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

INOVACE AUTOMOBILOVÉHO ALTERNÁTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MARTIN VOLEK

AUTHOR

BRNO 2014

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

INOVACE AUTOMOBILOVÉHO ALTERNÁTORU

AUTOMOTIVE ALTERNATOR INNOVATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN VOLEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Martin Volek
Ročník: 2

ID: 119671
Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Inovace automobilového alternátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište druhy a provedení automobilových alternátorů a základní charakteristiky.
2. Analyzujte možnosti a předpoklady inovace z hlediska současných trendů vývoje.
3. Proveďte elektromagnetický návrh alternátoru analyticky.
4. Návrh ověřte pomocí programu MKP.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Koziej E., Mazsyny elektryczne pojazdów samochodowych. WNT Warszawa, 1984, ISBN 83-204-0515-7
[2] Yeadon H., Handbook of Small Electric Motors,.Mc Graw Hill Book Company, 2001, ISBN 0-07-072332-X
[3] T. Denton, Automobile Electrical and Electronics Systems" Butterworth-Heinemann, Oxford 2001 ISBN 0-340-73195-8

Termín zadání: 27.9.2013 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2014

Vedoucí práce: prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá elektromagnetickým návrhem automobilového alternátoru s drápkovým rotorem 14V/120A. Tento návrh je dále ověřen v programu Maxwell s nástrojem RMxprt. Výsledky obou výpočtů jsou porovnávány. Navrhnutý alternátor je také porovnáván s výsledky naměřenými v laboratoři na alternátorech podobného typu. Dále jsou zde analyzovány jednotlivé výkonové ztráty stroje a uvedeny možnosti snížení těchto ztrát, což má za následek zvýšení celkové účinnosti.

Abstract

The work deals with the analytical electromagnetic design of automotive claw-pole alternator 14V/120A. This design is verified in program Maxwell with a RMxprt tool. The results of both calculations are compared. Designed alternator is also compared with the results measured in the laboratory on the alternators of similar type. Furthermore, there are analyzed individual power losses of machine and listed options of reducing these losses, which results in an increase in overall efficiency.

Klíčová slova

automobilový alternátor; drápkový rotor; magnetická indikce; elektrický výkon; ztráty; účinnost; otáčky; RMxprt; analytický elektromagnetický návrh

Keywords

automotive alternator; claw rotor; magnetic induction; electric power; losses; efficiency; speed; RMxprt; analytical elektromagnetic design

Bibliografická citace

VOLEK, M. *Inovace automobilového alternátoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 60 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Inovace automobilového alternátoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 semestrální práce prof. Vítězslavu Hájkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **11**

ÚVOD **16**

1 KLASICKÉ ALTERNÁTORY **17**

2 DRUHY A PROVEDENÍ AUTOMOBILOVÝCH ALTERNÁTORŮ **18**

2.1 ALTERNÁTOR S DRÁPKOVÝM ROTOREM (KOMPAKTNÍ) **18**

2.1.1 KONSTRUKCE A ČINNOST 18
2.1.2 VÝHODY 19
2.1.3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY 20
2.1.4 ZAPOJENÍ 22

2.2 DALŠÍ PROVEDENÍ ALTERNÁTORŮ **23**

2.2.1 ALTERNÁTOR S PERMANENTNÍM BUZENÍM 23
2.2.2 ALTERNÁTOR S VNĚJŠÍM VENTILÁTOREM 24
2.2.3 DVOJITÝ ALTERNÁTOR 24
2.2.4 BEZKROUŽKOVÝ ALTERNÁTOR 25

2.3 CHLAZENÍ ALTERNÁTORŮ **26**

2.3.1 CHLAZENÍ BEZ NASÁVÁNÍ ČERSTVÉHO VZDUCHU 26
2.3.2 CHLAZENÍ S NASÁVÁNÍM ČERSTVÉHO VZDUCHU 28

3 MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY INOVACE Z HLEDISKA SOUČASNÝCH TRENDŮ VÝVOJE **29**

3.1 ANALÝZA ZTRÁT DRÁPKOVÉHO ALTERNÁTORU **29**

3.1.1 ZTRÁTY VE VINUTÍ STATORU 29
3.1.2 ZTRÁTY V BUDÍCÍM VINUTÍ 30
3.1.3 DODATEČNÉ ELEKTRICKÉ ZTRÁTY 30
3.1.4 HYSTERÉZNÍ ZTRÁTY 30
3.1.5 ZTRÁTY VÍŘIVÝMI PROUDY 31
3.1.6 CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE 31
3.1.7 DODATEČNÉ MAGNETICKÉ ZTRÁTY 31
3.1.8 ZTRÁTY TŘENÍM KARTÁČŮ O KROUŽKY 31
3.1.9 ZTRÁTY TŘENÍM V LOŽISKÁCH A VENTILACÍ 31

3.2 MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY SNÍŽENÍ ZTRÁT DRÁPKOVÉHO ALTERNÁTORU **32**

3.2.1 SNÍŽENÍ ZTRÁT VE VINUTÍ STATORU A USMĚRNĚNÍM 32
3.2.2 SNÍŽENÍ MAGNETICKÝCH ZTRÁT V ŽELEZE 33
3.2.3 SNÍŽENÍ VENTILAČNÍCH ZTRÁT A TŘECÍCH V LOŽISKÁCH 33
3.2.4 SNÍŽENÍ DODATEČNÝCH ZTRÁT 34
3.2.5 ALTERNÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY 34

4 ANALYTICKÝ ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH ALTERNÁTORU **35**

5 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ PROGRAMU RMXPRT 46
5.1 ZADÁNÍ PARAMETRŮ 46
5.2 NASTAVENÍ ANALÝZY PRO JMENOVITÝ STAV 47
5.3 NASTAVENÍ ANALÝZY PRO STAV NAPRÁZDNO 47
5.4 VÝSLEDKY ANALÝZY PRO JMENOVITÝ STAV 48
5.5 VÝSLEDKY ANALÝZY PRO STAV NAPRÁZDNO 50
5.6 POROVNÁNÍ ANALYTICKÉHO VÝPOČTU S RMXPRT 51
5.7 POROVNÁNÍ VÝPOČTŮ S MĚŘENÍM V LABORATOŘI 52
6 ZÁVĚR 54
6.1 MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY INOVACE 54
6.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET 54
6.3 POROVNÁNÍ VÝPOČTŮ 55
LITERATURA 57
PŘÍLOHY 59

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Alternátor s vyniklými póly [1] 17
Obrázek 2-1 Alternátor s drápkovým rotorem kompaktní konstrukce [6] 19
Obrázek 2-2 Porovnání charakteristiky dynama a alternátoru [8] 20
Obrázek 2-3 Proudová charakteristika 20
Obrázek 2-4 Napěťová charakteristika 21
Obrázek 2-5 Budící charakteristika 21
Obrázek 2-6 Zapojení alternátoru [6] 22
Obrázek 2-7 Alternátor s vnějším ventilátorem [6] 24
Obrázek 2-8 Bezkroužkový alternátor [6] 25
Obrázek 2-9 Rotor bezkroužkového alternátoru [6] 26
Obrázek 2-10 Jednosměrné provětrávání [9] 27
Obrázek 2-11 Obousměrné provětrávání [9] 27
Obrázek 2-12 Ventilátor s nasáváním čerstvého vzduchu [9] 28
Obrázek 5-1 Záložka Machine 46
Obrázek 5-2 Záložka Stator 46
Obrázek 5-3 Záložka Rotor 47
Obrázek 5-4 Analýza pro jmenovitý stav 47
Obrázek 5-5 Analýza pro stav naprázdno 47
Obrázek 5-6 Výsledky elektrických veličin pro jmenovitý stav 48
Obrázek 5-7 Výsledky magnetických veličin naprázdno 49
Obrázek 5-8 Výsledky parametrů pro jmenovitý stav 49
Obrázek 5-9 Výsledky elektrických veličin pro stav naprázdno 50
Obrázek 5-10 Výsledky magnetických veličin pro stav naprázdno 51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Ztráty alternátoru 14V/120A při 6000 ot/min *32*

Tabulka 4-1 Charakteristika statoru a rotoru *39*

Tabulka 5-1 Porovnání analytického výpočtu s výpočtem pomocí RMxprt *52*

Tabulka 5-2 Porovnání výpočtů s měřením v laboratoři *53*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Veličina	Název	Jednotka
2p	počet pólů	[-]
a	počet paralelních větví	[-]
av	analytický výpočet	
A	proudové zatížení statoru	[A/m]
b	kladné diody	
b_{1-4}	šířkové rozměry statorové drážky	[m]
$b_{stř}$	střední šířka pólu rotoru	[m]
B	magnetická indukce	[T]
B_{js}	magnetická indukce jha statoru	[T]
B_{jr}	magnetická indukce v jádru rotoru	[T]
B_p	magnetická indukce pólu rotoru	[T]
B_{s0-2}	šířkové rozměry statorové drážky	[m]
B_z	magnetická indukce zubu statoru	[T]
B_δ	magnetická indukce vzduchové mezery	[T]
B+	kladný napěťový pól	
B-	záporný napěťový pól	
c	záporné diody	
d	budící vinutí	
d_0	střední průměr kuličkového věnce	[m]
d_3	otevření drážky statoru	[m]
d_k	průměr jedné kuličky	[m]
D	vrtání statoru	[m]
D_e	vnější průměr statoru	[m]
DF	kladný pól regulátoru	
DR	regulátor napětí	
D+	výstup pomocného usměrňovače	
f	frekvence	[Hz]
F_c	celkové magnetomotorické napětí pro dvojpólí	[A]
F_{c0}	magnetomotorické napětí při volnoběžných otáčkách	[A]

Veličina	Název	Jednotka
F_{cq}	magnetomotorické napětí pro kompenzaci příčné složky	[A]
F_l	magnetomotorické napětí pro kompenzaci podélné složky	[A]
F_m	magnetomotorické napětí	[A]
F_{max}	maximální magnetomotorické napětí	[A]
G	hmotnost	[kg]
G_{js}	hmotnost jha statoru	[kg]
G_k	hmotnost rotoru	[kg]
G_z	hmotnost zubů statoru	[kg]
h_{1-4}	výškové rozměry statorové drážky	[m]
H_{js}	intenzita magnetického pole jha statoru	[A/m]
H_{jr}	intenzita magnetického pole v jádru rotoru	[A/m]
H_p	intenzita magnetického pole pólu rotoru	[A/m]
H_{s0-2}	výškové rozměry statorové drážky	[m]
H_z	intenzita magnetického pole zubu statoru	[A/m]
H_δ	intenzita magnetického pole vzduchové mezery	[A/m]
i_m	jmenovitý budící proud	[A]
i_{max}	maximální budící proud	[A]
I_b	budící proud	[A]
I_f	fázový proud	[A]
I_G	stejnosměrný proud alternátoru	[A]
I_{ss}	stejnosměrný proud alternátoru	[A]
I_v	stejnosměrný proud alternátoru	[A]
k_q	činitel rozlohy	[-]
k_y	činitel kroku	[-]
K_c	Carterův činitel	[-]
K_d	činitel zhoršení magnetických vlastností materiálu	[-]
K_h	koeficient hysterezních ztrát	[W/kg]
K_s	činitel sycení	[-]
K_v	koeficient ztrát vířivými proudy	[W/kg]
l_c	délka čela vinutí statoru	[m]
l_{js}	délka indukční čáry ve jhu statoru	[m]

Veličina	**Název**	**Jednotka**
l_{jr}	délka indukční čáry v jádru rotoru	[m]
l_p	délka indukční čáry v pólech rotoru	[m]
l_s	střední délka rotorové cívky	[m]
l_z	délka indukční čáry v zubu	[m]
L_s	délka železa statoru	[m]
m	počet fází	[-]
mm	magnetomotorické napětí	
n	otáčky	[ot/min]
n_z	počet desek v sérii usměrňovače	[-]
N_d	počet vodičů v drážce	[-]
N_s	počet vodičů v sérii jedné fáze	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
p_k	tlak na kartáče	[Pa]
P	stejnosměrný výstupní výkon alternátoru	[W]
P_{ss}	stejnosměrný výkon alternátoru	[W]
$P_{stř}$	střídavý výkon alternátoru	[W]
q	počet drážek na pól a fázi	[-]
Q	počet drážek ve statoru	[-]
rm	RMxprt	
R_{20}	odpor vinutí při 20 °C	[Ω]
R_b	odpor budícího vinutí	[Ω]
R_s	odpor vinutí statoru při teplotě 100 °C	[Ω]
R_t	odpor budícího vinutí při teplotě 100 °C	[kg]
S_{jr}	průřez jádra rotoru	[m^2]
S_k	plocha kartáčů	[m^2]
S_p	průřez pólu rotoru	[m^2]
S_r	průřez rotorového vodiče	[m^2]
S_s	průřez statorového vodiče	[m^2]
t_v	drážková rozteč	[m]
U	fáze U	
U_2	sdružené napětí alternátoru	[V]

Veličina	**Název**	**Jednotka**
U_b	napětí budícího vinutí	[V]
U_f	fázové napětí alternátoru	[V]
U_{js}	magnetické napětí jha statoru	[A]
U_{jr}	magnetické napětí v jádru rotoru	[A]
U_p	magnetické napětí v pólu rotoru	[A]
U_{ss}	stejnosměrné napětí alternátoru	[V]
U_v	stejnosměrné napětí alternátoru	[V]
U_z	magnetické napětí zubu statoru	[A]
U_δ	magnetické napětí vzduchové mezery	[A]
v_k	obvodová rychlost kroužků	[m/s]
V	fáze V	
$VD_{1\text{-}6}$	diody hlavního usměrňovače	
$VD_{7\text{-}9}$	diody pomocného usměrňovače	
W	fáze W	
X_r	rozptylová reaktance vinutí statoru	[Ω]
Z_c	počet závitů budícího vinutí	[-]
α	teplotní odporový součinitel	[K^{-1}]
α_p	pólové krytí	[-]
β_l	činitel zmenšení podélné reakce nasycení železa	[-]
β_q	činitel zmenšení příčné reakce nasycení železa	[-]
δ	délka vzduchové mezery	[m]
ΔP	ztráty	[W]
$\Delta P_{\%}$	ztráty	[%]
ΔP_b	budící ztráty	[W]
ΔP_c	celkové ztráty	[W]
$\Delta P_{c\%}$	celkové ztráty	[%]
ΔP_{cb}	ztráty bez usměrnění a regulátoru	[W]
$\Delta P_{cb\%}$	ztráty bez usměrnění a regulátoru	[%]
ΔP_{Cu}	ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{Fe}	celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_{Fejz}	hysterezní a vířivé ztráty jha statoru	[W]

Veličina	Název	Jednotka
ΔP_{Fez}	hysterezní a vířivé ztráty zubů statoru	[W]
ΔP_h	hysterezní ztráty	[W/kg]
ΔP_k	ztráty na kartáčích	[W]
ΔP_m	mechanické ztráty	[W]
ΔP_{reg}	ztráty regulátoru	[W]
ΔP_{tk}	ztráty třením kartáčů o kroužky	[W]
ΔP_{tl}	ztráty třením v ložiskách a ventilací	[W]
ΔP_v	ztráty vířivými proudy	[W/kg]
Δt	zvýšení teploty	[K]
$\Delta U_č$	úbytek napětí na činné odporu statoru	[V]
ΔU_d	úbytek napětí diod na jedné desce usměrňovače	[V]
ΔU_j	úbytek napětí na jalovém odporu statoru	[V]
ΔU_k	úbytek napětí na kartáčích	[V]
$\eta_{stř}$	účinnost bez usměrnění a regulátoru	[%]
η_{us}	účinnost usměrnění	[%]
κ	Kappův činitel	[-]
κ_l	činitel deformace podélné reakce	[-]
κ_q	činitel deformace příčné reakce	[-]
λ_c	jednotková rozptylová vodivost čel statorového vinutí	[-]
λ_d	jednotková rozptylová vodivost drážky statoru	[-]
Λ_c	rozptylová magnetická vodivost čel statorového vinutí	[H]
Λ_d	rozptylová magnetická vodivost drážky statoru	[H]
Λ_z	rozptylová magnetická vodivost mezi zuby	[H]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
π	matematická konstanta	[-]
σ_{max}	maximální proudové zatížení budícího vinutí	[A/mm^2]
σ_s	proudová hustota statorového vinutí	[A/mm^2]
φ	fázový posun	[°]
ϕ	magnetický tok	[Wb]
ψ	vnitřní fázový posun alternátoru	[°]
τ_p	pólová rozteč	[m]

ÚVOD

V dnešní době mají všechny motorová vozidla svůj vlastní zdroj elektrické energie. Tyto zdroje se dají rozdělit do svou skupin, na zdroje závislé a nezávislé na provozu vozidla. Nezávislý zdroj na provozu je akumulátor, fungující na elektrochemickém principu. Závislý zdroj na provozu je alternátor, pracující na elektromechanickém principu. Akumulátor je využívám pouze na rozběh spalovacího motoru, po nastartování převezme napájení veškeré elektroniky alternátor. Jak se zvětšuje funkčnost motorových vozidel, zvětšují se i nároky na zdroj elektrické energie. Nejpoužívanějším alternátorem v automobilovém průmyslu je alternátor s drápkovým rotorem a i v dnešní době mají tyto alternátory účinnost pouze kolem 50 %. Proto i tyto alternátory podléhají inovacím vedoucím ke zvýšení účinnosti. Z těchto důvodů je tato práce věnována automobilovým alternátorům, zkoumání možností a předpokladů k inovacím a následně také analytickému elektromagnetickému návrhu a jeho ověření.

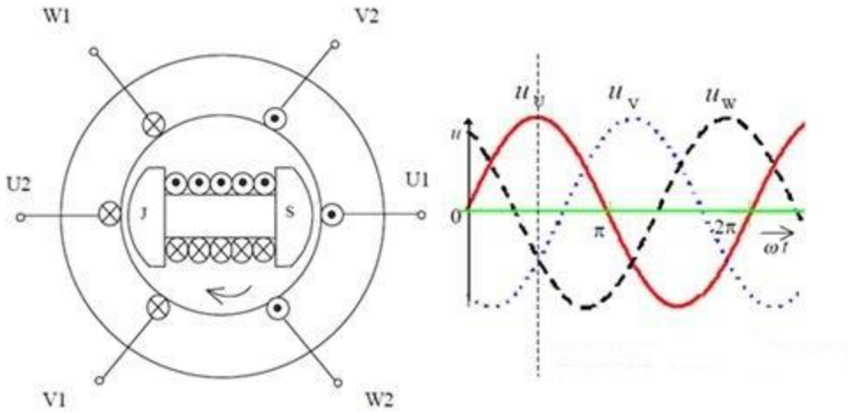
V první kapitole jsou rozebrány základní typy synchronních generátorů a jejich použití. Ve druhé kapitole je rozebrán nejpoužívanější alternátor v automobilovém průmyslu a to alternátor s drápkovým rotorem kompaktní konstrukce. Zde je uvedena jeho konstrukce a činnost, základní charakteristiky, zapojení a jeho výhody oproti předtím používaných dynam. Následně jsou rozebrány další typy alternátorů používaných v automobilovém průmyslu. Třetí kapitola je věnována možnostem a předpokladům inovace alternátoru. Jsou zde uvedeny a rozebrány jednotlivé ztráty a možnosti jejich snížení, za účelem zvýšení účinnosti. Ve čtvrté kapitole je proveden analytický elektromagnetický návrh alternátoru 14V/120A. V další páté kapitole je tento návrh ověřen pomocí programu Maxwell s nástrojem RMxprt. Poté jsou oba výpočty mezi s sebou porovnány a také porovnány s naměřenými výsledky alternátorů podobných výkonů.

1 KLASICKÉ ALTERNÁTORY

Alternátor je točivý elektrický stroj pracující v generátorickém režimu, přeměňuje kinetickou energii rotačního pohybu na energii elektrickou ve formě střídavého proudu. Alternátory mohou být jednofázové nebo vícefázové, pracují na principu elektrické indukce – ve vodiči je indukováno napětí, pokud se vodič a magnetické pole vůči sobě pohybují.

Alternátory jsou synchronní stroje, dělící se podle typu rotoru na alternátory:

- s hladkým rotorem (turboalternátory) – kde je obvykle hnacím strojem parní turbína
- s vyniklými póly (hydroalternátory) – jsou poháněny pomaluběžným strojem často vodní turbínou



Obrázek 1-1 Alternátor s vyniklými póly [1]

Turboalternátory mívají počet pólů $2p = 2$ případně $2p = 4$, otáčejí se synchronními otáčkami, které jsou při počtu pólů $2p = 2$ 3000 ot/min při frekvenci 50 Hz v elektrické síti. Rotorové vinutí je uloženo v drážkách a rotorový svazek tak plní funkci pólu. Díky této konstrukci je rotor hladký. Rotory turboalternátorů jsou vzhledem k vysokým otáčkám relativně malého průměru (kolem 1 m), aby nedocházelo vlivem odstředivé síly působící na rotující vinutí k vytrhávání vinutí z drážek. Rotory bývají dlouhé několik metrů.

Hydroalternátory mají oproti turboalternátorům pólové nástavce, které jsou upevněny po obvodu rotoru. Počet pólů u strojů s vyniklými póly bývá mnohonásobně větší, než u turboalternátorů (např. $2p = 30$). Otáčky u takového rotoru jsou jen 100 ot/min. Rotory jsou velkých průměrů (i 15 m), ale délka bývá 1 – 2 m. [2]

Oba tyto typy alternátorů nejsou pro automobilovou techniku příliš vhodné. Turboalternátory se nepoužívají díky své dlouhé délce rotoru a statoru a hlavně díky velké hmotnosti. Alternátory s vyniklými póly se nepoužívají z důvodu potřebných vysokých otáček u automobilových alternátorů a složité konstrukce vinutí rotoru s vyniklými póly. U hromadné sériové výroby by tento typ alternátoru byl velice nákladný na materiál, čas a pracovní sílu. Z těchto důvodů se v automobilech používá alternátor s drápkovým rotorem, který je podstatně jednodušší a rychlejší na výrobu.

2 DRUHY A PROVEDENÍ AUTOMOBILOVÝCH ALTERNÁTORŮ

Před alternátory se na výrobu elektrické energie v automobilovém průmyslu používaly dynama (stejnosměrná). Ty však měly řadu nedostatků. Dynama obsahovala komutátor, sloužící k přepínání polarity budícího proudu, ale jeho komutační vlastnosti ho výkonově omezovaly. Nejvýkonnější dynama dosahovala maximálního výkonu kolem 350 W (např. Škoda 1000 MB). Byly zkonstruovány i výkonnější dynama, ale jejich výkon rostl prudce s jejich hmotností (800 W dynamo vážilo 50 kg). Dále z důvodu správné funkce komutátoru mělo dynamo omezené otáčky na přibližně 6000 ot/min, proto převod od motoru býval téměř 1:1. Hlavní nevýhodou byla nemožnost ve volnoběžných otáčkách dodávat dostatek proudu pro napájení spotřebičů a nabíjení akumulátoru. Dále jiskření na komutátoru rušilo autorádia a podobná zařízení, také životnost uhlíků byla výrazně nižší (kolem 40 000 km), oproti uhlíkům alternátoru (kolem 120 000 km). [3]

V této kapitole je rozebrán alternátor s drápkovým rotorem včetně jeho konstrukce a činnosti, výhod, základních charakteristik a schéma zapojení. Dále jsou uvedeny další provedení používaných automobilových alternátorů

2.1 Alternátor s drápkovým rotorem (kompaktní)

Alternátor s drápkovým rotorem kompaktní konstrukce je celosvětově nejrozšířenější a nejpoužívanější alternátor používaný v automobilovém průmyslu. Je to relativně jednoduchý a spolehlivý elektrický stroj na výrobu elektrické energie v automobilech.

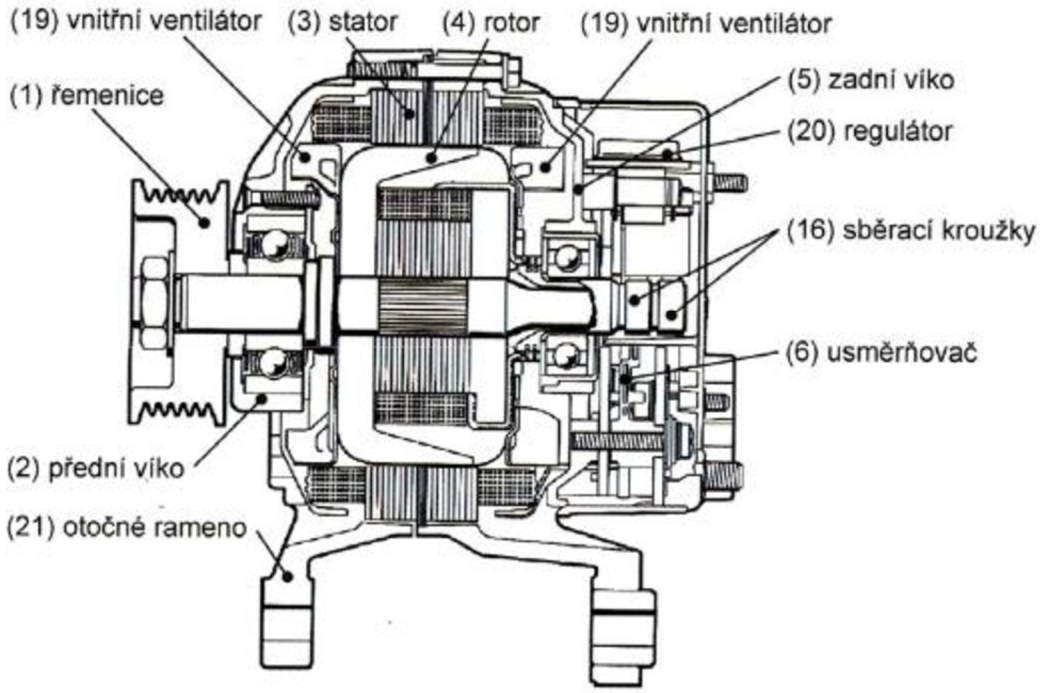
2.1.1 Konstrukce a činnost

U větších motorových vozidel, kde je potřebný větší výkon alternátoru, se používají alternátory se stejnosměrným buzením, u nichž je nezbytná regulace napětí. Používá se tu většinou alternátorů s drápkovým rotorem kompaktní konstrukce *Obrázek 2-1*.

Stator (3) je stejný jako stator vícepólového asynchronního motoru. V drážkách statorového paketu složeného z dynamových plechů, izolovaných na jedné straně, je uloženo trojfázové vinutí. Na rotoru (4) jsou dvě hvězdice z měkké oceli. Hvězdice jsou vyráběny tvářením za studena. Každá z nich má na vnějším obvodě p drápkových pólů (nejčastěji 6). Do mezery mezi drápkovými póly jedné hvězdice zasahují drápkové póly druhé hvězdice, takže ve vzduchové mezeře působí $2p$ drápkových pólů (nejčastěji 12). Budící cívka prstencového tvaru, která je napájena přes kroužky (16), budí všechny póly tak, že po obvodu se severní a jižní póly střídají. Levá hvězdice nese jen samé severní póly a pravá hvězdice jen samé jižní póly. Magnetický tok vycházející např. ze severního pólu projde vzduchovou mezerou do statoru, vyvolá v něm magnetický tok a vrací se přes vzduchovou mezeru do jižního pólu statoru. Drápkové póly mají lichoběžníkový tvar, aby se při otáčení měnil magnetický tok pozvolna a indukované napětí bylo blízké sinusovce.

Hlavní usměrňovač (6) je osazený diodami, které omezují napěťové špičky a chrání spotřebiče před přepětím. Jádro statoru má prodloužené střední plechy jejichž pomocí je upnuto v tělese alternátoru a ustředěno mezi oběma víky (2, 5). To umožňuje dosažení velké přesnosti při montáži a nízké úrovně magnetického hluku. Drápkové póly mají zkosenou „odtokovou“ hranu a ve spojení s vystředěnými středními lamelami se tak dosahuje dalšího snížení hlučnosti.

Dvouproudové provětrávání zajišťují dva uvnitř umístěné ventilátory (19) nasávající vzduch čelními stěnami dovnitř alternátoru. To vede ke snížení aerodynamické hlučnosti redukováním stupně odrazu a poskytuje větší volnost při umisťování alternátoru na motor. Sběrací kroužky (16) mají podstatně menší průměr, a proto také nižší obvodovou rychlost. Vzhledem k nižší obvodové rychlosti je také menší opotřebení jak kroužků, tak i kartáčů. Díky tomu životnost alternátoru již není tolik závislá na jejich opotřebení. Elektrický regulátor (20) je umístěn na držáků kartáčů. Usměrňovač (6) je chráněn proti vnějším vlivům krytem z plastu. K motoru je alternátor připevněn pomocí otočného ramene (21). [4], [5], [6]

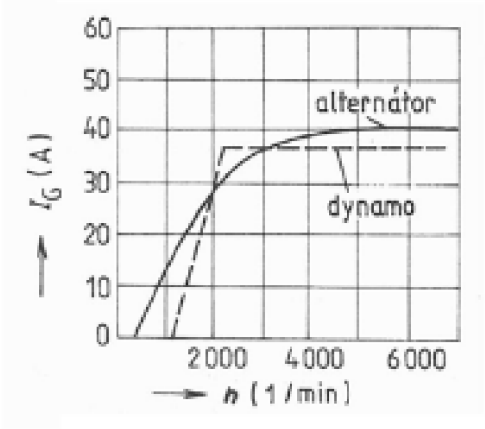


Obrázek 2-1 Alternátor s drápkovým rotorem kompaktní konstrukce [6]

2.1.2 Výhody

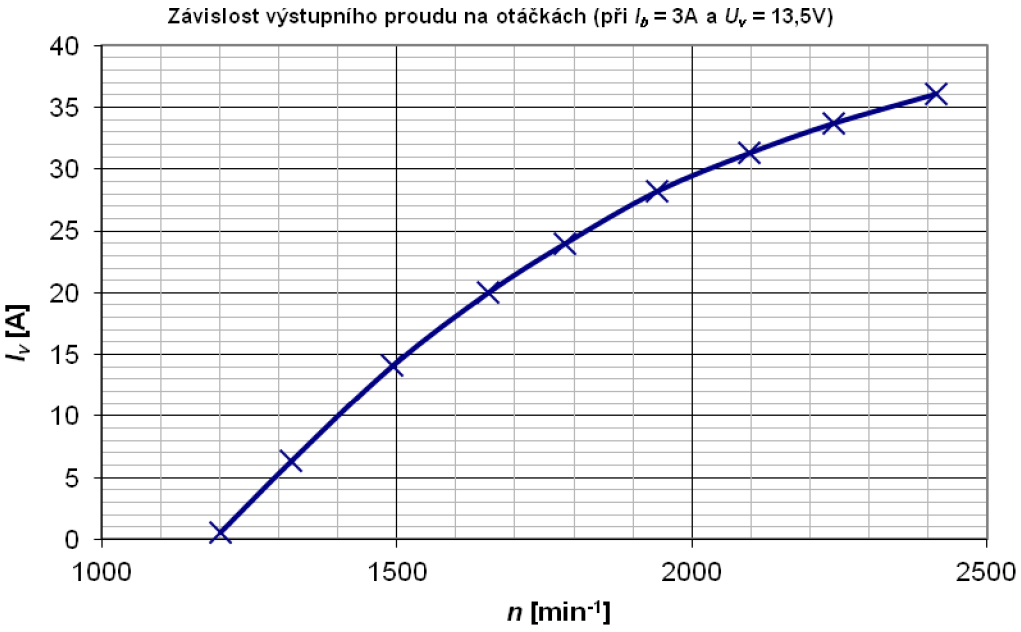
Alternátor s usměrňovačem dokáže akumulátor nabíjet při běhu naprázdno spalovacího motoru nebo dokonce při ještě menších otáčkách. To je důležitá výhoda pro dnešní velkoměstský provoz, kdy vozidlo většinu času stojí na křižovatkách a jede většinou pomalu. Životnost akumulátoru nabíjeného alternátorem s usměrňovačem je delší než u akumulátoru nabíjeného dynamem. Hlavní příčinou, proč alternátor může nabíjet při nižších otáčkách motoru než dynamo je, že alternátor lze navrhnout na vyšší obvodové rychlosti rotoru a zpřevodovat ho do rychla, kdežto u dynama vznikají omezení s ohledem na jakost komutace a odstředivé síly. Na *Obrázku 2-2* je porovnána charakteristika dynama a alternátoru přibližně stejného výkonu. Dynamo nedává při otáčkách 1000 ot/min ještě výkon, kdežto alternátor dává již 13 A. [4], [7]

Drápkový alternátor nemá komutátor, ale pouze hladké sběrací kroužky o malém průměru. Díky tomu životnost alternátoru už není tolik závislá na jejich opotřebení, záleží na prašnosti prostředí (u zapouzdřeného provedení překračuje životnost motoru). Díky tomu lze použít větší převod od motoru až 2,5:1 a z toho vyplývající vysoké otáčky (až 20 000 ot/min). [3]



Obrázek 2-2 Porovnání charakteristiky dynama a alternátoru [8]

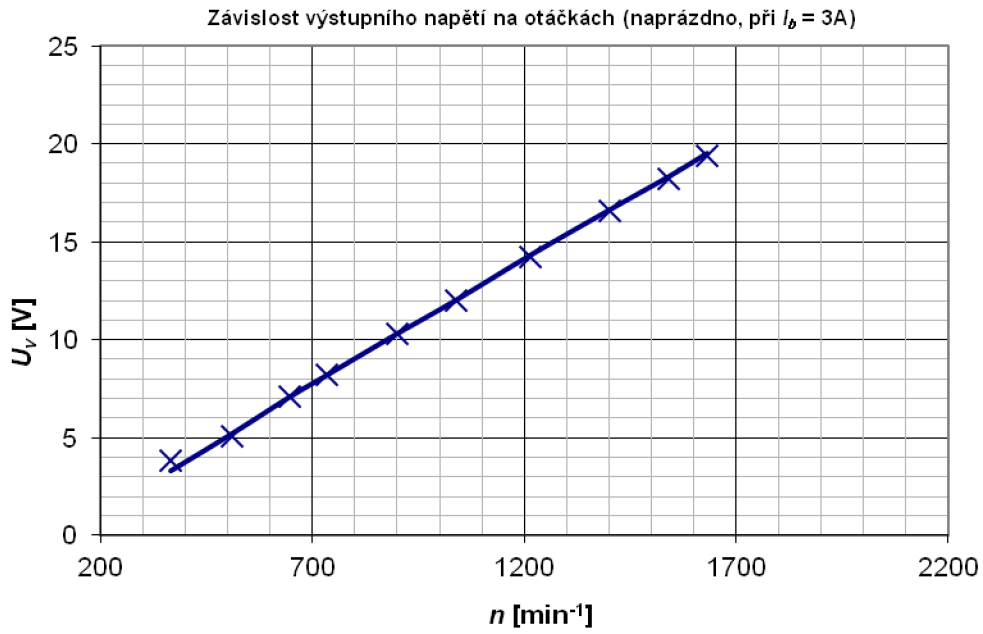
2.1.3 Základní charakteristiky



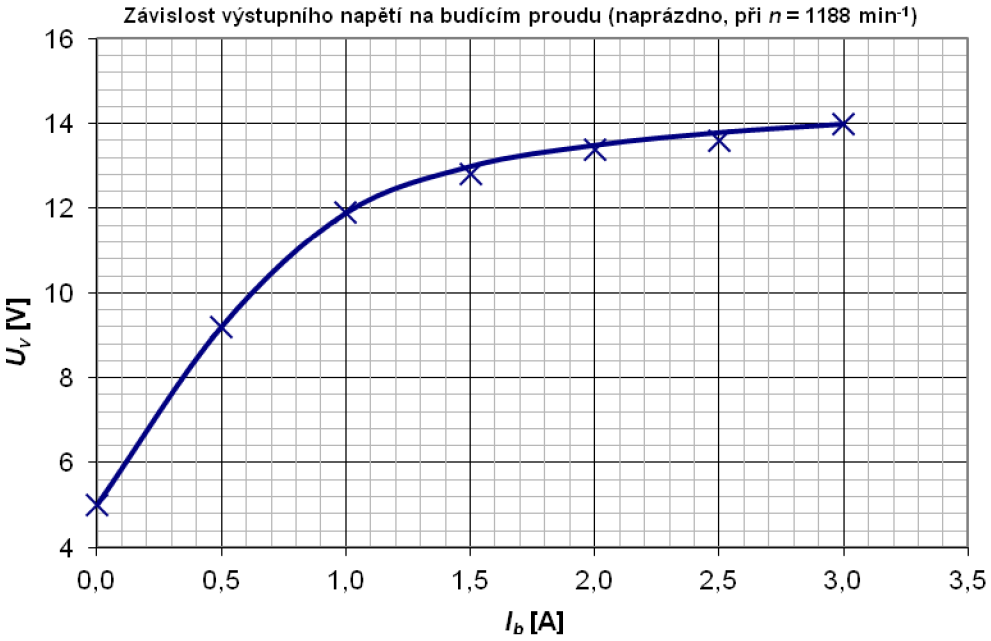
Obrázek 2-3 Proudová charakteristika

Proudová charakteristika udává závislost výstupního stejnosměrného proudu na otáčkách při konstantním výstupním napětí. Z *Obrázku 2-3* je patrné, že tento alternátor je schopen vydávat proud až při 1200 ot/min. Se zvyšujícími se otáčkami proud narůstá, až do své maximální hodnoty, ta obvykle bývá kolem 6000 ot/min. Následným zvýšením otáček se již proud nezvětšuje.

Napěťová charakteristika udává závislost výstupního napětí na otáčkách při konstatntím buzení a bez zatížení. Z charakteristiky je patrno, že se zvyšujícími se otáčkami výstupní napětí lineárně roste, viz *Obrázek 2-4*.



Obrázek 2-4 Napěťová charakteristika

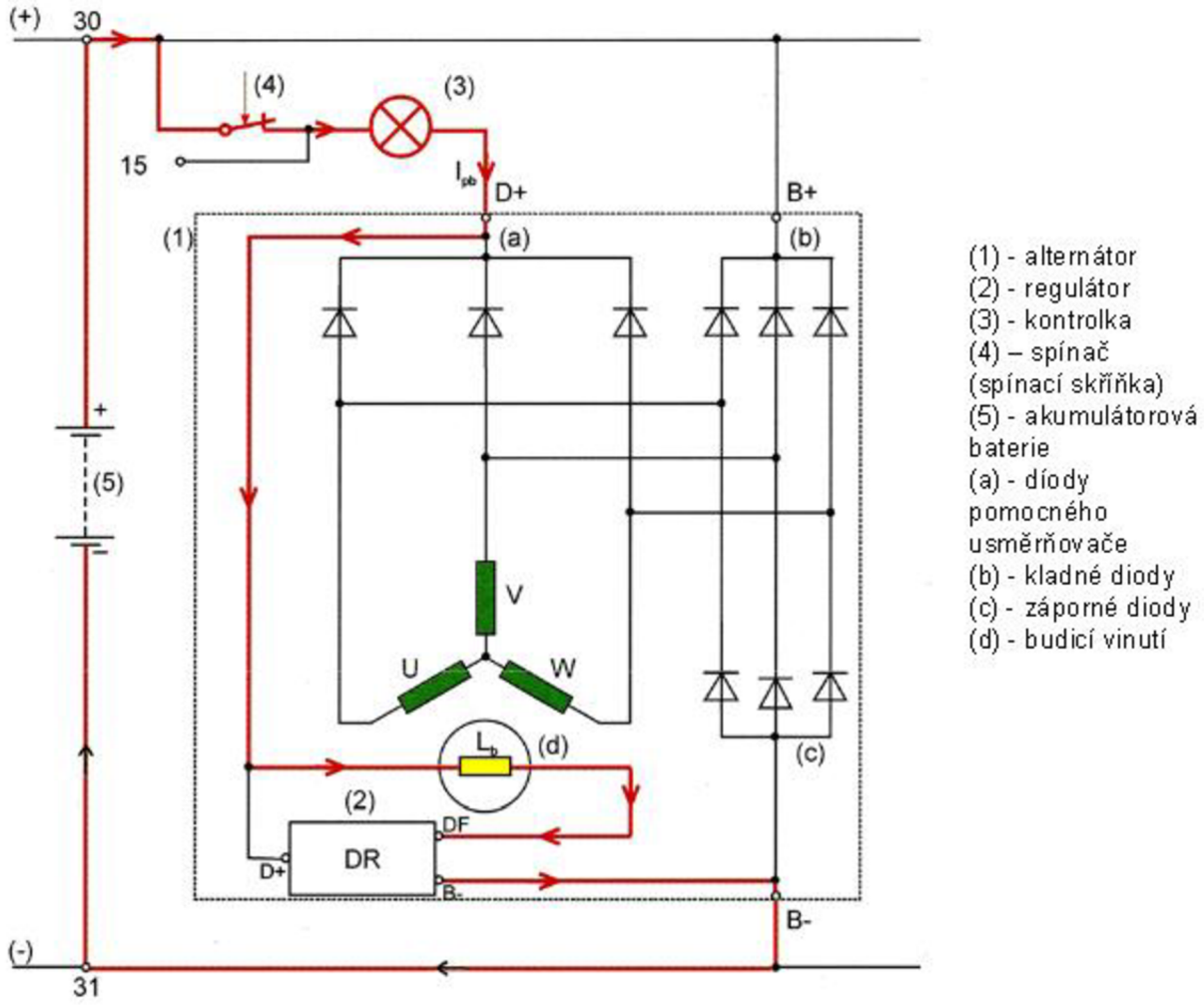


Obrázek 2-5 Budící charakteristika

Jelikož je u automobilů velký rozsah otáček (850 – 8000 ot/min), je nutné pro udržení konstantního výstupního napětí používat regulaci. Ta se provádí pomocí velikosti budícího proudu. Z *Obrázku 2-5* je patrno, že při nulovém budícím proudu je výstupní napětí alternátoru pouze 5 V. Naopak při plném budícím proudu je výstupní napětí maximální 14 V. Této skutečnosti se využívá u regulace toho napětí. Při volnoběžných otáčkách je alternátor buzen nejvíce a při maximálních otáčkách a bez zatížení je alternátor buzen nejméně. Zatížíme-li alternátor výstupním proudem předchozí popsaná skutečnost už takto doslovně neplatí, jelikož velikost budícího proudu začne ještě ovlivňovat reakce kotvy.

2.1.4 Zapojení

Alternátor je střídavý elektrický stroj, ale v automobilu je palubní síť stejnosměrná, je potřeba napětí a proud z alternátoru usměrnit. V hlavním usměrňovač je použito šest diod (VD_1 – VD_6). Většinou je alternátor osazen ještě třemi diodami (VD_7 – VD_9). Kladný pól pomocného usměrňovače je připojen na svorku D+ a záporný na B-, což zajišťuje napájení budícího vinutí.



Obrázek 2-6 Zapojení alternátoru [6]

Není-li motor automobilu v chodu, otáčky alternátoru jsou nulové. V tomto případě je nutné alternátor budit z cizího zdroje (akumulátor), aby bylo dosaženo požadovaného výstupního napětí alternátoru. Po sepnutí zapalování (4) jde proud I_b z akumulátoru přes kontrolku proud pro nabuzení a kontrolka se rozsvítí.

Po spuštění motoru a dosažení volnoběžných otáček se napětí na alternátoru zvýší na napětí vyšší, než je napětí akumulátoru. Kontrolka zhasne v okamžiku, kdy je dosaženo otáček, při kterých je napětí alternátoru rovno napětí akumulátoru. Díky rozdílu napětí na alternátoru a akumulátoru dochází k zajištění nabíjení akumulátoru. Budící proud I_b jde přes diody pomocného usměrňovače (a), uhlíkové kartáče a sběrací kroužky do budícího vinutí rotoru (d), odtud na svorku DF regulátoru (2) a ze svorky B- přes diody katodové skupiny (c) zpět do vinutí statoru.

Proud alternátoru I_G se dělí na proud, který složí k dobíjení akumulátoru a proud pro spotřebiče. Proud indukovaný v jedné fázi (např. V) jde přes jednu z kladných diod (b) na svorku B+ a dále přes akumulátor, popř. spotřebič na kostru (svorka B-) a odtud přes jednu ze záporných diod (c) na vinutí statoru (fáze W). Podle toho, jak se postupně mění pořadí diod, kterými proud prochází.

V poslední době se přechází na šestidiodové zapojení (bez pomocných diod) a alternátor je neustále buzen z baterie. Kontrolka dobíjení je v tomto případě připojena přes relé. Toto řešení má za následek zjednodušení zapojení alternátoru. [3], [6]

2.2 Další provedení alternátorů

V této kapitole budou popsány některé další používané alternátory v automobilovém průmyslu. Zejména jsou zde rozebrány alternátory s permanentním buzením, alternátor s vnějším ventilátorem, dvojitý alternátor a bezkroužkový alternátor.

2.2.1 Alternátor s permanentním buzením

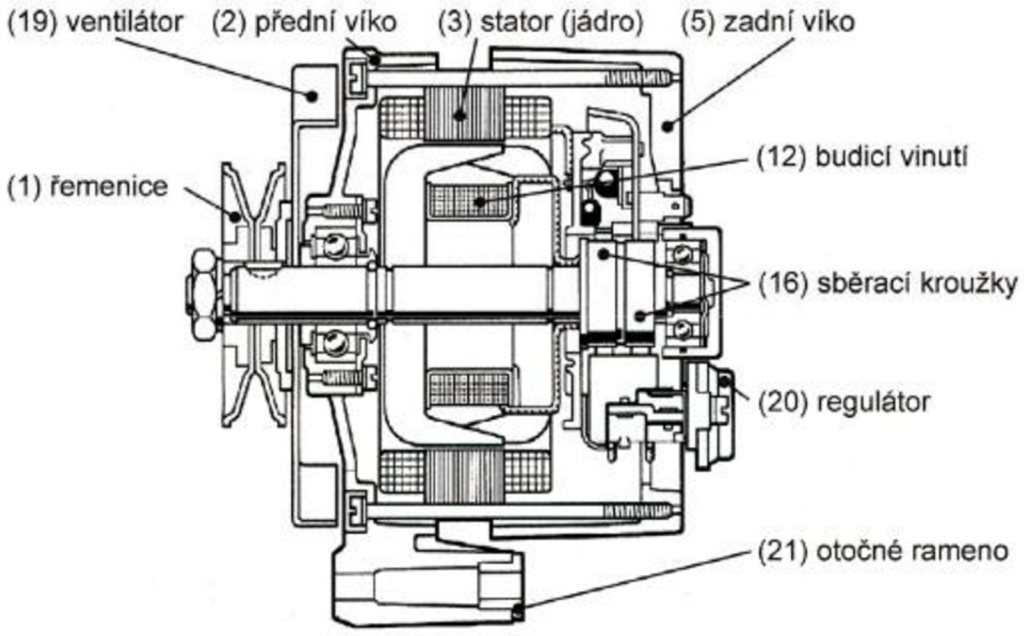
Je nejjednodušším typem alternátoru, buzení je realizováno permanentními magnety. Nejčastěji bývá v jednofázovém provedení. Nejznámějším představitelem je z malých motocyklů Jawa Pionýr. Budícím prvkem je rotor většinou z materiálu Alnico. Rotor může být uvnitř, tak i vně statoru, záleží na velikosti prostoru. Na statoru je několik vinutí, často jedno vinutí jeden spotřebič. Výkon jednotlivých vinutí bývá spočítán na daný odběr, protože u tohoto typu alternátoru se velmi obtížně reguluje napětí. Pokud je vinutí správně navrženo, vyrovná se při odběru spotřebiče napětí na požadovanou hodnotu. Z tohoto důvodu se permanentně buzené alternátory vyrábějí pro malé výkony s málo proměnnou spotřebou. Regulace napětí je možná až na výstupu a regulační člen (tyristor či výkonový tranzistor) musí být dimenzován na plný výkon alternátoru. Jde o méně náročné alternátory na údržbu, ale díky problémům s regulací napětí se nijak zvlášť kromě motocyklů nerozšířily. Pokud není použit akumulátor, alternátor není usměrňován a spotřebiče (většinou jen žárovky) jsou napájeny střídavým proudem. Obvod zapalování se speciálně upraví aby se zapalovací cívka nabíjela jen jednou půlperiodou kladné polarity, případně jiné přístroje obsahují vlastní usměrňovač. Pokud je akumulátor používán většinou se usměrní celý výkon. Jednotlivé statorové cívky jsou přepínačem odpojovány a připojovány podle potřeby odběru proudu, tím se odbourá nutnost použití regulace napětí. [3], [6]

2.2.2 Alternátor s vnějším ventilátorem

Tyto alternátory jsou určeny jak pro osobní, tak užitková vozidla, i když automobily jsou nejčastěji vybavovány alternátory s kompaktní konstrukcí. Pro různé provozní podmínky může být alternátor doplněn např. zvýšenou ochranou proti korozi, hadicovým adaptérem pro nasávání čerstvého vzduchu apod. Na *Obrázku 2-7* je alternátor typu K1. Konstrukce těchto alternátorů je označována jako alternátor s vnějším ventilátorem.

Alternátor je jednosměrně provětrávaný, dvanáctipólový, s vlastním buzením. Jádro statoru (3) není uchyceno do tělesa, ale pouze sevřeno mezi přední (2) a zadní víko (5). Ve víkách jsou uložena kuličková ložiska, které upevňují rotor. Před předním víkem je na hřídeli umístěna řemenice (1) a oběžné kolo ventilátoru (19). Budící proud se přivádí do cívky (12) na rotoru sběracími kroužky (16) a kartáči uchycenými v držáku kartáčů, který je upevněn na diodovém víku. V chladiči je zalisováno 6 diod hlavního a 3 diody pomocného usměrňovače. Usměrňovač je umístěn uvnitř diodového víka.

Pro zvláštní provoz mohou být alternátory řad K1 a N1 doplněny: O hadicový adaptér, který při vysoké okolní teplotě umožňuje nasávání čerstvého chladného vzduchu z okolí vozidla. Při dokonalém vyvážení a zvláštních opatřeních s ohledem na buzení, sběrací kroužky a ventilátor, mohou být maximální otáčky zvýšeny až na 18 000 ot/min. Zvýšenou ochranu oproti korozi. O ochranu částí citlivých na napěťové špičky při náhlých odpojeních zatížení. [5], [6]



Obrázek 2-7 Alternátor s vnějším ventilátorem [6]

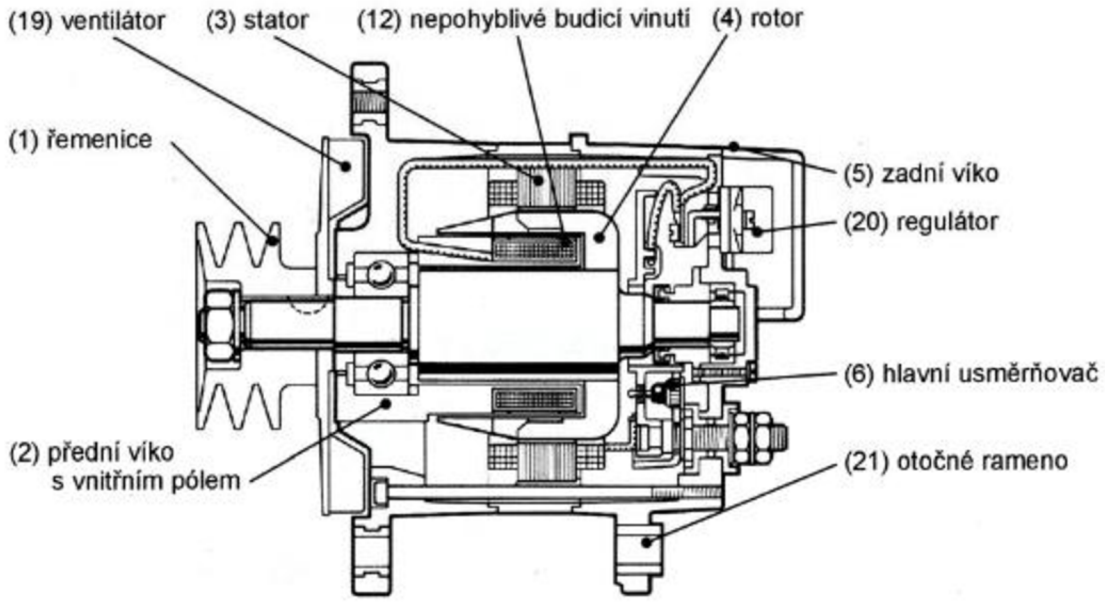
2.2.3 Dvojitý alternátor

Tento alternátor je určen pro vozidla, která odebírají větší proudy, zejména autobusy. Autobusy, především v městském provozu, vyžadují velkou změnu výkonu a širokém rozsahu otáček, včetně volnoběžných. Alternátor je založen na principu mechanického a elektrického

spojení svou jednoduchých alternátorů do jednoho celku. Sběrací kroužky a kartáče jsou umístěny v prachotěsném prostoru. [6]

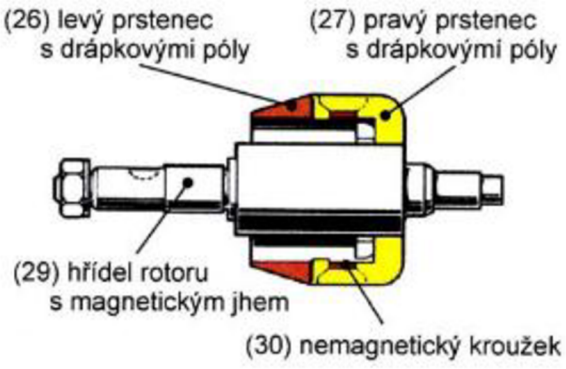
2.2.4 Bezkroužkový alternátor

U tohoto typu alternátoru jsou jediné součásti, které podléhají opotřebení valivá ložiska. Používají se zejména u stavebních strojů, u těžkých automobilů pro dálkovou dopravu a pro vysoce namáhaná speciální vozidla. Význam bezkroužkových alternátorů spočívá v tom, že mohou pracovat dlouhou dobu bez přerušení a pod značných zatížením. Základním principem, který to umožňuje, je použití co nejmenšího počtu částí, u kterých vzniká tření. Alternátor prakticky nepotřebuje údržbu, nemá sběrací kroužky a ani kartáče a je chráněn proti vnikání vlhkosti a prachu.



Obrázek 2-8 Bezkroužkový alternátor [6]

Alternátor má vlastní buzení. Budící proud se přivádí do nehybného vinutí (12), které je umístěno na vnitřním pólu (2). Budící pole magnetuje střídavě umístěné póly otáčejícího se rotoru (4). Rotující magnetické pole indukuje v pracovním vinutí statoru (3) třífázový proud. Magnetické indukční čáry vycházejí z magnetického jha (29), které je součástí rotoru a jdou přes vnitřní pól do levého prstence s drápkovými póly (26) stejné polarity a odtud do pracovního vinutí. Přes sousední, naproti umístěnou druhou polovinu drápkových pólů (27) se magnetický tok uzavírá opět v magnetickém jhu. Na rozdíl od alternátorů s uhlíkovými kartáči a sběracími kroužky musí v tomto případě magnetický tok překonávat navíc dvě vzduchové mezery mezi stojícím budícím vinutím a otáčejícím se rotorem. [3], [6]



Obrázek 2-9 Rotor bezkroužkového alternátoru [6]

2.3 Chlazení alternátorů

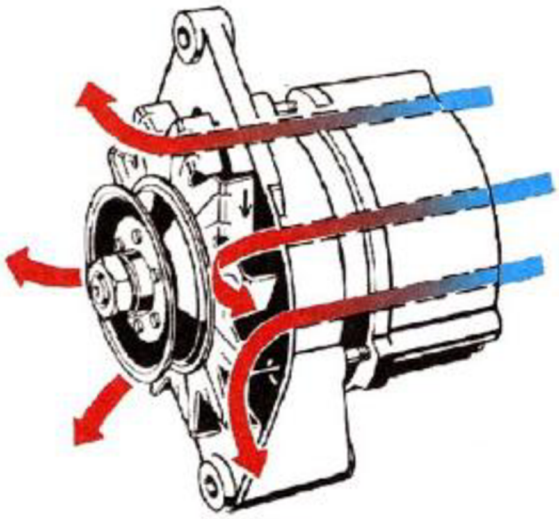
Automobilový alternátor je potřeba chladit. Je zahříván zářením a vedením tepla od motoru a výfuku, ale také vlastním ztrátovým teplem. Zahřívání se ještě zvyšuje, pokud je motorový prostor z důvodu odhlučnění izolován. Veškeré přebytečné teplo musí být z důvodu zabezpečené funkce jednotlivých částí odvedeno. Týká se to zejména izolací, pájených spojů a především polovodičových součástí. Maximální přípustná okolní teplota se pohybuje, podle typu alternátoru v rozmezí 80 – 120 °C. Proto je zapotřebí dostatečné chlazení alternátoru, které zajistí, že teplota jednotlivých částí nepřekročí stanovenou hranici. Chlazení alternátorů lze dosáhnout několika různými způsoby.

2.3.1 Chlazení bez nasávání čerstvého vzduchu

Obvyklý způsob chlazení používaný u alternátorů v normálním provozu je provětrávání. V tomto případě jsou použity radiální ventilátory pro jeden nebo oba smysly otáčení. Ventilátory se otáčejí společně s hřídelem alternátoru a se zvyšujícími se otáčkami vzrůstá i jejich chladící účinek. Proto je pro každý výkon zaručeno dostatečné chlazení. U některých typů alternátorů jsou lopatky ventilátorů uloženy asymetricky. Tím se dosáhne odstranění nežádoucích zvukových efektů (pískání apod.), které by mohlo nastat při určitých otáčkách.

Jednosměrné provětrávání

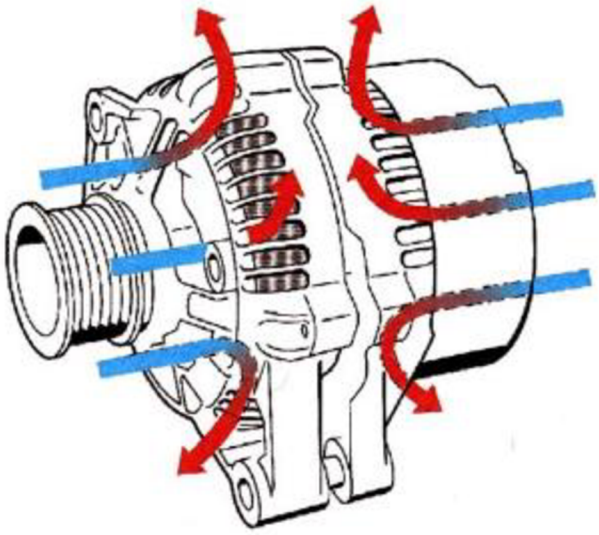
Oběžné kolo ventilátoru, tvořené lopatkami, je nasazeno z vnější strany předního víka. Vzduch vstupuje do alternátoru zadním víkem, proudí kolem sběracích kroužků podélně alternátorem a vystupuje předním víkem. Chladící vzduch je tedy ventilátorem nasáván přes celý alternátor, viz. *Obrázek 2-10*.



Obrázek 2-10 Jednosměrné provětrávání [9]

Obousměrné provětrávání

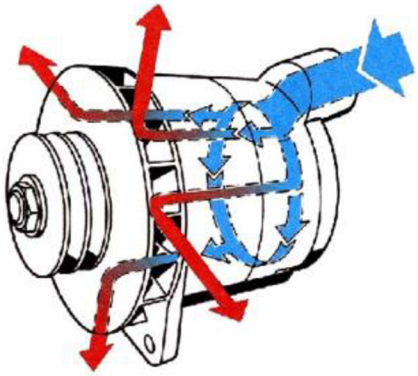
Alternátory pro větší výkony bývají provedeny jako obousměrně provětrávané. Dvě oběžná kola jsou nasazena na hřídeli rotoru vlevo a vpravo od aktivních částí (tj. ještě před ložisky). Vzduch je nasáván oběma ventilátory předním a zadním víkem axiálně a pak radiálně vytlačován otvory na obvodu alternátoru. Výhodou tohoto uspořádání je možnost použití menších oběžných kol ventilátorů a tím snížení hluku, který vzniká prouděním vzduchu po lopatkách. [9]



Obrázek 2-11 Obousměrné provětrávání [9]

2.3.2 Chlazení s nasáváním čerstvého vzduchu

U tohoto provedení vstupuje vzduch do nátrubku, umístěného na sací straně. Hadicí je chladný a čistý vzduch nasáván z okolí motorového vozidla. Vzduch vstupuje do alternátoru zadním víkem a je veden axiálně celým alternátorem a nasáván ventilátorem umístěným před předním víkem. Alternátory s nasáváním čerstvého vzduchu se používají v případě, že mají velký výkon nebo jsou umístěny v motorovém prostoru, kde je okolní teplota vyšší než 80 °C. Tento typ chlazení se využívá u autobusů. [9]



Obrázek 2-12 Ventilátor s nasáváním čerstvého vzduchu [9]

3 MOŽNOSTI A PŘEDPOKLADY INOVACE Z HLEDISKA SOUČASNÝCH TRENDŮ VÝVOJE

I nejmodernější alternátor má účinnost kolem 50 %. Což znamená, aby alternátor byl schopen vydat svůj maximální výkon, odebere spalovacímu motoru výkon dvakrát větší. Proto také automobilové alternátory podléhají inovacím. V poslední době vedou k inovaci alternátorů dvě cesty. Jedna cesta vede přes minimalizování aktivních materiálů, což ale vede k vyšším ztrátám. Druhá cesta vede přes zvyšování účinnosti snížením ztrát (mechanických, elektrických, magnetických a dodatečných). Jelikož otáčky alternátoru se mění ve velkém rozsahu, mění se také v tomto rozsahu účinnost. Proto bývá nejvyšší účinnost optimalizována pro nejpoužívanější rozsah otáček alternátoru (4000 – 6000 ot/min).

3.1 Analýza ztrát drápkového alternátoru

Ztráty alternátoru lze rozdělit na ztráty mechanické a ztráty elektromagnetické. Ztráty mechanické vznikají třením v ložiskách, třením kartáčů o komutátor, třením rotoru o vzduch a také ztrátám způsobených vzduchovým chlazením. Ztráty třením rotoru o vzduch a chlazením se obvykle nazývají ventilační ztráty.

Ztráty elektromagnetické se skládají ze ztrát elektrických a ztrát magnetických. Oba dva druhy ztrát se dělí na ztráty základní a dodatečné. Základní elektrické ztráty vznikají na odporu vodičů a mění se v teplo. Někdy se také nazývají Jouleovy ztráty. Do této skupiny patří i ztráty přechodem proudu přes kluzné kontakty. Dodatečné elektrické ztráty jsou způsobené především rozptylovými poli. Ztráty v železe jsou způsobeny tím, že v jednotlivých částech magnetického obvodu strojů se mění magnetický tok. V důsledku toho vznikají v těchto částech vířivé proudy, které způsobují ztráty a ohřívání příslušné části obvodu. Další ztráty vznikají přemagnetováním magnetického materiálu a jsou úměrné ploše hysterezní smyčky a nazývají se hysterezní ztráty. Dodatečné magnetické ztráty vznikají v důsledku pulsace magnetického pole způsobeného drážkováním kotvy a v důsledku existence vyšších harmonických magnetického pole ve vzduchové mezeře stroje. Ztráty mechanické, ztráty v železe a dodatečné ztráty způsobené pulsací magnetického pole existují jak při chodu naprázdno stroje, tak i při zatížení ve stejném rozsahu. Z toho důvodu se někdy nazývají ztrátami naprázdno.

3.1.1 Ztráty ve vinutí statoru

Ztráty ve vinutí statoru jsou dány odporem vinutí statoru, přepočítaným na provozní teplotu

$$\Delta P_{Cu} = I_f^{\,2} \cdot R_s \ [\mathrm{W}] \tag{3.1}$$

kde R_s je výsledný odpor vinutí statoru. Se vzrůstající teplotou se odpor vinutí zvyšuje podle následujícího vztahu

$$R_t = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \ [\Omega] \tag{3.2}$$

kde R_t - odpor vinutí při teplotě t

R_{20} - odpor vinutí při 20 °C

α - teplotní odporový součinitel

Δt - zvýšení teploty.

Ztráty ve vinutí s rostoucí teplotou porostou. [10], [11]

3.1.2 Ztráty v budícím vinutí

Elektrické ztráty v budícím vinutí jsou dány vztahem:

$$\Delta P_b = R_b \cdot I_b^{\,2} = \frac{U_b^{\,2}}{R_b} \text{ [W]} \tag{3.3}$$

přičemž U_b je napětí na svorkách budícího vinutí. [11]

Ztráty na kartáčích

Určují se obvykle pomocí úbytku napětí na kartáčích ΔU_k.

$$\Delta P_k = \Delta U_k \cdot I_b \text{ [W]} \tag{3.4}$$

3.1.3 Dodatečné elektrické ztráty

Dodatečné elektrické ztráty jsou způsobeny rozptylovým magnetickým polem a projevují se např. tak, že uprostřed vodiče prochází nejmenší proud (skinefekt) a nebo je proud v drážce vytlačován nahoru vlivem rozptylového pole.

3.1.4 Hysterézní ztráty

V každém elektrickém stroji se mění magnetický tok a střídavý magnetický tok způsobuje ztráty přemagnetováním neboli hysterezní ztráty. Tyto ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky magnetického materiálu. Úhrnné hysterezní ztráty jsou úměrné hmotnosti železných částí magnetického obvodu, kmitočtu a čtverci magnetické indukce (amplitudy). Pro praktické výpočty se používá upravený vzorec:

$$\Delta P_h = K_h \cdot \frac{f}{50} \cdot B^2 \text{ [W/kg]} \tag{3.5}$$

kde K_h - koeficient vyjadřující vliv materiálu. [10], [11], [12]

3.1.5 Ztráty vířivými proudy

Obdobný vztah platí pro výpočet ztrát vířivými proudy. Tyto ztráty závisí na druhé mocnině amplitudy magnetické indukce, na čtverci frekvence a na druhé mocnině tloušťky plechu. Pro výpočet používáme vzorec [10], [11], [12] :

$$\Delta P_v = K_v \cdot (\frac{f}{50})^2 \cdot B^2 \ \text{[W/kg]} \tag{3.6}$$

3.1.6 Celkové ztráty v železe

Celkové ztráty v železe jsou získány součtem jednotlivých ztrát, vynásobením hmotností příslušné části a koeficientem K_d, což je činitel, který vyjadřuje zhoršení vlastností opracováním částí a nesinusovým průběhem magnetické indukce. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí od 1 do 2. Potom tedy celkové ztráty v železe jsou dány vztahem [10], [11], [12] :

$$\Delta P_{Fe} = K_d \cdot G \cdot \left[K_h \cdot \frac{f}{50} + K_v \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot B^2 \ \text{[W]} \tag{3.7}$$

3.1.7 Dodatečné magnetické ztráty

Tyto ztráty jsou způsobeny především nesinusovým průběhem indukce ve vzduchové mezeře alternátoru a dále drážkováním statoru, rotoru nebo obojího. Projevující se jako ztráty vířivými proudy a je prakticky nemožné je separovat (při měření) od ztrát vířivými proudy. Také je lze jen velmi přibližně stanovit výpočtem. [10], [11]

3.1.8 Ztráty třením kartáčů o kroužky

Ztráty třením kartáčů o kroužky lze určit podle vzorce:

$$\Delta P_{tk} = \mu_t \cdot p_k \cdot v_k \cdot \Sigma S_k \ \text{[W]} \tag{3.8}$$

kde μ_t - koeficient tření kartáčů o kroužky (0,2 - 0,3)

p_k - tlak na kartáče

ΣS_k - plocha všech kartáčů

v_k - obvodová rychlost kroužků. [13]

3.1.9 Ztráty třením v ložiskách a ventilací

Ztráty třením v ložiskách a ventilační ztráty třením rotoru o vzduch se jen velmi obtížně stanovují. Většinou se k tomu používá empirických vzorců, které platí pouze pro omezený rozsah

rozměrů a výkonů strojů, nebo se používá různých grafů, rovněž empiricky sestavených. Je to způsobeno tím, že ztráty třením v ložiskách, především kluzných, závisí na mnoha činitelích, které není možné vždy analyticky vyjádřit. Přitom ztráty ve valivých ložiskách jsou menší než v ložiskách kluzných. Pro malé elektrické stroje s valivými ložisky je např. možné uvést vzorec:

$$\Delta P_{tl} = b \cdot \frac{d_{é} - d_{k}}{d_{0}} \cdot G_{k} \cdot n \cdot 10^{-6} \text{ [W]} \qquad (3.9)$$

kde b - závisí na druhu oleje (1 - 3)

d_o - střední průměr kuličkového věnce [cm]

d_k - průměr jedné kuličky [cm]

G_k - hmotnost rotoru [kg]

n - otáčky [ot/min]. [13]

3.2 Možnosti a předpoklady snížení ztrát drápkového alternátoru

Vývoj alternátoru jde prakticky dvojím směrem. Výrobci se zabývají především snižováním hmotnosti, objemu a dále zvýšením účinnosti. Tím lze dosáhnout snížení výkonu odebíraného spalovacímu motoru a v důsledku toho i úspory paliva. Pro budoucí vývoj alternátorů bude třeba brát více v úvahu zvýšení výkonu snížením ztrát. K tomu vedou různé možnosti. Ztráty ve vinutí závisí na proudu odebíraném z alternátoru, ztráty v železe závisí na magnetické indukci a na frekvenci a ztráty mechanické závisí na otáčkách.

Příklad hodnot ztrát alternátoru

Tabulka 3-1 Ztráty alternátoru 14V/120A při 6000 ot/min

Ztráty při 6000 ot/min	***ΔP*** **[W]**	***ΔP*** **[%]**	***ΔP$_c$*** **[W]**
ztráty ve vinutí statoru	855,7	56,6	1511,1
ztráty usměrněním	390	25,8	
ztráty v ložiskách a ventilací	150	9,9	
ztráty v buzení	40,8	2,7	
ztráty v železe	38,8	2,6	
ztráty v regulátoru	19,2	1,3	
ztráty třením kartáčů o kroužky	16,6	1,1	

3.2.1 Snížení ztrát ve vinutí statoru a usměrněním

Ztráty ve vinutí statoru závisí na odporu statorového vinutí a kvadrátu proudu. Při zachování rozměrů a výkonu alternátoru více eliminovat tyto ztráty takřka nelze.

Obdobně to platí u ztrát usměrněním. Ty nejvíce závisí také na proudu. K výraznému zmenšení těchto ztrát by došlo, při zachování stejného výkonu, snížením proudu a zvýšením napětí. To by ovšem s sebou přineslo také nutnost zvětšení délky statoru a rotoru, kvůli dosažení malé hodnoty odporu statorového vinutí. Zvýšení stejnosměrného napětí na 42 V by mohlo zvýšit účinnost alternátoru až na 70 - 80 % při maximálním proudovém zatížení. Zvětšování objemu alternátoru je však v automobilovém průmyslu nežádoucí. Navíc zvýšením napětí alternátoru by nastala nutnost dimenzovat na vyšší napětí také všechny spotřebiče nebo nutnost použití za alternátorem snižujícího měniče napětí.

Další možností je použití dvou-napěťové palubní sítě v automobilech 42 V a 12 V. Kde by na 42 V byly připojeny spotřebiče s vyšším příkonem (např. osvětlení, topení, čerpadla) a na 12 V (např. audio systémy, navigační systémy) by byly připojeny spotřebiče s nižším příkonem. Obě sítě by byly propojeny DC/DC měničem. Toto řešení by ovšem rapidně zvýšilo náklady na výrobu a složitost palubní sítě v automobilech. [13]

3.2.2 Snížení magnetických ztrát v železe

Ztráty v železe, tzn. ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní existují jakmile alternátor začne pracovat. Tyto ztráty nelze úplně odstranit, je možné je pouze snížit na nejmenší možnou míru. Podle výpočetního vztahu jsou závislé na magnetické indukci (na čtverci magnetické indukce), takže nejjednodušeji je můžeme snížit např. snížením magnetické indukce. To však zvyšuje objem a hmotnost aktivních částí.

Z výpočetních vztahů vyplývá, že ztráty, především vířivými proudy, můžeme snížit použitím tenčích plechů z materiálu s vyšším měrným odporem. Nepříznivým důsledkem je křehkost plechů (větší odpad) a rychlé opotřebení razidel ve výrobě.

3.2.3 Snížení ventilačních ztrát a třecích v ložiskách

Chlazení stroje je nutné, protože provozní teplota alternátoru je vyšší než 100 ^{o}C v důsledku vysoké proudové hustoty ve vinutí statoru (až 35 A/mm^2). Obvykle přijatelné řešení, tj. ventilátor nasávající vzduch přes celý alternátor způsobuje ztráty, především při vysokých otáčkách, které se snažíme snížit, zatím co ventilace se stává nadbytečnou. Tím také lze dosáhnout snížení hluku. Vývoj, vedoucí ke snížení příkonu ventilace, může probíhat v několika směrech:

Je možné optimalizovat tvar ventilátoru, rozměry a tlakové ztráty oběhu vzduchu. Tím lze dosáhnout snížení ztrát asi o 30 %, avšak snížení hlučnosti je minimální.

Jiný způsob postupu spočívá v použití ventilátoru s kontrolovanou (omezenou) rychlostí. Lze toho dosáhnout např. mechanickou spojkou. K omezení rychlosti ventilátoru by došlo, jakmile by chlazení bylo dostatečné. Podle zahraničních pramenů stabilizace kolem 5000 ot/min umožňuje zisk až 700 W, jsou-li otáčky alternátoru 12000 ot/min.

Další možností je oddělená ventilace. Jedná se o ventilátor, poháněný elektrickým motorkem nezávisle na otáčení hřídele alternátoru. Tato varianta byla už zkoumána v laboratorních podmínkách Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky VUT v Brně a výsledky byly publikovány na dvou zahraničních konferencích. Ze zkoušek vyplynulo, že použití ventilátoru

s motorkem o výkonu 30 W za určitých podmínek vede k dosažení teplot vinutí a diod nižších než u standardního stroje. Byl zde vyvozen předpoklad, že cena takového řešení omezí tento vývoj na speciální případy a malé série. Za současného stavu znalostí a ekonomických parametrů je nejvýhodnější řešení se dvěma vnitřními ventilátory, které se v současnosti používá. [13]

Snížení třecích ztrát lze také ovlivnit typem a kvalitou ložisek. Podle typu ložisek a tvaru lopatek ventilátoru mohou ventilační a třecí ztráty při 6000 ot/min nabývat hodnot 150 W , ale také 70 W, viz. Benchmarkingová studie provedení alternátorů vyšších výkonů. [14]

3.2.4 Snížení dodatečných ztrát

Dodatečné ztráty v alternátoru jsou způsobeny především nesinusovým tvarem indukovaného napětí v kotvě, což je dáno malou hodnotou q (počet drážek na pól a fázi, $q = 1$) a tím existenci vyšších harmonických a dále jako určitý důsledek činnosti regulátoru napětí. Tyto ztráty se projevují jako ztráty vířivými proudy, je prakticky nemožné, nebo obtížné je analyzovat nebo změřit. K dalším příčinám vzniku dodatečných ztrát lze počítat např. skinefekt ve vodičích.

Nejjednodušší způsob omezení dodatečných ztrát spočívá ve zvětšení délky vzduchové mezery alternátoru, což je však přesně opačná tendence, než v případě dvojí vnitřní ventilace, kdy je snaha vzduchovou mezeru zmenšit až na 0,2 mm. Z toho vyplývá, že je nezbytné zabývat se početním řešením a analýzou dodatečných ztrát. [13]

3.2.5 Alternátor s permanentními magnety

Od začátku výroby drápkových alternátorů se objevují snahy o nahrazení budícího vinutí permanentními magnety. Tím by bylo možné odstranit kroužky a kartáče, ztráty v buzení a dosáhnout vyššího výkonu na jednotku hmotnosti. V tomto uspořádání není možné regulovat výstupní napětí. Jinak, než působením na výstupní obvod, tzn. regulovat celý výkon alternátoru. To vyžaduje drahou elektroniku, jejích činnost se negativně projevuje z hlediska elektromagnetických poruch. Výkonové prvky a obvody s malým úbytkem napětí, provozuschopné v podmínkách automobilu, jsou stále ještě nákladné. Kromě toho jejich výkon při částečném zatížení je horší než u stávajících alternátorů, přičemž již není možné měnit buzení.

Jistá možnost se jeví při použití elektronicky řízené převodovky s proměnným převodem (variátoru), která by zajišťovala konstantní otáčky a tedy i konstantní napětí (a výkon). Také toto řešení by bylo značně nákladné, takže je zatím málo pravděpodobné, že se alternátory s buzením permanentními magnety objeví v nejbližších letech ve velkých sériích. [13]

4 ANALYTICKÝ ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH ALTERNÁTORU

Výpočet dvanáctipólového trojfázového alternátoru 14 V / 1620 W

Výpočet bude prováděn při napětí 14 V, jmenovitém výkonu 1620 W, jmenovitých otáčkách 6000 ot/min, *cos φ* = 1. Alternátor bude trojfázový, zapojený do hvězdy. Jako usměrňovač budou použity křemíkové diody v trojfázovém můstkovém zapojení.

Poměr sdruženého napětí před usměrňovačem a střední hodnoty usměrněného napětí za usměrňovačem je

$$\frac{U_2}{U_{ss}} = 0{,}74\,. \tag{4.1}$$

Poměr proudu jedné fáze alternátoru zapojeného do hvězdy a střední hodnoty usměrněného napětí za usměrňovačem je

$$\frac{I_f}{I_{ss}} = 0{,}816\,. \tag{4.2}$$

Vzhledem k tomu, že na deskách usměrňovače nastávají úbytky napětí, pro poměr efektivního napětí před usměrňovačem platí

$$\frac{U_2}{U_{ss} + 2n_z \cdot \Delta U_d} = 0{,}74 \tag{4.3}$$

kde n_z je počet desek zapojených v sérii v jedné větvi usměrňovače. Úbytek napětí křemíkových diod na jedné desce usměrňovače

$$\Delta U_d = 1{,}2V\,. \tag{4.4}$$

Sdružené napětí alternátoru

$$U_2 = 0{,}74 \cdot \left(U_{ss} + 2n_z \cdot \Delta U_d\right) = 0{,}74 \cdot \left(14 + 2 \cdot 1 \cdot 1{,}2\right) = 12{,}2V \tag{4.5}$$

Fázové napětí alternátoru

$$U_f = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{12{,}2}{1{,}73} = 7V \tag{4.6}$$

Je-li stejnosměrný výkon za usměrňovačem

$$P_{ss} = P + \Delta P_b + \Delta P_{reg} = 1620 + 40{,}8 + 19{,}2 = 1680W \tag{4.7}$$

kde $\Delta P_b = U_{ss} \cdot i_m = 14 \cdot 2{,}914 = 40{,}8W$ (4.8)

je stejnosměrný proud za usměrňovačem

$$I_{ss} = \frac{P_{ss}}{U_{ss}} = \frac{1680}{14} = 120A\,. \tag{4.9}$$

Fázový proud alternátoru

$$I_f = 0{,}816 \cdot I_{ss} = 0{,}816 \cdot 120 = 98A \tag{4.10}$$

Střídavý výkon alternátoru

$$P_{stř} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot 12{,}2 \cdot 98 = 2070W \tag{4.11}$$

Účinnost usměrnění

$$\eta_{us} = \frac{P_{ss} \cdot 100}{P_{stř}} = \frac{1680 \cdot 100}{2070} = 81{,}2\% \tag{4.12}$$

Vrtání statoru D = 0,094 m

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0{,}094}{12} = 0{,}0246m \tag{4.13}$$

Počet drážek na pól a fázi q = 1, krok $y = \tau_p / q = \tau_p$, vinutí jednovrstvé se stejnými cívkami.

Počet drážek ve statoru

$$Q = 2p \cdot q \cdot m = 12 \cdot 1 \cdot 3 = 36 \tag{4.14}$$

Kappův činitel

$$\kappa = 2{,}22 \cdot k_q \cdot k_y = 2{,}22 \cdot 1 \cdot 1 = 2{,}22 \tag{4.15}$$

$$k_q = \frac{\sin\left(q \cdot \frac{\pi}{p}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p}\right)} = \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)} = 1 \tag{4.16}$$

$$k_y = \sin\left(\frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{\tau_p}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \tag{4.17}$$

Magnetický tok stroje (zvolen)

$$\Phi = 0{,}875 \cdot 10^{-4} Wb$$

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{6 \cdot 6000}{60} = 600 Hz \tag{4.18}$$

Počet vodičů jedné fáze v sérii

$$N_s = \frac{U_f}{\kappa \cdot f \cdot \phi} = \frac{7}{2{,}22 \cdot 600 \cdot 0{,}875 \cdot 10^{-4}} = 60 \tag{4.19}$$

Počet vodičů v drážce

$$N_d = \frac{a \cdot N_s}{2p \cdot q} = \frac{1 \cdot 60}{12 \cdot 1} = 5 \tag{4.20}$$

Proudové zatížení obvodu vnitřního průměru statoru

$$A = \frac{m \cdot I_f \cdot N_s}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 98 \cdot 60}{\pi \cdot 0{,}094} = 59734 A/m \tag{4.21}$$

Indukce ve vzduchové mezeře (zvolena)

$$B_\delta = 0{,}16T$$

Délka železa statoru

$$L_s = \frac{\pi \cdot \phi}{2 \cdot \tau_p \cdot B_\delta} = \frac{\pi \cdot 0{,}875 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0{,}0246 \cdot 0{,}16} = 0{,}035 m \tag{4.22}$$

Průřez statorového vodiče (zvolen) 3x Φ 1,32 mm, tj. 3x 1,36 mm^2.

Proudová hustota

$$\sigma_s = \frac{I_f}{S_s} = \frac{98}{3 \cdot 1{,}36} = 24 A/mm^2 \tag{4.23}$$

Odpor jedné fáze při teplotě 100°C

$$R_s = \frac{(L_s + l_c) \cdot N_s}{43 \cdot a \cdot S_s} = \frac{(0{,}035 + 0{,}0492) \cdot 60}{43 \cdot 1 \cdot 4} = 0{,}0297\Omega \tag{4.24}$$

$$l_c = 2 \cdot \tau_p = 2 \cdot 0{,}0246 = 0{,}0492m \tag{4.25}$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu} = m \cdot R_s \cdot I_f^2 = 3 \cdot 0{,}0297 \cdot 98^2 = 855{,}7W \tag{4.26}$$

Drážková rozteč

$$t_v = \frac{\tau_p}{q \cdot m} = \frac{0{,}0246}{1 \cdot 3} = 0{,}0082m = 8{,}2mm \tag{4.27}$$

Při šířce zubu Z_u = 4,1 mm je indukce zubu

$$B_z = \frac{t_v \cdot B_\delta}{Z_u \cdot 0{,}95} = \frac{8{,}2 \cdot 0{,}16}{4{,}1 \cdot 0{,}95} = 0{,}34T \tag{4.28}$$

Hloubka drážky je 11mm

Indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot L_s \cdot 0{,}95 \cdot V_{js}} = \frac{0{,}875 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0{,}035 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0045} = 0{,}29T \tag{4.29}$$

Vnější průměr statoru

$$D_e = 0{,}125m$$

Indukce v pólu rotoru (zvolena)

$$B_p = 0{,}48T$$

Indukce v jádru rotoru (zvolena)

$$B_{jr} = 0{,}36T$$

Délka indukční čáry v zubu

$$l_z = 0{,}011m$$

Délka indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{js} = 0{,}032m$$

Délka indukční čáry v pólech rotoru

$$l_p = 0{,}08m$$

Délka indukční čáry v jádru rotoru

$$l_{jr} = 0{,}03m$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$U_\delta = 2 \cdot H_\delta \cdot K_c \cdot \delta = 2 \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot K_c \cdot \delta = 2 \cdot \frac{0{,}16}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}252 \cdot 0{,}0003 = 95{,}6A \tag{4.30}$$

Carterův činitel

$$K_c = \frac{t_v}{t_v + \delta - 0{,}75 \cdot d_3} = \frac{8{,}2}{8{,}2 + 0{,}3 - 0{,}75 \cdot 2{,}6} = 1{,}252 \tag{4.31}$$

Tabulka 4-1 Charakteristika statoru a rotoru

$U_{f\%}$	100	140	180	220	240
U_f	7	9,8	12,6	15,4	16,8
U_δ	95,6	133,8	172,1	210,3	229,4
B_z	0,34	0,48	0,61	0,75	0,82
H_z	125,8	142,6	157,2	174	182,8
$U_z = 2*0{,}011*Hz$	2,8	3,1	3,5	3,8	4,0
B_{js}	0,29	0,41	0,52	0,64	0,70
H_{js}	119,6	134,2	147,2	160,8	168
$U_{js} = 0{,}032*H_{js}$	3,8	4,3	4,7	5,1	5,4
B_p	0,48	0,67	0,86	1,06	1,15
H_p	109,4	131,4	165,4	217,6	254
$U_p = 2*0{,}08*H_p$	17,5	21,0	26,5	34,8	40,6
B_{jr}	0,36	0,50	0,65	0,79	0,86
H_{jr}	95	111	129	149,4	165,4
$U_{jr} = 0{,}03*H_{jr}$	2,9	3,3	3,9	4,5	5,0
F_m	122,5	165,6	210,6	258,6	284,4

Příklad výpočtu magnetomotorického napětí

$$F_m = U_\delta + U_z + U_{js} + U_p + U_{jr} = 95{,}6 + 2{,}8 + 3{,}8 + 17{,}5 + 2{,}9 = 122{,}5A \tag{4.32}$$

Pólové krytí

$$\alpha_p = \frac{b_{stř}}{\tau_p} = \frac{14{,}16}{24{,}6} = 0{,}58 \tag{4.33}$$

Pólové krytí $\alpha_p = 0{,}58$ a činitel sycení $k_s = 1{,}31$ je $\beta_q = 0{,}69$; $\kappa_q = 0{,}31$; takže příčná složka reakce magnetomotorického napětí je (viz. Cigánek, str. 406; [11])

$$\frac{F_q}{\cos\Psi} = \frac{1{,}35}{p} \cdot I_f \cdot N_s \cdot k_q \cdot k_y \cdot \beta_q \cdot \kappa_q = \frac{1{,}35}{6} \cdot 98 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}69 \cdot 0{,}31 = 283A \tag{4.34}$$

Charakteristika s vektorovým diagramem je nakreslena na *Příloha 1*.

Z charakteristiky odečtené elektromotorické napětí odpovídající magnetomotorickému napětí $F_q / \cos\Psi$ je

$$E_q / \cos\Psi = 20{,}57V$$

Vodivost polozavřené statorové drážky pro rozptyl

$$\Lambda_d = 0{,}04 \cdot \pi \cdot 10^{-8} \cdot L_s \cdot \lambda_d = 0{,}04 \cdot \pi \cdot 10^{-8} \cdot 35 \cdot 0{,}798 = 3{,}41 \cdot 10^{-8} H \tag{4.35}$$

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} + \frac{h_2}{b_2} + \left(\frac{h_3}{b_1 - b_4} \cdot \ln\left(\frac{b_1}{b_4} \right) \right) + \frac{h_4}{b_4} = \frac{10}{3 \cdot 6} + \frac{0{,}4}{4{,}2} + \left(\frac{0{,}6}{6 - 2{,}6} \cdot \ln\left(\frac{6}{2{,}6} \right) \right) + \frac{0}{2{,}6} = 0{,}798 \tag{4.36}$$

Vodivost mezi hlavami zubů

$$\begin{aligned} \Lambda_z &= 0{,}04 \cdot L_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot (t_v - b_4)}{2 \cdot b_4} \right) \cdot 10^{-8} = \\ &= 0{,}04 \cdot 35 \cdot \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot (8{,}2 - 2{,}6)}{2 \cdot 2{,}6} \right) \cdot 10^{-8} = 2{,}069 \cdot 10^{-8} H \end{aligned} \tag{4.37}$$

Vodivost pro rozptyl kolem čel vinutí

$$\lambda_c = 0{,}067 \cdot \frac{q}{L_s} \cdot \left(l_c - (0{,}64 \cdot \tau_p) \right) = 0{,}067 \cdot \frac{1}{0{,}035} \cdot \left(0{,}0492 - (0{,}64 \cdot 0{,}0246) \right) = 0{,}064 \tag{4.38}$$

$$\Lambda_c = q \cdot \lambda_c \cdot l_c \cdot 10^{-9} = 1 \cdot 0{,}064 \cdot 49{,}2 \cdot 10^{-9} = 0{,}315 \cdot 10^{-8} H \tag{4.39}$$

Celková rozptylová reaktance vinutí

$$\begin{aligned} X_r &= \frac{\pi \cdot f \cdot N_s^2}{p \cdot q} \cdot (\Lambda_d + \Lambda_z + \Lambda_c) \cdot 10^{-8} = \\ &= \frac{\pi \cdot 600 \cdot 60^2}{6 \cdot 1} \cdot (3{,}41 + 2{,}069 + 0{,}315) \cdot 10^{-8} = 0{,}0655\Omega \end{aligned} \tag{4.40}$$

Úbytek na činném odporu

$$\Delta U_č = R_s \cdot I_f = 0{,}0297 \cdot 98 = 2{,}91V \tag{4.41}$$

Úbytek na jalovém odporu

$$\Delta U_j = X_r \cdot I_f = 0{,}0655 \cdot 98 = 6{,}42V \tag{4.42}$$

Vnitřní fázový posun

$$\tan\psi = \frac{\Delta U_j + E/\cos\psi}{U_f + \Delta U_č} = \frac{6{,}42 + 20{,}57}{7 + 2{,}91} = 2{,}72 \tag{4.43}$$

$$\psi = \tan^{-1}(\Psi) = tg^{-1}(2{,}72) = 69{,}81^\circ \tag{4.44}$$

$$\sin\psi = \sin(\Psi) = \sin(69{,}81) = 0{,}939 \tag{4.45}$$

Z charakteristiky odečteno, že magnetomotorické napětí potřebné k indukci E a pro kompenzaci příčné složky reakce je

$$F_{cq} = 160A$$

β_l = 0,92; κ_l = 0,88; magnetomotorické napětí potřebné pro kompenzaci podélné složky reakce je

$$F_l = \frac{1{,}35}{p} \cdot I_f \cdot N_s \cdot k_q \cdot k_y \cdot \sin\Psi \cdot \beta_l \cdot \kappa_l = \frac{1{,}35}{6} \cdot 98 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}939 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}88 = 1005{,}8A \tag{4.46}$$

Celkové magnetomotorické napětí pro dvojpólí je

$$F_c = F_{cq} + F_l = 160 + 1005{,}8 = 1165{,}8A \tag{4.47}$$

S předpokladem 60 % rozptylu mezi póly je průřez pólu

$$S_p = \frac{1{,}6 \cdot \Phi}{B_p} = \frac{1{,}6 \cdot 0{,}875 \cdot 10^{-4}}{0{,}48} = 2{,}92 \cdot 10^{-4} m^2 \tag{4.48}$$

Průřez jádra rotoru při předpokládaném rozptylu 60 %

$$S_{jr} = \frac{p \cdot 1{,}6 \cdot \Phi}{B_{jr}} = \frac{6 \cdot 1{,}6 \cdot 0{,}875 \cdot 10^{-4}}{0{,}36} = 23{,}33 \cdot 10^{-4} m^2 \tag{4.49}$$

Činitel sycení

$$K_s = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{125{,}5}{95{,}6} = 1{,}31 \tag{4.50}$$

Střední délka závitu cívky

$$l_s = 0{,}0615 \cdot \pi = 0{,}193m \tag{4.51}$$

Počet závitů cívky

$$Z_c = \frac{F_c}{i_m} = \frac{1165,8}{2,914} = 400z \tag{4.52}$$

Průřez vodiče rotorové cívky 0,56 mm^2, tj. Φ 0,85 mm.

Odpor cívky při 20 °C

$$R_{20} = \frac{l_s \cdot Z_c}{56 \cdot S_r} = \frac{0,193 \cdot 400}{56 \cdot 0,56} = 2,46\Omega \tag{4.53}$$

Odpor cívky při 100 °C

$$R_t = \frac{l_s \cdot Z_c}{48 \cdot S_r} = \frac{0,193 \cdot 400}{48 \cdot 0,56} = 2,87\Omega \tag{4.54}$$

Při ztrátách na kartáčích 2 V je max. budící proud

$$i_{\max} = \frac{U_{ss} - 2}{R_t} = \frac{14 - 2}{2,87} = 4,18A \tag{4.55}$$

Proudové zatížení vodiče při i_{max}

$$\sigma_{\max} = \frac{i_{\max}}{S_r} = \frac{4,18}{0,56} = 7,5A/mm^2 \tag{4.56}$$

Prostor pro vinutí magnetů je 12 x 30 = 360 mm^2

Do tohoto prostoru se vejde 400 závitů drátu Φ 0,85 mm.

Výpočet magnetomotorického napětí pro dvojpólí při 14 V, 1800 ot/min bez proudového zatížení fází.

Magnetický tok stroje

$$\Phi = \frac{U_f}{\kappa \cdot f \cdot N_s} = \frac{7}{2.22 \cdot 180 \cdot 60} = 2,92 \cdot 10^{-4} Wb \tag{4.57}$$

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{6 \cdot 1800}{60} = 180Hz \tag{4.58}$$

Indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot \tau_p \cdot L_s} = \frac{\pi \cdot 2,92 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,0246 \cdot 0,035} = 0,53T \tag{4.59}$$

Indukce v zubu statoru

$$B_z = \frac{t_v \cdot B_\delta}{Z_u \cdot 0{,}95} = \frac{8{,}2 \cdot 0{,}53}{4{,}1 \cdot 0{,}95} = 1{,}12T \tag{4.60}$$

Indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot L_s \cdot 0{,}95 \cdot V_{js}} = \frac{2{,}92 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0{,}035 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}0045} = 0{,}98T \tag{4.61}$$

Indukce v pólu rotoru

$$B_p = \frac{1{,}6 \cdot \Phi}{S_p} = \frac{1{,}6 \cdot 2{,}92 \cdot 10^{-4}}{2{,}92 \cdot 10^{-4}} = 1{,}6T \tag{4.62}$$

Indukce v jádru rotoru

$$B_{jr} = \frac{1{,}6 \cdot p \cdot \Phi}{S_{jr}} = \frac{1{,}6 \cdot 6 \cdot 2{,}92 \cdot 10^{-4}}{23{,}33 \cdot 10^{-4}} = 1{,}2T \tag{4.63}$$

Celkové magnetomotorické nětí pro dvojpólí

$$\begin{aligned}
U_\delta &= 2 \cdot H_\delta \cdot K_c \cdot \delta = 2 \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot K_c \cdot \delta = 2 \cdot \frac{0{,}53}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}252 \cdot 0{,}0003 = 316{,}8A \\
U_z &= 2 \cdot l_z \cdot H_z = 2 \cdot 0{,}011 \cdot 233{,}2 = 5{,}1A \\
U_{js} &= l_{js} \cdot H_{js} = 0{,}032 \cdot 206 = 5{,}6A \\
U_p &= 2 \cdot l_p \cdot H_p = 2 \cdot 0{,}08 \cdot 1310 = 209{,}6A \\
U_{jr} &= l_{jr} \cdot H_{jr} = 0{,}03 \cdot 278 = 8{,}3A \\
F_{c0} &= U_\delta + U_z + U_{js} + U_p + U_{jr} = 316{,}8 + 5{,}1 + 5{,}6 + 209{,}6 + 8{,}3 = 545{,}4A
\end{aligned} \tag{4.64}$$

Skutečná magnetomotorické napětí pro dvojpolí je

$$\begin{aligned}
F_{\max} &= Z_c \cdot i_{\max} = 400 \cdot 4{,}18 = 1672A \\
F_c &< F_{\max} \rightarrow 1165{,}8 < 1672 \\
F_{c0} &< F_{\max} \rightarrow 545{,}4 < 1672
\end{aligned} \tag{4.65}$$

Magnetické indukce při jmenovitém stavu

$$\begin{aligned}
B_\delta &= 0{,}16T \\
B_z &= 0{,}34T \\
B_{js} &= 0{,}29T \\
B_p &= 0{,}48T \\
B_{jr} &= 0{,}36T
\end{aligned}$$

Výpočet účinnosti stroje při použití statorových plechů M800-50A při 6000 ot/min a výkonu 1620W.

Hmotnost zubů statoru

$$G_z = Q \cdot Z_u \cdot l_z \cdot L_s \cdot \gamma = 36 \cdot 4{,}1 \cdot 11 \cdot 35 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}426kq \tag{4.66}$$

Hmotnost jha statoru

$$G_{js} = \pi \cdot D_s \cdot V_{js} \cdot L_s \cdot \gamma = \pi \cdot 120{,}5 \cdot 4{,}5 \cdot 35 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}447kq \tag{4.67}$$

Hysterezní a vířivé ztráty zubů statoru

$$\Delta P_{fez} = K_d \cdot G_z \cdot \left[K_h \cdot \frac{f}{50} + K_v \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot B_z^2 = \\ = 2 \cdot 0{,}426 \cdot \left[3{,}05 \cdot \frac{600}{50} + 1{,}3 \cdot \left(\frac{600}{50} \right)^2 \right] \cdot 0{,}34^2 = 22W \tag{4.68}$$

Hysterezní a vířivé ztráty jha statoru

$$\Delta P_{fejs} = K_d \cdot G_{js} \cdot \left[K_h \cdot \frac{f}{50} + K_v \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] \cdot B_{js}^2 = \\ = 2 \cdot 0{,}447 \cdot \left[3{,}05 \cdot \frac{600}{50} + 1{,}3 \cdot \left(\frac{600}{50} \right)^2 \right] \cdot 0{,}29^2 = 16{,}8W \tag{4.69}$$

Ztráty v železe statoru

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{fez} + \Delta P_{fejs} = 22 + 16{,}8 = 38{,}8W \tag{4.70}$$

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{Cu} = m \cdot R_s \cdot I_f^2 = 3 \cdot 0{,}0297 \cdot 98^2 = 855{,}7W \tag{4.26}$$

Ztráty v buzení

$$\Delta P_b = U_{ss} \cdot i_m = 14 \cdot 2{,}914 = 40{,}8W \tag{4.8}$$

Ztráty třením kartáčů o kroužky

$$\Delta P_{tk} = 9{,}81 \cdot \mu_k \cdot F_k \cdot \frac{\pi \cdot D_k}{60} \cdot n = 9{,}81 \cdot 0{,}2 \cdot 1 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}027}{60} \cdot 6000 = 16{,}6W \tag{4.71}$$

Ztráty v ložiskách a ventilací

$$\Delta P_{tl} = 0{,}025 \cdot n = 0{,}025 \cdot 6000 = 150W \tag{4.72}$$

Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = \Delta P_{tk} + \Delta P_{tl} = 16{,}6 + 150 = 166{,}6W \tag{4.73}$$

Ztráty (bez usměrnění a regulátoru)

$$\Delta P_{cb} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} + \Delta P_b + \Delta P_m = 38{,}8 + 855{,}7 + 40{,}8 + 166{,}6 = 1101{,}9W$$

$$\Delta P_{cb\%} = \frac{\Delta P_{cb} \cdot 100}{P_{stř} + \Delta P_{cb}} = \frac{1101{,}9 \cdot 100}{2070 + 1101{,}9} = 34{,}74\% \tag{4.74}$$

Účinnost (bez usměrnění a regulátoru)

$$\eta_{stř} = 100 - \Delta P_{cb\%} = 100 - 34{,}74 = 65{,}26\% \tag{4.75}$$

Celkové ztráty (včetně usměrnění a regulátoru)

$$\Delta P_c = \Delta P_{cb} + \Delta P_u + \Delta P_{reg} = 1101{,}9 + 390 + 19{,}2 = 1511{,}1W$$

$$\Delta P_{c\%} = \frac{\Delta P_c \cdot 100}{P_{ss} + \Delta P_c} = \frac{1511{,}1 \cdot 100}{1620 + 1511{,}1} = 48{,}26\% \tag{4.76}$$

Celková účinnost (včetně usměrnění a regulátoru) [18]

$$\eta = 100 - \Delta P_{c\%} = 100 - 48{,}26 = 51{,}74\% \tag{4.77}$$

5 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ PROGRAMU RMXPRT

Tvar statorových plechů a rotorových drápků byl přejat z výkresů pro alternátor 14V/120A. Pomocí programu RMxprt byl ověřen analytický elektromagnetický návrh alternátoru. Hlavní program Maxwell obsahuje nástroj RMxprt, kde jsou přednastaveny různé typy elektrických točivých strojů. Následně pomocí zadání všech parametrů a analýzy, lze tyto stroje simulovat v různých režimech.

5.1 Zadání parametrů

V programu Maxwell byla tedy zvolena možnost Insert RMxprt Design, v menu Machine Type byla zvolena možnost Claw-Pole Alternator. V nastavení Machine bylo nastaveno: počet pólů, počet fází, třecí a ventilační ztráty, referenční rychlost otáčení.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Machine Type	Claw-Pole Synchronous Machine		
Number of Poles	12		
Number of Phases	3		
Frictional Loss	150	W	150W
Windage Loss	16.6	W	16.6W
Reference Speed	6000	rpm	

Obrázek 5-1 Záložka Machine

V záložce Stator byl zadán: vnější a vnitřní průměr statoru, délka statoru, počet drážek, typ drážek a materiál statoru. Jako materiál statoru byl vybrán plech M800-50A s nelineární magnetizační křivkou. Tento materiál byl do programu přidán z datasheetu. V záložce Slot byly zadány rozměry drážky: *Hs0* = 0,6 mm; *Hs1* = 0,4 mm; *Hs2* = 10 mm; *Bs0* = 2,6 mm; *Bs1* = 4,2 mm; *Bs2* = 6 mm; *Rs* = 1 mm. V záložce Winding bylo nastaveno: počet vrstev vinutí 1, počet paralelních větví 1, počet vodičů v drážce 5, počet vodičů v prameni 3 a průměr vodiče statoru 1,32 mm. [15]

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	125	mm	125mm
Inner Diameter	94	mm	94mm
Length	35	mm	35mm
Stacking Factor	0.98		
Steel Type	M800-50A		
Number of Slots	36		
Slot Type	3		
Skew Width	0		0

Obrázek 5-2 Záložka Stator

V záložce Rotor byl zadán: vnější a vnitřní průměr rotoru, délka rotoru, výška pouzdra rotoru a materiál rotoru. Pro rotor byl zvolen materiál Ocel 11331.3 s nelineární magnetizační křivkou.

V záložce Pole byla zadána velikost drápku. Poměrnou hodnotou: vnější šířka drápku 0,951 ~ 23 mm, vnitřní šířka drápku 0,2662 ~ 6,5 mm. Vnější tloušťka drápku 10 mm, vnitřní tloušťka drápku 4 mm, výška slotu 9,7 mm, tloušťka stěny 12 mm, délka pole 28 mm. V záložce Winding byl zadán: počet závitů 400, počet vodičů v prameni 1 a průměr vodiče rotoru 0,85 mm. V záložce Shaft byla zvolena magnetická hřídel. [17]

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Outer Diameter	93.4	mm	93.4mm
Inner Diameter	17	mm	17mm
Length	54	mm	54mm
Steel Type	Ocel 11331.3		
Yoke Diameter	49.5	mm	49.5mm

Obrázek 5-3 Záložka Rotor

5.2 Nastavení analýzy pro jmenovitý stav

U první analýzy pro jmenovitý stav a bylo nastaveno: typ generátoru, jmenovitý střídavý výkon, jmenovité výstupní fázové napětí, jmenovité otáčky a operační teplota.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	Setup1		
Enabled	☑		
Operation Type	Generator		
Load Type	Independent Generator		
Rated Apparent Power (kVA)	2.07		2.07
Rated Voltage	7	V	7V
Rated Speed	6000	rpm	6000rpm
Operating Temperature	100	cel	100cel

Obrázek 5-4 Analýza pro jmenovitý stav

5.3 Nastavení analýzy pro stav naprázdno

U druhé analýzy pro stav naprázdno (bez zatížení) bylo nastaveno: typ generátoru, nulový střídavý výkon, jmenovité výstupní fázové napětí, otáčky naprázdno a operační teplota.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	Setup2		
Enabled	☑		
Operation Type	Generator		
Load Type	Independent Generator		
Rated Apparent Power (kVA)	2.07e-005		2.07e-005
Rated Voltage	7	V	7V
Rated Speed	1800	rpm	1800rpm
Operating Temperature	100	cel	100cel

Obrázek 5-5 Analýza pro stav naprázdno

5.4 Výsledky analýzy pro jmenovitý stav

Při zadaném jmenovitém výstupním fázovém napětí 7 V a výstupním výkonu 2070 W byl vypočítán fázový proud 98,57 A a indukované fázové napětí 13,59 V. Pro tento stav byl také vypočítán potřebný budící proud 2,03 A. Proudové zatížení statoru je 60 082,2 A/m a proudová hustota statoru je 24,01 A/mm^2. Ventilační a třecí ztráty jsou 166,6 W, ty byly do programu zadány. Ztráty ve vinutí statoru jsou 790,19 W, ztráty v železe jsou 47,98 W a budící ztráty jsou 13,12 W. Celkové ztráty (bez ztrát usměrněním a regulátoru) jsou 1017,88 W a potřebný příkon je 3074,76 W. To odpovídá účinnosti (bez ztrát usměrněním a regulátoru) 67,03 %.

	Name	Value	Units	Description
1	RMS Phase Current	98.5714	A	
2	Apparrent Power	2070		VA.
3	Power Factor	1		
4	RMS Induced Phase Voltage	13.5914	V	
5	Exciting Current	2.03361	A	
6	Armature Thermal Load	1442.57		A^2/mm^3.
7	Specific Electric Loading	60082.2	A_per_meter	
8	Armature Current Density	24.01		A/mm^2.
9	Frictional and Windage Loss	166.6	W	
10	Iron-Core Loss	47.9675	W	
11	Armature Copper Loss	790.194	W	
12	Field Copper Loss	13.1226	W	
13	Total Loss	1017.88	W	
14	Output Power	2070	W	
15	Input Power	3074.76	W	
16	Efficiency	67.0362		%.
17	Synchronous Speed	6000	rpm	
18	Rated Torque	4.89363	NewtonMeter	
19	Power Factor Angle	0	deg	
20	Power Angle	0	deg	

Obrázek 5-6 Výsledky elektrických veličin pro jmenovitý stav

Ve vzduchové mezeře byla vypočítána magnetická indukce 0,20 T a magnetické napětí 64,76 A. Magnetická indukce ve jhu statoru je 0,32 T a v zubu statoru je 0,33 T. Magnetická indukce v pólu rotoru je 0,53 T, v boční stěně 0,32 T a ve sběrném disku rotoru 0,35 T. Celkové magnetomotorické napětí bylo vypočteno na 150,37 A a činitel sycení vyšel 1,16. Viz. *Obrázek 5-7*.

	Name	Value	Units	
1	Stator-Teeth Flux Density	0.333753	tesla	
2	Stator-Yoke Flux Density	0.315812	tesla	
3	Rotor-Pole Flux Density	0.528529	tesla	
4	Rotor-Shoe Flux Density	0.316533	tesla	
5	Rotor-Yoke Flux Density	0.352271	tesla	
6	Air-Gap Flux Density	0.202853	tesla	
7	Stator-Teeth Ampere Turns	1.34221		A.T.
8	Stator-Yoke Ampere Turns	1.81618		A.T.
9	Rotor-Pole Ampere Turns	2.40289		A.T.
10	Rotor-Shoe Ampere Turns	2.89774		A.T.
11	Rotor-Yoke Ampere Turns	3.92508		A.T.
12	Air-Gap Ampere Turns	64.7623		A.T.
13	Total Ampere Turns	77.1464		A.T.
14	One Pole Pair Excting MMF	150.368		A.T.
15	Leakage-Flux Factor	1.20003		
16	Stator Yoke Correction Factor	0.931741		Corr
17	Saturate Factor	1.16092		
18	Cogging Torque	0.0129283	NewtonMeter	

Obrázek 5-7 Výsledky magnetických veličin naprázdno

Vypočtená rozptylová reaktance statorového vinutí je 0,0969 Ω, odpor jedné fáze statorového vinutí při 100 °C je 0,0271 Ω a odpor budícího vinutí je 3,17 Ω.

	Name	Value	Units
1	Stator Winding Factor	1	
2	D-Axis Reactive Reactance Xad	0.646026	ohm
3	Q-Axis Reactive Reactance Xaq	0.32872	ohm
4	D-Axis Reactance X1+Xad	0.742895	ohm
5	Q-Axis Reactance X1+Xaq	0.425589	ohm
6	Armature Leakage Reactance X1	0.0968692	ohm
7	Zero-Sequence Reactance X0	0.0968692	ohm
8	Armature Phase Resistance R1	0.0271088	ohm
9	D-Axis Reactive Inductance Lad	0.171364	mH
10	Q-Axis Reactive Inductance Laq	0.0871956	mH
11	D-Axis Inductance L1+Lad	0.197059	mH
12	Q-Axis Inductance L1+Laq	0.112891	mH
13	Armature Leakage Inductance L1	0.0256953	mH
14	Zero-Sequence Inductance L0	0.0256953	mH
15	Field Leakage Inductance L1	138.874	mH
16	Field Resistance R1	3.1731	ohm

Obrázek 5-8 Výsledky parametrů pro jmenovitý stav

5.5 Výsledky analýzy pro stav naprázdno

Při stavu naprázdno je jmenovité fázové napětí 7 V a výstupní výkon 0 W. Vypočtený fázový proud je 0 A a indukované fázové napětí 7 V. Pro tento stav byl vypočítán potřebný budící proud 1,47 A. Ztráty ve vinutí statoru jsou 0 W, ztráty v železe jsou 37,96 W a budící ztráty jsou 6,89 W.

	Name	Value	Units	Description
1	RMS Phase Current	0.000985714	A	
2	Apparrent Power	0.0207		VA.
3	Power Factor	1		
4	RMS Induced Phase Voltage	7.00003	V	
5	Exciting Current	1.4736	A	
6	Armature Thermal Load	1.44257e-007		A^2/mm^3.
7	Specific Electric Loading	0.600822	A_per_meter	
8	Armature Current Density	0.0002401		A/mm^2.
9	Frictional and Windage Loss	27.2391	W	
10	Iron-Core Loss	37.9601	W	
11	Armature Copper Loss	7.90194e-008	W	
12	Field Copper Loss	6.89035	W	
13	Total Loss	72.0896	W	
14	Output Power	0.0207	W	
15	Input Power	65.2199	W	
16	Efficiency	0.028706		%.
17	Synchronous Speed	1800	rpm	
18	Rated Torque	0.346003	NewtonMeter	
19	Power Factor Angle	0	deg	
20	Power Angle	0	deg	

Obrázek 5-9 Výsledky elektrických veličin pro stav naprázdno

Vypočtená magnetická indukce ve vzduchové mezeře je 0,68 T a magnetické napětí je 215,87 A. Magnetická indukce ve jhu statoru je 1,05 T a v zubu statoru je 1,11 T. Magnetická indukce v pólu rotoru je 1,76 T, v boční stěně 1,05 T a ve sběrném disku rotoru 1,17 T. Celkové potřebné magnetomotorické napětí bylo vypočteno na 589,43 A a činitel sycení vyšel 1,37. Viz. *Obrázek 5-10*.

	Name	Value	Units	
1	Stator-Teeth Flux Density	1.11281	tesla	
2	Stator-Yoke Flux Density	1.05271	tesla	
3	Rotor-Pole Flux Density	1.7556	tesla	
4	Rotor-Shoe Flux Density	1.05266	tesla	
5	Rotor-Yoke Flux Density	1.17288	tesla	
6	Air-Gap Flux Density	0.676177	tesla	
7	Stator-Teeth Ampere Turns	2.48294		A.T.
8	Stator-Yoke Ampere Turns	3.00506		A.T.
9	Rotor-Pole Ampere Turns	60.5603		A.T.
10	Rotor-Shoe Ampere Turns	7.22955		A.T.
11	Rotor-Yoke Ampere Turns	11.1293		A.T.
12	Air-Gap Ampere Turns	215.874		A.T.
13	Total Ampere Turns	300.282		A.T.
14	One Pole Pair Excting MMF	589.434		A.T.
15	Leakage-Flux Factor	1.19864		
16	Stator Yoke Correction Factor	0.865086		Corre
17	Saturate Factor	1.36522		
18	Cogging Torque	0.143647	NewtonMeter	

Obrázek 5-10 Výsledky magnetických veličin pro stav naprázdno

5.6 Porovnání analytického výpočtu s RMxprt

Program RMxprt provádí výpočet také podle analytického výpočtu, ale přesný postup uživateli znám není. Při podrobnějším porovnání výsledků analytického výpočtu (av) s výpočtem pomocí RMxprt (rm), jsou zjištěny tyto skutečnosti, viz. *Tabulka 5-1*. Pro jmenovitý stav je rozdíl fázových proudů 0,57 A. Budící proud u rm vyšel 2,03 A oproti 2,914 A av. Hlavní důvod této odchylky bude způsob výpočtu magnetického napětí potřebného na reakci kotvy. To znamená, že program vypočítal menší potřebné celkové magnetomotorické napětí. U hodnot magnetických indukcí pro oba výpočty jsou jen s malé rozdíly. Budící ztráty vypočítané rm jsou 13,12 W, oproti 40,8 W av, jelikož rm neuvažuje ztráty na uhlíkových kartáčích a sběrných kroužcích. Na odlišnost budících ztrát mají také vliv různé hodnoty odporů budícího vinutí u rm a av. Program vypočítal 3,17 Ω a 2,87 Ω av. Odpor jedné fáze statorového vinutí vyšel u rm mírně menší 0,0271 Ω, oproti 0,0297 Ω av. Z toho plynou menší ztráty ve vinutí statoru 790,19 W rm, oproti 855,7 W av. Účinnost udávaná rm je z těchto důvodů o něco vyšší 67,03 %, oproti 65,26 % av. Program vypočítává účinnost pouze z hlediska střídavého napětí a proudu, tzn. bez uvažování ztrát usměrněním a ztrát regulátoru. Tudíž celkovou účinnost u něj nelze vypočítat. U av je celková účinnost 51,74 %. Hodnota rozptylové reaktance statorového vinutí vyšla u rm 0,0969 Ω a 0,0655 Ω u av. Rozdílnost je způsobena odlišností výpočtových vztahů.

Pro stav naprázdno vyšly magnetické indukce s malými odchylkami u obou výpočtů, např. magnetická indukce ve vzduchové mezeře je u rm 0,68 T a 0,53 T u av. Malá rozdílnost těchto indukcí způsobí menší rozdíly magnetického napětí buzení a tudíž i rozdílný budící proud u rm 1,47 A oproti 1,36 A u av.

Tabulka 5-1 Porovnání analytického výpočtu s výpočtem pomocí RMxprt

Veličina		Analytický výpočet		RMxprt	
		jm. stav	naprázdno	jm. stav	naprázdno
střídavý výkon	**[W]**	2070	0	2070	0
fázové napětí	**[V]**	7	7	7	7
fázový proud	**[A]**	98	0	98,57	0
budící proud	**[A]**	2,914	1,36	2,03	1,47
ztráty ve vinutí statoru	**[W]**	855,7	-	790,19	-
ztráty v železe	**[W]**	38,8	-	47,97	-
budící ztráty	**[W]**	40,8	-	13,12	-
ztráty třecí a ventilační	**[W]**	166,6	-	166,6	-
součet ztrát (bez usměrnění a regul.)	**[W]**	1101,9	-	1017,88	-
příkon	**[W]**	3171,9	-	3074,76	-
účinnost (bez usměrnění a regul.)	**[%]**	65,26	-	67,03	-
celková účinnost	**[%]**	51,74	-	-	-
mag. indukce vz. mez.	**[T]**	0,16	0,53	0,2	0,68
indukce v zubu statoru	**[T]**	0,34	1,12	0,33	1,11
indukce ve jhu statoru	**[T]**	0,29	0,98	0,32	1,05
indukce v pólu rotoru	**[T]**	0,48	1,6	0,53	1,75
indukce ve sběr. disku rotoru	**[T]**	0,36	1,2	0,35	1,17
magnetomotorické napětí	**[A]**	122,5	545,4	150,37	589,43
magnetomotorické napětí buzení	**[A]**	1165,8	545,4	812	589,43
rozptylová reaktance vinutí	**[Ω]**	0,0655	-	0,0969	-
odpor jedné fáze vinutí stat. (při 100 °C)	**[Ω]**	0,0297	0,0297	0,0271	0,0271
odpor vinutí rotoru (při 100 °C)	**[Ω]**	2,87	2,87	3,17	3,17
proudové zatížení kotvy	**[A/m]**	59734	-	60082,2	-
proudová hustota kotvy	**[A/mm^2]**	24	-	24,01	-

5.7 Porovnání výpočtů s měřením v laboratoři

Jelikož nejsou k dispozici změřené hodnoty v laboratoři pro alternátor 14V/120A, budou vypočtené hodnoty alternátoru porovnány s alternátory Bosch 14V/140A a Valeo 14V/140A. Parametry jsou porovnávány při 6000 ot/min. Měřením v laboratoři bylo zjištěno, že u alternátorů Boch a Valeo je maximální stejnosměrný proud o 3,9 A a o 5,2 A větší, oproti udávaným 140 A. Mechanické ztráty u alternátoru 120A byly vypočteny na 166,6 W. U alternátoru Bosch jsou mechanické ztráty o 22,7 W nižší a u alternátoru Valeo dokonce o 95,6 W nižší. Hlavní příčinou nižších mechanických ztrát je tvar lopatek ventilátorů a typ použitých ložisek. Ztráty v železe u alternátoru 120A byly vypočteny na 38,8 W av.. U alternátoru Bosch jsou ztráty v železe o 20,7 W nižší a u alternátoru Valeo o 20,5 W vyšší. Velikosti mechanických ztrát je ovlivněna použitými statorovými plechy, avšak na celkovou účinnost stroje volba statorových plechů výraznější vliv nemá. Celková účinnost vyšla u alternátoru 120A 51,74 %. U alternátoru Bosch

je celková účinnost 57,9 % a u alternátoru Valeo 51,2 %. Celkovou účinnost lze tedy významněji ovlivnit velikostí mechanických ztrát. Viz. *Tabulka 5-2*. [14]

Tabulka 5-2 Porovnání výpočtů s měřením v laboratoři

Parametry při 6000 ot/min		**14V/120A**		**Měření v laboratoři**	
		Analyt. výpočet	**RXxprt**	**Bosch 14V/140A**	**Valeo 14V/140A**
stejnosměrný proud	**[A]**	120	120,8	143,9	145,2
ztráty mechanické	**[W]**	166,6	166,6	154	71
ztráty v železe	**[W]**	38,8	47,97	18,1	59,3
celková účinnost	**[%]**	51,74	-	57,9	51,2

6 ZÁVĚR

6.1 Možnosti a předpoklady inovace

Procentuelní rozložení ztrát alternátoru 14V/120A při 6000 ot/min je: 56,6 % ztráty ve vinutí statoru; 25,8 % ztráty usměrněním; 9,9 % ztráty v ložiskách a ventilací; 2,7 % ztráty v buzení; 2,6 % ztráty v železe; 1,3 % ztráty v regulátoru a 1,1 % ztráty třením kartáčů o kroužky. Což představuje celkovou účinnost 51,74 %. Ztráty ve vinutí statoru a ztráty usměrněním představují dvě největší položky celkových ztrát. Jejich výrazné zmenšení je bez změny velikosti proudu, napětí a délkových rozměrů alternátoru takřka nemožné. Ztráty, které je možné zmenšit, aniž by bylo nutné zasahovat do délkových rozměrů alternátoru jsou ztráty v ložiskách, ventilační a dále ztráty v železe. Vhodnou úpravou tvaru a velikostí lopatek ventilátoru a použitím lepších ložisek lze eliminovat ztráty v ložiskách a ventilací až na 70 W při 6000 ot/min, viz [14]. Tento fakt, by přinesl u počítaného alternátoru 14V/120A zlepšení celkové účinnosti o 1,65 %. Dále použitím lepšího materiálu pro statorový plech např. M330-35HP (s koeficientem ztrát 1,22 W/kg [16]), lze ztráty v železe zmenšit na 30 W. To by zlepšilo celkovou účinnost o další 0,14 %. Celkově lze těmito dvěma úpravami zlepšit celkovou účinnost o 1,8 %, tedy na 53,54 %. Otázkou zůstává jestli toto malé zlepšení celkové účinnosti vynahradí např. zvýšenou náročnost výroby (tenčí statorový plech bude křehčí).

Pro rapidnější zvýšení účinnosti řádově o desítky procent, by bylo potřeba výrazně zmenšit ztráty ve vinutí statoru a ztráty usměrněním. To by bylo možné zmenšením výstupního proudu a zvýšením napětí alternátoru, což s sebou nese zvětšení délky statoru a rotoru pro dosažení malé hodnoty počtu vodičů v drážce, respektive malé hodnoty odporu statorového vinutí. Toto zvýšení účinnosti by přineslo také řadu problémů. Jednak zvětšení rozměrů alternátoru (což není úplně žádoucí), tak také nutnost předělání všech spotřebičů na vyšší napětí nebo použití snižujícího měniče za alternátorem. Další možností by bylo vytvoření dvou-napěťové palubní sítě 42 V a 12 V, kde by spotřebiče vyšších příkonů byly připojeny k 42 V a spotřebiče nižších příkonů k 12 V. Tyto řešení zvýšení účinnosti by, ale také výrazně zvýšily náklady na realizaci a složitost elektrické soustavy v automobilech.

Při otáčkách alternátoru nad 6000 ot/min dosahují mechanické ztráty vysokých hodnot a účinnost alternátoru výrazně klesá. Omezením otáček alternátoru či pouze ventilace přibližně na 6000 ot/min by bylo zajištěno dostatečné chlazení alternátoru při nízkých hodnotách třecích a ventilačních ztrát. Oproti 12000 ot/min by toto omezení přineslo zisk až několik stovek wattů, to by výrazně zvýšilo účinnost alternátoru při vysokých otáčkách motoru.

6.2 Analytický výpočet

U analytického elektromagnetického návrhu alternátoru s drápkovým rotorem 14V/120A je postup následující. Jako první se zvolí plech statoru, který stanoví rozměry pro výpočet. Následně je vypočítáno fázové výstupní napětí (7 V) a fázový proud (98 A) pro jmenovitý stav. Dále je zvolen magnetický tok přes vzduchovou mezeru ($0{,}875.10^{-4}$ Wb), tím se vypočte počet drážek ve statoru (5). Poté se zvolí magnetická indukce ve vzduchové mezeře (0,16 T) a vypočte se délka

železa statoru (35 mm). Vypočítá se odpor jedné fáze statoru (0,0297 Ω) a ztráty ve vinutí statoru (855,7 W). Dále se vypočte magnetická indukce v zubu statoru (0,34 T) a ve jhu statoru (0,29 T). Magnetická indukce v pólu rotoru zde byla zvolena (0,48 T) a indukce ve jhu rotoru také (0,36). Následně se vypočítá magnetomotorické (mm) napětí pro vzduchovou mezeru (95,6 A).

Poté se vytvoří tabulka, kde je mm napětí vzduchové mezery pro násobky jmenovitého fázového výstupního napětí. Tím se dostane charakteristika vzduchové mezery. Dále jsou v této tabulce vypočítány ostatní mm alternátoru a proveden jejich součet. Tím je možno získat charakteristiku mm napětí alternátoru pro jmenovitý stav.

Dále se vypočítá příčná složka reakce mm napětí (283 A) a z charakteristiky se odečte elektromotorické napětí (20,57 V). Vypočte se celková rozptylová reaktance statorového vinutí (0,0655 Ω). Díky tomu lze vypočítat úbytek na jalovém odporu (6,42 V) a vypočítat vnitřní fázový posun indukovaného napětí (69,81°). K charakteristice se přidá vektorový diagram a odečte se mm napětí potřebné k indukce E a pro kompenzaci příčné složky reakce (160 A). Poté se vypočte mm napětí potřebné pro kompenzaci podélné složky reakce (1005,8 A). Součtem těchto dvou napětí se dostane celkové potřebné mm napětí (1165,8 A).

Podělením celkového mm napětí (1165,8 A) jmenovitým budícím proudem (2,914 A) je vypočítán počet závitů budící cívky (400 z) a zvolí se průměr vodiče (0,85 mm). Dále se vypočítá odpor budící cívky (2,87 Ω). Díky tomu je možné vypočítat maximální budící proud (4,18 A). Tím se dostane maximální budící mm napětí (1672 A), která musí být větší, než maximální mm napětí alternátoru naprázdno (545,4 A) a než mm napětí pro jmenovitý stav (1005,8 A). Dále se provede kontrola, jestli se budící vinutí vejde do určeného prostoru.

Následně jsou vypočítány parametry alternátoru pro stav naprázdno. Vypočítá se výstupní fázové napětí (7 A) a frekvence naprázdno (180 Hz). Dále je spočítán magnetický tok naprázdno ($2{,}92.10^{-4}$ Wb), magnetická indukce ve vzduchové mezeře (0,53 T) a všechny ostatní indukce. Z magnetizačních křivek se odečtou hodnoty magnetických intenzit a vypočítá se celková mm napětí naprázdno (545,4 A). Poté se vypočítají celkové ztráty alternátoru ve jmenovitém stavu (1511,1 W) a celková účinnost (51,74 %).

6.3 Porovnání výpočtů

Výpočet promocí nástroje RMxprt slouží k ověření výsledků. Do programu byly zadány rozměry a parametry rotoru a statoru podle výkresů pro alternátor 14V/120A. Dále zde byly zadány ostatní parametry (počet fází, počet drážek statoru, počet pólů rotoru, jmenovité otáčky, materiály statoru a rotoru, průměry vodičů obou vinutí a počet závitů obou vinutí) podle analytického výpočtu. Porovnáme-li výsledky analytického výpočtu s výpočtem RMxprt pro jmenovitý stav jsou největší rozdíly u ztrát ve vinutí statoru a ve velikosti budícího proudu. Rozdílnost ztrát ve vinutí statoru o 61,51 W je způsobena odlišnými hodnotami vypočteného fázového proudu a odporu vinutí statoru. Rozdílnost budícího proudu je způsobena odlišným výpočtem reakce kotvy. Program RMxprt vypočetl o 0,884 A nižší budící proud, což odpovídá magnetomotorickému napětí 353,6 A. To znamená, že program vypočítal celkové potřebné magnetomotorické napětí 812 A, oproti analytickému výpočtu 1165,8 A. Tyto rozdíly mají vliv na účinnost (bez ztrát usměrněním a regulátoru) RMxprt 67,03 % a analytický výpočet 65,26 %, viz *Tabulka 5-1*.

Díky ověření pomocí RMxprt je možné konstatovat, že je analytický elektromagnetický návrh správný. RMxprt má minimálně jeden nedostatek a to, že už neuvažuje usměrnění čili ztráty způsobené usměrněním a ztráty v regulátoru napětí.

Jsou-li porovnány vypočítané hodnoty navrhnutého alternátoru 14V/120A se změřenými hodnotami alternátorů 14V/140A Bosch a Valeo, lze říci, že vypočtené hodnoty přibližně odpovídají skutečným hodnotám. Vypočítaná účinnost alternátoru 14V/120A je 51,74 % a vypočítané účinnosti podložené měřením v laboratoři pro alternátory 14V/140A jsou 57,9 % Bosch; 51,2 % Valeo při 6000 ot/min, viz. *Tabulka 5-2*.

LITERATURA

[1] Princip synchronního generátoru. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Princip_Synchronního_generátoru.JPG

[2] Alternátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Alternátor

[3] VÁŇA, Petr. Alternátor. *Škoda TechWeb* [online]. 2002 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=380

[4] ŠŤASTNÝ, Jiří a Branko REMEK. *Autoelektrika a autoelektronika*. 4. vyd. Praha: Nakladatelství T. Malina, 1998. ISBN 80-901975-9-0.

[5] T. Denton, Automobile Electrical and Electronics Systems" Butterworth-Heinemann, Oxford 2001 ISBN 0-340-73195-8.

[6] Alternátory. [online]. 2005 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://media0.nolimit.cz/files/media0:50fcda8b5e2a3.pdf.upl/Alternatory.pdf

[7] KUBÍN, Pavel. *Elektrická zařízení osobních automobilů*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1973. ISBN 2-687.904-73.

[8] Dynamo a alternator. *Automobilová elektrotechnika* [online]. 2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat430/data/ae/Dynamo a alternator.pdf

[9] Generátory, alternátory. In: *Coptel* [online]. 2013, 2013-07-31 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=36365&docGroup=8505&cmd=0&instance=4

[10] JARMARA, Martin a Čestmír ONDRŮŠEK. Výpočet ztrát univerzálního motoru metodou konečných prvků. *Elektrorevue* [online]. 2004, 2004-04-26 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/04026/index.html

[11] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958, 714, [1] s.

[12] Yeadon H., Handbook of Small Electric Motors,.Mc Graw Hill Book Company, 2001, ISBN 0-07-072332-X.

[13] HÁJEK, Vítězslav a Čestmír ONDRŮŠEK. *Metody zvýšení účinnosti a optimalizace automobilových elektrických strojů*. Brno, 2000. Výukový materiál. VUT Brno.

[14] HÝSEK, Roman a Radomil KRAJCAR. *Benchmarkingová studie provedení alternátorů vyšších výkonů*. Kroměříž, 2008. Zpráva z měření. Magenton.

[15] Typical data for SURA M800-50A. *Cogent* [online]. 2009 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/800-50.pdf?OpenElement

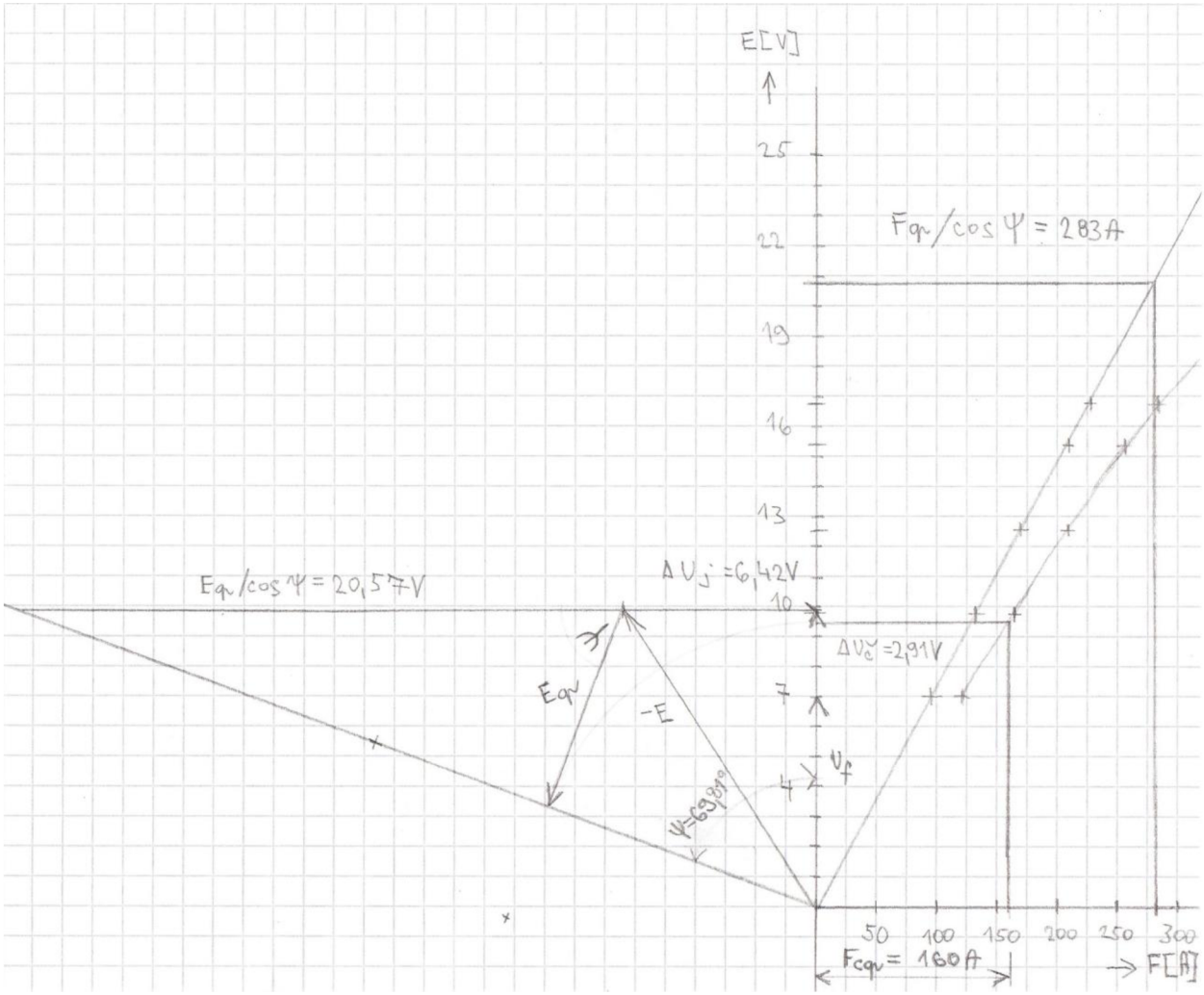
[16] Typical data for SURA M330-35HP. *Cogent* [online]. 2009 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/03A8B2433FAE16C4C1256AA8002280E6/$FILE/330-35hp.pdf?OpenElement

[17] HÁJEK, Vítězslav. *B-H křivka Ocel 11 331.3*. VUT Brno, 2000.

[18] HÁJEK, Vítězslav. *Výpočet trojfázového alternátoru s drápkovým rotorem*. VUT Brno, 2000.

PŘÍLOHY

Příloha 1 Charakteristika s vektorovým diagramem



Příloha 2 B-H charakteristiky

B	M800-50A	M330-35HP	Ocel 11331.3
	H	H	H
[T]	[A/m]	[A/m]	[A/m]
0	0	0	0
0,1	84,5	30,2	40
0,2	107	39,0	64
0,3	121	44,9	83
0,4	133	50,2	103
0,5	145	55,5	111
0,6	156	61,2	123
0,7	168	67,8	135
0,8	180	76,0	151
0,9	194	86,5	175
1	209	101	199
1,1	228	123	230
1,2	254	160	278
1,3	304	238	341
1,4	402	466	452
1,5	660	1293	659
1,6	1480	3344	1310
1,7	3710	6672	2300
1,8	7300	11361	3350
1,9	-	-	4360
2	-	-	6000