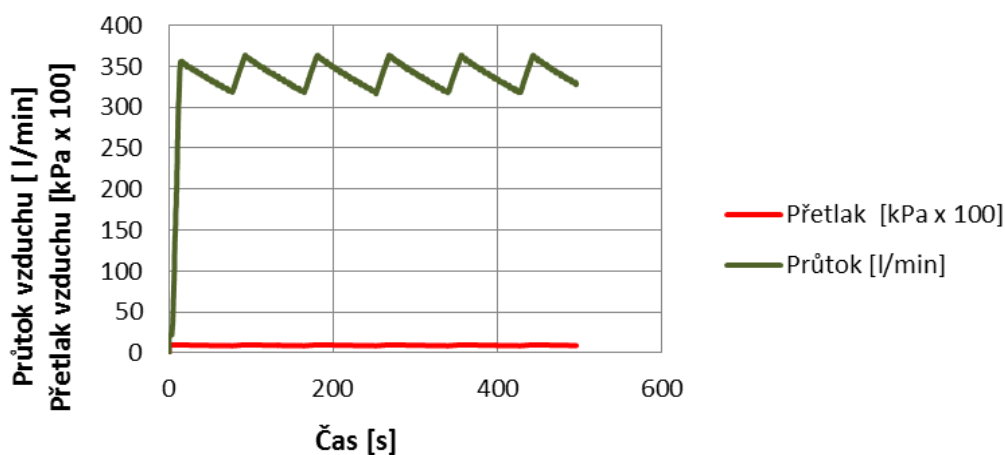
Obr. 33 - Průměrná spotřeba elektrické energie

Plnění vzdušníků trvalo 188 sekund. Za tuto dobu bylo naměřeno 3655 litrů naakumulovaného vzduchu ve vzdušníku. Spotřeba elektrické energie byla 639,75 Wh. Po vydělení elektrické energie množstvím naakumulovaného vzduchu vychází hodnota 0,18 Wh/l pro plnění vzdušníku.

Režim při konstantních průtocích vzduchu

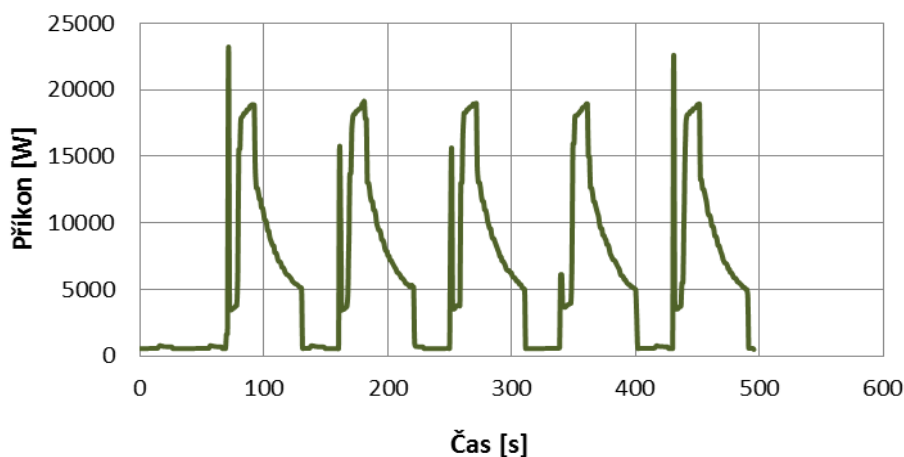
Při měření režimu konstantního průtoku byl škrtící ventil nastavován na 150, 250 a 350 l/min. Pro ukázkou byly vybrány grafy při konstantním odběru vzduchu při 350 l/min.

Průtok a tlak v pracovním režimu



Obr. 34 - Průtok a tlak v pracovním režimu

Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min



Obr. 35 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min

Všechny režimy při konstantním odběru vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 3.

Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
150 l/min	790	1748	1060,33	0,61
250 l/min	592	2168	748,88	0,35
350 l/min	495	2483	857,53	0,35

Tab. 3 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku

Měřením režimů při konstantních odběrech vzduchu byla zjištěna průměrná hodnota vynaložené energetické hodnoty na jeden litr stlačeného vzduchu 0,44 Wh/l.

Shrnutí

Na kompresoru Atlas Copco s označením GX15FF bylo provedeno celkem pět měření – 2 x režim plnění vzdušníku a 3 x režimy při konstantních průtocích. Výsledná průměrná hodnota energetické náročnosti na výrobu jednoho litru stlačeného vzduchu na tomto kompresoru je **0,33 Wh/l**. Odchylka při průtoku 350 l/min byla 35,4 l/min.

9. Kolísání průtoku v jednotlivých režimech

Kolísání průtoků v režimech při konstantním odběru tlakového vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 4.

Orlík Optimal			
Režim	Objem vzdušníku [l]	Maximální přetlak [kPa]	Velikost kolísání průtoku [l/min]
40 l/min	50	808	14,7
Schneider-pístový			
Režim	Objem vzdušníku [l]	Maximální přetlak [kPa]	Velikost kolísání průtoku [l/min]
50 l/min	390	612	3,6
100 l/min	390	612	5,7
150 l/min	390	612	1,8
250 l/min	390	612	3,3
350 l/min	390	612	4,4
Schneider-šroubový			
Režim	Objem vzdušníku [l]	Maximální přetlak [kPa]	Velikost kolísání průtoku [l/min]
250 l/min	270	914	68,1
350 l/min	270	914	125,2
Atlas Copco			
Režim	Objem vzdušníku [l]	Maximální přetlak [kPa]	Velikost kolísání průtoku [l/min]
150 l/min	400	986	13,9
250 l/min	400	986	21,9
350 l/min	400	986	35,4

Tab. 4 - Kolísání tlaku

10. Závěr

Bylo provedeno experimentální měření energetické náročnosti na výrobu tlakového vzduchu pro obráběcí stroj na čtyřech kompresorech. Dva kompresory pístové a dva kompresory šroubové. Výsledné hodnoty všech měření jsou obsaženy v tabulce 5.

Orlík Optimal				
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
40 l/min	1813	1330	590,16	0,44
1.-5.Plnění vzdušníku	234	284	97,17	0,34
Schneider-pístový				
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
1.Plnění vzdušníku	420	3203	466,22	0,15
2.Plnění vzdušníku	419	3196	461,14	0,14
50 l/min	2691	2166	377,26	0,17
100 l/min	1500	2434	217,65	0,09
150 l/min	1223	2785	424,51	0,15
250 l/min	1020	3874	401,78	0,10
350 l/min	700	3529	483,89	0,14
Denní režim	37020	8886	1475,12	0,17
Schneider-šroubový				
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
250 l/min	1754	5902	1591,93	0,27
350 l/min	2267	10027	2844,39	0,28
Plnění vzdušníku	200	1345	302,43	0,22
Denní režim	52122	15240	13099,57	0,86
Atlas Copco				
Režim	Čas[s]	Množství vzduchu[l]	Spotřeba [Wh]	Spotřeba [Wh/l]
150 l/min	790	1748	1060,33	0,61
250 l/min	592	2168	748,88	0,35
350 l/min	495	2483	857,53	0,35
1.Plnění vzdušníku	186	3658	651,49	0,18
2.Plnění vzdušníku	190	3652	628,00	0,17

Tab. 5 – Naměřené hodnoty při všech režimech

Průměrné hodnoty energetických spotřeb pro jednotlivé kompresory v tabulce 6.

Kompresor	Spotřeba [Wh/l]
Orlík Optimal	0,39
Schneider-pístový	0,14
Schneider-šroubový	0,41
Atlas Copco	0,33

Tab. 6 - Tabulka výsledných spotřeb elektrické energie

Průměrná hodnota energetické spotřeby na litr tlakového vzduchu je **0,32 Wh/l** bez ztrát.

Při provozu je odběr tlakového vzduchu cca 300 l/min tj. 96 Wh za jednu minutu.

Za jeden rok při 8 hodinové směně každý pracovní den vychází spotřeba na 16 819,2 kWh, takovou spotřebu má pro srovnání průměrná domácnost (2-3 osoby) na osvětlení na 4,5 roku. Do toho nejsou počítány ztráty rozvodu tlakového vzduchu. Ztráty mohou zvýšit spotřebu elektrické energie až několikanásobně, viz noční měření, kdy za

3126 sekund byla spotřeba elektrické energie 529,9 Wh. [7]

11. Seznam obrázku

Obr. 1 - p -V diagram ideálního kompresoru [1]	10
Obr. 2 - p-V diagram skutečného pístového kompresoru [1]	12
Obr. 3 - Rozdělení kompresorů [1]	13
Obr. 4 - Šroubový kompresor [1].....	14
Obr. 5 - Pístový kompresor [1]	15
Obr. 6 - Třífázový analyzátor C.A. 8335 [2]	17
Obr. 7 - Klešťový převodník [2]	17
Obr. 8 - Set pro měření tlakového vzduchu	18
Obr. 9 - Měření na fázi kabelového přívodu	20
Obr. 10 - Měření na fázích v rozvodné skříní	20
Obr. 11 - Schéma zapojení měřicí aparatury.....	20
Obr. 12 - Kompresor Orlik Optimal [1].....	21
Obr. 13 - Graf průměrného nárustu tlaku ve vzdušníku	22
Obr. 14 - Graf průměrné spotřeby elektrické energie	22
Obr. 15 - Průtok a tlak v pracovním režimu	23
Obr. 16 - Aktuální spotřeba elektrické při průtoku 40 l/min	23
Obr. 17 - Kompresor Schneider UNM STS 660-10-90 [4].....	24
Obr. 18 - Vzdušník VLM SB 300/11 [5]	24
Obr. 19 - Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku	25
Obr. 20 - Průměrná aktuální spotřeba elektrické energie.....	25
Obr. 21 - Průtok a tlak v pracovním režimu	26
Obr. 22 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min	26
Obr. 23 - Denní režim	27
Obr. 24 - Kompresor Schneider AM 5-10S1 [4]	28
Obr. 25 - Nárůst tlaku ve vzdušníku	29
Obr. 26 - Aktuální spotřeba elektrické energie při plnění vzdušíku	29
Obr. 27 - Průtok a tlak v pracovním režimu	30
Obr. 28 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min	30
Obr. 29 - Denní režim	31
Obr. 30 Aktuální spotřeba při nočním režimu	32
Obr. 31 - Kompresor Atlas Copco [6].....	33

Obr. 32 - Průměrný nárůst tlaku ve vzdušníku	34
Obr. 33 - Průměrná spotřeba elektrické energie	34
Obr. 34 - Průtok a tlak v pracovním režimu	35
Obr. 35 - Aktuální spotřeba při průtoku 350 l/min	35

12. Seznam tabulek

Tab. 1 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku	27
Tab. 2 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku	31
Tab. 3 - Hodnoty režimu při konstantním průtoku	36
Tab. 4 - Kolísání tlaku.....	37
Tab. 5 – Naměřené hodnoty při všech režimech.....	38
Tab. 6 - Tabulka výsledných spotřeb elektrické energie	39

13. Použitá literatura

- [1] Prof. Ing. Antonín Liška, CSc a Doc. Ing. Pavel Novák, CSc. Kompresory, vydavatelství ČVUT 1999, ISBN 80-01-01962-4
- [2] C.A. 8335 Qualistar plus [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z:<http://qualistar.chauvin-arnoux.com/>
- [3] Festo Equipment [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z:<http://www.festo.com/net/startpage/>
- [4] Orlik Optimal [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: http://www.techair.cz/orlik-kompresory-orlik-optimal-c-2_4_89_16.html
- [5] Schneider [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z:<http://www.schneider-bohemia.cz/>
- [6] VANĚK s.r.o. [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z:[http:// www.vanektu.cz/](http://www.vanektu.cz/)
- [7] Atlas Copco . [online]. [cit. 2015-06-10]. Dostupné z:<http://www.atlasCopco.cz/>
- [8] ENERGOBLOG [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: <http://www.energetika.cz/?id=71&cl=356>

14. Seznam Příloh

Elektronické přílohy

- /Atlas Copco/
 1. Plnění1
 2. Plnění2
 3. Prtok150
 4. Prtok250
 5. Prtok350
- /Schneider_sroubovy/
 1. Denní
 2. Nocni
 3. Plnění
 4. Prtok250
 5. Prtok350
- /Schneider_pistovy/
 1. Denní
 2. Plnění1
 3. Plnění2
 4. Prtok50
 5. Prtok100
 6. Prtok150
 7. Prtok250
 8. Prtok350
- /Orlik optimal/
 1. Plnění1
 2. Plnění2
 3. Plnění3
 4. Plnění4
 5. Plnění5
 6. Prtok40
- Bakalarska_prace.pdf

Textové přílohy

1.	Měření na kompresoru Orlik Optimal při režimu plnění vzdušníku.....	2
2.	Měření na kompresoru Orlik Optimal při režimu konstantního průtoku....	3
3.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu plnění vzdušníku	4
4.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu konstantního průtoku 50 l/min.....	5
5.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu konstantního průtoku 100 l/min.....	6
6.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu konstantního průtoku 150 l/min.....	7
7.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu konstantního průtoku 250 l/min.....	8
8.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při režimu konstantního průtoku 250 l/min.....	9
9.	Měření na kompresoru Schneider UNM STS 660-10-90 při denním režimu	10
10.	Měření na kompresoru Schneider AM 5-10S1 při režimu plnění vzdušníku	11
11.	Měření na kompresoru Schneider AM 5-10S1 při režimu konstantního průtoku 250 l/min.....	12
12.	Měření na kompresoru Schneider AM 5-10S1 při režimu konstantního průtoku 350 l/min.....	13
13.	Měření na kompresoru Schneider AM 5-10S1 při denním režimu	14
14.	Měření na kompresoru Schneider AM 5-10S1 při nočním režimu	15
15.	Měření na kompresoru Atlas Copco při režimu plnění vzdušníku	16
16.	Měření na kompresoru Atlas Copco při režimu konstantního odběru vzduchu 150 l/min	17
17.	Měření na kompresoru Atlas Copco při režimu konstantního odběru vzduchu 250 l/min	18
18.	Měření na kompresoru Atlas Copco při režimu konstantního odběru vzduchu 350 l/min	19