

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PROBLEMATIKA CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ V AUTOMOBILECH

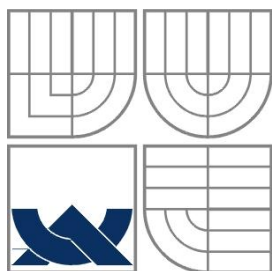
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Novotný

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

PROBLEMATIKA CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ V AUTOMOBILECH

THE ISSUE OF COOLING OF POWER MACHINES IN CAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ NOVOTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Veselka, Csc.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Jiří Novotný

Ročník: 3

ID: 121034

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Problematika chlazení elektrických strojů v automobilech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou chlazení el. strojů.
2. Navrhněte měřicí pracoviště pro měření chlazení malého stroje.
3. Vyhodnoťte naměřené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucích

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí projektu: doc. Ing. František Veselka, Csc

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s elektrickými stroji v automobilech a vypracování přehledu těchto strojů. Dále změřit ventilační okruh malého stroje za pomoci Thomasova válce. A také si přiblížit problematiku výpočtů těchto ventilačních měření.

Abstract

The aim of this bachelor's project was introduction with the electrical machine in the car and make overview of these machines. Measure ventilation circuit the small machine with help of Thomas cylinder. And the calculation of the issue measurement of ventilation.

Klíčová slova

Elektrické stroje v automobilech; hluk elektrických strojů; chladicí média; chlazení; proudění v kanálu a jeho typy; tepelné obvody; ventilační měření; ventilátory.

Keywords

Coolants; cooling; electric fans; electrical machines in cars; flow channel and his types; noise of electrical machines; thermal circuits; ventilation measurements.

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, J. *Problematika chlazení el. strojů v automobilech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 62 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Veselka, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Problematika chlazení elektrických strojů v automobilech* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce *doc. Ing. František Veselka, Csc.* za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

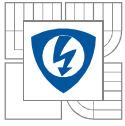
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

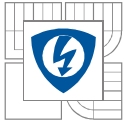
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Ventilační obvody	14
2.1 Určení druhu chladícího media a stanovení jeho množství.....	14
2.2 Návrh ventilačního systému	16
2.2.1 Sestavení a řešení náhradního ventilačního obvodu	17
2.3 Typy proudění	19
2.3.1 Laminární proudění	19
2.3.2 Turbulentní proudění.....	19
2.4 Proudění v kanálu.....	20
2.4.1 Proudění v kruhovém kanálu.....	21
2.5 Ventilátory.....	22
2.5.1 Ventilátorová charakteristika	23
3 Tepelné obvody	24
3.1 Přenos tepla vedením	25
3.2 Závislost ztrát na teplotě zdroje	26
4 Chlazení.....	27
4.1 Rozčlenění chlazení.....	27
4.1.1 Chlazení vzduchem	28
4.1.2 Chlazení kapalinou.....	29
5 Rozdělení el. strojů.....	31
5.1 Stejnoseměrné stroje	31
5.2 Asynchronní stroje	33
5.3 Synchronní stroje.....	34
5.4 Obecné členění el. strojů podle dalších kritérií	35
5.5 Podle druhu zatížení	38
6 Hluk el. strojů	40
6.1 Snižování hluku el. strojů.....	40
7 Elektrické stroje v automobilech.....	41
7.1 Historie	41
7.2 Vlastnosti.....	41



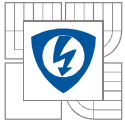
7.3 Seznam napájecích zařízení a el. strojů v automobilu Škoda 120	42
7.4 Nejdůležitější el. stroje v automobilech a jejich chlazení	44
8 Ventilační měření malého stroje	46
8.1 Zadání.....	46
8.2 Rozbor	46
8.3 Postup měření.....	51
8.4 Závěr ventilačního měření.....	56
9 Závěr.....	57
Literatura	58
Přílohy	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Převládající směr ventilace: a) axiální, b) radiální, c) smíšený	16
Obr. 2: Laminární proudění.....	19
Obr. 3: Turbulentní proudění	20
Obr. 4: Relativní pohyb desky P2 vůči stojící P1: A) mírná rychlost v2 desky P2, laminární proudění, B) větší rychlost v2 desky P2, turbulentní proudění.....	20
Obr. 5: Proudění v kruhovém kanálu: a,b) laminární, c) turbulentní.....	21
Obr. 6: Axiální ventilátor	22
Obr. 7: Radiální ventilátor.....	22
Obr. 8: Ventilátorová charakteristika	23
Obr. 9: Varianta chlazení kapalinou s chladicími trubkami umístěnými vně svazku statorových plechů.....	30
Obr. 10: Řez moderním stejnosměrným servomotorem s permanentními magnety.....	32
Obr. 11: Dovolené oteplení θ dov a maximální teploty θ dov pro jednotlivé třídy izolace	36
Obr. 12: Mezní hodnoty oteplení na nadmořské výšce	36
Obr. 13: A) Trvalé zatížení, B) krátkodobý chod.	38
Obr. 14: Škoda 120, poslední vyráběná Škoda s umístěným motorem v zadní části.....	42
Obr. 15: Motor stěrače s převodem (Škoda 120)	43
Obr. 16: Průřez startérem (Škoda 120).....	44
Obr. 17: Alternátor Magneton (Škoda 120)	44
Obr. 18: A) ventilátor topení (Škody 120), B) novodobý ventilátor v automobilech (Škoda Octavia)	45
Obr. 19: Pohled na jednofázový komutátorový motor.....	47
Obr. 20: A) Schéma zapojení sériového motoru, B)detail komutátoru.....	48
Obr. 21: A) Směr magnetické indukce budícího pole statoru, B) zeleně – směr magnetické indukce vodivé smyčky, červeně – směr síly působící na vodič s proudem, vzniká moment síly, který smyčku otočí (směr otáčení fialově)	48
Obr. 22: Princip stroje, oranžově - směr síly, modře - magnetická indukce pole statoru	49
Obr. 23: V sériovém zapojení statoru a rotoru se směry působících sil, a tedy i směr otáčení, při změně polarity nezmění	49
Obr. 24: Upevnění komponent určené k měření	51
Obr. 25: Měřicí pracoviště s válcem $\varnothing 150\text{mm}$	52
Obr. 26: Měřicí pracoviště s válcem o $\varnothing 120\text{mm}$	52
Obr. 27: Znázornění závislosti množství proudícího chladícího media na otáčkách stroje, při měření na $\varnothing 150\text{mm}$ i $\varnothing 120\text{mm}$ Thomasovi válci. Bod měření č.3	53
Obr. 28: Znázornění množství proudícího chladícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro $U = 230\text{V}$ u $\varnothing 150\text{mm}$ i $\varnothing 120\text{mm}$ válce . Bod měření č.6.....	53
Obr. 29: Znázornění množství proudícího chladícího media, při oddalování AM od válce v přímém směru (osa x), pro dané napěťové hladiny při měření na $\varnothing 150\text{mm}$ Thomasovi válci. Bod měření č.4.....	54
Obr. 30: Znázornění množství proudícího chladícího media, při oddalování AM od válce v přímém směru (osa x), pro dané napěťové hladiny u $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.4	54

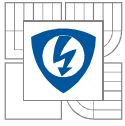


-
- Obr. 31: Znázornění množství proudícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro dané napěťové hladiny, při měření na $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.5 55
- Obr. 32: Znázornění množství proudícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro dané napěťové hladiny, při měření na $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.5 55



SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Třídy izolace [2].....	24
Tab. 2: Měření č.6 pro $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válece.....	59
Tab. 3: Měření č.6 pro $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válece.....	59
Tab. 4: Měření č.3 pro $\varnothing 150\text{mm}$ a $\varnothing 120\text{mm}$ (druhý sloupec) Thom. válece	60
Tab. 5: Měření č.4 pro $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válece.....	61
Tab. 6: Měření č.4 pro $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válece.....	61
Tab. 7: Měření č.5 pro $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válece.....	62
Tab. 8: Měření č.5 pro $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válece.....	62



1 ÚVOD

Chlazení a ventilace elektrických strojů obecně je v dnešní době velmi aktuální téma v oblasti konstruování elektrických strojů. Jeho složitost je dána hned několika jevy, např. kompromisem mezi velikostí a výkonem stroje, atd. Je zde více protichůdných požadavků.

Zvláště citlivým místem el. strojů je izolace elektrických částí, která při překonání dovolené teploty rychle stárne a zkracuje tak život celého stroje. Zvýšená provozní teplota působí nepříznivě i na ostatní části stroje: mazání ložisek, teplotní roztažnost tyčí v rotoru. U vodičů vzrůstá s teplotou jejich ohmický odpor a tím stoupají Jouleovy ztráty.

Dnes je třeba získat komplexní přehled o chlazení stroje za různých podmínek již v etapě elektromagnetického návrhu nového stroje, neboť jen tak je možné navrhnout optimální ventilační systém. Tepelně ventilační návrh je nedílnou součástí každého nově vyvinutého el. stroje. Tyto návrhy jsou početní a také modelovací, za pomoci metody konečných prvků, které se dají řešit v programech ANSYS, ANSYS Workbench, atd.

Obecně je tepelný výpočet elektrického stroje velmi složitou záležitostí. Po geometrické stránce je stroj dosti složitý. Teplo ve stroji vzniká v objemu aktivních částí, jeho množství je závislé na provozním stavu stroje a také na teplotě zdroje. Odvádění tepla je závislé na způsobu a rychlosti proudění chladícího prostředí. Ztráty a odvod tepla jsou stěžejními problémy.

Dostatečně účinné chlazení točivých elektrických strojů v automobilech je bezesporu jednou z nezbytných podmínek jejich bezporuchového chodu. Vyvarování se vzniku míst s extrémními teplotami vede k prodloužení životaschopnosti elektroizolačních materiálů a tím i doby života celého stroje. Každé snížení teploty vinutí navíc zlepšuje prostor pro přetěžování stroje a zrovna tak vylepšuje i účinnost v důsledku snížení odporu a ztrát v mědi.

2 VENTILAČNÍ OBVODY

Ventilační výpočet el. strojů tvoří důležitou část jejich návrhu. Ventilační vlastnosti stroje určují totiž do značné míry jeho chlazení a tím i výsledné oteplení. Proto je důležité znát již při konstrukčním řešení případně návrhu a posuzování ventilačních úprav alespoň základní souvislosti mezi určujícími konstrukčními veličinami ventilačního okruhu stroje (ventilátoru, krytu, kanálů, apod.) a hlavními ventilačními veličinami průtokem tlakem, ventilačními ztrátami, rychlostním prouděním a také ventilačním hlukem. [5]

Účelem ventilace je odvod ztrátového tepla ze stroje, tak aby teplota aktivních částí nepřekročila hodnotu danou tepelnou odolností použité izolace. Z toho důvodu je třeba navrhnout ventilační systém každého stroje.

Úkoly ventilačního návrhu:

- určení druhu chladícího média a stanovení jeho množství,
- návrh ventilačního systému,
- sestavení a řešení náhradního ventilačního obvodu,
- návrh samotného ventilátoru.

2.1 Určení druhu chladícího média a stanovení jeho množství

Nejčastějším chladícím médiem je vzduch. Chladící vzduch je nejlacinější a volně přístupný. Musí být ovšem čistý, bez znečišťujících a agresivních příměsí. Pro malé a střední výkony se používá otevřená ventilace, tzn. že vzduch volně prochází strojem. V některých případech se i u malých strojů volí uzavřený vnitřní oběh vzduchu, který se ochlazuje vzduchem proudícím kolem vnějšího povrchu stroje. Stroje velkých a mezních výkonů mají uzavřený oběh vzduchu, který se ochlazuje ve vzduchových nebo vodních výměnících zabudovaných přímo ve stroji, nebo v jeho bezprostřední blízkosti. Dalšími chladícími médii může být vodík, voda, olej nebo jiné plyny, či kapaliny. [2]

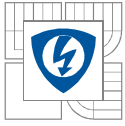
Množství chladícího média, které musí projít strojem, se určí z kalorimetrické rovnice:

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta} \quad (1)$$

Kde: Q je množství chladiva, které má projít strojem [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
 ΔP součet všech ztrát, které se budou chladícím médiem odvádět [W]
 ρ hustota chladícího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 c_p měrné teplo chladícího média [$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 $\Delta \vartheta$ oteplení chladícího média, které prošlo strojem [K]

Když připustíme oteplení vzduchu při průchodu strojem o 20 K (20°C), tedy $\Delta \vartheta = 20^\circ\text{C}$ a do rovnice (1) dosadíme fyzikální hodnoty vzduchu: $\rho \cdot c_p = 1250$, dostáváme:

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{1250 \cdot 20} = 0,04 \cdot \sum \Delta P_{[kW]} \quad (2)$$



To znamená, že na odvod 1kW ztrát musí projít strojem $0,04\text{m}^3$, tj. 40 litrů vzduchu za 1s.[2]

Pracovní tlak p (tlakový rozdíl) ventilátoru při průtoku Q je dán vztahem:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{K_p}{K_v}} \right) \quad (3)$$

Kde: p_0 je tlak naprázdno ($Q = 0$) [Pa],
 K_p celkový odpor proudění: $K_p = p \cdot Q^{-2}$
 K_v vnitřní odpor ventilátoru: $K_v = p_0 \cdot Q_m^{-1}$

Ventilační ztráty P_V představují vlastně příkon ventilátoru, který se celý přemění postupně v kruhu na teplo. Příkon P_V závisí na veličinách Q a p pracovního bodu ventilátoru.

$$P_V = \frac{pQ}{\eta_v} \quad (4)$$

Kde: η_v vyjadřuje celkovou účinnost ventilátoru v daném bodě [-],
 p pracovní tlak. [5]

2.2 Návrh ventilačního systému

Ventilační systém je určen konstrukčním řešením stroje. Musí být proto vzájemná vazba mezi uspořádáním ventilačního (nebo chladicího) systému a konstrukcí.

Z hlediska uspořádání ventilačního systému lze rozdělit stroje následujícím způsobem:

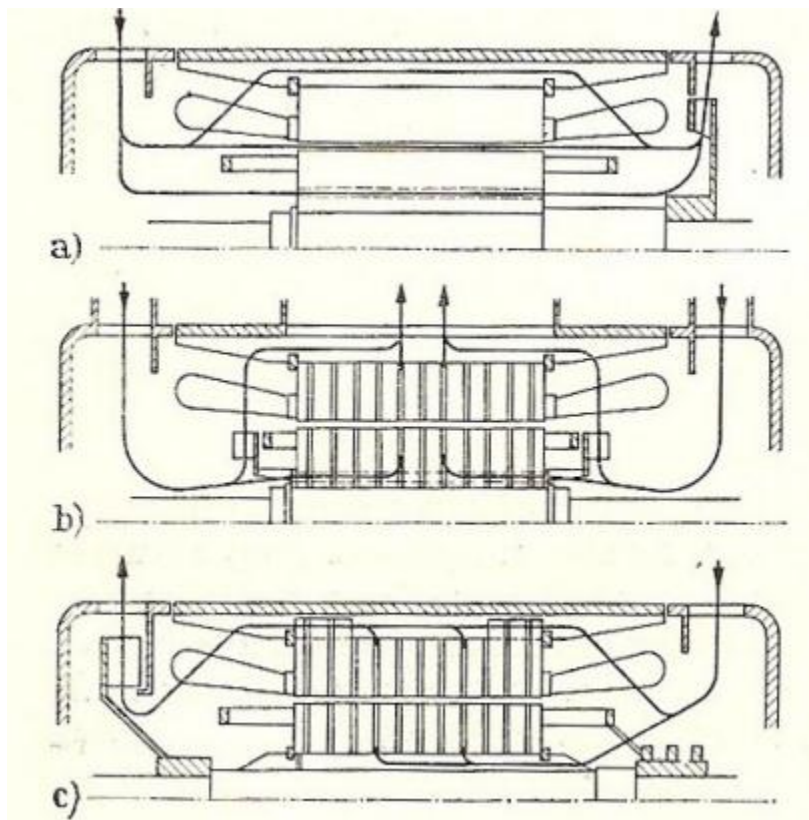
- a) podle provedení stroje:
 1. otevřené,
 2. uzavřené,

- b) převládajícího směru proudění:
 1. radiální,
 2. axiální,
 3. smíšená,

- c) vstupu a výstupu chladiva:
 1. jednostranný vstup,
 2. oboustranný vstup,

- d) zdroje tlaku:
 1. přirozená ventilace - bez ventilátoru (zdrojem tlaku jsou rotující části stroje, jako ramena, žebra, póly rotoru, ventilační vložky, atd.,
 2. vlastní – ventilátor je součástí rotoru,
 3. cizí – zdroj tlaku je umístěn mimo stroj.

Některé způsoby uspořádání ventilačních systémů jsou uvedeny na následujícím obrázku:



Obr. 1: Převládající směr ventilace: a) axiální, b) radiální, c) smíšený [2]

2.2.1 Sestavení a řešení náhradního ventilačního obvodu

Celkový tlak v proudící tekutině p_c (tekutinou se rozumí kapalina nebo plyn) má tři složky:

- Tlak statický p_s - podle Pascalova zákona je ve všech směrech stejný a vyskytuje se i v neproudící tekutině (např. v pneumatice)
- Tlak dynamický p_d - odpovídá kinetické energii proudící tekutiny a jeho maximum je ve směru vektoru rychlosti proudění. Velikost dynamického tlaku je:

$$p = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (5)$$

Kde: ρ je hustota proudící tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 v její rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

- Tlak hydrostatický Δp_h - je závislý na hustotě tekutiny a její výšce. (v našich úvahách lze tento tlak zcela zanedbat).

Pro proudící medium platí Bernoulliova věta: $p_c = p_s + p_d + p_h$, při zanedbání hydrostatické složky: $p_c = p_s + p_d$. To znamená, že při zvýšení rychlosti proudění se zmenšuje statická složka tlaku a narůstá jeho dynamická složka. Od určité rychlosti proudění se na úkor dynamické složky zmenší statická hodnota tlaku, která může být menší, než je okolní atmosférický tlak. V proudící mediu dochází kromě toho ke ztrátám a to se projevuje v poklesu celkového tlaku. Při turbulentním proudění (dostatečně velká rychlost proudění a drsnost stěn kanálu) platí:

$$\Delta p = K Q^2 \quad (6)$$

Kde: Δp je úbytek tlaku [Pa],
 K hydraulický odpor [$\text{m}^7 \cdot \text{kg}^{-1}$]
 Q množství proudícího media za jednotku času [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Vztah (6) se nazývá Atkinsonův zákon a je obdobou Ohmova zákona v elektrických obvodech, ovšem s tím zásadním rozdílem, že se jedná o závislost kvadratickou. Tato skutečnost značně komplikuje řešení složitějších ventilačních obvodů, protože tato řešení jsou popsána soustavou kvadratických rovnic, kterou nedokážeme exaktně řešit.

Hydraulický odpor je dán vztahem:

$$K = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{F^2} \quad (7)$$

Kde ξ je součinitel hydraulického odporu.

Hydraulické odpory:

V elektrických strojích převládají dva druhy hydraulických odporů: Odpory třením a odpory místní. Odpory odbočením se většinou neuplatňují.

1. Odpory třením:

Jedná se o tření mezi proudícím mediem a stěnou kanálu a uvnitř proudícího media. Velikost odporu je dána součinitelem tření λ :

$$\xi = \lambda \frac{l}{D_H} \quad (8)$$

Kde l je délka kanálu a D_H je hydraulický průměr kanálu.

Hydraulickým průměrem se rozumí průměr kruhového kanálu, kterým nahrazujeme kanál obecného průřezu. Velikost hydraulického průměru se určí z podmínky, že poměr průřezu obecného kanálu ku jeho obvodu je stejný jako stejný poměr kanálu kruhového, tedy:

$$\frac{S}{U} = \frac{\frac{\pi}{4} D_H^2}{\pi D_H} \quad (9)$$

$$D_H = \frac{4S}{U} \quad (10)$$

Kde S je průřez obecného kanálu a U je jeho obvod.

Určení součinitele odporu λ je poměrně obtížná záležitost, kdy záleží na drsnosti kanálů a kvalitě proudění. Proudění může být laminární, turbulentní anebo přechodné, kdy v části průřezu (blíže ke stěnám) je proudění ještě laminární, zatímco dále od stěn je již turbulentní. Charakter proudění je závislý na velikosti bezrozměrného Reynoldsova čísla Re :

$$Re = \frac{v D_H}{\nu} \quad (11)$$

nebo také

$$Re = \rho \frac{v D_H}{\eta} \quad (12)$$

Kde: v je rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 D_H hydraulický průměr [m]
 ν kinematická vazkost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 η viskozita [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ hustota proudící kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Když vztah mezi kinematickou vazkostí a viskozitou je:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (13)$$

Velikost Reynoldsova čísla určuje charakteristiku proudění:

- $Re < 2500$ proudění laminární
- $2500 < Re < 5000$ proudění přechodné
- $Re > 5000$ proudění turbulentní

Z hlediska chladících účinků je výrazně vhodnější turbulentní proudění, protože s teplo předané z ochlazovaného povrchu v důsledku „proplétání“ proudových vláken dostane do celého objemu proudícího media, zatímco při laminárním proudění se proudová vlákna nemísí a teplo se šíří v mediu vedením a zde se nepříznivě uplatní nízká tepelná vodivost media. V elektrických strojích se většinou vytváří turbulentní proudění a ještě při drsných kanálech se nedopustíme velké chyby, když volíme součinitel ventilačního odporu $\lambda = 0,03$.

2. Odpory místní:

Jsou to odpory způsobené změnou vektoru rychlosti proudění, to znamená změnou velikosti rychlostí, směru nebo kombinací obojího. [2]

2.3 Typy proudění

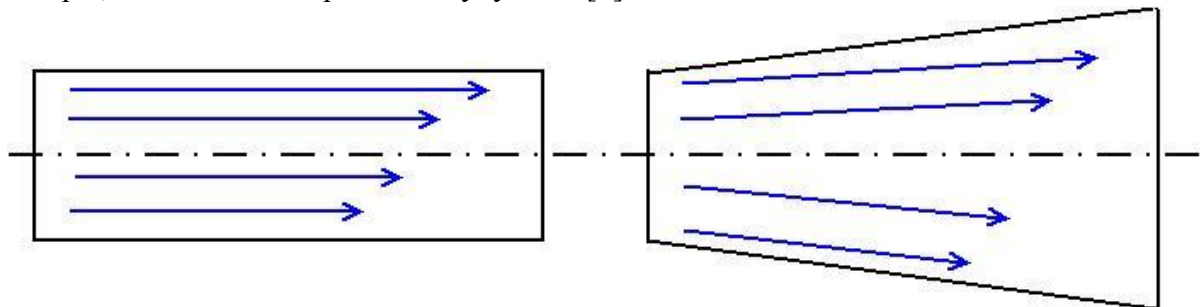
Rozlišujeme dva základní druhy: - laminární,
- turbulentní – který se mimo jiné vyskytuje pod kapotou automobilu.

2.3.1 Laminární proudění

Je proudění vzduchového média, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice proudícího média se pohybují vedle sebe jako ve vrstvách, které se vzájemně nepromíchávají. Odtud také laminární neboli vrstevnaté proudění.[3]

Nastává, když je hodnota Reynoldsova čísla do 2 500 a vysoká viskozita. Maximální rychlost proudění je v ose kanálu, zmenšuje se směrem ke stěnám. Má parabolický průběh (Obr. 2)

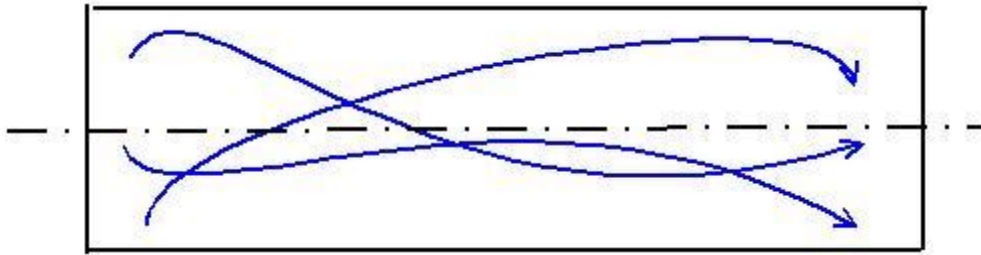
Tlakový spád stoupá úměrně v kruhovém kanále s rychlostí proudícího média. V elektrických strojích se laminární proudění vyskytuje jen zřídka; přestupy tepla jsou v laminárním proudění podstatně nižší než v turbulentním, takže všude tam, kde se jedná o odvod tepla, se laminárnímu proudění vyhýbáme.[1]



Obr. 2: Laminární proudění

2.3.2 Turbulentní proudění

Platí pro $Re > 5\,000$ a viskozita je velice nízká. Jednotlivé vrstvy média neklouzají klidně ve směru proudění jako v laminárním toku. Tvoří se makroskopické shluky obsahující řádově 10^9 molekul, které neuspořádaně vybočují ze směru proudění, rozdělují a rozpadávají se a znovu se vytvářejí v jiné, nestálé podobě a velikosti. V proudícím médiu trvá tak vedle hlavního pohybu druhotný pohyb, který způsobuje velké zvýšení vnitřního tření. [1]



Obr. 3: Turbulentní proudění [10]

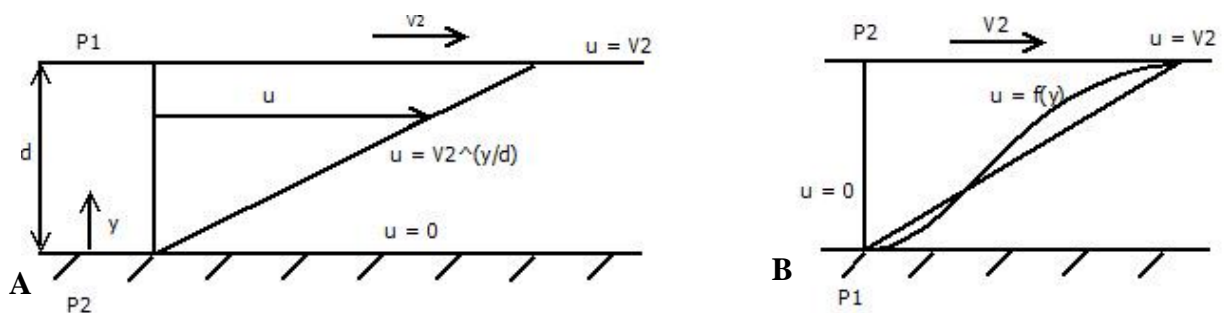
2.4 Proudění v kanálu

V mezeře δ (m) mezi dvěma rovnými paralelními deskami P_1 a P_2 (Obr. 4A) je uzavřena kapalina nebo plyn. Pohybuje-li se deska P_2 paralelně k P_1 mírnou rychlostí v_2 , je kapalina strhována tak, že rychlost u jednotlivých jejích vrstev roste lineárně od $u = 0$ při $y = 0$, tedy u desky P_1 , až po $u = v_2$ při $y = \delta$ u desky P_2 , takže $u = v_2 y / \delta$ nebo $du/dy = v_2 / \delta$. Přímo úměrná poměru v_2 / δ je také síla přenášená deskou P_2 na plyn. Síla ve směru na v_2 plošnou jednotku, čili tečné napětí (Pa).

$$\tau = \frac{\mu v_2}{\delta} = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) = konst. \quad (14)$$

Součinitel μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) se označuje jako viskozita (absolutní nebo dynamická); je to součinitel vnitřního tření kapaliny.

Vzroste-li rychlost desky P_2 nad určitou mez, mění se rozložení rychlosti jednotlivých vrstev: rychlost u roste se vzdáleností y blízko obou stěn rychleji, uprostřed mezery se vyrovnává a její vzrůst je mnohem pomalejší (Obr. 4B). Rychlostní křivka (rychlostní profil) $u = f(y)$ má inflexní bod ležící na spojnici obou koncových bodů a, b, v nichž jsou rychlosti $u = 0$ a $u = v_2$. [1]



Obr. 4: Relativní pohyb desky P_2 vůči stojící P_1 : A) mírná rychlost v_2 desky P_2 , laminární proudění, B) větší rychlost v_2 desky P_2 , turbulentní proudění [1]

2.4.1 Proudění v kruhovém kanálu

Průběh laminárního proudění v kruhovém kanálu se odvodí integrací vztahu:

$$\tau = -\mu \left(\frac{du}{dr} \right) = \frac{C_r}{R} \quad (15)$$

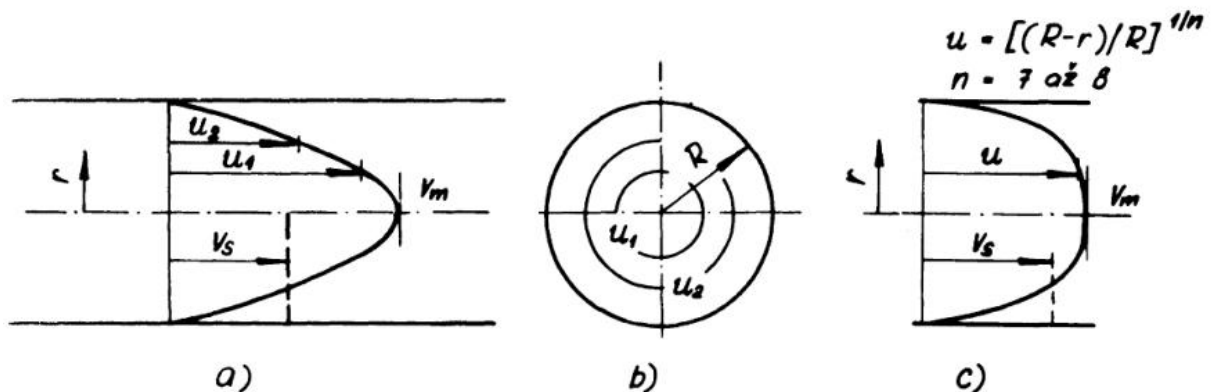
Na rozdíl od případu proudění v rovném kanálu ($\tau = \text{konst.}$), zde roste tečné napětí (opačného smyslu než má rychlost u , protože stěny kanálu brzdí pohyb tekutiny) od středu kanálu (kde je nulové) ke stěnám, a to lineárně. Integrací se dostane vztah pro rychlost:

$$u = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Kde v_m je maximální rychlost v ose kanálu ($r = 0$). Rychlostní profil je tedy parabola a střední rychlost v kanálu je $v_s = v_m/2$. Křivky stejných rychlostí v každém průřezu kolmém k ose jsou soustředné kružnice u_1, u_2 .

Při vyšších rychlostech nastává v kanálu proudění turbulentní, které je charakterizováno obdobně jako mezi dvěma deskami, tím že rychlost blízko stěn vzrůstá, ale blíže osy se vyrovnává. Rychlostní profil (Obr. 5c) má tvar paraboly vyššího stupně. Podle kvalitativního základního zákona, který říká, že výskyt turbulentního proudění nezávisí pouze na rychlosti v , ale zároveň na velikosti průměru kruhového kanálu D , na viskozitě a na hustotě proudícího media. Pokusně bylo nalezeno, že směrodatné pro charakter proudění je bezrozměrné číslo, později nazvané Reynoldsovo číslo.

Pomocí Reynoldsova čísla je možné určit, zda je proudění tekutiny laminární nebo turbulentní. Čím je Reynoldsovo číslo větší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. Přechod z laminárního do turbulentního proudění nastává při překročení hodnoty $Re = 2500$.



Obr. 5: Proudění v kruhovém kanálu: a,b) laminární, c) turbulentní [1]

2.5 Ventilátory

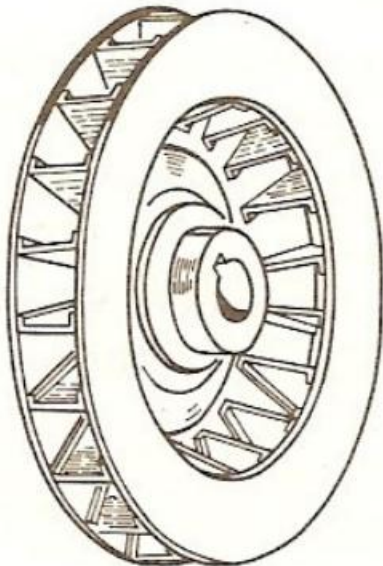
Jsou nezbytné pro chlazení el. strojů nuceným chlazením. Existuje velké množství různých konstrukčních řešení ventilátorů. Ventilátory se řadí mezi stroje rotační lopatkové, sloužící k stlačování a dopravě vzduchu na el. stroje. Hlavním úkolem při dopravě vzduchu je překonávat tlakové ztráty na vstupu a výstupu.

Ventilátory jsou zařízení, které slouží jako zdroje tlaku, přičemž se v jejich teorii považuje proudící medium za nestlačitelné, tedy jeho hustota $\rho = \text{konst.}$ Mezi dva hlavní typy ventilátorů se považují:

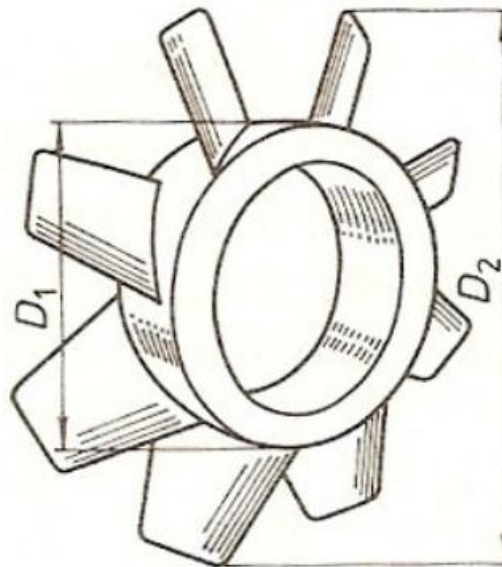
- Radiální, též odstředivé (obr.7), kde chladivo proudí v radiálním směru a využívá se odstředivé síly, která působí na chladivo v mezi lopatkovém prostoru.
- Axiální, též vrtulové (obr.6), kdy chladivo proudí v axiálním směru, lopatky mají tvar vrtule s vhodným profilem a úhlem natočení.

Konstrukčně i výrobně jednodušší jsou ventilátory radiální, u kterých lze dosáhnout většího tlaku a u ventilátoru s rovnými radiálními lopatkami ho lze použít pro oba směry otáčení. Ve srovnání s axiálními mají ovšem horší účinnost. Axiální ventilátory zase dávají větší množství chladiva při menším tlaku. Používají se častěji u strojů s vyššími otáčkami (např. u turboalternátorů) Jsou ovšem citlivé na jejich umístění ve stroji a mohou se dostat do nestabilní oblasti.

V automobilech se jich vyskytuje několik, např. radiální ventilátor topení, či axiální před chladičem motoru.



Obr. 7: Radiální ventilátor [2]



Obr. 6: Axiální ventilátor [2]

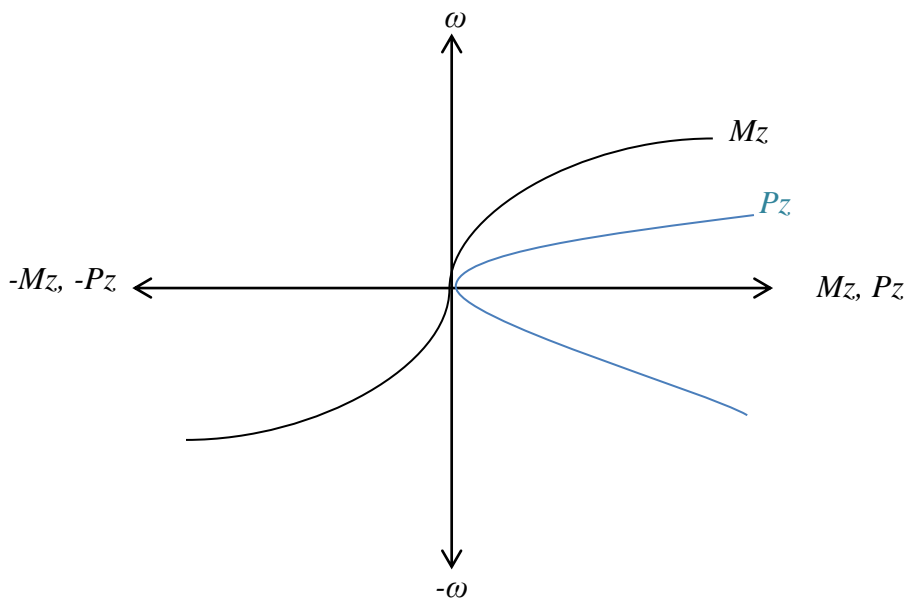
2.5.1 Ventilátorová charakteristika

Ventilátor, který je umístěný na hřídeli a vytváří sílu, jenž pohání vzduch procházející strojem. Tato činnost vytváří na hřídeli určitý zátěžný moment. Tento moment je závislý na rychlosti, kterým pracovní mechanismus zatěžuje hnací soustavu. Mechanická charakteristika na obr. 5 udává grafickou podobu průběhu zátěžného momentu ventilátorové charakteristiky.

Mechanické ztráty u točivých elektrických strojů zahrnují také ztráty způsobené třením v ložiskách nebo prouděním vzduchu. Vzduch ve většině strojů slouží jako chladicí médium. Je hnán od předního čela k zadnímu a tím ochlazuje celý stroj. Ztráty v ložiskách jsou poměrně nízké, pokud jsou dobře udržované, ale i tak působí jako zdroj tepla. Ztráty ventilací rostou kvadraticky s otáčkami stroje.

Zátěžný moment M_z ventilátorové charakteristiky má kvadratický průběh v I. a III. kvadrantu. Ztrátový výkon P_z má tvar křivky třetího stupně. To je charakteristické pro ventilátory, kompresory, dmychadla, odstředivá čerpadla a vývěvy.

Pracovní mechanismus je určen mechanickou charakteristikou. Pro jejich matematický popis se používá obecný výraz pro pasivní zátěžný moment. [9]



Obr. 8: Ventilátorová charakteristika

3 TEPELNÉ OBVODY

Účelem tepelných výpočtů je zjistit střední, resp. i maximální oteplení jednotlivých částí stroje. Nejvíce nás zajímají ty části, které jsou v bezprostředním styku s izolací. Toto oteplení nesmí přesáhnout hodnotu, která odpovídá tepelné odolnosti použité izolace. V případě jejího překročení je třeba upravit ventilační systém nebo snížit ztráty v příslušné části, to ovšem vede k menšímu využití stroje a znamená to např. větší rozměry, hmotnost a tedy zpravidla i vyšší cenu.

Podle tepelné odolnosti jsou izolační materiály zařazeny do jednotlivých tříd, jak je uvedeno v následující tabulce. V tabulce je uvedena maximální teplota a oteplení (Tab. 1).

Teplota – je to stav daného místa nebo objektu, který zjistíme pomocí nějakého čidla, jako je dotykový teploměr, termočlánek, termistor, apod.

Oteplení – je teplota nad teplotou okolí, ČSN předepisuje tuto teplotu 40°C. Teplota vinutí se ve většině případu zjišťuje z přírůstku elektrického odporu a tím se určí střední hodnota teploty vodičů, která se může lišit od maximální, resp. minimální teploty o 5÷10 °C. Proto se u tepelné třídy A a E zvyšuje teplota okolí o 5°C a u třídy B až H o 10°C. Když se zjišťuje nebo počítá oteplení dané části stroje, udává se teplota okolí $\vartheta_0 = 0^\circ\text{C}$. Získaná hodnota oteplení $\Delta\vartheta$ se porovnává s doporučenou hodnotou použité izolace, jak je uvedeno v následující tabulce.[2]

Třída	Max teplota [°C]	Max oteplení [°C]	Materiál
Y	90	45	Organické látky neimpregnované (papír, bavlna, hedvábí, apod.)
A	105	60	Organické látky třídy A, impregnované (ponořené v oleji nebo napuštěné podobnou, nejčastěji organickou látkou)
E	120	75	Folie na bázi polyetylentereftátu
B	130	80	Anorganické látky spojované většinou syntetickými látky a pryskyřicemi
F	155	105	Anorganické látky spojované většinou syntetickými laky a pryskyřicemi
H	180	130	Anorganické látky s pojivky na bázi silikonových laků a pryskyřic
C	nad 180	nad 130	Anorganické látky (slída, sklo, porcelán, atd.)

Tab. 1: Třídy izolace [2]

3.1 Přenos tepla vedením [9]

Přenos tepla je děj probíhající na rozhraní dvou různých látek s rozdílnou teplotou a dochází k přestupu tepla z jedné látky na druhou. Poznatky z tohoto tématu jsou používány k návrhu chladicích systémů, u strojů a jiných tepelně namáhaných součástí. Teplo vzniká na částech, v nichž vznikají ztráty. K přestupu tepla dochází vzájemně mezi všemi částmi stroje. Sdílení tepla probíhá třemi různými způsoby:

- Vedením (kondukce),
- prouděním (konvekce),
- zářením (sálání).

Vedení - přenos tepla vedením probíhá v pohyblivém i statickém prostředí různého skupenství (pevné, kapalné, plynné), ale především se tento druh týká tuhých materiálů. Teplo se zpravidla přenáší z prostředí s nižší teplotou do prostředí s vyšší teplotou.

$$H = kS \frac{T_H - T_S}{d} \quad (17)$$

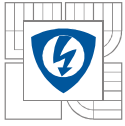
Kde: H je tepelný tok [W],
 k je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 S je průřez předmětu [m^2],
 T_H je vyšší teplota [K],
 T_S je nižší teplota [K],
 d je vzdálenost přenosu [m].

Proudění – jedná se o fyzikální děj, kdy dochází k šíření tepla prouděním nějakého plynu o různé teplotě. Toto proudění můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Přenos tepla přirozenou konvencí a umělou konvencí. U přirozené konvence dochází k samovolnému proudění tekutiny. Teplejší médium se pohybuje směrem vzhůru kvůli rozdílným teplotám. U umělé konvence je chladivo poháněno ventilátorem nebo jiným přístrojem. Přestup tepla prouděním je užíván při návrhu plyných a kapalných chladicích systémů. Základem je přestup tepla vedením do chladicího média a poté může být teplo odvedeno prouděním.

Přenos tepla konvekcí je určen také množstvím média, které je schopno vzniklé teplo odvádět. Tato vlastnost závisí na rychlosti proudícího média a na jejím množství. Velikost objemového toku nám určuje vztah:

$$Q = vS \quad (18)$$

Kde: Q je objemový tok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 v rychlost proudícího média [m^3],
 S průřez toku proudícího média [m^2].



Sálání – přenos tepla zářením, které probíhá mezi předmětem a okolím, je způsobeno prostřednictvím elektromagnetických vln. Je možné ve vakuu i v plynném prostředí. Výkon P_r vyzařujícího předmětu nám udává rychlost, s jakou zdroj tepla vyzařuje energii pomocí elektromagnetických vln. Tento výkon je dán Stefan – Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4 \quad (19)$$

Kde: P_r je tepelný tok vyzařovaný do okolí [W],
 σ emisivita [-],
 ε Stefan – Boltzmannova konstanta, $\varepsilon = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².K⁻⁴],
 S je plocha předmětu [m²],
 T teplota [K].

3.2 Závislost ztrát na teplotě zdroje

Elektrický odpor vodičů je závislý na teplotě vodiče. U většiny vodičů s teplotou elektrický odpor narůstá. Tato závislost je dána vztahem:

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha(\vartheta_1 - \vartheta_0)] \quad (20)$$

Kde: R_1 je odpor při teplotě ϑ_1 ,
 R_0 je odpor při teplotě ϑ_0 ,
 α součinitel tepelné závislosti elektrického odporu, který je uveden pro danou látku v příslušných tabulkách. [2]

4 CHLAZENÍ

Chlazení elektrického stroje zajišťuje odvod tepla, které se ve stroji tvoří vlivem ztrát. Dané teplo odvádíme ze stroje chladicím médiem, což je látka, která má za úkol chladit stroj. Jako chladicího média je možné použít plynu (např. vzduch, vodík) nebo kapalin (nejčastěji voda).

V elektrických strojích rozeznáváme tři základní typy ventilace dle směru chladicího média. Je to axiální ventilace (Obr.1a), dále radiální ventilace (Obr.1b) a axiálně radiální ventilace (Obr.1c). Dále můžeme rozeznávat otevřený a uzavřený oběh chladiva. U otevřeného oběhu se médium neustále obnovuje. Bere se tedy z okolního prostředí, a poté se mu odevzdává. Uzavřený oběh se vyznačuje tím, že chladivo primární odevzdává své teplo sekundárnímu médiu, čili oběh je zprostředkováván stále stejným chladivem.

Z hlediska nároku na vlastnosti chladicích médií je důležité dělení chlazení na přímé a nepřímé. U přímého chlazení je chlazený objekt vystaven přímo chladicímu médiu, zatímco u nepřímého je tento styk zprostředkován (např. mezistěnou, izolace vodičů). Je zřejmé, že u nepřímého chlazení jsou menší nároky na vlastnosti média, než u přímého chlazení.

Velice důležitý je také zdroj energie pro ventilátor, či jiný přístroj zajišťující tok chladiva. Zdroj může být závislý, nebo nezávislý. Nezávislý zdroj získává energii pro oběh chladiva ze zdroje nezávislého na daném elektrickém přístroji, zatímco závislý zdroj je poháněn energií z chlazeného stroje. Jde třeba o případ, kdy je ventilátor umístěn na hřídeli chlazeného stroje. V některých případech je proudění chladicího vzduchu zajištěno rozdílem teplot uvnitř stroje, či otáčením rotoru. Jde o takzvané přirozené chlazení a daný stroj nepotřebuje ventilátor.

Chlazení se označuje na el. strojích podle normy velkými písmeny IC (International Cooling), viz str. 37. [4]

4.1 Rozčlenění chlazení

Způsoby chlazení točivých el. strojů lze rozčlenit podle mnoha odlišných hledisek. Základní rozdělení je na stroje s pasivním nebo aktivním chlazením:

- Pasivní chlazení:

Teplo je z povrchu stroje odváděno pouze přirozenou konvekcí a zářením. Hlavní předností je tak jednoduchost, k odvodu tepla navíc nepotřebujeme odebírat žádný další zdroj výkonu. Tento druh chlazení je bohužel použitelný pouze u nejmenších strojů nízkých výkonů.

- Aktivní chlazení:

Teplo je ze stroje odváděno zejména nucenou konvekcí. Proudění chladicího média je uměle podporováno např. ventilátorem, či čerpadlem. Výhodou je mnohem větší účinnost chlazení, tento způsob je proto použitelný i u strojů vysokých výkonů. Nevýhodou je jeho větší složitost a určitý mechanický příkon nutný pro jeho funkci.

Zvláštní kategorii, ležící na pomezí obou výše uvedených skupin, tvoří chlazení pomocí tepelných trubíc. Pro zintenzivnění přenosu tepla je zde využito skupenské přeměny chladicího média. Odváděné teplo je pak v konečném důsledku opět rozptýleno do okolí, stejně jako u ostatních způsobů chlazení.

Aktivní chlazení lze dále dělit podle druhu chladicího média na:

- chlazení vzduchem,
- chlazení kapalinou,
- jiné způsoby chlazení.

Stroje s aktivním chlazením vzduchem můžeme dále dělit podle umístění ventilátoru na tlačné nebo sací uspořádání:

- Tlačné uspořádání:
Ventilátor je umístěn na vstupu vzduchu do stroje. Dovnitř tak vstupuje vzduch rozvířený ventilátorem, což může zlepšit přestup tepla (zejména u předního čela statoru, které má vůči ventilátoru relativně velký rozdíl obvodové rychlosti). Nevýhodou může být nepatrné ohřátí vzduchu ještě před vstupem do stroje vlivem ventilačních ztrát.
- Sací uspořádání:
Ventilátor je umístěn na výstupu vzduchu ze stroje. Toto uspořádání zlepšuje přestup tepla na předním (vstupním) čele rotoru, které má vůči nerozvířenému vstupujícímu vzduchu poměrně velkou obvodovou rychlost.

Je zde mnoho dalších způsobů dělení, například na stroje s axiálním nebo radiálním ventilátorem, s vlastním nebo cizím ventilátorem, atd.[3]

4.1.1 Chlazení vzduchem

V automobilech se všechny el. stroje chladí proudícím vzduchem. A tyto stroje je možné rozdělit podle provedení na:

- Otevřené provedení:
Dovnitř stroje vstupuje studený vzduch přímo z okolního prostředí, ohřátý vzduch pak opět vystupuje ven do okolí.
U tohoto provedení se o vystupující ohřátý vzduch již nemusíme dále nijak starat, nevýhodou je ovšem zanášení stroje nečistotami nasávanými z okolního prostředí. Další nevýhodou může představovat skutečnost, že teplo je rozptýlováno přímo v prostorech, ve kterých je motor umístěn.

- Uzavřené provedení:

Vzduch cirkuluje pouze uvnitř samotného stroje nebo v uzavřeném okruhu mezi strojem a výměníkem tepla.

V prvním případě může jít o i pouhé víření vzduchu uvnitř stroje samotným rotorem, který je tímto způsobem chlazen. Vzduch pak předává teplo chladnějším částem stroje, například jeho vnější kostře. Vnější povrch může být chlazen jak aktivně, tak i pasivně.

Ve druhém případě bývá cirkulace vzduchu podporována ventilátorem. Vzduch ohřátý ve stroji odevzdává své teplo ve výměníku tepla, který je součástí vzduchového okruhu. Do stroje se tak opět navrací ochlazený vzduch. Teplo předané do výměníku je pak rozptýleno do okolí nebo odváděno dalším uzavřeným okruhem pryč. Hlavní nevýhodou bývají v tomto případě poměrně velké rozměry výměníku tepla, který zvyšuje prostorové nároky na umístění stroje.[3]

4.1.2 Chlazení kapalinou

V luxusních moderních automobilech se využívá maximálně pro chlazení alternátoru, ale v budoucnosti určitě přibude v automobilech strojů na této bázi chlazení.

Přímé chlazení kapalinou se používá téměř výhradně v provedení s uzavřeným chladicím okruhem. Chlazení stroje je tak zajištěno pomocí cirkulace neměnného množství chladiva.

Ve většině informačních zdrojů je vodní chlazení prezentováno jako velice účinné, s možností udržet teploty vodou chlazených částí (zpravidla statoru) na poměrně nízkých hodnotách. Tato vlastnost souvisí s termo-fyzikálními vlastnostmi vody. Na smočených teplosměnných plochách lze snadno dosáhnout vysokých hodnot součinitele přestupu tepla o několik řádů vyšších než v případě vzduchu.

Pozitivní vliv má také velmi vysoká tepelná kapacita vody, která je nejvyšší ze všech běžně dostupných kapalin. I při relativně malém průtoku je tak vodní proud schopen pojmout velké množství tepla. S vysokou tepelnou kapacitou souvisí i malé oteplení vody mezi vstupem a výstupem z chlazeného stroje. Typické hodnoty oteplení se většinou pohybují v řádu jednotek °C. Teplotní pole chlazeného stroje proto bývá ve směru průchodu chladiva velice vyrovnané, bez přehřátých míst.

S výše popsanými vlastnostmi souvisí i poměrně malá citlivost teplot stroje na změnu průtoku vodním okruhem. Patrné je to zejména u těch částí stroje, které jsou od tělesa vodního chlazení odděleny větším tepelným odporem (např. vinutí).

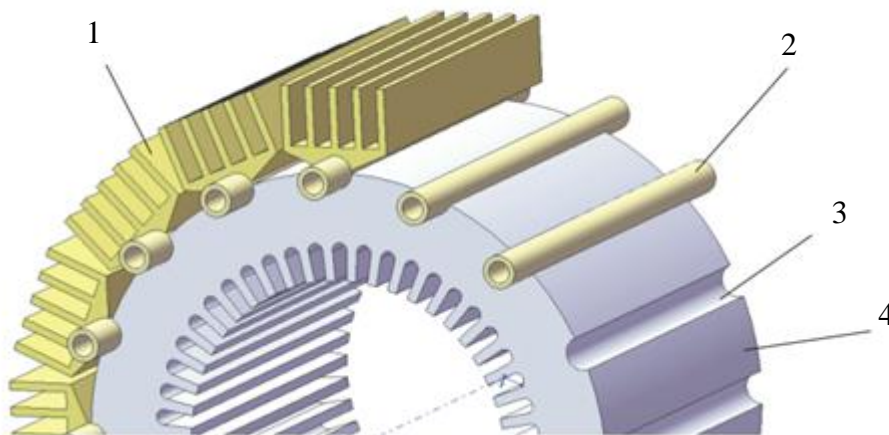
Jednu z pomyslných slabín vodního chlazení představuje odvod tepla z částí stroje, které nejsou v přímém kontaktu s vodním chladicím okruhem. Často se jedná například o čela vinutí a zejména rotor stroje, který je od vodou chlazeného statoru oddělen vzduchovou mezerou. Teploty těchto částí proto bývají mnohem vyšší, někdy je potřeba chladit je doplněným vzduchovým okruhem, což poněkud snižuje výhody vodního chlazení.

Výhody vodního chlazení:

- Vysoká účinnost a nízké teploty vodou chlazených částí.
- Dobrý poměr výkonu k rozměrům stroje. Součástí stroje nemusí být rozměrný výměník tepla vzduch – voda, což zmírňuje prostorové nároky na umístění stroje.
- Ve statoru stroje nemusí být žádné vzduchové radiální kanály. Stroj proto může být kratší nebo mít větší moment při stejné délce paketu.
- Stroj je plně uzavřený. Na rozdíl od otevřeného provedení chlazení vzduchem nehrozí nasávání nečistot.
- Teplo nemusí být rozptylováno v blízkosti stroje. Vodním okruhem může být odvedeno do výměníku umístěného v dostatečné vzdálenosti od stroje.
- Nižší hlučnost, zejména v porovnání s chlazením vzduchem v otevřeném provedení.
- Čerpadlo, které zajišťuje cirkulaci vody v okruhu, nepotřebuje tak velký příkon jako ventilátor vzduchem chlazeného stroje

Nevýhody vodního chlazení:

- Vyšší výrobní náklady.
- nezbytnost dalšího příslušenství vodního okruhu (čerpadlo, výměník tepla, filtry, atd.),
- Vyšší nároky na údržbu, jsou zde nutné kontroly vodního okruhu a kvality vody.
- Nebezpečí úniků vody.
- Vodní chlazení zasahující přímo do statorového paketu může negativně narušovat magnetický obvod stroje.
- Nemožnost přivedení vodního okruhu na pohybující se části stroje. Rotor musí být chlazen vzduchem.[3]



Obr. 9: Varianta chlazení kapalinou s chladicími trubkami umístěnými vně svazku statorových plechů [3]

Legenda: 1 žebrovaný chladič vzduchu, 2 trubka vodního chlazení, 3 půlkruhová drážka pro trubku, 4 svazek statorových plechů.

5 ROZDĚLENÍ EL. STROJŮ

Elektrické stroje jsou strojní elektromechanická zařízení, sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou, nebo elektrické energie opět na elektrickou, ale s jinými parametry. A automobilismu mají nepostradatelnou roli, pro samotný chod auta.

Hlavní dělení je podle vstupního napětí:

1. stejnosměrné,
2. střídavé:
 - a. synchronní,
 - b. asynchronní.

5.1 Stejnosměrné stroje

Jsou historicky nejstarší, pro své specifické vlastnosti se využívají dodnes, skoro by se dalo říci, že prožívají určitou poměrně silnou renesanci, zejména v regulovaných pohonech, v robotice a mikro-elektronických pohonech. Mají i tu zvláštnost, že bez jakýchkoliv úprav lze tentýž stroj použít jako motor i jako stejnosměrný generátor – záleží pouze na druhu dodávané energie.

Každý motor má tři části:

1. Stator = stojící pevná část, obvykle tvořena magnetickým obvodem - z pevného (permanentního) magnetu nebo dynamoplechy s drážkami v nichž jsou cívky, které vytvářejí statorové elektromagnetické pole.
2. Rotor = točící se část - vždy tvořena cívkami, do nichž přivádíme elektrickou energii, která vytvoří rotorové magnetické pole, které pak interakcí se statorovým vyvodí pohyb (rotační charakter je dán upevněním neb lineární motory vyvozují lineární pohyb podél rozvinutého statoru).
3. Rotační přenosové ústrojí (komutátor) s jednotlivými lamelami.

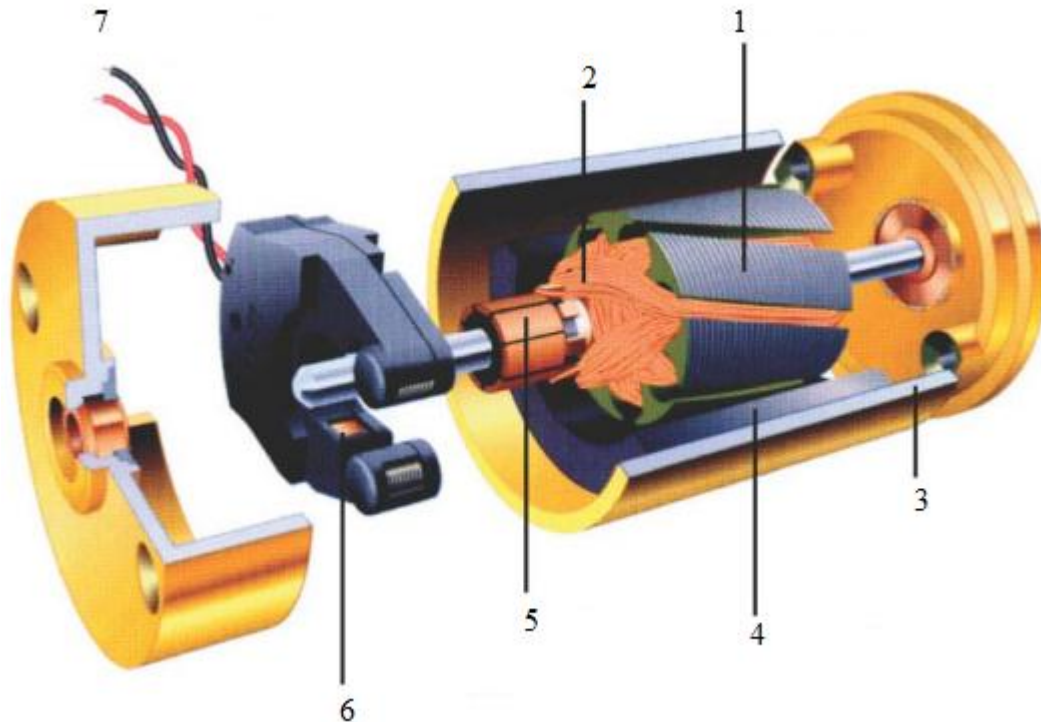
Nevýhodou tohoto uspořádání je, že se elektrická energie do rotoru musí přivádět přes soustavu rotujícího komutátoru a sběracího ústrojí (kartáčů).

Podle způsobů buzení magnetického pole se dělí:

1. **ss motory s cizím buzením** – budicí vinutí umístěné ve statoru je napájeno elektrickou energií ze zvláštního (samostatného) zdroje nebo motor využívá pevných magnetů s tvarově příslušnými pólovými nástavci umístěnými jako nedílná součást statoru + rotorové vinutí je napájeno z jiného (samostatného) zdroje,
2. **ss motory s vlastním buzením** – budicí vinutí je určitým způsobem spojeno s vinutím rotoru, je tedy vinutí statoru i rotoru napájeno z jediného společného zdroje, podle druhu propojení:
 - A. *buzení (zapojení) derivační* – vinutí rotoru a statoru jsou zapojeny paralelně a prochází jimi proud rozdílné velikosti,

B. buzení (zapojení) sériové – vinutí rotoru a statoru jsou zapojeny do série a prochází jimi proud stejné (shodné) velikosti,

C. buzení (zapojení) kompaundní (sdružené) – kombinace obou předcházejících, kdy magnetizační statorové vinutí je složeno z (minimálně) dvou cívek, z nichž jedna je v sérii s rotorovým vinutím a druhá paralelně.



Obr. 10: Řez moderním stejnosměrným servomotorem s permanentními magnety [10]

Legenda: 1 jádro rotoru složené z plechů, 2 vinutí, 3 feromagnetický plášť, 4 permanentní magnety, 5 komutátor, 6 držák s kartáči, 7 elektrické přívody.

V automobilech hodně využívaný pro svoji jednoduchost. Např. startér, motor ventilátoru topení, motor stěračů i ostříkovačů, atd.

5.2 Asynchronní stroje

Indukční (asynchronní) stroj je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části: stator a rotor. Obě části jsou opatřeny vinutím. Jedno vinutí (obvykle statorové) je připojeno na zdroj střídavého proudu a druhé (obvykle rotorové) je spojeno nakrátko a proud v něm vzniká elektromagnetickou indukcí, podobně jako u transformátoru. Odtud název indukční stroj.

Nejčastějším druhem indukčního stroje je trojfázový indukční motor, který využívá silového působení statorového proudu (ze sítě) a rotorového proudu (indukovaného ve vinutí spojeném nakrátko).

Trojfázový indukční motor je jednoduchý, v provozu spolehlivý a nevyžaduje žádnou zvláštní obsluhu a údržbu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů: od několika wattů až do 20 MW s velmi širokým rozsahem otáček od desítek otáček za minutu až po 100 000 otáček za minutu. Asynchronní motor nakrátko je díky své konstrukční jednoduchosti nejužívanějším motorem. V porovnání se stejnosměrnými stroji vyniká jednoduchá konstrukce a prakticky bezúdržbový provoz asynchronních strojů. Jejich rozšíření je spojeno s rozvojem střídavých distribučních a napájecích sítí. Především v neregulovaných pohonech se využívá možnost jednoduchého spouštění přímým připnutím na síť, i když problémy může činit vzniklý proudový náraz (pěti až sedminásobek jmenovitého proudu) a velký odběr jalového výkonu. Snaha o omezení záběrového (spouštěcího) proudu a splnění požadavků na regulaci vedla ke konstrukci speciálních strojů buď s vinutým (kroužkovým) rotorem, čímž však zanikla hlavní výhoda jednoduchých asynchronních strojů s klecovým rotorem, případně strojů vícerychlostních, umožňujících za cenu větší složitosti statorového vinutí stupňovou regulaci otáčivé rychlosti. Teprve nové poznatky v oblasti výkonové elektroniky a regulace zcela vyřešily problémy s kmitočtovým řízením rychlosti asynchronních strojů, které tak dnes získaly dominantní postavení i v oblasti regulovaných pohonů všeobecného použití.

Indukční motor může být podle statorového vinutí:

- a) jednofázový (pro malé výkony),
- b) trojfázový,

a podle rotorového vinutí:

- a) nakrátko,
- b) kroužkový.

V automobilech není moc využíváný, ale v některých je uplatněn např. jako motor posilovače řízení.

5.3 Synchronní stroje

Mají tu základní vlastnost, že rotující elektromagnetická pole statoru a rotoru musí být "v syn-chronu" - to znamená, že se otáčí stejnou rychlostí (danou frekvencí napájecího napětí). V okamžiku, kdy tato podmínka není dodržena, vypadnutí ze synchronismu znamená u motoru zastavení rotoru a u generátoru špatnou frekvenci výstupního napětí. Výhodou synchronních motorů je právě možnost přesného nastavení otáček (přesnou frekvencí napájecího napětí) a velkým rotačním momentem, který "drží" rotor v synchronních otáčkách (velikost "držení" závisí mj. na konstrukčním uspořádání vinutí). Jednoznačnou nevýhodou je, že při přetížení se motor zcela zastaví.

Podle uspořádání rotoru rozeznáváme synchronní stroje:

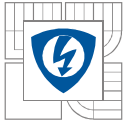
1. ***S vyjádřenými póly*** - rotor je složen z rotorového kola, na němž je upevněn určitý počet pólů (čtyři a více) a každý pól má svou budicí cívku.
2. ***S hladkým rotorem*** - rotor tvoří pevný válec, který má na povrchu podélné drážky a v nich je uloženo soustředné budicí vinutí napájené stejnosměrným proudem tak, že rotor se magnetuje (obvykle dvoupólově).

Alternátory i synchronní motory jsou zpravidla trojfázové, neboť vzhledem k jednofázovým mají mnohé přednosti. Jednofázové generátory se používají jen ojediněle, v některých speciálních případech.

Speciální příklad synchronním strojů jsou krokové motory:

Konstrukce a řízení pohybu je přizpůsobeno krokovému režimu. Změnou polohy magnetického toku na statoru působí na zubový (popř. drážkovaný) rotor, vzniká synchronizační moment způsobující pootočení rotoru do nové rovnovážné polohy, ve které je minimální magnetický odpor. Velikost kroku je dána počtem fází na statoru, počtem pólu a způsobem řízení (s plným krokem - symetrické; s polovičním krokem - nesymetrické). Vhodným postupným střídáním ve vedení proudu ve fázových vinutích na statoru dochází k nespojitému (přetržitému) pohybu rotoru – krokování. Úhel (dráha) pohybu je pak úměrná počtu impulzu (kroku), rychlost pohybu je pak úměrná kmitočtu řídicích impulzu. Změnou sledu spínání fází se mění i směr otáčení motoru.

Tyto motorky jsou v palubní desce automobilu, přesně točí s ukazatelem rychlosti, paliva, atd.



5.4 Obecné členění el. strojů podle dalších kritérií

A. Další dělení podle vstupního napětí:

- **universální** – může pracovat s napájecím ss proudem nebo 1-fáz. stř. proudem,
- **speciální** – např. krokový, ventilový stř. motor, trakční, apod.

B. Dělení podle směru toku energie:

- motory - vstupní energie je elektrická, výstupní mechanická,
- generátory – střídavé alternátory (vstupní energie je mechanická, výstupní elektrická),
- měniče - mají na vstupu a výstupu elektrickou energii různých vlastností.

C. Podle výkonu se točivé el. stroje dělí:

- drobné do 0,5 kW,
- malé od 0,5 do 15 kW,
- střední od 15 do 100 kW,
- velké nad 100 kW.

D. Rozdělení podle rychlosti otáčení:

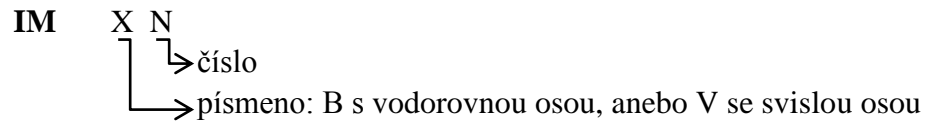
- pomalé s otáčkami nižšími než 1000 min^{-1} ,
- normální 1000 až 2000 min^{-1} ,
- a rychloběžné s otáčkami nad 2000 min^{-1} .

E. Všechny stroje se dělí podle mechanického krytí - IP kód dle ČSN EN 60034-5:

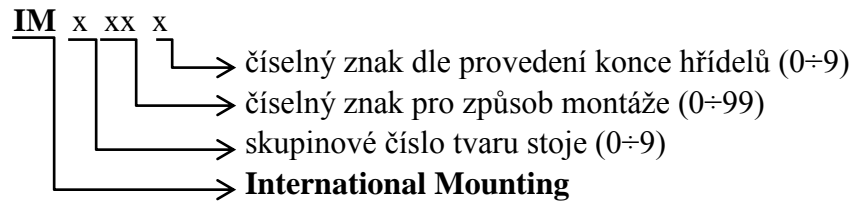
- na otevřené,
- chráněné proti hrubým předmětům,
- kryté větrané, kryté proti dešti, prachu, třaskavým plynům, nebo do vody (ponorné),
- zavíkané, anebo zavřené obyčejně, neprodyšně či nepromokavě.

F. Podle označování el. strojů dle tvaru ČSN EN 60034-7, IM kód, (možnosti jejich mechanického upevnění, polohy a způsobu montáže) je v souladu s převzatou mezinárodní normou, která umožňuje dva způsoby označování tvarů ES:

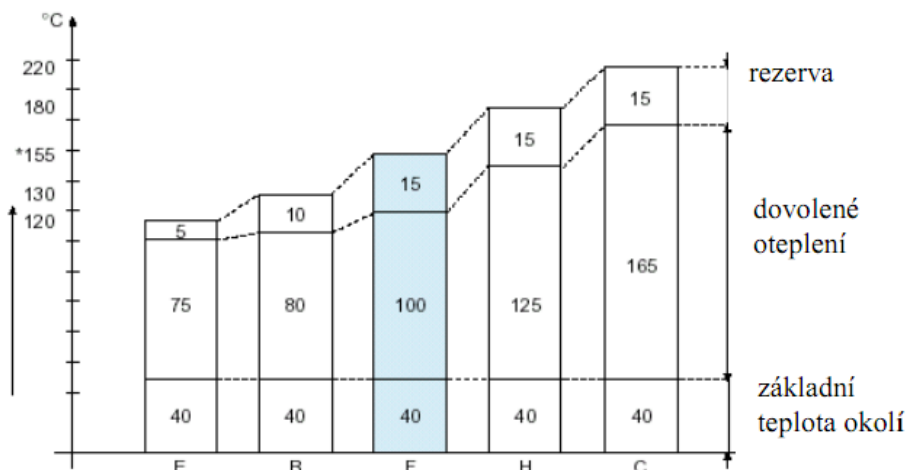
- kód označování I - tzv. písmeno - číslicové (pro motory s ložiskovými štíty)



- kód označování II - číslicové - (tzv. nový kód):

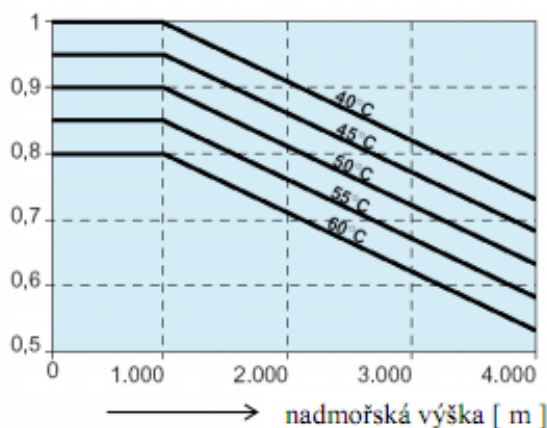


G. Dovolené teploty a oteplení strojů - tepelná třída izolace izolačních systémů strojů je dána ČSN 33 0050 (IEC 60085) a musí být vyjádřena písmeny A, E, B, F, H



Obr. 11: Dovolené oteplení θ_{dov} a maximální teploty θ_{max} pro jednotlivé třídy izolace [12]

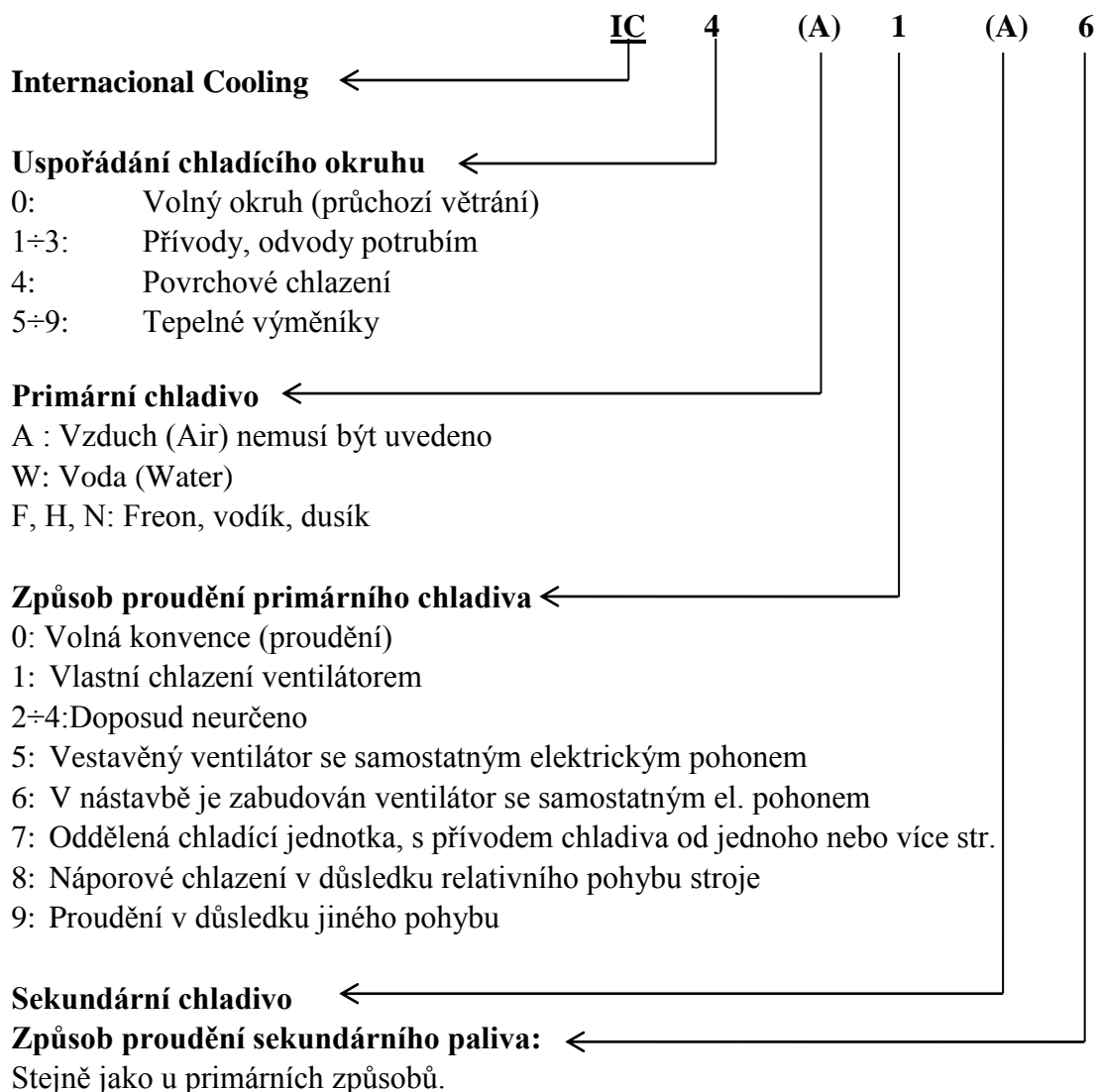
Mezní hodnoty oteplení vinutí jsou závislé na způsobu chlazení, druhu chladiva a metodice měření (teploměr, odpor, vložená sonda). Korekci hodnot dovoleného oteplení je nutno provést s ohledem na pracovní podmínky motoru: teplotu okolí (nad 40°C) a nadmořskou výšku (nad 1000 m).



Obr. 12: Mezní hodnoty oteplení na nadmořské výšce [12]

H. Dle provedení chlazení (odvod ztrátového tepla) - IC kód, dle ČSN EN 60034-6, (35 0000). V zásadě mohou být motory s ohledem na způsob chlazení provedeny:

- s přirozeným chlazením (bez jakéhokoliv ventilátoru, chlazení je zde pouze konvekci),
- s vlastním chlazením (na hřídeli motoru je ventilátor, účinek je závislý na otáčkách motoru),
- s přirozeným vlastním chlazením (dva okruhy - vnitřní konvekci, vnější s ventilátorem),
- s cizím chlazením (ventilace je od cizího zdroje nezávislého na otáčkách motoru).



V případě vlastního chlazení je ventilátor poháněn rotorem motoru. Takové provedení je zpravidla určeno pro motory pracující s neřízenými otáčkami. V případě řízení otáček, by při nízkých otáčkách mohlo dojít k nežádoucímu oteplení stroje mající za následek jeho poškození (izolace) a následně možnou inicializaci požáru, popř. výbuchu.

5.5 Podle druhu zatížení

Průběh oteplení motoru předpokládá jeho trvalé, časově neměnné zatížení, které se v praxi vyskytuje jen u některých zařízení. S výjimkou motoru pro speciální použití (jako např. u servopohonu) jsou jmenovité parametry motoru udávány pro trvalý provoz. V mnoha aplikacích u nn motoru je druh provozu odlišný od trvalého zatížení (zátěžný moment - výkon) se mění včetně častých nestacionárních stavů (rozběhy, brzdění, apod.). Při jeho provozování pak dochází rovněž ke změnám ztrát v motoru a tím i jeho oteplení. Počet jeho možných druhů provozu je skoro neomezený. Proto bylo z důvodu zlepšení komunikace mezi uživatelem (projektantem) a výrobcem přistoupeno ke klasifikaci určitých druhů provozu (zatížení).

V souladu s mezinárodní klasifikací jsou dle CSN EN 60034-1 definovány jednotlivé druhy zatížení, označené S1÷S10.

Trvalé zatížení - druh zatížení S1

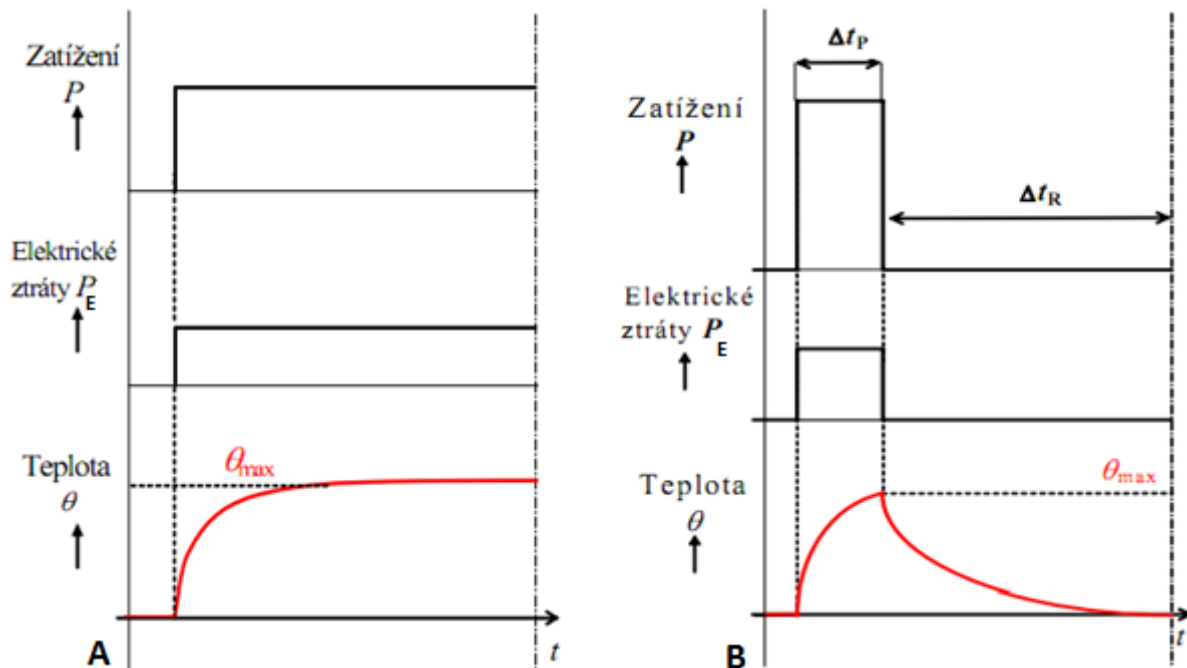
Provoz při konstantním zatížení, který je dostatečně dlouhý pro dosažení ustálené teploty ($\Delta t_z \geq 3 \cdot T_1$).

Označení: S1 - nemusí být vždy uvedeno

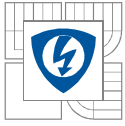
Krátkodobý chod - druh zatížení S2

Provoz při konstantním zatížení po stanovenou dobu Δt_p , která je kratší, než doba nutná pro dosažení ustálené teploty. Následuje doba klidu Δt_R a odpojení dostatečně dlouhá, aby teplota stroje opět dosáhla hodnoty okolí (chladaiva) s tolerancí $\pm 2 \text{ K}$: ($\Delta t_p < 3 \cdot T_1$); $t_p > 4 \cdot T_2$.

Označení: S2 Δt_p (min.) Příklad: S2 60 min.



Obr. 13: A) Trvalé zatížení, B) krátkodobý chod. [12]



Přerušovaný chod - druh zatížení S3

Sled stejných pracovních cyklu, z nichž každý zahrnuje dobu provozu Δt_p při konstantním zatížení a dobu klidu a odpojení Δt_R . Po dobu zatížení se nedosáhne ustáleného oteplení. Rozběhový proud podstatně neovlivňuje oteplení. Označení: S3

Přerušovaný chod s rozběhem - druh zatížení S4

Sled stejných pracovních cyklu, z nichž každý zahrnuje dosti značnou dobu rozběhu Δt_D , dobu provozu Δt_p při konstantním zatížení a dobu klidu a odpojení Δt_R . Označení: S4

Přerušovaný chod s elektrickým brzděním - druh zatížení S5

Sled stejných pracovních cyklu, z nichž každý zahrnuje dobu rozběhu Δt_D , dobu provozu při konst. zatížení Δt_p , dobu el. brzdění Δt_F a dobu klidu a odpojení Δt_R . Označení: S5

Přerušované zatížení - druh zatížení S6

Sled stejných pracovních cyklu, z nichž každý zahrnuje dobu provozu při konstantním zatížení Δt_p a dobu chodu naprázdno – Δt_V (není zde doba klidu a odpojení). Označení: S6

Přerušované pravidelné zatížení s elektrickým brzděním (S7)

Přerušované pravidelné zatížení se změnami otáček spojenými se změnami zatížení (S8)

Nepřerušované zatížení a změny otáček (S9)

Zatížení s nespojitými konstantními zatíženími (S10)

6 HLUK EL. STROJŮ

Pro komfort cestujících se vnitřní prostor automobilu odhlučňuje. El. stroje v automobilu nejsou největším zdrojem nežádoucích zvuků, ale tato problematika je zde rozvedena díky ventilačnímu měření (viz kapitola 8), kde měřený jednofázový komutátorový el. stroj vydával se zvyšujícími se otáčky nepříjemný hluk.

Elektrické točivé stroje jsou v současnosti nejpoužívanější pohonnou jednotkou strojních zařízení v průmyslu, dopravě, stavebnictví i zemědělství. Nejrůznější použití těchto strojů je dáno jejich technickými parametry, z nichž rozhodující je především typ stroje (asynchronní, synchronní, stejnosměrné), dále jejich výkon, otáčky i způsob chlazení. K parazitním jevům v těchto strojích patří mimo jiné právě jejich hluk. V celém rozsáhlém sortimentu vyráběných elektrických točivých strojů je nutno hledat společné zdroje a příčiny jejich nadměrného hluku, abychom byli schopni komplexně řešit otázku jeho snižování.

Z analýzy hluku točivého elektrického stroje vyplývá, že jeho celkový hluk je tvořen superpozicí tří základních složek, jimiž jsou:

- Hluk elektromagnetického původu - je nejtýpější složkou hluku elektrického stroje. Jeho příčinou je kmitání kostry, případně jiných částí stroje, způsobené elektromagnetickými silami.
- Hluk ventilačního původu - je především u strojů s vysokým počtem otáček. Podrobná analýza ventilačního hluku ukazuje, že hlavním zdrojem je v tomto případě samotný ventilátor se svým nejbližším okolím.
- Hluk mechanického původu - je působen především valivými ložisky a dále nevyvážeností všech rotujících částí stroje.

6.1 Snižování hluku el. strojů

V technické praxi rozeznáváme dva základní způsoby snižování hluku strojních zařízení:

- primární způsob, tj. snižování hluku přímo v jeho zdroji ve stroji samotném,
- sekundární způsob, tj. pohlcování již vyzářené akustické energie a její přeměna v jiný druh energie.

První způsob je pochopitelně efektivnější, řeší samotnou podstatu problému. Při jeho aplikování nutno zvažovat, z jakých dílčích složek se skládá celkový hluk strojního zařízení a snížení které z těchto složek bude představovat výrazné snížení jeho celkového hluku. V případě elektrického točivého stroje jsou tyto dílčí složky hluku tři, jak bylo již dříve uvedeno.

Při následném měření v laboratořích nás bude nejvíce zajímat ventilační složka hluku, a tak jsou zde právě pro ni uvedeny možnosti snížení hluku:

- použít minimálního potřebného množství chladicího vzduchu pro ventilaci stroje (vyhnout se předimenzování ventilačního systému).
- vyhýbat se vzniku sirénovým jevům, dodržováním doporučených hodnot pro vzdálenost mezi stojící a rotující částí,
- volit optimální počet lopatek ventilátoru,

- zabránit rezonančním jevům krytu ventilátoru.[14]

7 ELEKTRICKÉ STROJE V AUTOMOBILECH

7.1 Historie

Automobil byl v ještě nedávné době výhradně záležitostí z oblasti strojírenství. Elektrické spotřebiče představovala zapalovací soustava a osvětlení vozidla, později elektrický startér a stěrače. Zásobníkem elektrické energie býval olověný akumulátor, zdrojem energie dynamo, napětí palubního rozvodu 6 nebo 12 V, výkon dynama 150 až 200 W. Postupem času elektrických spotřebičů přibývalo; dynamo bylo nahrazeno výhodnějším alternátorem, příkon osvětlení podstatně vzrostl, v lépe vybavených automobilech se začala instalovat zařízení náročnější na odběr výkon (např. klimatizace), a tak není divu, že instalovaný výkon v současných osobních vozech přesahuje 1 kW a toto číslo bude neustále stále růst na vyšší hodnoty, podle kategorie vozu. Další zpřísnění emisních limitů si vyžádá dokonalejší řízení spalovacího procesu a recyklace spalin, palubní počítače budou mít podstatně více funkcí, elektricky ovládané stahování oken se stane standardem. Dalšími spotřebiči elektrické energie budou vytápěná vnější zrcátka, vnitřní vytápění sedaček, audiotechnika, systémy globální orientace a další. Trochu nadneseně lze říci, že se automobil stává složitým elektrickým a elektronickým zařízením, které je nainstalováno do téměř standardního strojírenského produktu. Samozřejmě nelze pominout nové produkty z oboru hydrauliky, pneumatiky a dalších odvětví.[6]

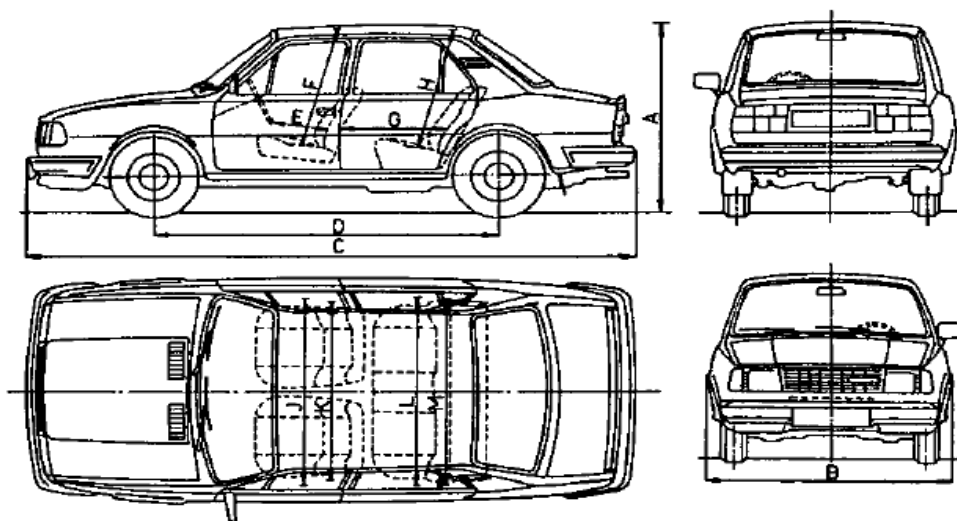
7.2 Vlastnosti

Nárůstem spotřeby elektrického výkonu nastává situace, kdy velikost elektrického proudu z alternátoru, popř. z akumulátoru, dosahuje při napětí 12 V hodnoty 100 A (a více), a to nejen krátkodobě, při startování vozidla. Tomu musí odpovídat dimenzování vodičů, jejichž celkový průřez se podstatně zvětšuje, a tak rostou i ztráty v elektrickém rozvodu (závislé na velikosti proudu). Problémem zůstává skutečnost, že ne vždy jsou všechny spotřebiče v provozu současně, ale přesto existují provozní režimy, kdy se téměř všechny spotřebiče na celkovém odběru současně podílejí. Výjimečné postavení má startér motoru, jehož příkon výrazně převyšuje příkon ostatních spotřebičů, avšak doba jeho činnosti je velmi krátká. Navíc je tomu tak v době, kdy všechny velké spotřebiče nemusejí pracovat. Tento spotřebič ovšem po celou další dobu jízdy vozidla je jen jakousi „mrtvou“ hmotou, kterou vozidlo veze s sebou.

Za povšimnutí stojí, že z celkové spotřeby paliva připadá zhruba 0,8 až 1,5 l/100 km právě na krytí příkonu elektrických spotřebičů vozidla. Většina elektrospotřebičů pracuje nezávisle na právě odebíraném mechanickém výkonu motoru, který závisí na jízdním režimu, tedy i v době chodu motoru na volnoběh. Potom, a to zejména v městském nebo smíšeném provozním režimu, je právě odběr elektrického výkonu po nezanedbatelnou část provozní doby dominantním zatížením motoru.[6]

7.3 Seznam napájecích zařízení a el. strojů v automobilu Škoda 120 [7]

Ke zpřehlednění tohoto tématu je zde uveden počet a parametry el. strojů v automobilu Škoda 120. Které byly snadno zjistitelné z brožury: „Návod k použití Škoda 120“^[7]. U novodobých automobilů není možnost přesně zjistit typ, počet a výkon el. strojů. Při přezkoumávání bylo patrné, že v tomto automobilu nemá žádný el. stroj až na alternátor samostatnou chladicí jednotku (ventilátor myšleno). Neboli, že všechny el. stroje se chladí průchozím vzduchem pod kapotou motoru. Je to dáno tím, že výkony el. strojů jsou malé. Jediné ventilátory jsou pro chlazení chladiče a na vhánění studeného nebo teplého vzduchu do kabiny auta. Přehlednější popis je uveden v této kapitole.



Obr. 14: Škoda 120, poslední vyráběná Škoda s umístěným motorem v zadní části [7]

1. **Akumulátor** 12 V/37 Ah, typ AKUMA 6N 37, je zásobníkem elektrické energie pro provoz vozu.
2. **Alternátor** – je třífázový generátor s vestavěným polovodičovým usměrňovačem, k napájení spotřebičů a akumulátoru stejnosměrným proudem.
PAL Magneton 443.113-516.181

Provozní napětí 14 V

Otáčky počátku nabíjení 1100 min⁻¹

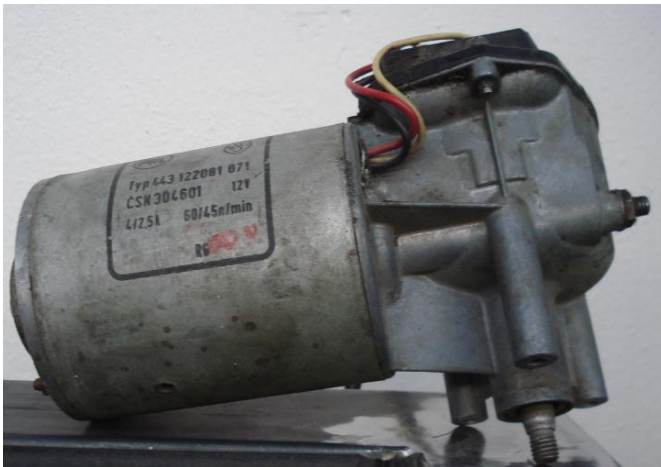
Proud při otáčkách 2700 (za tepla) 37A

Maximální proud 55 A

Maximální otáčky 10 000 min⁻¹

3. **Spouštěč** – je elektromotor pro krátkodobé zatížení, s elektromagnetickým vysouvaným pastorkem, určený k roztočení motoru při spouštění. Je to stejnosměrný sériový motor 12V, čtyřpólový.
PAL Magneton 443.115-142.070
Jmenovitý výkon 0,66 kW
Záběrový moment 12,25 Nm
Otáčky pro jmenovitý výkon max 1000 min⁻¹
Proud spouštěče bez zatížení max 65 A

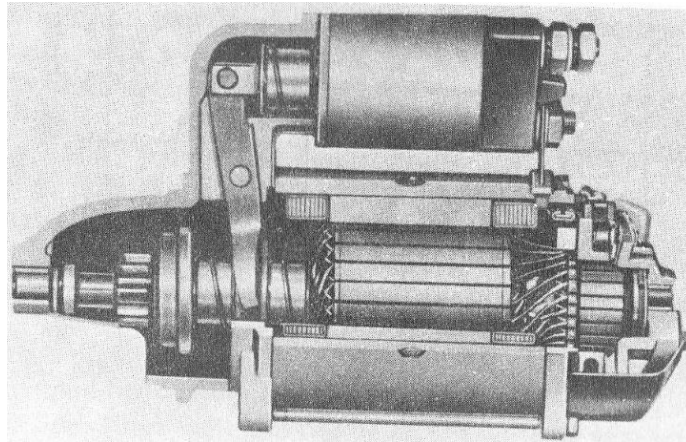
4. **Motor stěrače** – stěrač se skládá z elektromotoru s převodovkou, pákového pohonu a ze dvou stíracích ramének. Motor je stejnosměrný dvoupólový s permanentními magnety.
Typ stírače PAL 443.122-081.071
Jmenovitý proud při vyšší rychlosti 4 A, pro nižší rychlost 2,5 A
5. **Ostříkovač** čelního okna se skládá ze zásobní nádržky, čerpadla se stejnosměrným motorem, rozvodky, dvou trysek a spojovacího potrubí
Typ ostříkovače MEZ MM
Jmenovitý výkon 50 W
6. **Ventilátor chlazení** – je skupina elektromotoru s oběžným kolem větráku. Kolo z plastu je na hřídel motoru nalisováno. Motor je dvoupólový s permanentními magnety, s rotorem uloženým v samomazných ložiskách.
Typ motoru PAL 443.132-097.045
Jmenovitý proud 7,5 A
Jmenovitý výkon 55 W
7. **Ventilátor větrání, vytápění** – je skupina elektromotoru s držákem a oběžným kolem jako součást topného tělesa. Kolo je na hřídel motoru nalisováno. Motor je dvoupólový s permanentními magnety, s rotorem uloženým v samomazných ložiskách.
Typ motoru PAL 443.132-084.025
Jmenovitý výkon 60 W



Obr. 15: Motor stěrače s převodem (Škoda 120)

7.4 Nejdůležitější el. stroje v automobilech a jejich chlazení

- Startér (spouštěč) - nejnákladnější stroj v autě (cca $0,8 \div 1,8$ kW). Je to stejnosměrný sériový motor čtyřpólový s elektromagneticky vysouvaným pastorkem. Má malý zatěžovatel, což znamená, že může pracovat maximálně pár desítek sekund a následně několik minut chladnout.



Obr. 16: Průřez startérem (Škoda 120) [7]

- Alternátor (druhý nejnákladnější stroj v autě), synchronní stroj
 - V nízkých otáčkách je rotor alternátoru hodně vybuzen (velký budící proud) velké ztráty v rotoru, které se přenáší na hřídel před volnoběžku nebo řemenici oteplují řemen, který předčasně zastárne vlivem vyšší teploty.
 - Chlazení alternátoru - bez nasávání čerstvého vzduchu (nejčastější) = provětrávání, ventilátor je na hřídeli alternátoru, se zvyšujícími se otáčkami vyšší chladicí účinek,
 - *jednosměrné* - 1 ventilátor, vzduch vstupuje od předního víka a vystupuje zadním,
 - *obousměrné* - 2 ventilátory, vzduch vstupuje oběma víky a vystupuje středem těla,
 - s nasáváním čerstvého vzduchu (u velkých výkonu, nebo při teplotě $> 80^{\circ}\text{C}$) hadicí je chladný a vyčištěný vzduch nasáván z okolí vozidla,
 - V moderních automobilech jsou nainstalovány alternátory, které jsou chlazeny vodou, mají velkou životnost, protože mají konstantně 80°C .



Obr. 17: Alternátor
Magnetron (Škoda
120) [13]

- Třetí nejvýkonnější motor je pro ventilátor topení, je to motor stejnosměrný. V minulosti často regulovaný předřadníkem (v současné době pulzně šířkovou modulací).



Obr. 18: A) ventilátor topení (Škody 120), B) novodobý ventilátor v automobilech (Škoda Octavia)

Další el. stroje:

- elektromotor posilovače řízení,
- el. stroje pro posun zrcátek, oken, centrálu pro zamykání,
- čerpadla ostřikovačů, předních a zadních stěračů,
- kompresor klimatizace, motor sklonu světel,
- motor ventilátoru chladiče, v budíkách přístrojové desky jsou velice přesné krokové motorky.

A mnoho dalších el. strojů, ovšem automobilky ani autorizované servisy neposkytují žádný přehled těchto strojů, natož jejich výkonové hladiny.

8 VENTILAČNÍ MĚŘENÍ MALÉHO STROJE

Celkový tok chladicího vzduchu strojem lze měřit na vstupu nebo na výstupu vzduchu ze stroje proměřením rychlostí v dostatečném počtu bodů vstupního nebo výstupního průřezu, avšak pohodlněji a přesněji s pomocí vzduchotěsné komory a kalorimetrického měřiče (Thomasova válce).

Měřit přímo vnitřní tok uzavřeného stroje s vnitřní cirkulací je obtížné. Přímo lze měřit rychlosti v kanálu, jímž většina tohoto toku prochází. [8]

8.1 Zadání

1. Navrhnout a posléze sestavit měřicí pracoviště ve školních laboratořích, pro el. stroj. Námi vybraný je jednofázový komutátorový el. stroj. Který je v automobilu hojně zastoupen, např. startér.
2. Za pomoci Thomasova válce naměřit charakteristiky komutátorového stroje, ze kterých se určí průběh vyprodukovaného proudícího chladicího vzduchu, v závislosti na velikosti nastaveného napětí. Měřit se bude na dvou různých rozměrech Thomasova válce, jeden o $\varnothing 120\text{mm}$ a druhý o $\varnothing 150\text{mm}$, pro porovnání.

8.2 Rozbor

Elektrické stroje jsou vždy měniče energie, jejichž rozdělení a provedení je závislé na druhu použitého proudu a výstupní formě energie. Pro tuto přeměnu využívají magnetický obvod s elektrickým vinutím. V našem měření budeme měřit elektrický stroj točivý, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou, za pomoci střídavého proudu.

Jednofázový sériový komutátorový motor se široce využívá zejména u těch el. zařízení, které vyžadují plynulou a jednoduchou regulaci otáček. Zdokonalenou konstrukcí a technologií se daří zvládat mechanické a komutační problémy, které jsou s provozem tohoto stroje spojeny. Aplikací moderní elektroniky lze možnosti regulace otáček nejen zjednodušit, ale i zlepšit.

Části komutát. stroje: 1. Rotor – tvoří hřídel, rotorové vinutí a kotva s komutátorem

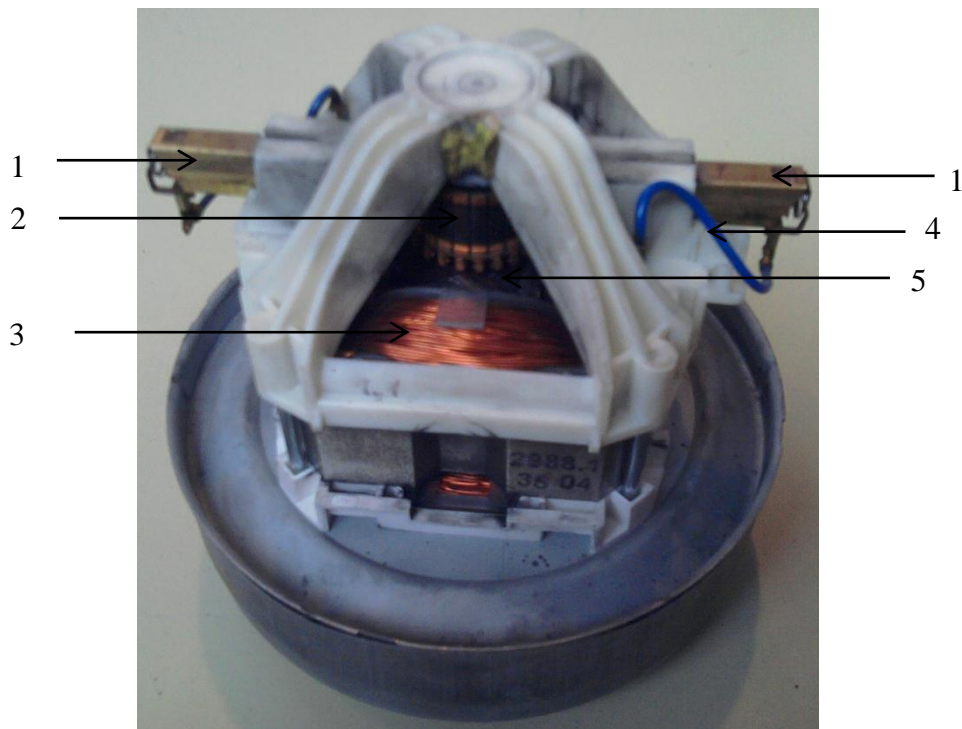
2. Stator – větší stroje mají stator s rozloženým vinutím uloženým v drážkách, statorovým obvodem se uzavírá střídavý magnetický tok, takže musí být složen z dynamových plechů.

3. Komutátor – působí jako měnič kmitočtu. Skládá se z měděných vzájemně odizolovaných lamel, na které jsou vyvedeny konce pracovního vinutí. Začátky a konce cívek jsou pootočené o 180° . Takto zapojené zařízení slouží jako mechanický usměrňovač. Proud se z komutátoru odvádí dvěma dvojicemi kartáčů (uhlíků) pootočenými o 90° .

Komutátorový motor:

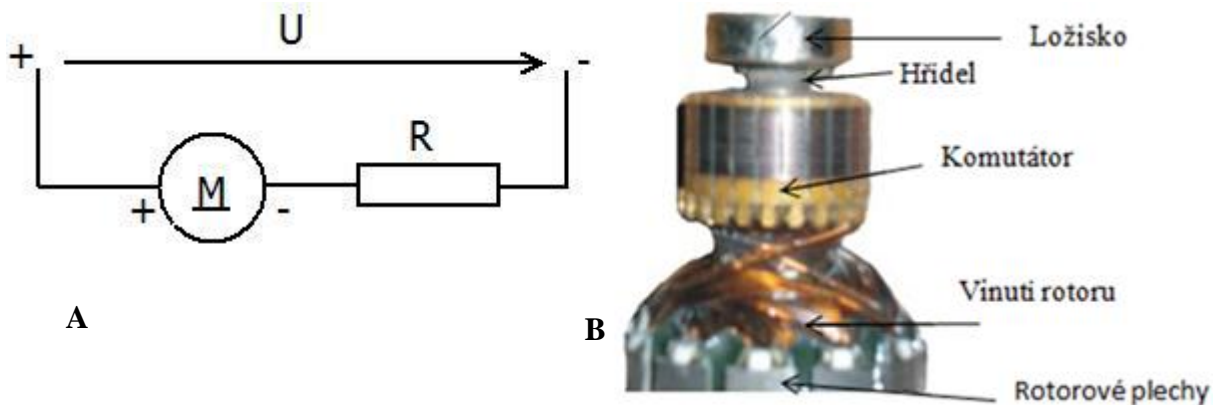
K měření byl tento stroj vybrán proto, že má na své hřídeli pevně připevněn krytý ventilátor, takže má vlastní ventilační okruh, který chladí motor po celou dobu běhu. S rostoucími otáčkami, roste i množství proudícího vzduchu, díky upevnění ventilátoru na hřídeli.

Motor připojíme na jednofázové napětí. Je to motor univerzální, funguje jak při stejnosměrném napětí, tak i při střídavém napětí. Komutátorový motor má dvě hlavní části, a to nepohyblivý stator a otáčející se rotor. Stator je tvořen dvěma cívkami s jádrem, protože při průchodu proudem cívkou vzniká magnetické pole, tyto cívky působí jako elektromagnety. Rotor se skládá z hřídele, na něj jsou rotorové plechy, ve kterých je v drážkách uloženo vinutí rotoru. Vinutí statoru a rotoru je zapojeno do série (Obr. 20A). A je vodivě spojeno zařízením zvané komutátor (proto sériový komutátorový motor na Obr.20B). Komutátor je rotující část el. stroje, složená z měděných klínových lamel, elektricky navzájem izolovaných slídovou izolací. Lamely, k nimž jsou připojeny předepsaným způsobem vývody cívek vinutí kotvy, tvoří dutý válec, který je elektricky izolovaně spojený s hřídelem motoru.



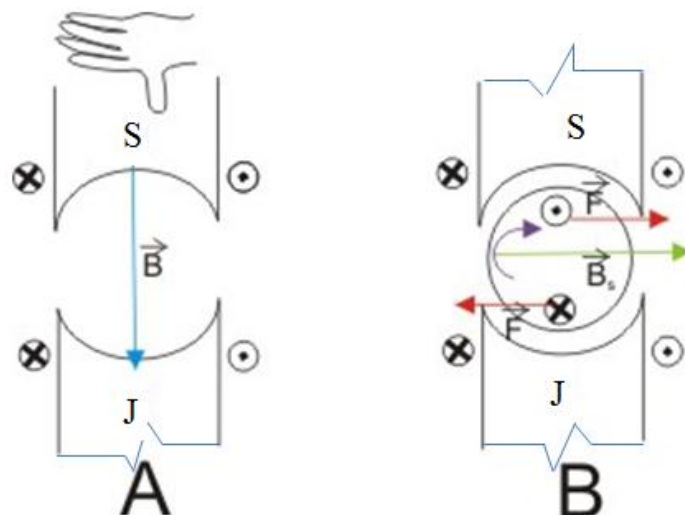
Obr. 19: Pohled na jednofázový komutátorový motor

Legenda: 1 uhlíky, 2 komutátor, 3 cívka statoru, 4 propojení statoru, 5 rotor.

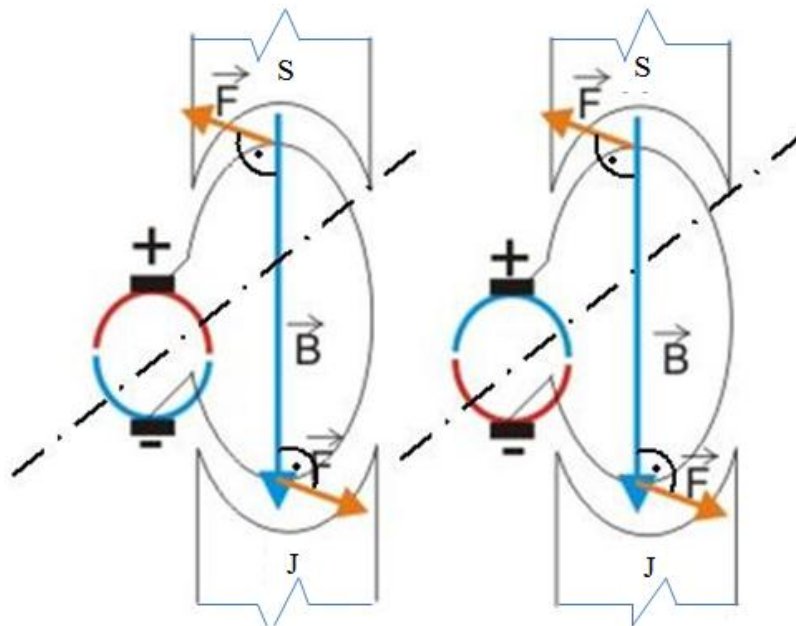


Obr. 20: A) Schéma zapojení sériového motoru, B) detail komutátoru

Popis funkce stroje. Proud, který protéká vinutím statoru, vytváří magnetické pole (Obr.21A). Jeho orientaci určíme podle Ampérova pravidla pravé ruky, tj. prsty pravé ruky musí ukazovat dohodnutý směr proudu tekoucího cívkou a palec nám pak ukáže směr indukčních čar (od severního pólu k jižnímu). Vinutím rotoru však také prochází proud a také vytváří magnetické pole (Obr. 21B). Rotor je však navinut tak, že jeho orientace je taková, že výsledná síla na něj působící není nulová a stejně jako magnetku v magnetickém poli ho natočí tak, aby jeho jižní pól směřoval k severnímu pólu a naopak jeho severní pól k jižnímu. Směr působící síly můžeme také určit podle Flemingova pravidla levé ruky, tj. levou ruku natočíme tak, aby její prsty ukazovaly dohodnutý směr proudu ve vodivé smyčce v rotoru a indukční čáry magnetického pole vytvořeného statorem vstupovaly do dlaně. Palec nám pak ukáže směr působící síly (Obr.22B). Takto by se rotor jen natočil do polohy, kde by byl výsledný moment sil na něj působících nulový. Na to, aby se rotor roztočil, potřebujeme změnit směr proudu ve vinutí rotoru. K tomu slouží komutátor (Obr.22). Aby otáčení rotoru bylo stejnoměrné, je na rotoru více vinutí (cívek), které jsou rozloženy po obvodu kotvy.

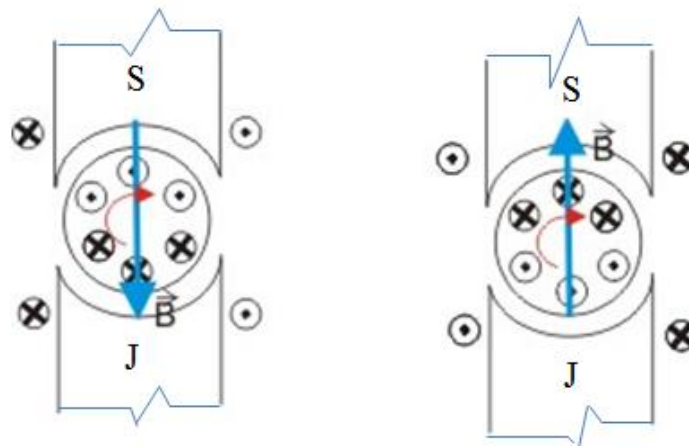


Obr. 21: A) Směr magnetické indukce budícího pole statoru, B) zeleně – směr magnetické indukce vodivé smyčky, červeně – směr síly působící na vodič s proudem, vzniká moment síly, který smyčku otočí (směr otáčení fialově) [11]



Obr. 22: Princip stroje, oranžově - směr síly, modře - magnetická indukce pole statoru [11]

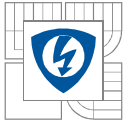
Jelikož se jedná o univerzální motor, tak je jedno jestli ho napájíme ss nebo stř napětím, neboť, i když protéká vinutím rotoru a statoru proud pokaždé jiné polarity, na vodiče působí vždy síla stejného směru, protože vinutí jsou v sérii, a tak se v nich polarita proudu mění současně (Obr. 23).



Obr. 23: V sériovém zapojení statoru a rotoru se směry působících sil, a tedy i směr otáčení, při změně polarity nezmění [11]

Protože vinutí motoru klade střídavému proudu odpor (daný impedancí). Dochází k fázovému posunu proud a napětí, a proto není jalový výkon motoru nulový. Kvůli jeho zmenšení jsou tyto motory vyráběny s menším počtem závitů budícího vinutí.

Otáčky těchto motorů jsou velmi závislé na jeho zátěži. Pokud by takovýto motor běžel naprázdno, bez zátěže, mohl by běžet rychle, že by mohlo dojít k jeho poškození. Proto jsou tyto motory pevně spojovány s nějakou zátěží. V našem případě je to ventilátor. Otáčky motoru jdou snadno regulovat změnou efektivního napětí. Moment síly působící na cívku v magnetickém poli je dán vztahem:



$$M \sim BI \quad (21)$$

Kde: M moment síly [Nm],
 B indukce magnetického pole vytvořeného statorem [T],
 I proud protékající cívkou rotoru [A].

Díky tomu, že vinutí statoru a rotoru jsou zapojena v sérii, je navíc i magnetická indukce B také závislá na proudu, který vinutím protéká (s rostoucím proudem roste). Proto když omezíme napětí, snížíme samozřejmě i proud, a tak se zmenší moment síly působící na rotor a snížíme tím otáčky motoru. Snížit napětí na motoru můžeme sériovým zařazením proměnného rezistoru. Dnes se však používá spíše polovodičových součástek, nejčastěji tyristorů nebo triaků. Na motoru je také kondenzátor, který slouží k jeho odrušení. [11]

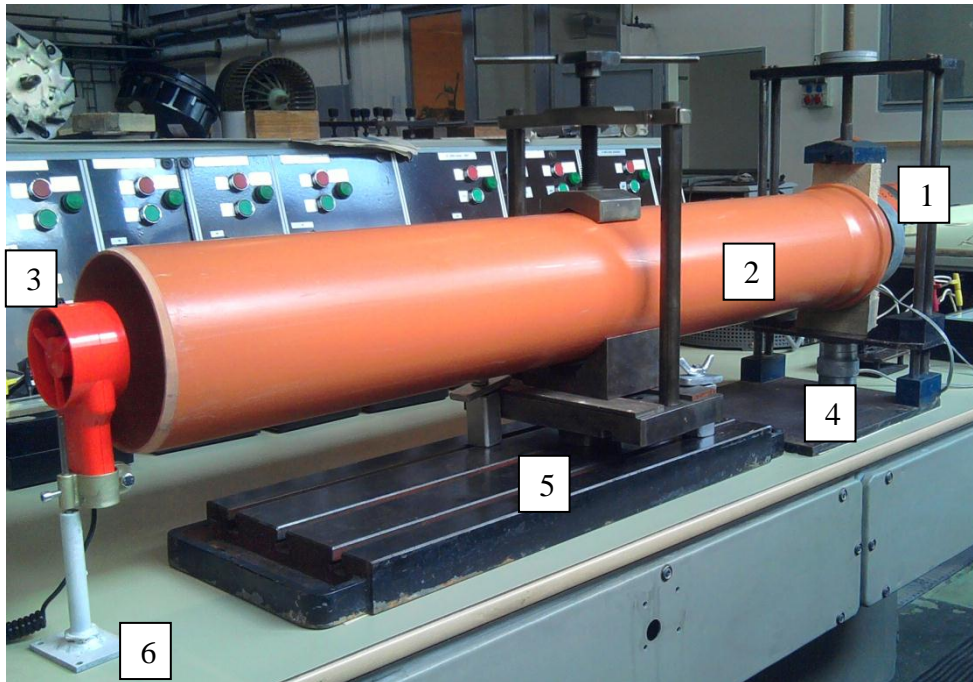
Thomasův válec: Jedná se o válec o stanovené délce, která má jeden konec rozšířený, tak aby se do válce snadněji dostalo proudící medium. To znamená, že k rozšířené části přiložíme měřicí prvek, v našem případě el. motor a na nerozšířené části válce budeme pomocí anemometru měřit množství proudícího media.

Anemometr (AM): Je přístroj pro měření rychlosti proudění vzduchu a v našem případě pro měření množství proudícího vzduchu Thomasovým válcem.

Autotransformátor: Zdroj jednofázového napětí, kterým se bude regulovat potřebné napětí na el. stroji.

8.3 Postup měření

1. Nejdůležitějším úkolem pro dosažení hodnotných výsledků je sestavit měřící pracoviště pro vybraný typ motoru, protože podle typu motoru a jeho typu uchycení se celé plánování výstavby měřícího pracoviště odvíjí. Námi vybraný motor má vysoké otáčky až $20\,000\text{ min}^{-1}$, takže musí být pevně upevněn, tak aby nenastalo nežádané rušení při měření. Motor je upevněn do zatíženého stojanu, a to samé platí pro stojan Thomasova válce. Pro anemometr (AM) potřebujeme takový držák, aby se nám vlivem proudícího media nepohnul nebo neotáčel v ose.

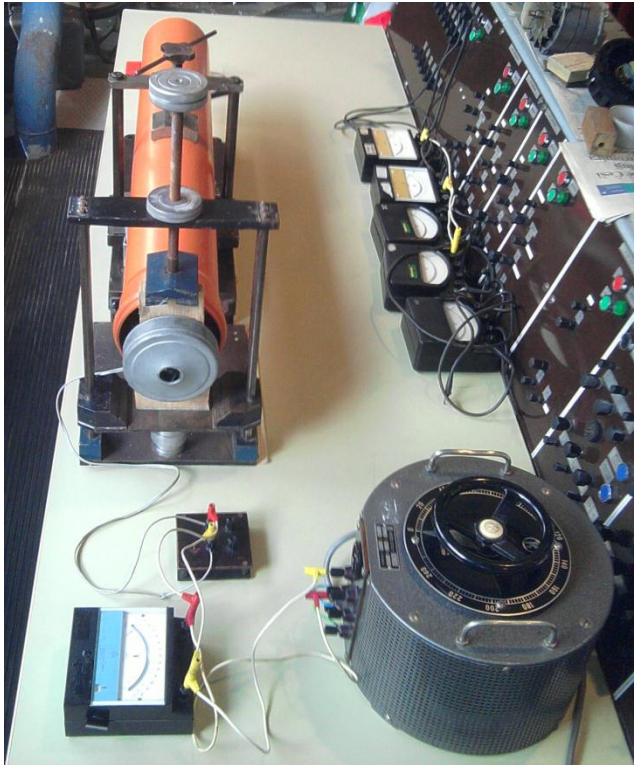


Obr. 24: Upevnění komponent určení k měření

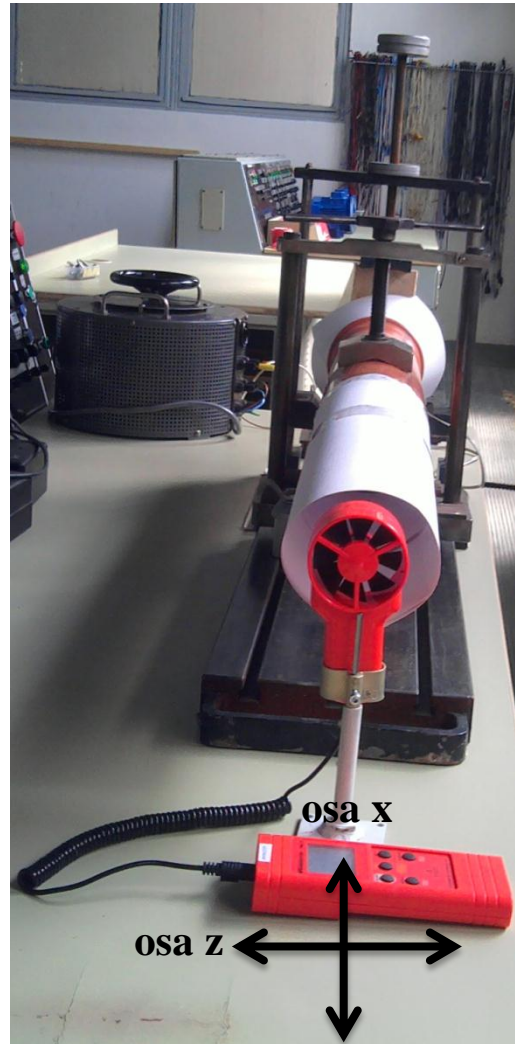
Legenda: 1 komutátorový motor, 2 Thomasův válec, 3 anemometr (AM), 4 zatížený stojan pro komutátorový motor, 5 stojan pro Thomasův válec, 6 stojan pro AM

2. Po sestavení pracoviště, k motoru připojíme paralelně ručkový voltmetr napájený jednofázovým napětím z autotransformátoru. Velikost napětí budeme nastavovat v povoleném rozsahu 0-253V, max hodnota je dána povolenou výhylkou v síti $\pm 10\%$.
3. První měřením zjistíme, jak se bude zvyšovat množství proudícího media (Q) v Thomasově válci, na rostoucím napětí. A to když bude anemometr (AM) těsně na opačném konci válce než jen motor a následně, když posuneme AM 10cm za válec v přímém směru, stále ve stejné ose i výšce (posun v ose x).
4. Následujícím měřením získáme hodnoty, tak že AM bude stále v ose válce, ale ve vzdálenosti dvaceti centimetrů od válce a bude se přibližovat plynule k válci. Tak zjistíme, v jaké vzdálenosti vznikají postupné úbytky proudícího media. A to při daných napěťových hladinách (20, 40, 60, 80, 100V).
5. Dále změříme úbytek proudícího media, když budeme AM vychylovat v příčném směru od osy válce (v bok, posun v ose z), a to při daných napěťových hladinách (20, 50, 80V).

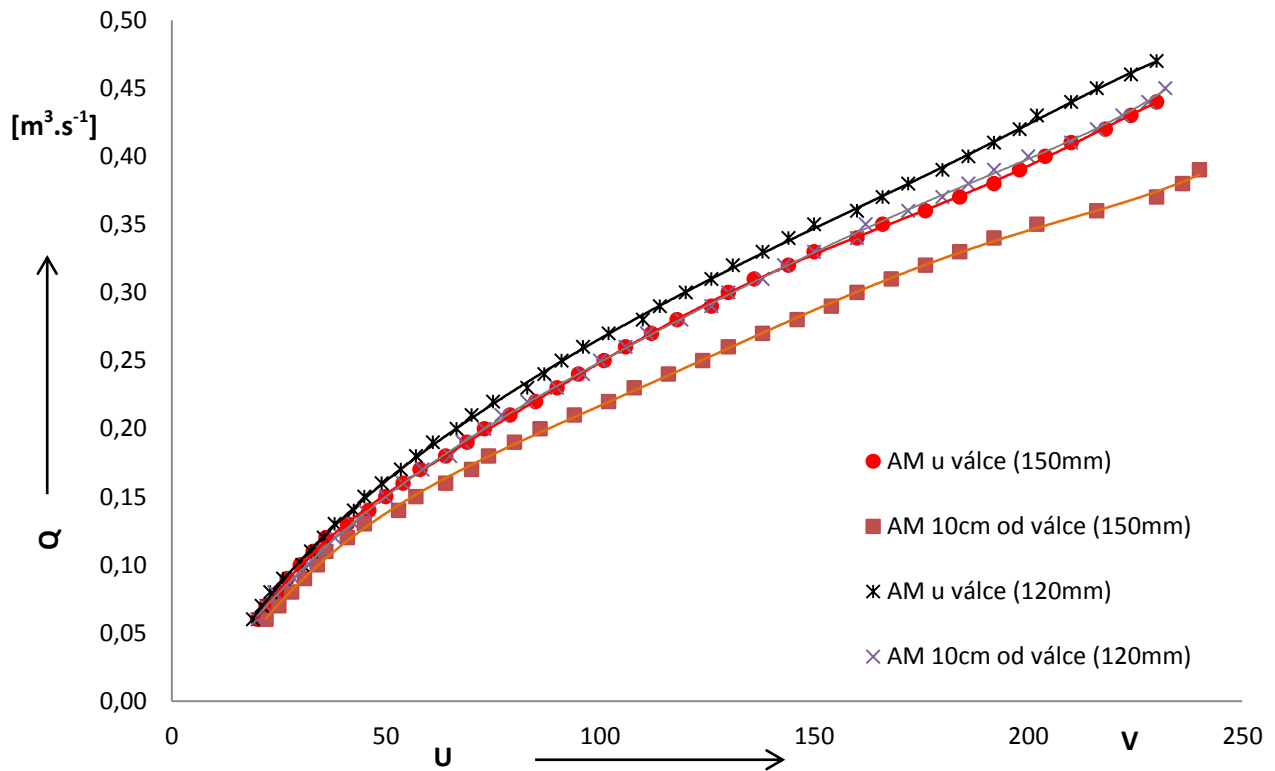
6. Toto měření rozšiřuje bod č.3, kdy se při konstantním napětí $U = 230\text{ V}$ bude měřit množství unikajícího (rozptyl) media v příčné osy válce (osa z).



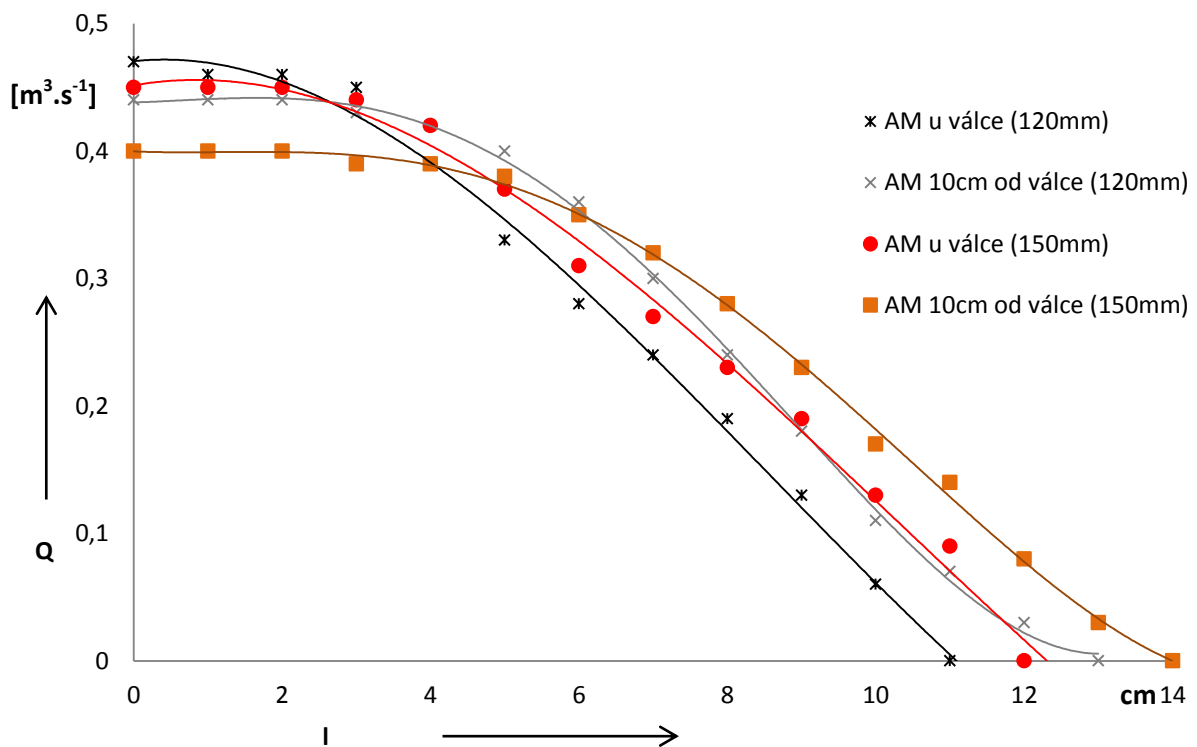
Obr. 25: Měřicí pracoviště s válcem $\varnothing 150\text{mm}$



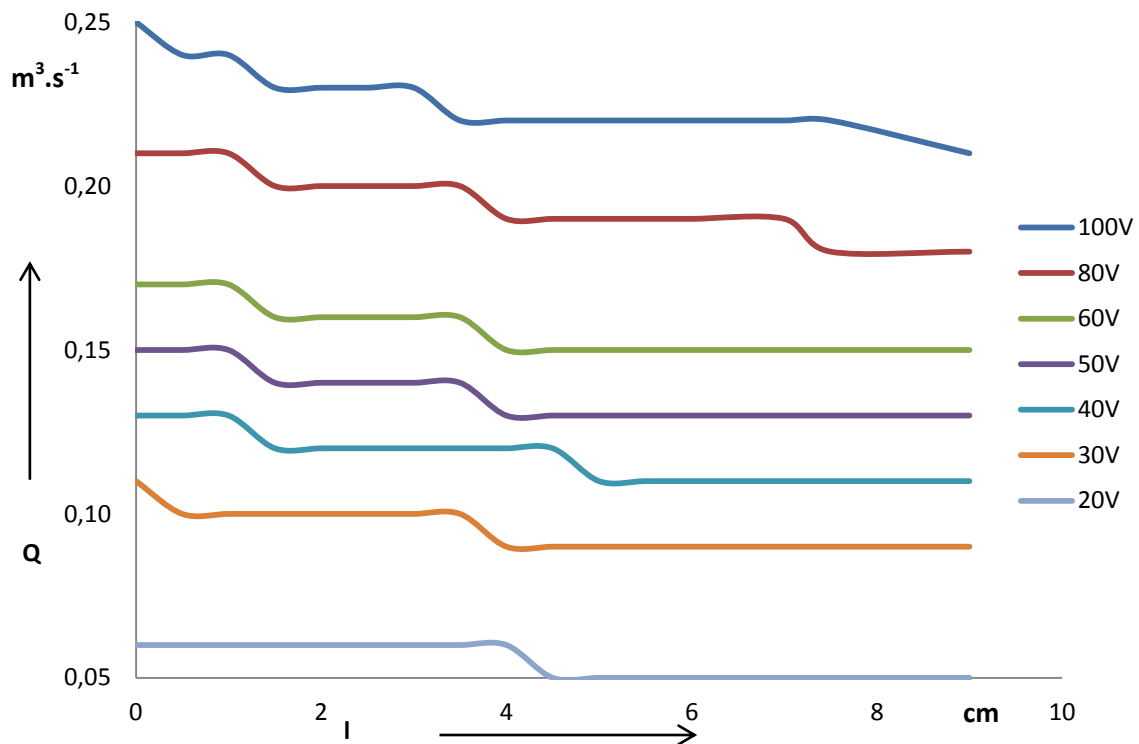
Obr. 26: Měřicí pracoviště s válcem o $\varnothing 120\text{mm}$



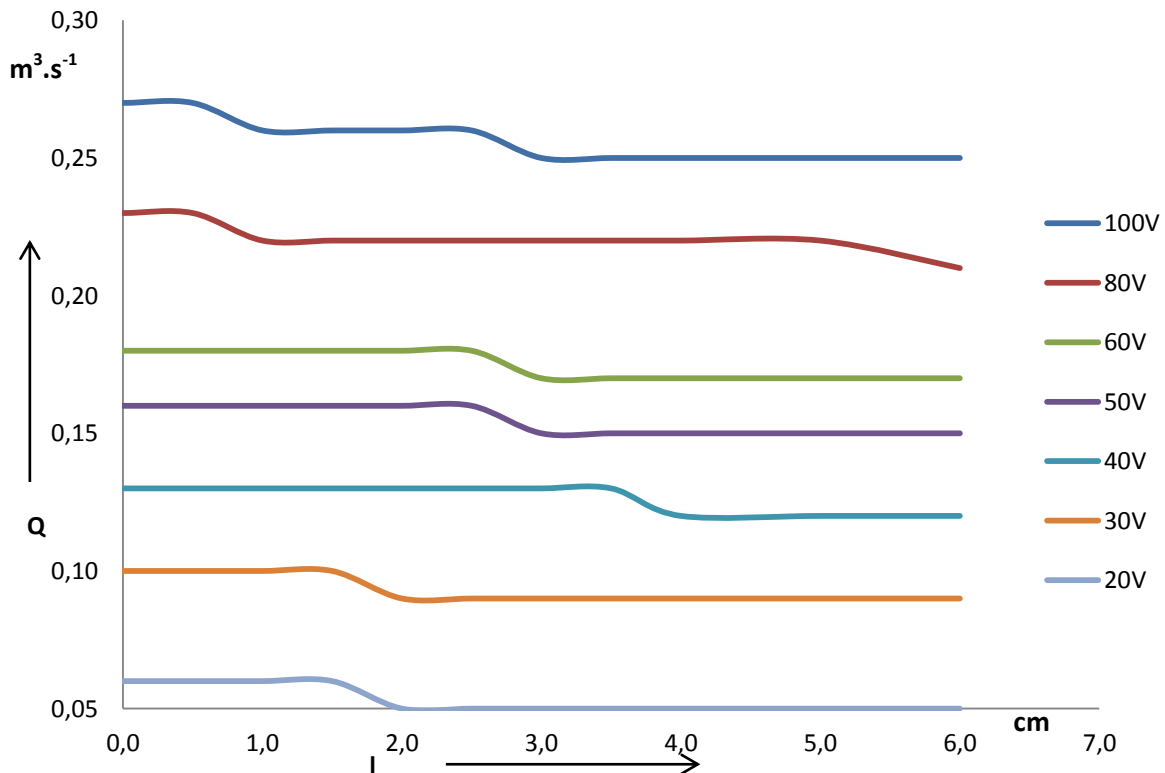
Obr. 27: Znárodnění závislosti množství proudícího chladícího media na otáčkách stroje, při měření na $\phi 150\text{mm}$ i $\phi 120\text{mm}$ Thomasovi válci. Bod měření č.3



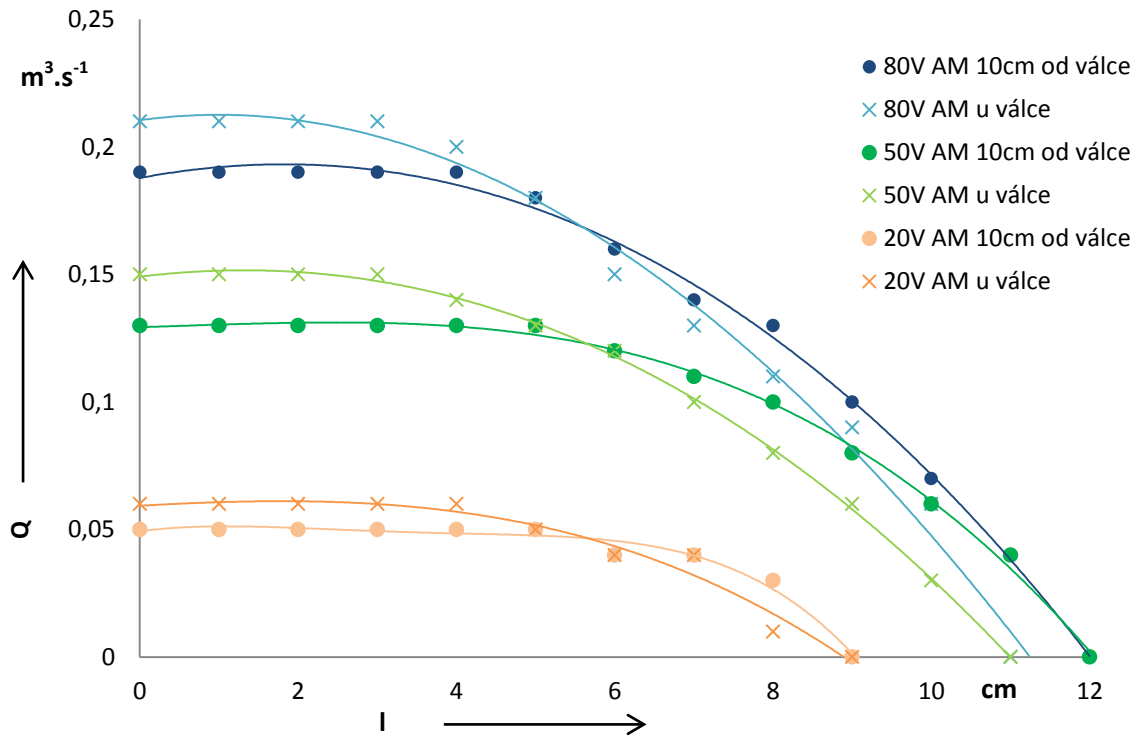
Obr. 28: Znárodnění množství proudícího chladícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro $U = 230\text{V}$ u $\phi 150\text{mm}$ i $\phi 120\text{mm}$ válce. Bod měření č.6



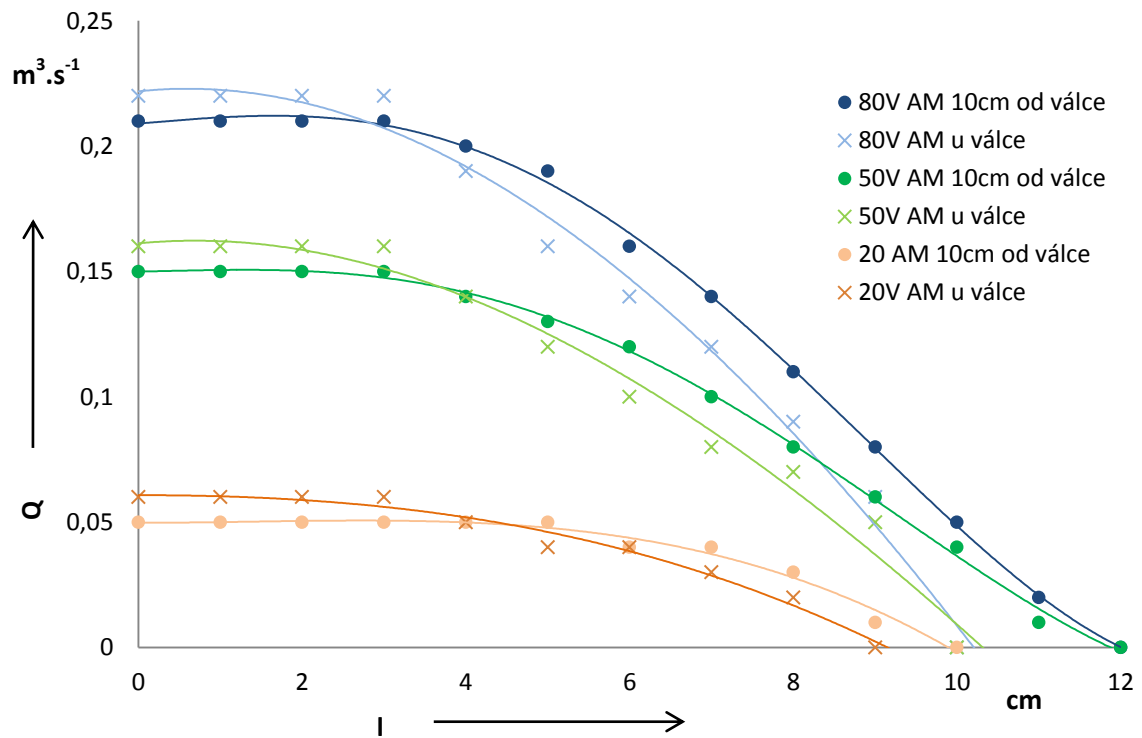
Obr. 29: Znázornění množství proudícího chladícího media, při oddalování AM od válce v přímém směru (osa x), pro dané napěťové hladiny při měření na $\varnothing 150\text{mm}$ Thomasovi válci. Bod měření č.4



Obr. 30: Znázornění množství proudícího chladícího media, při oddalování AM od válce v přímém směru (osa x), pro dané napěťové hladiny u $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.4



Obr. 31: Znárodnění množství proudícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro dané napěťové hladiny, při měření na $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.5



Obr. 32: Znárodnění množství proudícího media, při vychylování AM v příčném směru od válce (osa z), pro dané napěťové hladiny, při měření na $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válci. Bod měření č.5

8.4 Závěr ventilačního měření

Pro námi zvolený typ jednofázového komutátorového el. stroje s vlastním ventilátorem, bylo navrženo měřicí pracoviště tak, aby se zjistil charakter a množství proudícího chladícího vzduchu Thomasovým válcem, který stoj vyprodukuje. Množství proudícího chladícího media zaznamenával anemometr, který byl naprogramován pro daný průměr Thomasova válce. El. stroj se rozbíhá při $U_f = 15 \text{ V}$, avšak ustálené hodnoty množství proudění byly dosaženy až od 20V.

První měření se proměřil plný rozsah napěťové stupnice 20-245V, aby bylo patrné, jak se v narůstajícím napětí zvyšuje množství dodávaného vzduchu ke chlazení el. stroje. Závislost do 50V roste strmě ($0,05 \div 0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ale od pomezí této hodnoty napětí roste lineárně ($0,15 \div 0,45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), a to pro obě velikosti válců (Obr. 27).

Druhé měření vyšlo dle vlastních předpokladů, a to že s přibližujícím se AM k válci, se zvyšuje množství proudícího chladícího media. AM byl na začátku měření dvacet centimetrů od válce a postupně byl přibližován k hrdlu válce. Z (Obr. 29) je vidět, že změny jsou nejrazantnějšího rázu čtyři a následně dva centimetry před válcem, a to pro průměr válce $\varnothing 150\text{mm}$, kdy je narůst o jedno desetinné místo. Pro užší válec (Obr. 30 $\varnothing 120\text{mm}$) změny nastanou tři centimetry před válcem, tedy dřív než u širšího válce, což je následek více stlačeného vzduchu ve válci. Je tedy patrné, že hned za koncem válce se vzduch rozměňuje do širokého okolí a neproudí dále v ose válce.

Při měření pro bod č.5 byl AM v ose válce a následně byl vychylován v příčném směru (osa z). Z grafů je patrné, že čím víc byl AM vychylován, tím bylo naměřeno menší množství proudícího chladícího media (Obr. 31 a 32).

Poslední měření bylo podobné bodu č.5, akorát že bylo měřeno při $U = 230 \text{ V}$, tedy při plném zatížení (v návaznosti na první měření). Do vychýlení o čtyři centimetry byly hodnoty nad hodnotou $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, po této vzdálenosti začal proudící vzduch lineárně klesat na nulu (Obr. 28).

9 ZÁVĚR

Chlazení je neodmyslitelnou součástí při navrhování každého el. stroje, ať už do osobního automobilu, průmyslových zařízení, domácích spotřebičů, apod.. Automobily mají jednu nespornou výhodu, a to že v nich jsou el. stroje o malých výkonech, až na drobné výjimky. Takže nepotřebují speciální ventilační okruhy. K chlazení jim stačí pouze průchozí vzduch kolem karoserie a pod kapotou motoru, kde se většina el. strojů vyskytuje. Určitě to bylo i záměrem konstruktérů, vytvořit takové stroje, aby zvládaly spolehlivě svojí činnost a nemusely mít složitý odvod vzduchu, což by značně komplikovalo úspory místa, které jsou stěžejní pro návrh automobilů. Nejvíce namáháním strojem v automobilech je alternátor, protože má velký výkon, a také protože je v pohybu po celou dobu jízdy, takže má na své hřídeli upevněn ventilátor, který se stará, o to aby nebyl vystaven nebezpečným teplotám pro jeho vlastní chod.

Záměrem bakalářské práce bylo také praktické měření ventilačního obvodu malého el. stroje. K měření byl vybrán jednofázový komutátorový el. stroj, který má na své hřídeli pevně připevněn ventilátor, což umožňuje lehce zjistit množství proudícího chladícího media, které vyprodukuje, a to za pomoci Thomavova válce, který se pro ventilační měření využívá. Měření bylo navrhováno i tak, aby poskytovalo možnost rozšířit školní laboratorní úlohy.

LITERATURA

- [1] Hak, Josef, Ošlejšek, Oldřich: Vypočet chlazení elektrických strojů – 1.Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973, 628s.
- [2] *Projektování el. zařízení* [online]. Plzeň, 2008 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: <http://webs.zcu.cz/fel/kev/+PEZ/P%FDedn%A0%E7ky/Microsoft%20Word%20-%20Projektov%A0n%A1%20elektrick%ECch%20za%FD%A1zen%A1.pdf> . Skripta. Západočeská univerzita. Vedoucí práce p. Červený.
- [3] *Inovace systému chlazení točivých el. strojů s využitím CFD metod* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43847 . Dizertační práce. VUT FSI.
- [4] TRNKA, Z. *Měření teploty na elektrickém motoru* [online]. [s.l.], 2009. 55 s. Bakalářská práce. VUT FEKT.
- [5] Veselka, F.: Poskytnuté podkladové materiály. Brno 2012
- [6] CETL, T. Novinky v elektrické výzbroji automobilů. *ELEKTRO odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Leden, 2002, 01, [cit. 2012-05-07]. Dostupný z WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=24884 .
- [7] J. ANDRT. *Údržba a opravy automobilů škoda 105S-120GLS*. Praha: SNTL, 1981, 386 s.
- [8] LIST, Vladimír a Josef HAK a kolektiv. *Elektrotechnika II: Elektrické stroje, část 1*. 3 vydání. Praha 1: SNTL, 1969, 640 s.
- [9] DOSTÁLEK, Martin. *Měření teplotních polí v elektrických strojích* [online]. Brno, 2012 [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51359
- [10] Elektronická zařízení silničních vozidel. [online]. [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~pav15/ss_motor.pdf
- [11] Elektromotor. In: *Fyzweb články* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=90&id_casti=31
- [12] VRÁNA, V. *Elektrické stroje* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/rozvody_lomy/04_el_stroje.pdf . VŠB-TU.
- [13] ALTERNÁTOR - ORIGINÁL (MAGNETON). In: *Autodilycz* [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: <http://www.autodilycz.cz/zbozi/alternator-original-magneton-xs-115901010/199128/>
- [14] MADEJEWSKI, B. Hluk elektrických strojů točivých. [online]. [cit. 2012-05-27]. Dostupné z: <http://www.hlukovekryty.cz/clanky-o-hluku&clanek=hluk-elektrickyh-stroju-tocivych.html>

PŘÍLOHY

Naměřené data pro bod 6: Množství proudícího vzduchu, pro situaci, kdy se AM od středu válce posouvá v ose z, neboli do boku. Při 0cm je AM ve středu válce.

U = 230V			U = 230 V		
AM u válce	Vzdálenost od středu válce v ose z	AM 10 cm od válce	AM u válce	Vzdálenost Od středu válce v ose z	AM 10 cm od válce
Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	Q[m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]
0,45	0	0,40	0,47	0	0,44
0,45	1	0,40	0,46	1	0,44
0,45	2	0,40	0,46	2	0,44
0,44	3	0,39	0,45	3	0,43
0,42	4	0,39	0,39	4	0,42
0,37	5	0,38	0,33	5	0,4
0,31	6	0,35	0,28	6	0,36
0,27	7	0,32	0,24	7	0,3
0,23	8	0,28	0,19	8	0,24
0,19	9	0,23	0,13	9	0,18
0,13	10	0,17	0,06	10	0,11
0,09	11	0,14	0	11	0,07
0,00	12	0,08		12	0,03
	13	0,03		13	0
	14	0,00			

Tab. 2: Měření č.6 pro $\varnothing 120\text{mm}$ Thom. válce

Tab. 3: Měření č.6 pro $\varnothing 150\text{mm}$ Thom. válce

Naměřená data z bodu 3: Množství proudícího vzduchu v závislosti na napětí v el. motoru.

AM u válce	Množství vzduchu	AM 10cm od válce	AM u válce	Množství vzduchu	AM 10 cm od válce
U [V]	Q [m ³ .s ⁻¹]	U [V]	U [V]	Q [m ³ .s ⁻¹]	U [V]
20	0,06	22	19,0	0,06	20,0
22	0,07	25	21,0	0,07	22,0
25	0,08	28	23,0	0,08	24,0
27	0,09	31	26,0	0,09	28,5
30	0,10	34	30,5	0,10	32,0
33	0,11	36	32,5	0,11	35,0
36	0,12	41	35,5	0,12	38,0
41	0,13	45	38,0	0,13	42,5
46	0,14	53	42,5	0,14	45,0
50	0,15	57	45,0	0,15	50,0
54	0,16	64	49,0	0,16	54,0
58	0,17	70	53,5	0,17	58,5
64	0,18	74	57,0	0,18	65,0
69	0,19	80	61,0	0,19	68,0
73	0,20	86	66,5	0,20	73,0
79	0,21	94	70,0	0,21	77,0
85	0,22	102	75,0	0,22	83,0
90	0,23	108	83,0	0,23	90,0
95	0,24	116	87,0	0,24	96,0
101	0,25	124	91,0	0,25	100,0
106	0,26	130	96,0	0,26	106,0
112	0,27	138	102,0	0,27	111,0
118	0,28	146	110,0	0,28	119,0
126	0,29	154	114,0	0,29	126,0
130	0,30	160	120,0	0,30	130,0
136	0,31	168	126,0	0,31	138,0
144	0,32	176	131,0	0,32	143,0
150	0,33	184	138,0	0,33	150,0
160	0,34	192	144,0	0,34	160,0
166	0,35	202	150,0	0,35	162,0
176	0,36	216	160,0	0,36	172,0
184	0,37	230	166,0	0,37	180,0
192	0,38	236	172,0	0,38	186,0
198	0,39	240	180,0	0,39	192,0
204	0,40	-	186,0	0,40	200,0
210	0,41		192,0	0,41	210,0
218	0,42		198,0	0,42	216,0
224	0,43		202,0	0,43	222,0
230	0,44		210,0	0,44	228,0
235	0,45		216,0	0,45	232,0
245	0,46		224,0	0,46	235,0
			230,0	0,47	245,0

Tab. 4: Měření č.3 pro $\phi 150\text{mm}$ a $\phi 120\text{mm}$ (druhý sloupec) Thom. válce

Naměřené data z bodu 4: Množství proudícího vzduchu, když AM přisunujeme k válci ve směru osy středu válce (osa x) při konstantním napětí. Při 0cm je AM přímo u válce.

l [cm]	U [V]						
	20 [V]	30 [V]	40 [V]	50 [V]	60 [V]	80 [V]	100 [V]
	Q[m ³ .s ⁻¹]						
0	0,06	0,11	0,13	0,15	0,17	0,21	0,25
0,5	0,06	0,10	0,13	0,15	0,17	0,21	0,24
1,0	0,06	0,10	0,13	0,15	0,17	0,21	0,24
1,5	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,23
2,0	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,23
2,5	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,23
3,0	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,23
3,5	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,22
4,0	0,06	0,09	0,12	0,13	0,15	0,19	0,22
4,5	0,05	0,09	0,12	0,13	0,15	0,19	0,22
5,0	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,19	0,22
5,5	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,19	0,22
6,0	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,19	0,22
7,0	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,19	0,22
7,5	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,18	0,22
9,0	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,18	0,21
20,0	0,05	0,09	0,11	0,13	0,15	0,18	0,21

Tab. 5: Měření č.4 pro $\phi 150\text{mm}$ Thom. válece

l [cm]	U						
	20 [V]	30 [V]	40 [V]	50 [V]	60 [V]	80 [V]	100 [V]
	Q [m ³ .s ⁻¹]						
0,0	0,06	0,10	0,13	0,16	0,18	0,23	0,27
0,5	0,06	0,10	0,13	0,16	0,18	0,23	0,27
1,0	0,06	0,10	0,13	0,16	0,18	0,22	0,26
1,5	0,06	0,10	0,13	0,16	0,18	0,22	0,26
2,0	0,05	0,09	0,13	0,16	0,18	0,22	0,26
2,5	0,05	0,09	0,13	0,16	0,18	0,22	0,26
3,0	0,05	0,09	0,13	0,15	0,17	0,22	0,25
3,5	0,05	0,09	0,13	0,15	0,17	0,22	0,25
4,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,22	0,25
5,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,22	0,25
6,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,25
7,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,25
8,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,25
9,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,25
10,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,24
20,0	0,05	0,09	0,12	0,15	0,17	0,21	0,24

Tab. 6: Měření č.4 pro $\phi 120\text{mm}$ Thom. válece

Naměřená data z bodu 5: Hodnoty množství proudícího vzduchu, při manipulaci AM v ose z (v bok), pro konstantní napětí. Střed válce je 0cm.

U = 20V			U = 50V			U = 80V		
AM u válce		AM 10 cm od válce	AM u válce		AM 10 cm od válce	AM u válce		AM 10 cm od válce
Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]
0,06	0	0,05	0,15	0	0,13	0,21	0	0,19
0,06	1	0,05	0,15	1	0,13	0,21	1	0,19
0,06	2	0,05	0,15	2	0,13	0,21	2	0,19
0,06	3	0,05	0,15	3	0,13	0,21	3	0,19
0,06	4	0,05	0,14	4	0,13	0,2	4	0,19
0,05	5	0,05	0,13	5	0,13	0,18	5	0,18
0,04	6	0,04	0,12	6	0,12	0,15	6	0,16
0,04	7	0,04	0,1	7	0,11	0,13	7	0,14
0,01	8	0,03	0,08	8	0,1	0,11	8	0,13
0	9	0	0,06	9	0,08	0,09	9	0,1
			0,03	10	0,06	0,06	10	0,07
			0	11	0,04	0	11	0,04
				12	0		12	0

Tab. 7: Měření č.5 pro $\phi 150\text{mm}$ Thom. válce

U = 20V			U = 50V			U = 80V		
AM u válce		AM 10 cm od válce	AM u válce		AM 10 cm od válce	AM u válce		AM 10 cm od válce
Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	Q [m ³ .s ⁻¹]	l [cm]	Q [m ³ .s ⁻¹]
0,06	0	0,05	0,16	0	0,15	0,22	0	0,21
0,06	1	0,05	0,16	1	0,15	0,22	1	0,21
0,06	2	0,05	0,16	2	0,15	0,22	2	0,21
0,06	3	0,05	0,16	3	0,15	0,22	3	0,21
0,05	4	0,05	0,14	4	0,14	0,19	4	0,2
0,04	5	0,05	0,12	5	0,13	0,16	5	0,19
0,04	6	0,04	0,1	6	0,12	0,14	6	0,16
0,03	7	0,04	0,08	7	0,1	0,12	7	0,14
0,02	8	0,03	0,07	8	0,08	0,09	8	0,11
0	9	0,01	0,05	9	0,06	0,06	9	0,08
	10	0	0	10	0,04	0	10	0,05
			0	11	0,01	0	11	0,02
				12	0		12	0

Tab. 8: Měření č.5 pro $\phi 120\text{mm}$ Thom. válce