

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

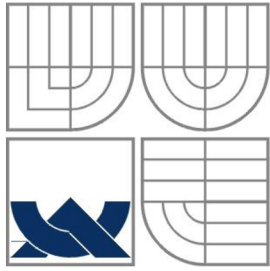
NÁVRH DRÁPKOVÉHO PROVEDENÍ AUTOMOBILOVÉHO ALTERNÁTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTECH SZEKERES

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

NÁVRH DRÁPKOVÉHO PROVEDENÍ AUTOMOBILOVÉHO ALTERNÁTORU

CLAW-POLE AUTOMOTIVE ALTERNATOR DESIGN

BAKALÁŘSKA PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

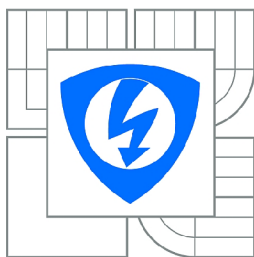
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTECH SZEKERES

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Vojtech Szekeres

ID: 146965

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh drápkového provedení automobilového alternátoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte drápkové provedení automobilových alternátorů - výhody, nevýhody, možnosti vývoje a inovace.
2. Uveďte základní charakteristiky alternátorů a způsoby jejich měření.
3. Proveďte elektromagnetický návrh automobilového alternátoru s využitím 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: 2.6.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práca sa zaoberá alternátormi používanými v osobných automobiloch, ich konštrukciou, funkciou, typickými priebehmi a charakteristikami a návrhom. Alternátory sú špecifické lichobežníkovým tvarom pólov na rotore, vytvárajú priebeh podobný obdĺžnikovému, namiesto sínusového. Ten je viac žiaduci pre jednoduché usmernenie na jednosmerný prúd, ktorý je používaný v elektrickej sieti automobilov. Kvôli tvaru pólov sú tieto alternátory nazývané aj drápkové. Samotný návrh pozostáva z vytvorenia alternátoru v programe Ansys Maxwell podľa meraného skutočného alternátoru. Výsledky sú porovnané numericky aj graficky.

Abstract

The thesis deals with the alternators used in passenger cars, their design, function and typical behaviours and characteristics and design. Alternators are specific with the trapezoidal shape of rotor poles, which produce a waveform similar to a square wave instead of a sinusoid. This is more desirable for simple rectification to direct current, which is used in the electrical distribution system of automobiles. Because of the shape of the poles, these alternators are also called the claw-pole. The design itself consists of creating an alternator in Ansys Maxwell software in compliance with real measured alternator. The results are compared numerically and also graphically.

Kľúčové slová

alternátor; dynamo; zdroj jednosmerného prúdu; drápkový alternátor; automobil; otáčky počiatku nabíjania; ostrovná sieť; usmerňovač; stator; rotor; regulátor; dobíjanie batérie; Maxwell; RMxprt; návrh alternátoru;

Keywords

alternator; dynamo; direct current supply; claw-pole alternator; automobile; cut-in speed; island power system; rectifier; stator; rotor; regulator; battery charging; Maxwell, RMxprt; alternator design;

Bibliografická citácia

SZEKERES, V. *Návrh drápkového provedení automobilového alternátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 41 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Návrh drápkového provedení automobilového alternátoru som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zbierky zákonov ČR, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zbierky zákonov ČR.

V Brne dňa

Podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce, ktorým je prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, Csc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. MARTIN MACHovi za odbornú pomoc pri návrhu a práci v programe Ansys Maxwell.

V Brne dňa

Podpis autora



Obsah

Zoznam obrázkov.....	8
Zoznam tabuliek.....	9
1. Úvod.....	10
2. Konštrukcia	11
2.1. Stator	12
2.2. Rotor.....	12
2.3. Usmerňovací a regulačný blok	13
2.4. Chladenie.....	13
3. Regulácia.....	14
3.1. Napäťová regulácia	14
1.1. Prúdová regulácia	16
2. Charakteristické priebehy	17
2.1. Prúdovo otáčková charakteristika	17
2.2. Voltampérová charakteristika	18
2.3. Krivka účinnosti.....	18
2.4. Ďalšie charakteristiky.....	19
3. Činnosť alternátora	20
4. Vývoj	21
4.1. Účinnosť.....	21
4.2. Použité materiály.....	24
4.3. Menovité napätie siete	24
5. Návrh alternátora v programe ANSYS Maxwell 16.0.2.....	25
5.1. O programe Maxwell a jeho nástroji RMXprt.....	25
5.2. Namerané hodnoty	28
5.3. Hodnoty z programu Maxwell.....	29
5.4. Spracovanie výsledkov	31
Záver	33
Použitá literatúra	34
Prílohy	35
Príloha A - Tabuľka nameraných hodnôt	35
Príloha B - Tabuľka vypočítaných hodnôt	36
Príloha C - Návrhový list (design sheet) navrhnutého alternátora	37



Zoznam obrázkov

Obr. 1: Alternátor z vozidla Cadillac SRX [1].....	10
Obr. 2: Konštrukcia alternátoru [2]	11
Obr. 3: Konštrukcia rotoru [3].....	12
Obr. 4: Zapojenie šesťdiódového a deväťdiódového usmerňovača [1]	13
Obr. 5: Schéma zapojenia regulátoru Bosch [2].....	15
Obr. 6: Princíp regulácie napätia spínaním budiaceho prúdu [2]	16
Obr. 7: Prúdovo otáčková charakteristika alternátoru.....	17
Obr. 8: Závislosť výstupného napätia na záťažovom prúde alternátoru	18
Obr. 9: Závislosť účinnosti alternátoru na otáčkach.....	18
Obr. 10: Závislosť mechanického príkonu na otáčkach	19
Obr. 11: Závislosť budiaceho prúdu na otáčkach	19
Obr. 12: Závislosť napätia na budiacom prúde.....	20
Obr. 13: Bezkrúžkový alternátor [1].....	23
Obr. 14: Uloženie statorových vinutí; vľavo ručne vinuté, vpravo flat pack [7]	24
Obr. 15: RMxpřt - výber typu stroja.....	26
Obr. 16: RMxpřt - prostredie pre zadávanie parametrov	26
Obr. 17: RMxpřt - rotor	27
Obr. 18: RMxpřt - nastavenie riešenia	27
Obr. 19: Prúdovo otáčková charakteristika alternátoru.....	28
Obr. 20: Mechanický príkon a účinnosť v závislosti na otáčkach alternátoru	29
Obr. 21: Prúdovo otáčková charakteristika pri rôznom H_{so}	30
Obr. 22: Definovanie nového materiálu v knižnici Maxwell.....	30
Obr. 23: Prúdovo otáčkové krivky meraného a navrhnutého alternátoru.....	31
Obr. 24: Krivky účinnosti meraného a navrhnutého alternátoru	32



Zoznam tabuliek

Tab. 1: Namerané hodnoty alternátoru Magneton typ 9 510 110	35
Tab. 2: Vypočítané hodnoty navrhnutého alternátoru z programu Maxwell	36

1. Úvod

Alternátor je točivý stroj, prevádzajúci kinetickú energiu rotačného pohybu na elektrickú vo forme striedavého prúdu. Tento prúd je buď jednofázový, alebo trojfázový. V automobilovej technike sa využívajú trojfázové alternátory. O tejto problematike bude však pojednávané až neskôr. Alternátory patria medzi synchronne stroje. Tie sa podľa konštrukcie rotoru delia na alternátory s hladkým rotorom a s vyniklými pólmi, resp. turboalternátory a hydroalternátory. Už z názvu je zrejmé, že prvé zmienené sa točia veľmi vysokými otáčkami (3000 ot./min pri 50 Hz a jednom pólovom páre), preto im musí byť aj ich konštrukcia prispôsobená. Axiálna dĺžka turboalternátorov je väčšia ako radiálna, čo znamená, že pre ich umiestnenie je potreba väčšieho priestoru. Hydroalternátory sú predstaviteľmi presne opačného princípu. Prúd sa, vďaka väčšiemu počtu pólových dvojíc, indukuje už pri nízkych otáčkach (x100 ot./min), takže môžu byť použité v sústavách s väčším rozsahom otáčok, čo je ideálne pre spaľovacie motory.



Obr. 1: Alternátor z vozidla Cadillac SRX [1]

Automobilový alternátor musí podľa Dentona [1] pre správnu funkciu pri bežiacom motore spĺňať niekoľko kritérií:

- vytvárať dostatočný prúd pre zásobovanie všetkých záťaží
- vytvárať dostatočný prúd pre dobíjanie batérie
- vytvárať prúd už pri otáčkach voľnobehu
- dodávať konštantné napätie za akýchkoľvek podmienok
- mať dobrý pomer výkonu k hmotnosti
- byť spoľahlivý, tichý a odolný voči nečistotám
- nevyžadovať údržbu
- indikovať správnu funkciu

V počiatkoch automobilovej techniky boli inštalované jednosmerné dynamá. Hlavný dôvod bola oveľa nižšia cena ako u alternátorov, kvôli vysokej cene polovodičových súčiastok použitých na usmernenie striedavého prúdu. Alternátory sa začali v motorových vozidlách používať v 40. rokoch 20. storočia v USA v automobiloch používaných na ťahanie obytných prívesov. Ako usmerňovač boli používané mostíkové usmerňovače vo forme selénových dosiek, ktoré však boli veľmi rozmerné a vyžadovali intenzívne chladenie. Vývoj polovodičovej techniky umožnil v 60. rokoch výrobu výkonných diódových usmerňovačov a ich použitie v alternátoroch pre osobné automobily. V Československu sa alternátory začali používať v automobiloch až neskôr, v polovici roku 1973 automobilkou Škoda. V počiatkoch boli návrhy použiť jednofázový alternátor, od ktorého sa upustilo, pretože táto konštrukcia nebola dostatočne výkonná pre potreby motorových vozidiel.

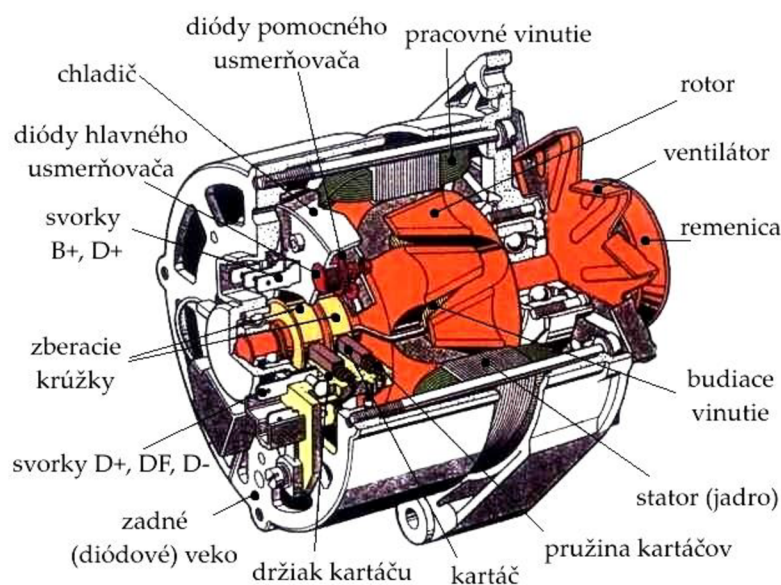
Hlavné výhody alternátoru oproti dynamu spočívajú v:

- malých rozmeroch a hmotnosti
- vysokom mernom výkone (dynamo 300W / 6,5kg ~ alternátor 450W / 3kg)
- nízkych otáčkach počiatku nabíjania (900-1100 ot./min)
- vysokých maximálnych otáčkach
- obmedzení maximálneho prúdu
- blokování spätného prúdu diódami

Napriek tomu majú alternátory aj isté nevýhody:

- veľký radiálny rozmer
- dĺžka rotoru je väčšia ako statoru
- budiaca cievka musí vytvárať celý magnetický tok
- veľké magnetické rozptylové toky
- nízka účinnosť (<50%)

2. Konštrukcia



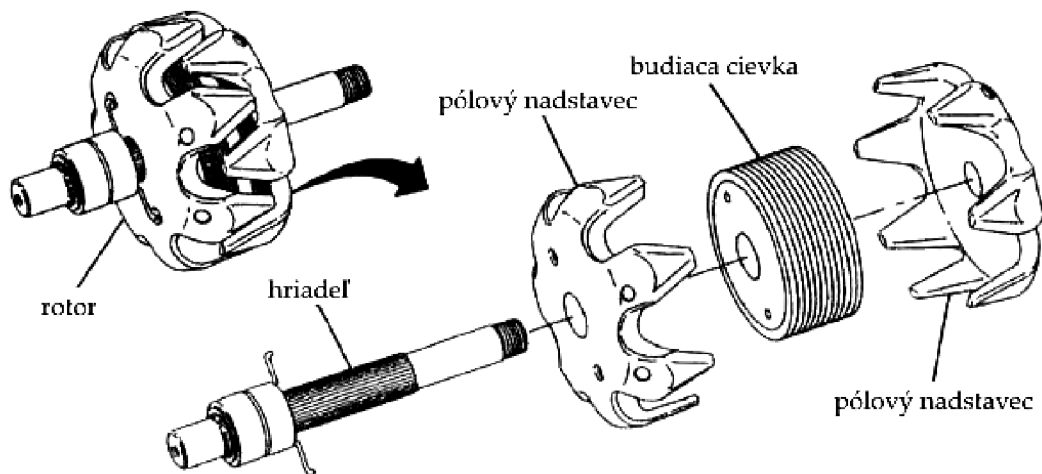
Obr. 2: Konštrukcia alternátoru [2]

2.1. Stator

Jednou z hlavných súčastí alternátora je stator. Je to netočivá časť stroja, obsahujúca trojfázové vinutie, v ktorom je indukované striedavé napätie, ktorého tvar v časovom priebehu určuje tvar pólov. Stator je, kvôli obmedzeniu vírivých prúdov, ktoré spôsobujú v strojoch značné straty, zložený zo vzájomne odizolovaných drážkovaných dynamových plechov. Najčastejšie je pre dosiahnutie jednej drážky na pól a fázu ($q = 1$) zvolených 36 drážok. Práve v týchto drážkach je navinuté trojfázové pracovné vinutie, ktorých fázy sú vždy pootočené o 120° elektrických. Vinutie tvorí len niekoľko závitov hrubého medeného drôtu o priemere približne 1 až 2 mm v závislosti od výkonovej, resp. prúdovej zaťažiteľnosti. Spojenie vinutí je možné do trojuholníka alebo do hviezdy, avšak vo veľkej väčšine je používané zapojenie do hviezdy, kedy je stred pracovného vinutia vyvedený a pripojený na spínač kontrolky nabitia batérie. Zapojenie do trojuholníka možno vidieť v alternátoroch vozidiel Škoda Favorit, Forman alebo Pick up (2).

2.2. Rotor

Rotor (obr.3) vytvára hlavné magnetické pole. V dutine statoru sa otáča s vôľou 0,2-0,3mm. Poháňa ho remenica s klinovým alebo drážkovým remeňom, ktorým je spojená priamo s kľukovým hriadeľom motoru s prevodom 1:2 až 1:3. Rotor je zložený z dvoch pólových hviezdicových nastavcov, ktoré sú pri výrobe väčšinou lisované za studena, prípadne frézované. Jeden nastavec obsahuje póly len jednej polarít. Póly majú lichobežníkový tvar a v automobilových alternátoroch tvoria najčastejšie 6 párov. Podľa ich tvaru sú tieto alternátory nazývané aj drápkové (ang. claw-pole). Tento tvar je použitý z dôvodu, že pre jednoduchšie usmernenie je prijateľnejší obdĺžnikový priebeh prúdu a práve priebeh podobného tvaru poskytuje takýto tvar pólov. Kvôli zníženiu magnetického rušenia sú, v zmysle otáčania, zadné hrany týchto pólov skosené. Toto riešenie znižuje spätné účinky kotvy, ktoré pri elektrickom zaťažení alternátora vyvolávajú deformácie magnetického poľa vo vzduchovej medzere a sú príčinou tohto rušenia.



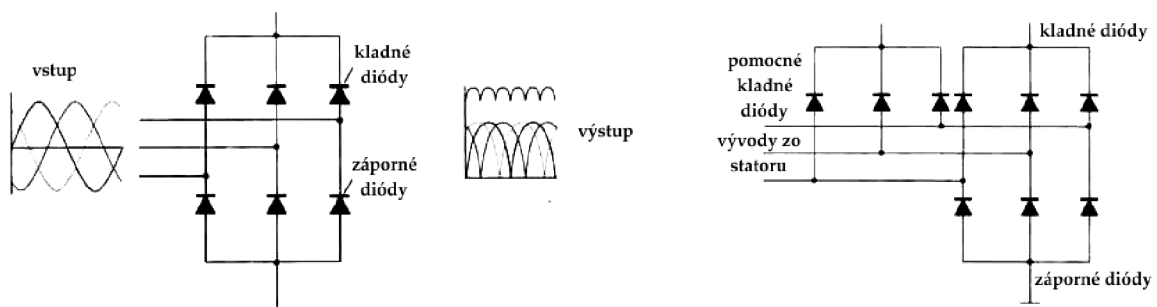
Obr. 3: Konštrukcia rotoru [3]

Medzi pólové nadstavce je do stredu na prstencovú cievku navinuté budiace vinutie. Jeho konce sú pripojené na **zberné krúžky**, cez ktoré je zmenou budiaceho prúdu regulátorom ovládané budenie rotoru (magnetický tok) a tým ovládané napätie na výstupe alternátoru.

2.3. Usmerňovací a regulačný blok

Regulátor zaisťuje konštantné napätie pri zmenách záťaže batérie, resp. alternátoru a predovšetkým pri zmenách otáčok motoru automobilu. O regulácii je venovaný samostatný odstavec v tejto práci, takže bude obsiahnejšie vysvetlená neskôr.

Alternátor je zdrojom striedavého prúdu a preto je potrebné tento prúd, pred vstupom do rozvodnej sústavy automobilu, usmerniť. **Usmerňovač** tvorí takisto súčasť alternátoru a s regulátorom a držiakom uhlíkov tvoria jeden blok, ktorý je chránený pred nepriaznivými vplyvmi plastovým krytom na konci alternátoru. K usmerneniu sú používané väčšinou kremíkové, resp. Zenerove diódy, ktoré obmedzujú napäťové špičky a chráni spotrebiče vo vozidle pred prepätím. Používajú sa v šesťdiódovom ako trojfázový mostík alebo deväťdiódovom zapojení, kde sú pridané ďalšie tri pomocné diódy pre regulátor. Tieto dve riešenia sa líšia napájaním budiaceho vinutia. Šesťdiódové zapojenie napája budenie priamo z batérie a deväťdiódové cez už spomínaný „malý usmerňovač“ v podobe pomocných diód. Pri šesťdiódovom zapojení však alternátor musí mať svoje statorové vinutie zapojené do hviezdy s možným vyvedeným stredom hviezdy, ktorý je pripojený na spínač kontrolky nabitia. Pri použití deväťdiódového zapojenia možno vinutie statoru zapojiť do hviezdy alebo do trojuholníka. V prípade trojuholníka je kontrolka nabíjania zapojená na uzol pomocných diód medzi konektory D+ alternátoru a B+ batérie.



Obr. 4: Zapojenie šesťdiódového a deväťdiódového usmerňovača [1]

2.4. Chladenie

Diódový usmerňovač ako aj samotné vinutie alternátoru spôsobuje veľké straty vo forme tepla, ktoré sa prejavujú zahrievaním týchto častí. Preto je potrebné celý alternátor účinne chladiť. Chladenie je vzduchové zabezpečené **ventilátormi** umiestnenými na hriadeli rotoru. Staršie alternátory obsahujú jeden chladič na strane remenice na prednom veku, ktorý samotný musí chladiť celý alternátor. Vzduch vstupuje cez zadné veko, prúdi cez blok s usmerňovačom a regulátorom okolo zberacích krúžkov, vzduchovou medzerou medzi statorom a rotorom pozdĺž celého stroja a cez vetracie otvory von. Chladenie však nie je dostatočné, pretože vzduch je často už príliš ohriaty na to, aby mohol ohriať tie najvzdialenejšie časti. Modernejšie alternátory sa



konštruujú s dvoma vnútornými ventilátormi, kde vzduch prúdi z oboch koncov alternátora cez vinutie a blok usmerňovaču a vystupuje vetracími otvormi radiálne k hriadeľu na boku alternátora. Tieto alternátory sa nazývajú aj **kompaktné**. Výhodou tejto konštrukcie je zníženie aerodynamickej hlučnosti ventilátorov. Ďalšia značná výhoda týchto alternátorov vďaka dvom ventilátorom je menšia vzduchová medzera medzi statorom a rotorom. U klasických alternátorov je táto medzera 0,35mm. Kompaktné alternátory umožnili túto medzeru znížiť až na 0,2mm. Toto riešenie umožňuje zvýšiť výkon a indukčnosť, čo však má za následok aj väčšie straty. Kompaktné alternátory majú aj viacero ďalších inovatívnych konštrukčných riešení, ako napríklad podstatne menší priemer zberacích krúžkov, čo prináša menšiu obvodovú rýchlosť a tým pádom aj menšie opotrebenie krúžkov a uhlíkov. Alternátory tohto druhu sa inštalujú už do všetkých nových automobilov.

3. Regulácia

Zaťaženie alternátora sa neustále mení pôsobením väčšieho množstva spotrebičov a zmenami otáčok spaľovacieho motoru. Aby alternátor bol schopný dodávať konštantné napätie pri zmenách záťaže, je vybavený regulátorom napätia. Je to nedielna súčasť alternátora. Najnovšie regulátory sa vyrábajú ako integrované obvody. Spolu s usmerňovačom je zabudovaný v jednom bloku priamo na telese alternátora. Oddelene od alternátora boli inštalované len vibračné regulátory, ktoré možno dnes nájsť už len u niektorých jednostopových vozidlách.

3.1. Napäťová regulácia

Napätie je regulované na úrovniach 13,5 až 14,2 V, kde hornú hranicu určuje hranica plynovacieho napätia batérie 14,4V. Táto hranica nesmie byť prekročená, pretože plynovanie môže nebezpečne natlakovať batériu a môže dôjsť až k pretrhnutiu obalu a úniku elektrolytu v podobe kyseliny sírovej (H_2SO_4).

Regulácia tohto napätia môže byť buď jednostupňová alebo dvojstupňová.

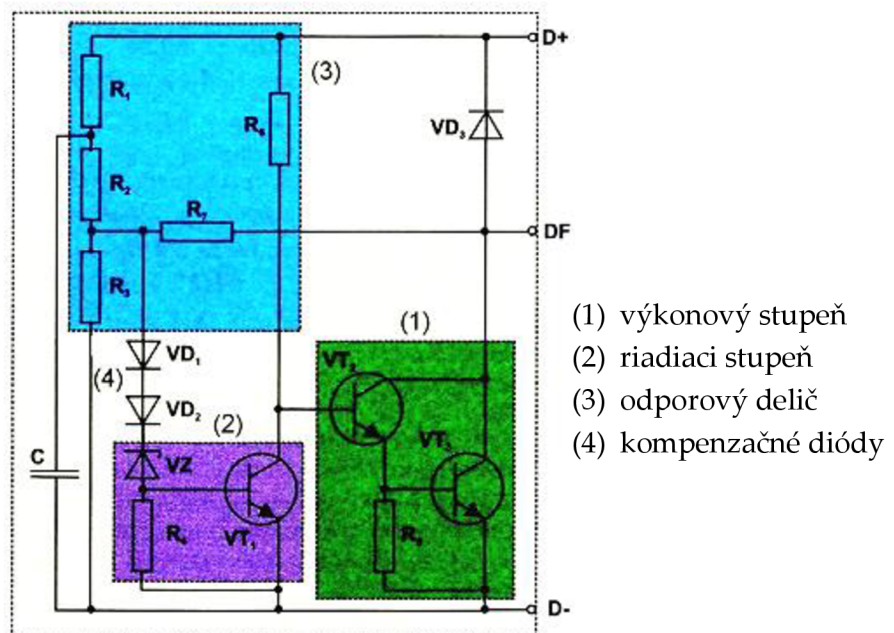
3.1.1. Dvojstupňová regulácia

Dvojstupňovú reguláciu tvorí už spomínaný vibračný regulátor. Tieto regulátory však boli používané výhradne u dynám a prvých alternátoroch. Pracuje na elektromagnetickom princípe, ktorý je jednoducho a presne popísaný Kubínom [4]: *Do série s budiacim vinutím je zapojený rezistor spojený nakrátko kontaktmi ovládanými elektromagnetom, ktorého ťah je závislý na regulovanej hodnote (tu na napätí dynama). Pri malých otáčkach dynama, kedy je napätie malé, sú kontakty spojené a budiace vinutie je pripojené na napätie dynama. Keď sa otáčky zvýšia a napätie vzrastie tak, že ťah elektromagnetu premôže pružinu pridržiujúcu kontakty v styku, zaradí sa regulačný rezistor do budenia a napätie aj magnetický ťah sa zmenšujú, kým pružina pôsobiaca proti magnetickému ťahu nevráti kontakty do styku. Celý cyklus sa potom opakuje, kontakty sa spínajú a rozopínajú v rýchlom slede a udržiavajú potrebný priemerný budiaci prúd.* Bohužiaľ mal značné nevýhody ako veľké rozmery aj hmotnosť, kvôli čomu musel byť umiestnený len mimo alternátor, nemohol dosahovať vysokej

frekvencie spínania kontaktov, čo obmedzovalo presnosť regulácie. Mechanické kontakty spôsobovali aj ich opalovanie a iskrenie, čo vyžadovalo istú údržbu.

3.1.2. Jednostupňová regulácia

Jednostupňová regulácia je tvorená polovodičovými súčiastkami vo forme integrovaných obvodov, ktoré tvoria obvykle jeden celok s držiakom uhlíkov v alternátore. Hlavnou súčiastkou v integrovaných obvodoch sú tranzistory, ktoré v regulátore pracujú v spínacom režime. To znamená, že pracujú ako mechanický spínač, avšak bez nežiadúcich javov, ktoré mechanický spínač sprevádza ako iskrenie, opotrebenie. Taktiež má schopnosť spínať vo vysokých frekvenciách, takže presnosť regulácie je oveľa vyššia ako u relé. Medzi ďalšie výhody patrí to, že rozmery samotného regulátora sú oveľa menšie takisto ako aj hmotnosť.



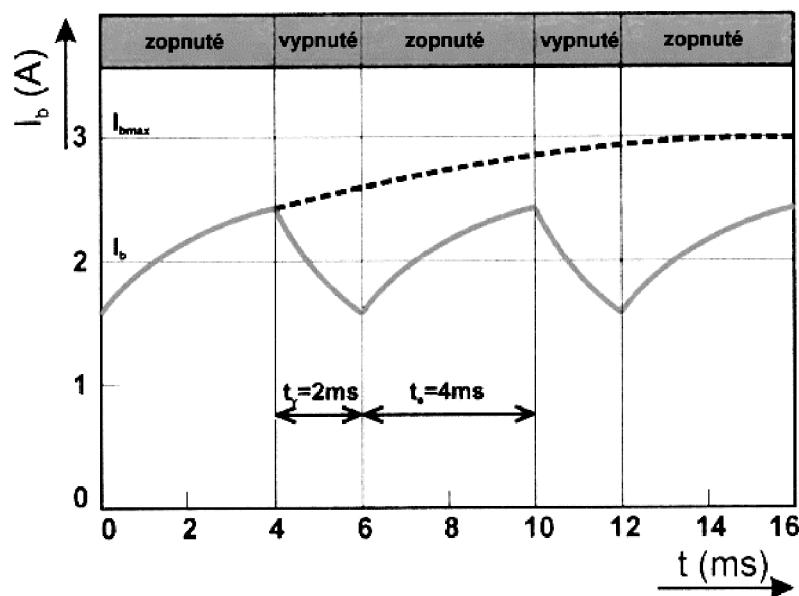
Obr. 5: Schéma zapojenia regulátoru Bosch [2]

Samotné zapojenie regulátoru bude jednoducho vysvetlené na príklade od firmy Bosch na obr.6. Tento regulátor je osadený tromi tranzistormi NPN, jeden riadiaci a dva v Darlingtonovom zapojení ako výkonový stupeň (1). Báza tranzistoru v riadiacom stupni (2) je napájaná z odporového deliču (3) cez Zenerovu diódu VZ, ktorá slúži ako zdroj referenčného napätia a ovláda okamih otvorenia a uzavretia riadiaceho tranzistoru VT_1 . Diódy zapojené do série so Zenerovou diódou sú použité ako teplotná kompenzácia (4). So zvyšujúcou sa teplotou vodivosť Zenerovej diódy v závernom smere klesá a naopak vodivosť diódy v priepustnom smere rastie, čím sa vyrovnáva tepelné pôsobenie. Kondenzátor C, značne veľkej kapacity, slúži ako ochrana pred napäťovými špičkami a znižuje rozdiel medzi jednosmernou a efektívnou zložkou napätia, t.j. vyhladzuje zvlnené napätie z alternátoru. Rozdiel týchto zložiek môže mať vplyv aj na kontrolku nabíjania. Výkonový stupeň regulátoru má funkciu spínaču, ktorého rýchlosť je ešte zvýšená rezistorom R_7 . Dióda VD_3 pracuje ako ochrana pred napäťovými špičkami, ktoré vznikajú vplyvom vlastnej indukčnosti budiaceho vinutia pri prerušení obvodu. Samotné budiace vinutie je zapojené medzi svorky D+ a DF.

Ak je napätie dodávané alternátorom nižšie než Zenerove napätie diódy VZ, medzi bázou a emitorom tranzistoru VT₁ nie je požadované napätie a je uzavretý. Báza tranzistoru VT₂ má oproti emitoru kladné napätie dané úbytkom na rezistore R₆. Tým pádom je tranzistor zopnutý, čo zaisťuje potrebné napätie aj na báze tranzistoru VT₃, ktorý je taktiež otvorený. Budiaci prúd ide teda od svorky D+ cez budiace vinutie na svorku DF, ďalej tranzistorom VT₃ až k svorke D-. Budenie je v tomto prípade **maximálne**.

Ak je však napätie dodávané alternátorom väčšie než Zenerove napätie, dióda VZ sa stane vodivou, čo spôsobí zopnutie tranzistoru VT₁. To spôsobí kaskádový efekt, pri ktorom sa uzavrie tranzistor VT₂ (zopnutie VT₁ spôsobí uzemnenie báze VT₂ a jeho uzavretie) a následne aj tranzistor VT₃ (uzavretie VT₂ zamedzí prístupu kladného napätia na bázu VT₃). Tým je budiaci obvod prerušený a budenie je **minimálne**. Je dané len remanentným magnetizmom drápkových pólov.

3.1.3. Princíp regulácie napätia



Obr. 6: Princíp regulácie napätia spínaním budiaceho prúdu [2]

Regulácia napätia prebieha zmenou intenzity magnetického poľa. Keďže je intenzita závislá na veľkosti budiaceho prúdu, reguluje sa práve veľkosť tohto prúdu. Ako je z obr.5 vidno, regulátor periodicky spína a vypína budiaci obvod a tým mení veľkosť budiaceho prúdu a zosilňuje alebo zoslabuje tým magnetické pole statoru. V dôsledku vlastnej indukčnosti budiaceho vinutia nie je nárast zopnutého prúdu lineárny, ale pomaly narastajúci. Rovnako pomaly rastúce je tým pádom aj svorkové napätie alternátoru.

1.1. Prúdová regulácia

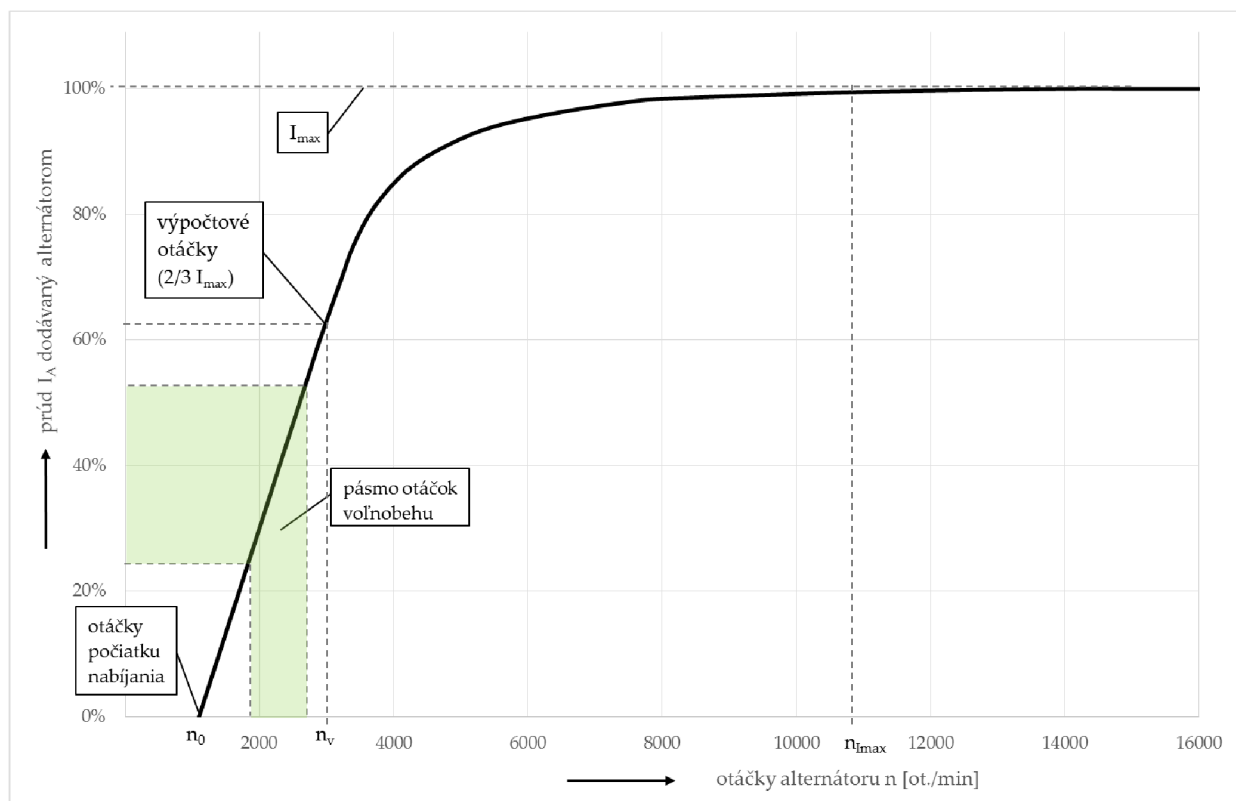
V porovnaní s dynamami, nepotrebuje alternátor prúdovú reguláciu. Jeho maximálny prúd je nepriamo úmerný členu $(\omega L)^2$. Z toho vyplýva, že so vzrastajúcimi otáčkami rastie reaktancia vinutia a prúd je prirodzene obmedzovaný. Pri zvyšovaní otáčok sa síce lineárne zvyšuje indukované vnútorné napätie, avšak pri zvyšovaní kmitočtu sa lineárne zväčšuje aj vnútorná reaktancia, takže prúd nemôže prestúpiť určitú najväčšiu hodnotu ani pri krátkom spojení [4].

2. Charakteristické priebehy

Výrobcovia často dodávajú spolu so svojimi výrobkami aj niektoré z charakteristických priebehov pre konkrétne typy alternátorov. Tie ukazujú vlastnosti alternátoru pri rôznych podmienkach. Grafy sú konštruované pod istými špecifickými podmienkami ako konštantné výstupné napätie a konštantná teplota.

2.1. Prúdovo otáčková charakteristika

Výkonová, či prúdovo otáčková krivka (obr.7) je často používaná na výpočet typu remeňu, potrebného pre prenos výkonu, resp. momentu na alternátor. Meraná je pri maximálnom budení, ktoré sa počas celého merania nemení. V úvode merania sú otáčky nastavené na takú hodnotu, aby mal alternátor pri chode naprázdno na svojich svorkách 13,5 V jednosmerných, t.j. za usmerňovačom. Tieto otáčky sa nazývajú otáčky počiatku nabíjania. Následne je pridaná elektrická záťaž, čo spôsobí prúdový odber a pokles napätia. To je vyrovnané zvýšením otáčok opäť na takú hodnotu, aby bolo na svorkách rovnakých 13,5 V. Meranie pokračuje rovnakou metódou zvyšovania záťaže a vyrovnaním napätia zvýšením otáčok až do maximálnych otáčok alternátoru.



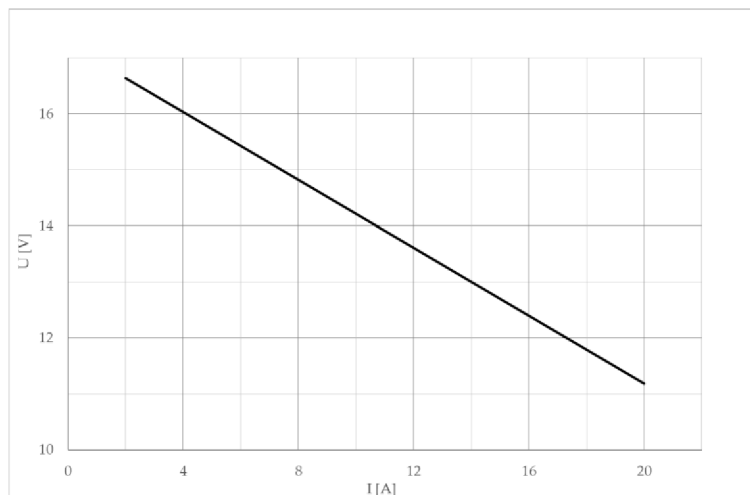
Obr. 7: Prúdovo otáčková charakteristika alternátoru

Samotná charakteristika začína v bode n_0 , t.j. v otáčkach počiatku nabíjania. Tie sa pohybujú v rozmedzí 900 až 1100 ot./min. Voľnobežné otáčky spaľovacieho motoru sa pohybujú v rozmedzí približne 1900 až 2800 ot./min na remenici alternátoru. Dôležitým bodom pre návrh alternátoru sú výpočtové otáčky n_v , pri ktorých musí alternátor dodávať 2/3 maximálneho prúdu. Maximálny prúd dosahujú alternátory pri otáčkach n_{lmax} . Tejto úrovne docelia niektoré už pri

otáčkach 6000 ot./min. Prúdovo otáčková charakteristika alternátoru na obr.7 je meraná pri konštantnom výstupnom napätí, pri plnom budení a konštantnej teplote okolia. Táto charakteristika najlepšie vyjadruje pracovné možnosti sústavy s akumulátorom a je udávaná výrobcom ako jedna zo základných charakteristík.

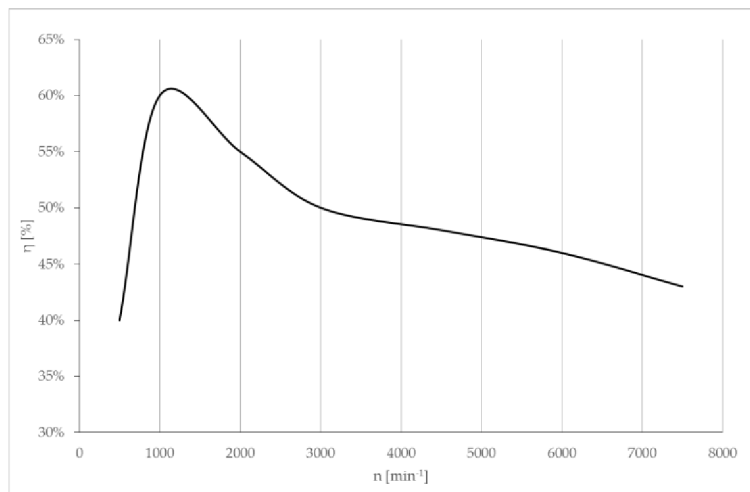
2.2. Voltampérová charakteristika

Jednou z najzákladnejších charakteristík všetkých elektronických zariadení je voltampérová charakteristika. V prípade alternátorov ide o závislosť výstupného napätia na záťažovom prúde meranú pri konštantnom budení a otáčkach ako na obr.8. Ide o charakteristiku lineárne klesajúcu, ktorá však bola prebratá z merania alternátoru, ktorého rotor nebol tvorený drápkovými pólmi, preto ju možno považovať len ako obecnú, avšak charakter priebehu popisuje správne. Je zrejmé, že so vzrastajúcim zaťažením napätie na výstupe lineárne klesá. Preto je pre vyrovnanie a isté „skonštantnenie“ priebehu potreba zvýšiť budiaci prúd, o čo sa stará regulátor umiestnený vo veku alternátoru. Ako bolo uvedené už skôr, napätie na výstupe alternátoru nesmie klesnúť pod 13,5 V a zároveň presiahnuť úroveň 14,2 V.



Obr. 8: Závislosť výstupného napätia na záťažovom prúde alternátoru

2.3. Krivka účinnosti

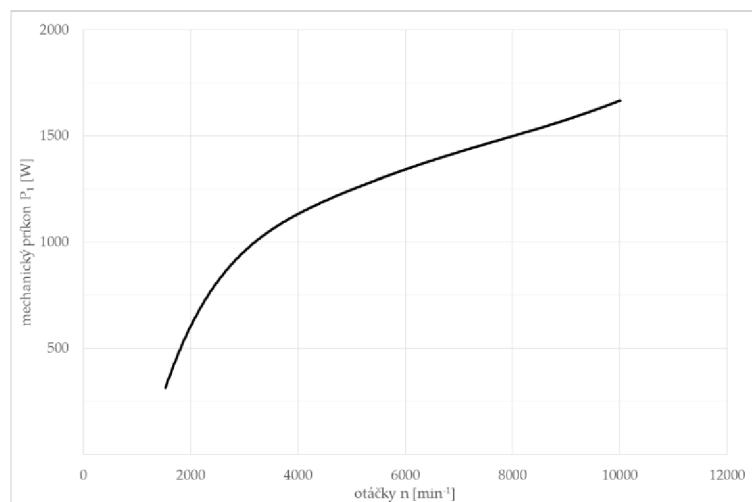


Obr. 9: Závislosť účinnosti alternátoru na otáčkach

Dôležitá charakteristika dodávaná výrobcom je krivka účinnosti, t.j. závislosť účinnosti alternátoru na otáčkach rotoru. Z merania uvedeného alternátoru je jasné maximum v oblasti 2000 ot./min . Po tomto bode krivka so zvyšujúcimi sa otáčkami klesá. Toto správanie alternátoru je úmyselné, z dôvodu dosiahnutia najvyššej účinnosti v najviac frekventovaných otáčkach. Bežné alternátory dosahujú účinnosť maximálne 50 až 60 %, tie najlepšie až 70 %.

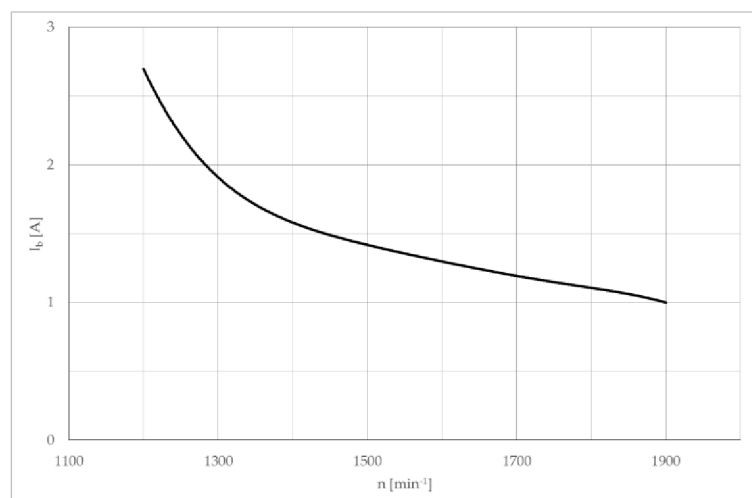
2.4. Ďalšie charakteristiky

Krivka účinnosti v spojení s prúdovo otáčkovou charakteristikou dáva miernu predstavu o tvare závislosti mechanického výkonu na hriadieli na otáčkach. Oba priebehy sú v počiatku rastúce, avšak po prekročení spomínaných 2000 ot./min účinnosť klesá a preto je potrebné pre pokrytie odberu dodať väčší mechanický príkon. To znamená, že s rastúcimi otáčkami, resp. s klesajúcou účinnosťou a relatívne konštantným prúdom príkon rastie.



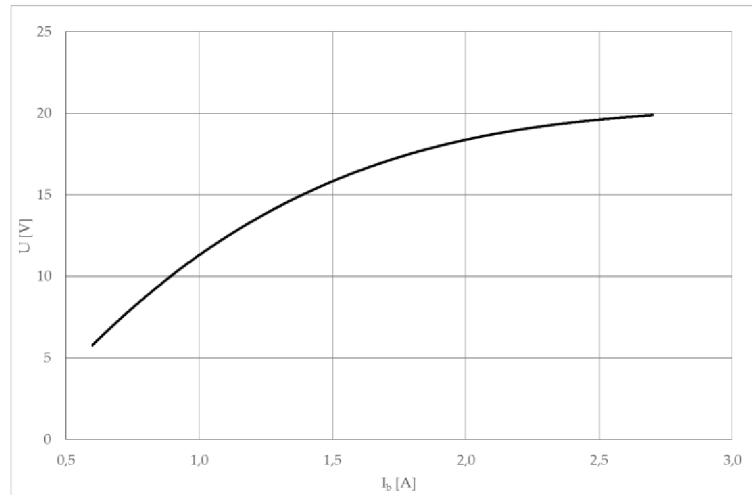
Obr. 10: Závislosť mechanického príkonu na otáčkach

Ďalšia zo smerodajných charakteristík automobilového alternátoru je závislosť budiaceho prúdu na otáčkach, meraná pri konštantnom napätí aj záťažovom prúde. Je z nej zrejmé, že so zvyšujúcimi sa otáčkami budiaci prúd potrebný na dosiahnutie žiadaného napätia, resp. prúdu nelineárne klesá.



Obr. 11: Závislosť budiaceho prúdu na otáčkach

Nemenej smerodajná charakteristika je závislosť napätia na svorkách alternátoru na budiacom prúde. Meraná je pri konštantných otáčkach a záťažovom prúde. Pribeh je exponenciálne rastúci a ustáľuje sa na hodnote napätia určenej prúdom a otáčkami. Zmenami týchto hodnôt sa pribeh posúva nahor alebo nadol.



Obr. 12: Závislosť napätia na budiacom prúde

3. Činnosť alternátoru

Elektrická záťaž kladená na alternátory býva často nerovnomerná. Záťažové prvky možno podľa Dentona [1] rozdeliť na nepretržité, dlhodobé a prerušované (krátkodobé). Kvalitný alternátor musí zvládnuť rôzne zmeny týchto záťaží a takisto dodávať dostatočnú energiu na dobíjanie batérie. Napätie ostáva vždy konštantné, takže so záťažou sa mení len dodávaný prúd. Od roku 1960, kedy bola záťaž spotrebičov na alternátor približne 30A, sa elektrické vybavenie stále zväčšovalo. Do roku 2000 toto číslo vzrástlo až na 160A a do dnešných čias sa pohybuje už na úrovni 200A [1].

Nepretržité záťaže zahŕňajú prvky, ktoré sú neustále v činnosti po celú dobu prevádzky motoru a teda aj alternátoru. Možno povedať, že ide o prvky, bez ktorých nie je možné motor prevádzkovať. Ide o zapalovanie, systém vstrekovania paliva, palivová pumpa a menšie pomocné nástroje potrebné pre chod motoru. Tieto komponenty odoberajú v dnešných časoch prúd približne 13A, čo je pri 14V alternátoru záťaž 180W.

Ďalšiu skupinu tvoria **dlhodobé záťaže**. Ide o súčasti, ktoré sú tak-povediac v nepretržitej prevádzke, no vozidlo, resp. motor by bez nich pracoval bez sebemenších problémov. Sem patria svetlá (obrysové, stretávacie, diaľkové, hmlové, na osvetlenie poznávacej značky,...), ale aj rádiový prijímač, či kazetový alebo CD-prehrávač alebo vetrací systém a pod.. Záťaž dosahuje hodnôt často aj viac ako 20A.

Prerušovanými alebo krátkodobými záťažami sa rozumejú spotrebiče zapínané len na kratšiu dobu, najčastejšie kvôli údržbe alebo zmene inak statických prvkov, či indikácii ako



napríklad brzdové a smerové svetlá, stierače, ovládanie okien, klaksón, zapaľovač, pohyb sedadiel, ovládanie spätných zrkadiel, interiérové svetlá, vyhrievanie sedadiel, a pod.. Všetky tieto spomínané aj nespomínané komponenty podobného charakteru odoberajú zo zdroja - alternátora prúd viac ako 100A, čo vo výkonovom vyjadrení ďaleko prekonáva hranicu 1kW.

Alternátor samotný často nie je schopný dodávať tak značné výkony a preto je veľmi zriedka využívaná na napájanie aj samotná batéria, čo však možno považovať za nie ideálny, resp. poruchový stav a teoreticky by nemal nikdy nastať. Pod ideálnym stavom sa rozumie stav, kedy alternátor pokrýva výkon odoberaný zo spotrebičov vozidla a má dostatočnú rezervu na to, aby mohol dobíjať batériu. K tomu však nie vždy dochádza, hlavne keď je mnoho krátkodobých spotrebičov v prevádzke v jednej chvíli. Práve kvôli tomuto dôvodu sa čoraz častejšie konzultuje o zvýšení menovitého napätia v elektrickej sieti automobilov. K spomínanému stavu dochádza aj pri stave, kedy je napätie alternátora nižšie ako napätie batérie (k čomu by pri odmyslení stavu 0V nemalo dôjsť vďaka regulátoru) pri vypnutom motore alebo otáčkach nižších ako otáčky počiatku nabíjania. Usmerňovacie diódy v tomto prípade zabráňujú spätnému prúdu z batérie do alternátora. Keď napätie alternátora znovu dosiahne hodnôt vyšších ako napätie batérie, prúd začne opäť tiecť do spotrebičov a batérie. Práve z tohto dôvodu je menovité napätie alternátora vyššie ako napätie batérie. **V normálnej prevádzke však nikdy nedochádza k stavu, kedy by bol z batérie odoberaný prúd.**

4. Vývoj

Alternátory, ako aj väčšina elektrických zariadení a strojov, podliehajú nepretržitému vývoju a inováciám. Často ide len o jednoduché kozmetické úpravy veka a úchyty podľa ostatného vybavenia priestoru motora automobilu. Základ alternátora je vo väčšine prípadov rovnaký. Zásahy do vnútorných častí, resp. ich vývoj neprebíha nepretržite. Vývoj je predovšetkým vedený smerom k väčšej odolnosti voči nepriaznivému prostrediu v priestore spaľovacieho motora. Pri štarte sú to rázy otrasmi a počas behu motora nepretržité vibrácie a znečistenie olejom. V priebehu času došlo k zmenám v rozmeroch, čo ušetrilo priestor až do 400 cm³, zvýšenie maximálnej prevádzkovej teploty (až na 120 °C) a hlavne k zvýšeniu účinnosti na cca 76% [1]. Za najväčší krok v zariadeniach, slúžiacich na dobitie akumulátora a napájanie spotrebičov vo vozidlách možno považovať zmenu z dynám na drápkové alternátory.

Hlavným predpokladom pre vývoj, resp. inováciu je problém alebo snaha o vylepšenie produktu. Takýmto problémom možno označiť nízku účinnosť a súčasne potreba vyššieho výkonu, životnosť elektrických, ale aj mechanických súčiastok a podobne.

4.1. Účinnosť

Nízka účinnosť je problém, ktorý v minulosti nebol intenzívne riešený. Dôvod je jednoduchý: spotrebiče v automobiloch nedosahovali takých odberov, aby ich alternátory neboli možné pokryť a zároveň efektívne dobíjať aj batériu. V posledných rokoch to už neplatí. Osobné vozidlá vybavujú výrobcovia stále viac zariadeniami, ktoré pre svoju funkciu vyžadujú elektrickú energiu. Alternátor preto musí dosahovať stále vyšších výkonov. V dnešných dobách



sa výkony alternátorov v osobných automobiloch pohybujú na úrovniach 1 až 2 kW čo však pri nízkej účinnosti môže znamenať znateľné zníženie výkonu spaľovacieho motoru. Pri účinnosti starších alternátorov 50% je potreba z motoru odobrať výkon až 2 kW mechanických pre výrobu 1 kW elektrických. Do budúcnosti je predpovedaný požadovaný výkon až 5 kW. Pri tejto účinnosti to predstavuje 10 kW mechanických odoberaných z motora, čo je už výkon motocyklu Čz 175. Za predpokladu že veľká väčšina stratového výkonu 5 kW je premenená na teplo, možno práve týmto príkladom vysvetliť aj potrebu účinného chladenia alternátoru pri takto nízkej účinnosti. Nízka účinnosť takisto ovplyvňuje spotrebu paliva, čo vyplýva s predchádzajúcej úvahy. Časť paliva, ktoré je vstrekané do valcov je použitá len na pokrytie spomínaných 2 kW použitých na pohon rotoru alternátoru. Podľa Dentona [1] bola spotreba paliva, zmenami spomenutými v prvom odstavci, znížená o 0,2 litru na sto kilometrov a zároveň výkon alternátorov zvýšený až o 1 kW.

4.1.1. Straty

Na vyriešenie tohto problému je treba poznať najprv ich zdroj, t.j. straty a ich rozdelenie. Obecne možno straty rozdeliť na mechanické a elektromagnetické.

Medzi **mechanické straty** sa zaraďujú straty trením v ložiskách, trením uhlíkov o zberné krúžky komutátoru a ventilačné. Ventilačné straty v sebe zahrňujú pohyb chladiaceho telesa - ventilátoru a aj trenie rotoru o vzduch. Úroveň týchto strát je závislá od otáčok rotoru - čím sú otáčky vyššie, tým sa aj ventilátor otáča rýchlejšie, čo zvyšuje straty a zároveň je takého chladenie až nadbytočné. Zníženie ventilačných strát možno dosiahnuť úpravou tvaru ventilátoru, či obmedzením otáčok (ventilátoru) pri vyšších otáčkach rotoru. V tomto prípade by boli otáčky ventilátoru rozdielne ako rotoru, na ktorom je pripevnený a preto by musel byť s nim spojený napr. mechanickou spojkou, prípadne súčiastkou plynulo obmedzujúcou otáčky, resp. s postupným uvoľňovaním na spôsob odstredivej brzdy, ktorá by však nesmela brzdiť hriadeľ rotoru. Ďalšie možné riešenie je ventilátor oddelený od hriadele alternátoru a napájaný vlastným elektrickým motorčekom s otáčkami elektronicky ovládanými podľa potreby chladenia. Napriek jednoznačnému zníženiu ventilačných strát je toto riešenie značne nákladné a tým pádom možno očakávať, že vývoj tejto varianty nebude pokračovať pre zaradenia do sériovej výroby.

S poškodenými ložiskami v alternátore sa stretol snáď každý vodič. Ide o jednu z najčastejších porúch a preto je nutné pri vývoji dbať aj na kvalitu a vysokú životnosť ložísk. Ich poškodenie môže spôsobiť špina alebo vysoká teplota a je sprevádzané hlasným piskľavým alebo škrípavým zvukom. S takýmto ložiskom sa rotor otáča neefektívne, značne znižuje účinnosť celého alternátoru a hrozí aj, že rotor spadne, vyosí sa a v prípade prevádzky nenávratne poškodí alternátor. Preto je potrebné takéto ložisko čo najskôr vymeniť. V súčasnosti sú tieto problémy menej časté, vďaka použitiu kvalitných ložísk, no stále početné. Straty mechanickým trením uhlíkov o zberné krúžky, ale aj úbytky napätia na uhlíkoch možno odstrániť bezkrúžkovým prevedením alternátoru. Ide o stroje s permanentnými magnetmi, t.j. s konštantným budením, takže výstupné napätie je závislé na rýchlosti otáčania hriadele. Regulácia je teda možná len externými meničmi, ktoré sú však náročné na konštrukciu a cenu.

Ďalšia možnosť regulácie je elektronicky riadená prevodovka, ktorá by zaistila konštantné otáčky hriadele alternátoru. Tu je však takisto najväčším problémom peňažná hodnota riešenia.

Napriek tomu sú tieto alternátory v menšom množstve vyrábané a osádzané do vozidiel do extrémnych podmienok s vysokou prašnosťou a podobne. Jedno zo zaujímavých riešení bezuhlíkového alternátoru je vodou chladený, ktorý možno preťažovať viac ako vzduchom chladený. Jeho odolnosť voči vysokým teplotám dosahuje vďaka vodnému chladeniu až 130 °C a takisto je obmedzená hlučnosť vďaka absencii vetrania.



Obr. 13: Bezkrúžkový alternátor [1]

V prípade **elektromagnetických strát** ide o elektrické a magnetické straty. Tie elektrické sú spôsobené vodivosťou, resp. odporom vodičov, na ktorých vznikajú prechodom prúdu výkonové straty závislé na kvadráte tohto prúdu. Čím je odpor vodičov vyšší, tým sú aj straty vyššie. Preto je potrebné použiť materiál s čo najnižším odporom - väčšinou meď. K týmto stratám patria aj straty na uhlíkoch. Inak povedané, elektrické straty vznikajú všade tam, kde tečie prúd, pretože nemožno povedať, že má nejaký materiál nulový odpor. Magnetické straty zahŕňajú straty v železe, ktoré tvoria hysterézne a straty vírivými prúdmi. Vírivé prúdy sú indukované zmenou magnetického toku v plechoch statoru. Tieto straty možno značne obmedziť skladaním tenkých plechov do požadovanej hrúbky a tvaru magnetického obvodu. Pretože plocha na ktorej tieto prúdy vznikajú je kolmá na smer magnetického toku, budú vďaka tenkým plechom veľmi malé, no stále spôsobujúce zahrievanie. Hysterézne straty sú spôsobované premagnetovávaním magnetických materiálov a sú úmerné ploche hysteréznej slučky. Okrem iného sú závislé na hmotnosti plechov, kmitočte a štvorci magnetickej indukcie. Obmedzované sú hlavne znížením magnetickej indukcie, čo však prináša so sebou problém potreby väčšieho množstva a teda aj objemu a hmotnosti materiálu. Na elektromagnetických stratách závisí aj chladenie alternátoru, pretože sa všetky premieňajú na teplo. Nemožno ich však úplne odstrániť, jedine znížiť na čo najnižšiu úroveň.

Z priebehu na obr.9 je zrejmé, že najvyššiu účinnosť dosahuje alternátor v oblasti nízkych otáčok. Straty hysterézne sú totiž priamo úmerné frekvencii a straty vírivými prúdmi sa navyše zväčšujú až s druhou mocninou frekvencie, čo znamená, že so zvyšujúcimi sa otáčkami prudko rastú magnetické straty. S otáčkami rastú vďaka vyššiemu treniu aj mechanické straty. Mimo týchto strát ovplyvňuje účinnosť aj zaťaženie alternátoru, podmienky prevádzky, rozmery, hmotnosť a ďalšie vplyvy.

4.2. Použité materiály

Najväčší problém vo vývoji alternátorov je pochopiteľný tlak od výrobcov na čo najnižšiu cenu. Tá sa znižuje s vyšším počtom vyrobených strojov, takže je vyžadovaná veľkosériová výroba. Práve preto nie je možné použiť kvalitné vysokokremíkové dynamové plechy. Vo výrobe sú totiž razené z dlhého kusu plechu navinutého do kotúčov. To by nebolo možné vykonať so spomínanými kremíkovými plechmi, pretože sú veľmi tvrdé. Súčasná výroba s použitím mäkkších plechov však znamená len stratu rádovo jednotiek až desiatok wattov. Preto je výhodnejšie použiť práve toto riešenie. Ďalší možný variant je upravovať celý magnetický obvod, t.j. plechy a aj satorové vinutie.



Obr. 14: Uloženie satorových vinutí; vľavo ručne vinuté, vpravo flat pack [7]

Vyššiu účinnosť zaistí okrem iného použitie hrubšieho medeného drôtu, čo však znamená nutnosť tenšej vrstvy izolácie a aj úpravu drážok. Podobný princíp má už vo výrobe používaná metóda uloženia vinutia flat pack, vid'. obr.13. Zaisťuje zväčšenie činiteľa plnenia medi v drážkach satoru. Ďalšie z možných riešení je zväčšenie počtu drážok na pól a fáz, tzv. činiteľ q . Existuje však návrh firmy Bosch, ktorá navrhla a vytvorila alternátor s $q = 2$, čo znamená dve drážky na pól a fáz. Tento alternátor má však väčšie rozmery (priemer) a hmotnosť, preto sú zatiaľ stále vyrábané alternátory s $q = 1$.

4.3. Menovité napätie siete

Ako bol spomenuté v úvode, už dlhšie sa uvažuje nad **zvýšením menovitého napätia** v elektrickej sieti automobilov. Podľa normy možno zvyšovať napätie len v rámci bezpečného malého napätia do 50 V. V prípade použitia vyššieho napätia by bolo nutné skvalitniť izolácie a aj celkové konštrukčné riešenie siete, aby nedošlo ku kontaktu so živými časťami, čo by zvýšilo náklady a tým pádom aj ceny automobilov. V súčasnosti je vo vozidlách nad 3,5 tony napr. značky LIAZ (Liberecké automobilové závody), v kombajnoch, ale aj v armádnych vozidlách využívaná 24 V sieť s alternátormi s menovitým napätím 28 V. Preto nie je zvýšenie napätia nereálnym riešením. Jedna z mála výhod je aj zmenšenie potrebného prierezu vodičov vďaka menšiemu prúdu, ktorý tečie obvodmi, čo by bol pri stále zvyšujúcom sa počte vodičov pozitívny prínos. Táto zmena by pozitívne ovplyvnila aj samotný alternátor, pretože so zvyšujúcim sa napätím rastie aj jeho účinnosť. Avšak nepriaznivý vplyv by to malo na samotné spotrebiče. Mikropohony by tak vysoké napätie neboli schopné zvládvať a takisto aj osvetlenie by strácalo na svojej životnosti. Preto by bolo najlepším riešením vytvoriť **viacnapäťovú sieť** v automobile. Najpravdepodobnejšie rozdelenie je sieť 12/36 V s alternátorom o menovitom napätí 42 V a s 36 voltovým akumulátorom. Spôsobov sa ponúka viacero, avšak ten najlacnejší a asi najjednoduchší



je použitie malých meničov pre prístroje, ktoré potrebujú pre svoju prevádzku nižšie napätie 12 V. Druhé reálne riešenie je použitie jedného výkonového meniču, ktorým by boli napájané všetky spotrebiče vyžadujúce nižšie napätie, ktoré je však cenovo drahšie, avšak otázne je, či sa neukáže, že to je so vzrastajúcim počtom malých meničov nakoniec výhodnejšie.

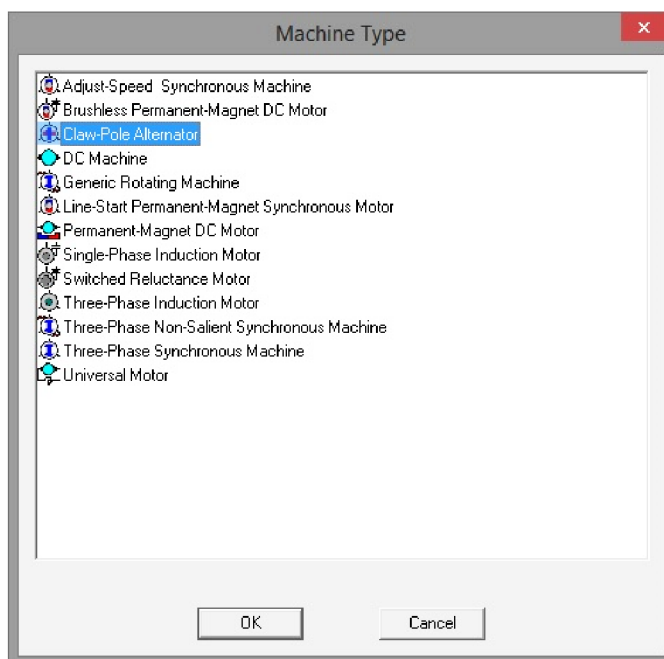
Vývoj alternátorov bude postupovať stále ďalej s vývojom technológií, ktoré ovplyvňujú automobilový priemysel. Či už v oblasti permanentných magnetov na výrobu pólov (NdFeB, ktorý je však značne teplotne závislý), magnetických materiálov na výrobu plechov alebo aj v iných oblastiach ako použitie štartér-alternátoru (Toyota), bezkrúžkového alternátoru a podobne.

5. Návrh alternátoru v programe ANSYS Maxwell 16.0.2

5.1. O programe Maxwell a jeho nástroji RMxprt

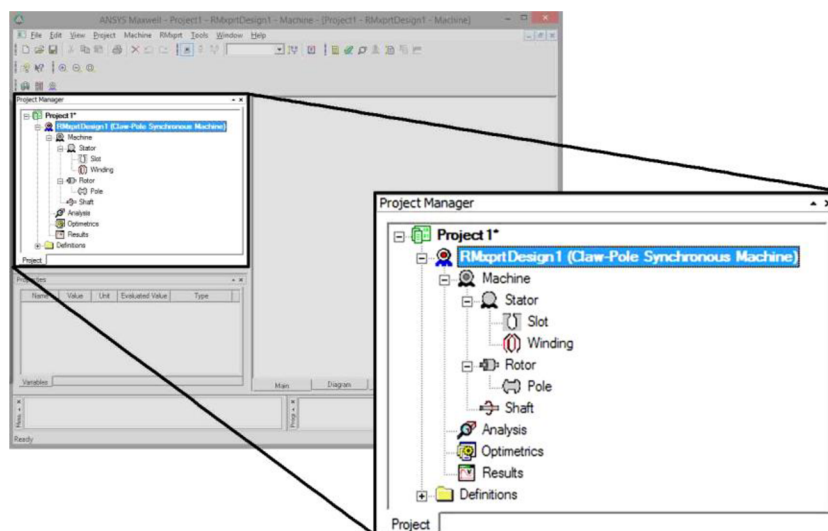
CAD (Computer-Aided Design, resp. počítačom podporovaný návrh) programy sa stali nedielnou súčasťou návrhu akéhokoľvek zariadenia, či výrobku. Pre svoju jednoduchosť a intuitívne ovládanie si našli svoje využitie aj v automobilovom priemysle. V rôznych CAD systémoch sú navrhované prakticky všetky súčasti automobilu. Pri vytváraní nového produktu je však potrebné výpočtom zistiť veličiny, ktoré charakterizujú daný produkt. V mechanických častiach ide napríklad o namáhanie silami a v elektrických zariadeniach ako motorčeky a alternátor rôzne vnútorné elektromagnetické vlastnosti. Tie sú vypočítavané matematickou metódou konečných prvkov. Ide o postup, pri ktorom je plocha na zariadení rozdelená na mriežku, resp. sieť stanoveného (konečného) počtu bodov. Následne je pre každý tento bod vypočítaný žiaduci parameter. Najväčšia výhoda takéhoto návrhu využitím počítačovej podpory je možnosť zmeny parametrov, rozmerov, prípadne aj materiálov prakticky „za chodu“ a sledovanie vplyvov, aké tieto zmeny spôsobia. To dovoľuje návrh čiastočne vytvárať tzv. metódou pokus - omyl.

Predmetom tejto práce je návrh alternátoru v programe ANSYS Maxwell, resp. pomocou nástroju RMxprt. Skôr ako návrh je väčšia priorita zistiť ako sa alternátor bude správať, resp. výsledné charakteristiky. RMxprt je nástroj určený k návrhu elektrických motorov a generátorov podľa predom určenej šablóny. Návrh zahrňuje fyzické rozmery, charakteristiky vinutia v statore a budiaceho vinutia v rotore a materiálové vlastnosti stroja. Vstavané rozhrania umožňujú z tohto návrhu vytvoriť 3D model nakonfigurovaného alternátoru do Maxwell 3D FEA, kde možno následne využiť metódu konečných prvkov (FEA – Finite Element Analysis), ktorá umožní detailnejšie zobrazenie a výpočet dejov a rozloženia magnetického poľa a jeho siločiar. Výpočet zahrňa nelinearity, vírivé prúdy ako aj pohyb samotného rotoru.



Obr. 15: RMxpert - výber typu stroja

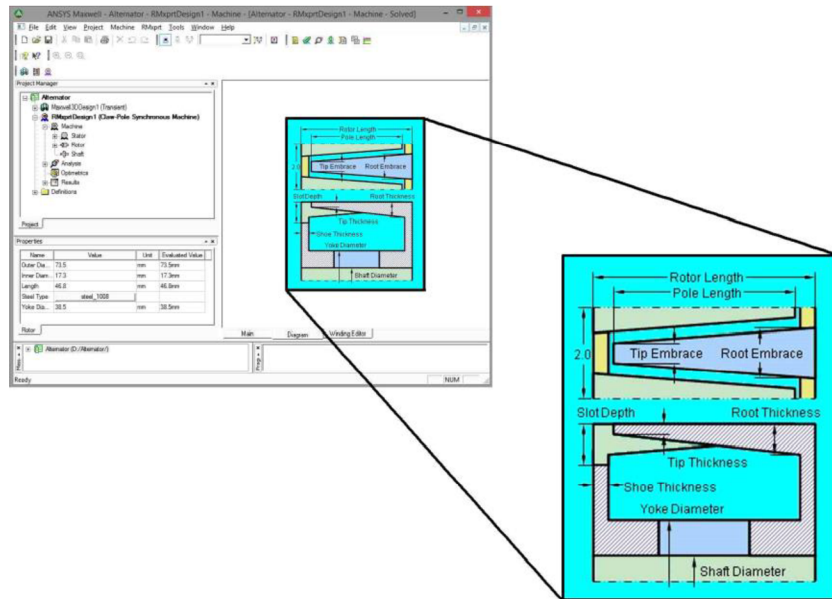
Nástroj RMxpert je veľmi užitočný pri vytvorení počiatočného modelu stroja, založeného na rozmeroch a vlastnostiach materiálov. Pri jeho spustení sa zobrazí okno pre výber typu stroja, ktorý bude navrhovaný, vid'. obr.12. Následne sa otvorí už samotné prostredie, v ktorom je stroj rozdelený do niekoľkých záložiek podľa konštrukcie. V tomto prípade to je stator, rotor a hriadeľ ako ukazuje obr. 13. Tieto záložky sú ďalej rozložené na niekoľko podskupín podľa funkčného rozdelenia onej časti, kde sú požiadavky na niektoré rozmery a typy materiálov a drážok.



Obr. 16: RMxpert - prostredie pre zadávanie parametrov

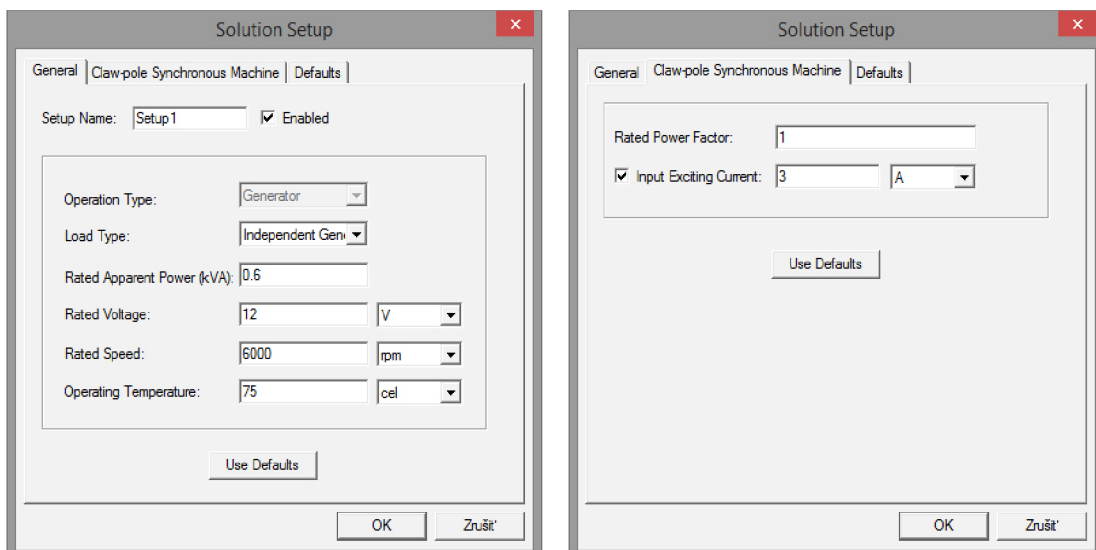
Stator navrhovaného alternátora má podľa použitia dvanásťpólového riešenia a troch fáz 36 drážok s jednou drážkou na pól a fázu. Vinutie je vedené sedemnástimi závitmi vodičom s priemerom $1,18\text{mm}$. Pre väčšinu štandardných vinutí môže byť konfigurácia stanovená samotným programom, t.j. známe rozmery sa zadajú a zvyšné sú vypočítané alebo odhadnuté. Táto užitočná vlastnosť nástroja RMxpert uľahčuje prácu a návrhárovi postačujú konštrukčné

výkresy a znalosť niektorých elektrických parametrov stroja bez potreby dodatočného získavania hodnôt.



Obr. 17: RMxprt - rotor

V prípade rotoru je kladený dôraz na tvar pólov a ich rozmery. Podľa praxe a väčšiny vyrábaných alternátorov je počet pólových dvojíc zvolený na šesť. Budiace vinutie v rotore je potrebné pridať manuálne, pretože nástroj počíta s budením permanentnými magnetmi. Vinutie je tvorené 435 závitmi z medeného izolovaného drôtu o priemere $0,67\text{mm}$. Stator aj rotor je vyrobený z jednoduchej konštrukčnej ocele 1008 podľa americkej normy. V prípade materiálov program Maxwell, resp. jeho nástroj RMxprt ešte zaostáva. Jeho knižnica obsahuje len veľmi málo materiálov a navyše všetky z americkej normy. V prípade požiadavky použitia iného materiálu je potreba nadefinovať nový a zadať všetky informácie vrátane B-H krivky. Hriadeľ nie je nijak definovaná, jej rozmery si nástroj vypočíta sám, zadávaná je jediná vlastnosť materiálu a to, či je vyrobený z magnetického materiálu.

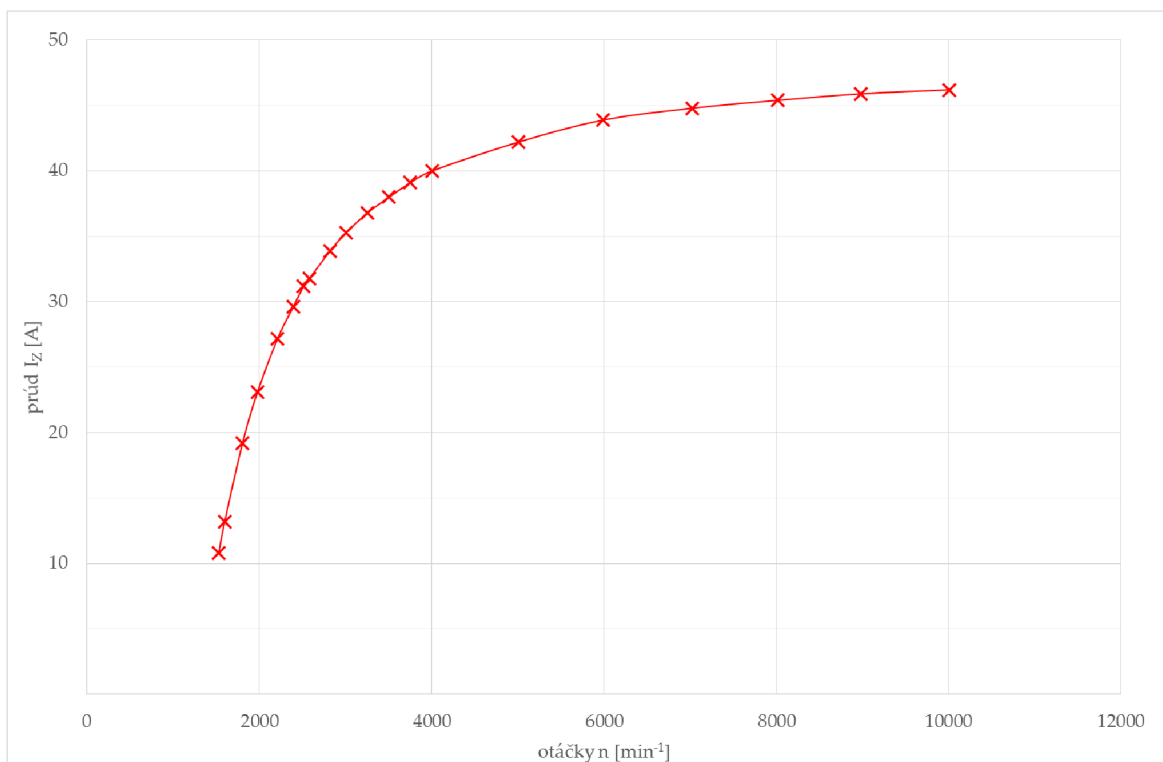


Obr. 18: RMxprt - nastavenie riešenia

Po zadaní všetkých potrebných rozmerov je potrebné zadať požiadavky pre riešenie. Typ záťaže sa vyberie nezávislý generátor a nastaví sa ďalšie hodnoty ako zdanlivý výkon, efektívna hodnota výstupného napätia, otáčky a teplota v prevádzke. Výstupné napätie, resp. jeho efektívna hodnota sa uvažuje na výstupe vinutia, t.j. ešte trojfázové striedavé napätie pred vstupom do usmerňovaču. Na ďalšej karte je zadávaný účinník a budiaci prúd do vinutia na rotore. Vyplnením týchto parametrov je možné spustiť výpočet, po ktorom je už Maxwell schopný vykresliť potrebné charakteristiky.

5.2. Namerané hodnoty

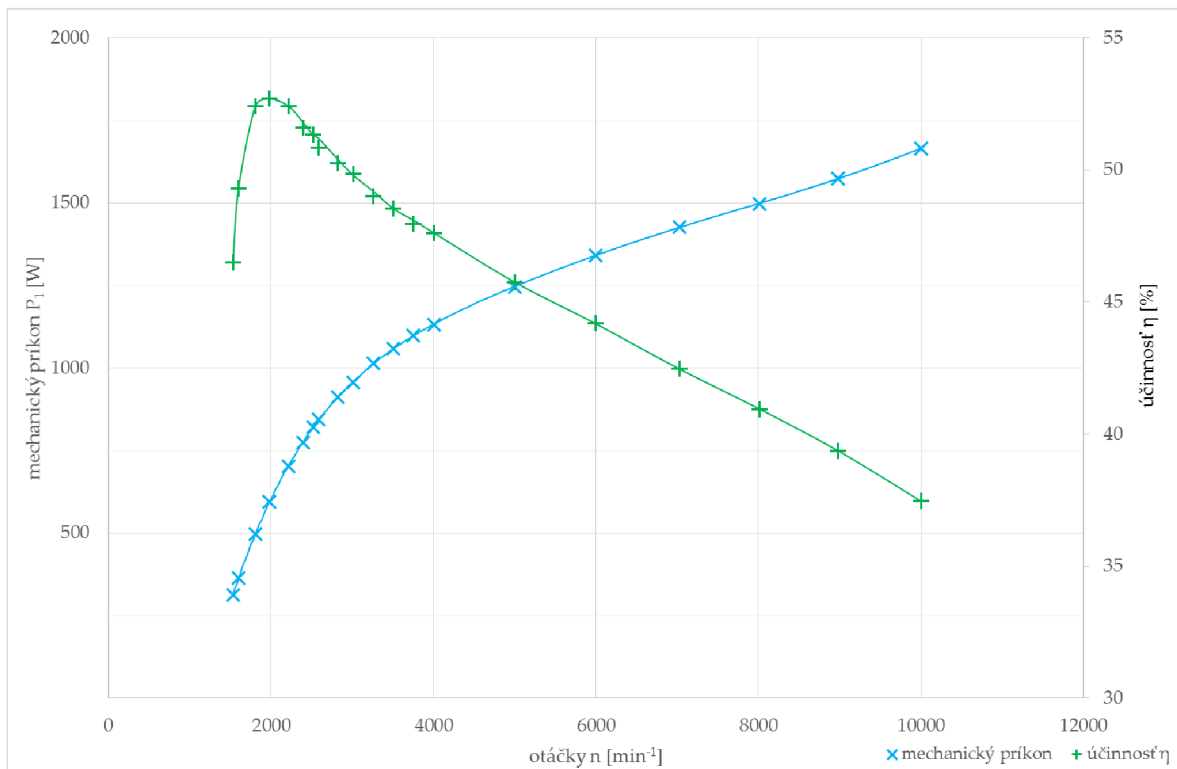
V spolupráci s firmou Magneton a.s. boli namerané hodnoty vybraného alternátora s menovitým prúdom 42 A. Konkrétne bola meraná prúdovo otáčková charakteristika a účinnosť alternátora v rozsahu otáčok 1500 min^{-1} až 10000 min^{-1} pri napätí $U_{B+} = 13,5 \pm 0,01 \text{ V}$ v teplotne ustálenom stave alternátora a teplote okolia $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnoty sú obsiahnuté v skúšobnom protokole Magnetonu uvedenom v prílohách, resp. v tabuľke nameraných hodnôt prebratých z tohto protokolu. Ich grafické závislosti možno vidieť na obr.16 a obr.17. Ide o bežné charakteristiky, neodlišujúce sa od známych priebehov uvedených v teoretickej časti tejto práce. Podľa nich však bude prebiehať návrh v programe Maxwell.



Obr. 19: Prúdovo otáčková charakteristika alternátora

Prúdovo otáčková charakteristika (obr. 16) je ako bolo už spomenuté je jeden zo základných priebehov a zobrazuje možnosti zaťaženia alternátora. Jej tvar je podobný funkcii $1 - e^{-x}$ a maximum, ku ktorému sa krivka približuje je ovplyvnené frekvenčnou závislosťou indukčnosti vinutia statoru, t.j. so zvyšujúcou sa frekvenciou (otáčkami) sa zvyšuje aj reaktancia vinutia a tým pádom je prúd prirodzene obmedzovaný. Obširnejšie je tento priebeh teoreticky opísaný v kapitole 3 na str. 15. Jeho meranie prebieha na požiadavku konštantného napätia pri

maximálnom buzení, rôznom prúdovom zaťažení a meniacich sa otáčkach. Napätie je udržiavané na hodnote $13,5 \pm 0,01$ V, zaznamenáva sa aj teplota okolia, ktorá bola v tomto prípade $+25 \pm 2$ °C a pri meraní je snaha o konštantnú teplotu samotného alternátora, pretože viacero veličín (prúd, výkon, účinnosť,...) je teplotne závislých. Prvá prevádzková hodnota bola meraná po 15 minútach teplotného ustálenia a ostatné hodnoty po 3 minútach teplotného ustálenia. Týmto meraním boli zisťované aj otáčky počiatku nabíjania n_0 , ktoré činia 1250 ot./min. Extrapoláciou priebehu možno dospieť k podobnému záveru. Maximálna hodnota ku ktorej sa približuje krivka činí približne 47 až 50 A.



Obr. 20: Mechanický príkon a účinnosť v závislosti na otáčkach alternátora

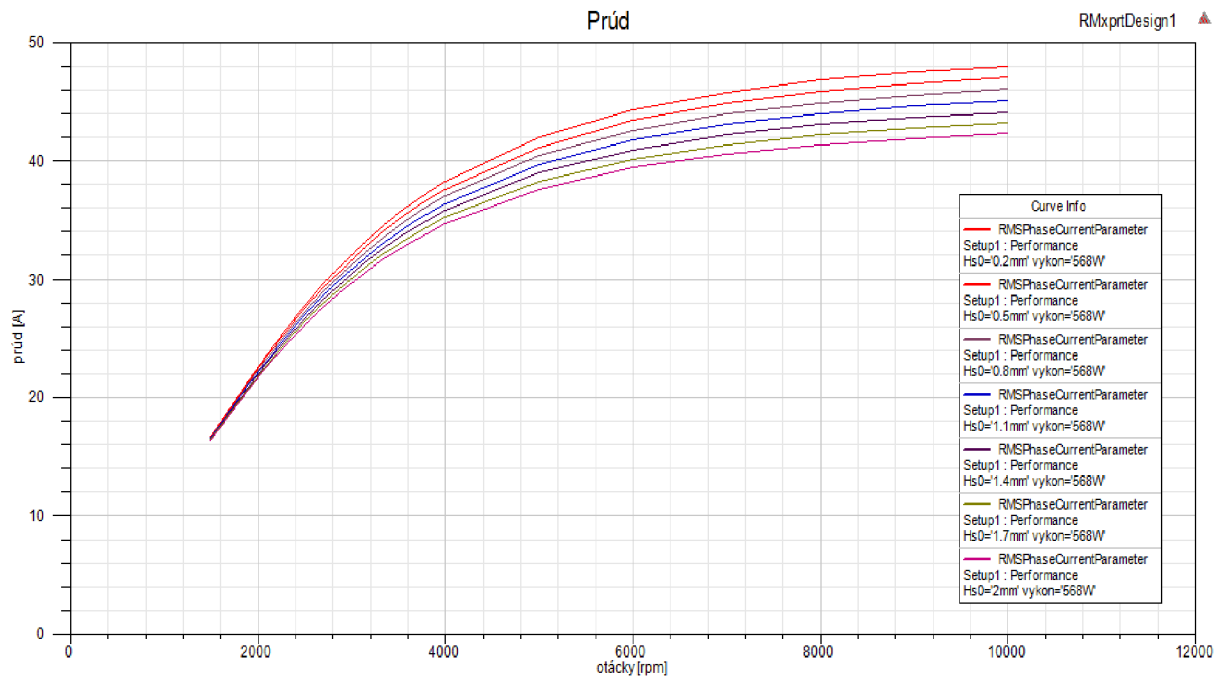
Na obr. 20 možno zreteľne vidieť ako, resp. s akou účinnosťou alternátor premieňa dodanú energiu vo forme mechanického príkonu. Je zrejmé, že pri vyšších otáčkach a vyššej dodávanej točivej energii klesá účinnosť rapídne dole až na približne 2/3 maximálnej účinnosti. Tá dosahuje hodnôt 52 až 53 % pri mechanickom príkone 500 až 700 W. Najnižšia účinnosť je zaznamenaná pri najvyšších meraných otáčkach, t.j. 10000 ot./min a to 37,5% pri príkone 1666 W. Podľa merania je elektrický výkon v tejto oblasti 624 W. To znamená, že viac ako 1 kW výkonu odoberaného zo spaľovacieho motoru je premrhaných na teplo.

Namerané hodnoty sú obsiahnuté v tabuľke tab. 1, uvedenej v prílohách.

5.3. Hodnoty z programu Maxwell

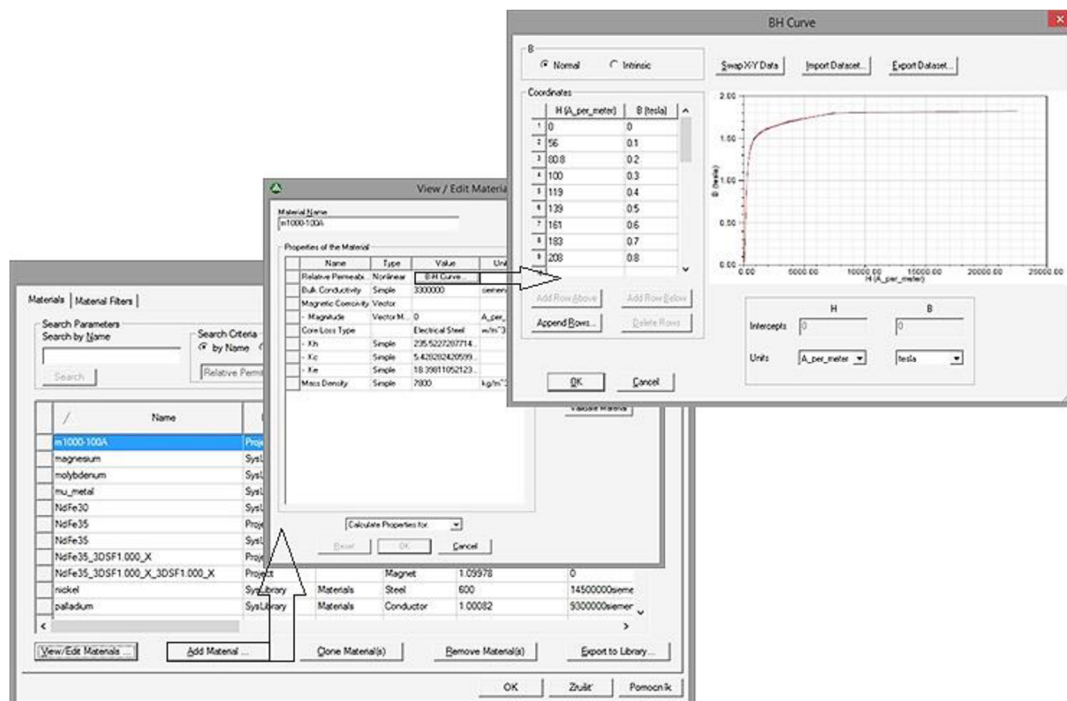
Primárna krivka, podľa ktorej bol alternátor navrhovaný je prúdovo otáčková charakteristika, pretože ide o hlavný priebeh vypovedajúci o funkcii alternátora, na ktorú je navrhovaný a to dodávanie prúdu do elektrických spotrebičov v automobiloch. Návrh prebiehal zadaním typických hodnôt pre alternátor ako rozmery a materiály. Známe hodnoty boli len menovité prúdové zaťaženie a to 42 A, z ktorého bolo pomocou menovitého napätia 14 V možné

následne vypočítať menovitý výkon 588 W. Výstupný prúd alternátora je závislý na mnohých materiálových a rozmerových parametroch. Jedným z takýchto parametrov je tvar, plocha drážky a vzdialenosť samotnej drážky od rotora, resp. vzduchovej medzery.



Obr. 21: Prúdovo otáčková charakteristika pri rôznom H_{s0}

Rozdiely v priebehoch prúdovo otáčkovej charakteristiky pri rôznych vzdialenostiach drážky H_{s0} znázorňuje graf na obr. 21. Všetky priebehy začínajú v spoločnom bode, resp. na spoločnej krivke a približne od 1800 ot./min sa začínajú so zvyšujúcou sa frekvenciou rozvetvovať a odchyľovať. Z týchto priebehov sa najviac približoval žiadanému „ $H_{s0} = 1,1 \text{ mm}$ “.



Obr. 22: Definovanie nového materiálu v knižnici Maxwell

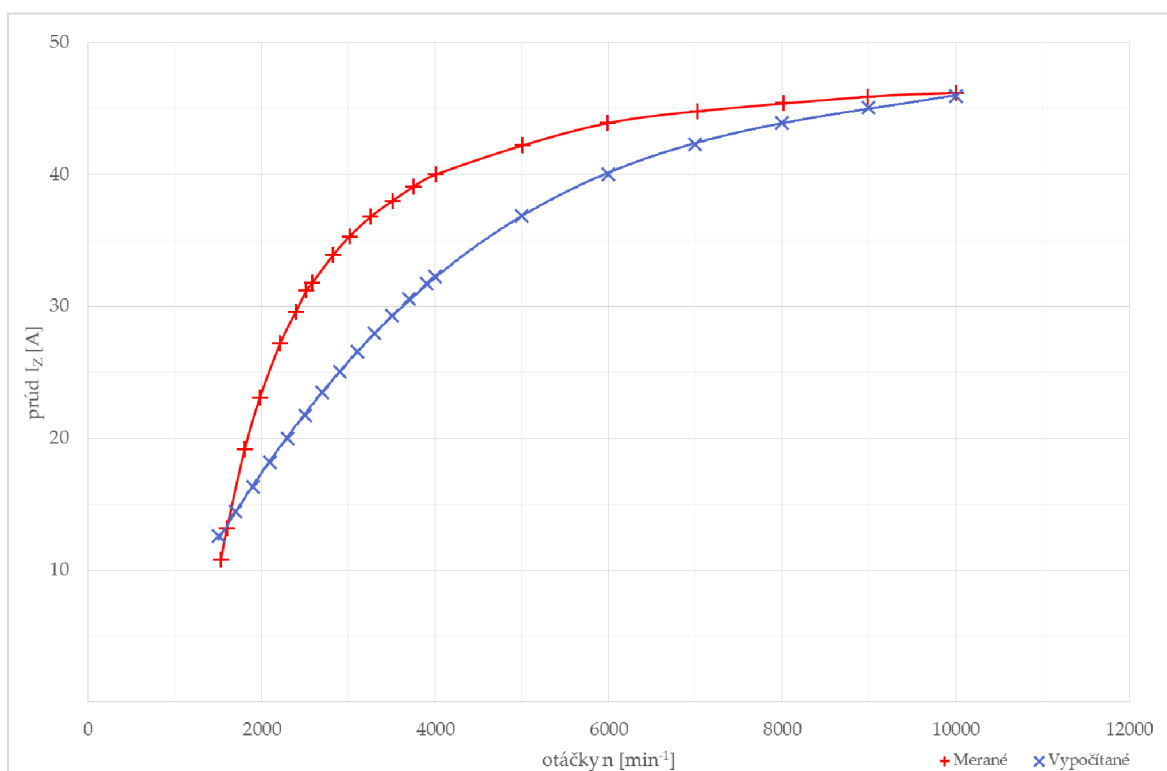
Z meraných hodnôt je zrejmé, že alternátor nemá vysokú účinnosť, preto ako materiál statorových plechov a pólových hviezdíc bola zvolená bežná technická oceľ. Bohužiaľ knižnica programu Maxwell neobsahuje ocele európskych noriem, preto je potrebné túto oceľ nadefinovať podľa katalógového listu alebo použiť podobnú náhradu v americkej norme. Pridanie nového materiálu do knižnice programu Maxwell popisuje vizuálne obr. 22. V knižnici materiálov je potrebné vybrať položku „Add Material...“, kde sa zadáva niekoľko materiálových konštánt. Ide hlavne o hustotu, objemovú vodivosť a najdôležitejší je tvar B-H krivky. Jedná sa o krivku, popisujúcu správanie materiálu pri magnetizácii, resp. je to časť hysteréznej krivky. Do knižnice je zadávaná formou tabuľky s jednotlivými bodmi krivky. Zvyšné body si program dopočíta sám pomocou interpolácie. Zvolená bola bežná konštrukčná oceľ M1000-100A.

Všetky charakteristiky navrhovaného alternátoru nebolo jednoduché získať, pretože pri výpočtoch priebehov bol zaznamenaný značný problém. Napätie nebolo možné regulovať na konštantnú hodnotu 13,5 V, ale rástlo spolu s prúdom. Preto výkon a teda aj príkon stroja dosahovali veľmi vysokých hodnôt, čo mohlo značne ovplyvniť aj krivku účinnosti. Alternátor bol preto navrhovaný len podľa prúdovo otáčkovej charakteristiky a účinnosti. Výkon bol dosiahnutý umelo, t.j. multiplikovaním jednotlivých zaznamenaných hodnôt prúdov napätím 13,5 V. Príkon bol následne získaný cez výkon a účinnosť stroja.

Výsledný alternátor, resp. jeho návrhový list (design sheet) je obsiahnutý v prílohách.

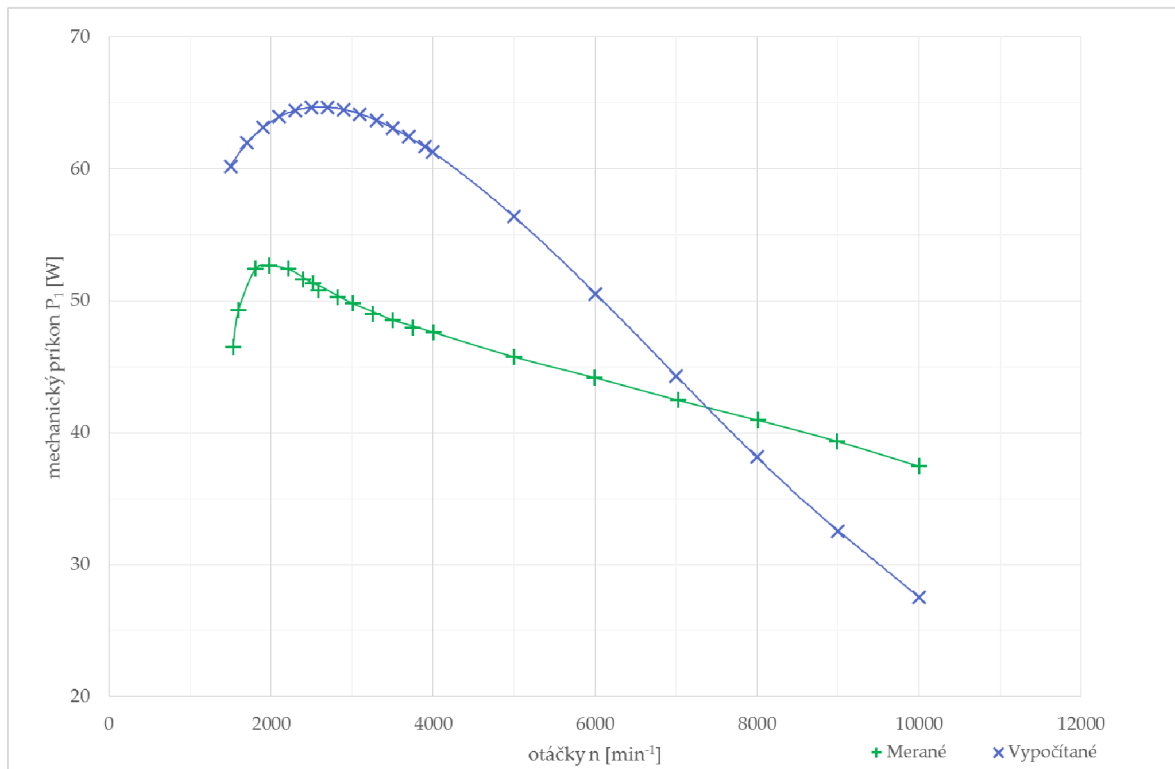
5.4. Spracovanie výsledkov

Po vypísaní hodnôt, vypočítaných programom Maxwell, ktoré sú taktiež súčasťou príloh práce, boli obe prúdovo otáčkové krivky spojené do jedného grafu, vid' obr. 23, pre vizuálne porovnanie.



Obr. 23: Prúdovo otáčkové krivky meraného a navrhnutého alternátoru

Z obrázku je zrejmé, že vypočítaná charakteristika je relatívne presná k meranej. Pri výpočte týchto priebehov je veľmi ťažké určiť presný tvar krivky. Presnosť 5 až 10% je akceptovateľná. Pri prvých a posledných hodnotách charakteristík je dokonca presnosť veľmi vysoká, čo možno považovať za úspech.



Obr. 24: Krivky účinnosti meraného a navrhnutého alternátoru

Naproti tomu účinnosť alternátoru meraného a navrhnutého je mierne odlišná. Ako ukazuje obr. 24 maximálna účinnosť meraného alternátoru sa pohybuje na hodnote približne 53 %, no navrhnutý alternátor dosahuje maximálnej účinnosti až 65 %, čo možno považovať za nereálnu hodnotu pri uvážení použitých materiálov a konštrukcie. Navyše je charakteristika značne strmá so zvyšujúcimi sa otáčkami, čo možno prisúdiť vysokými ventilačnými stratami, ktoré sa so zvyšujúcimi otáčkami kvadraticky zvyšujú. Túto úvahu však výpočet s nižšími ventilačnými stratami nepotvrdil. Naopak, zmenou ventilačných strát sa účinnosť nijak nemenila, ovplyvňovali ju len straty trením, čo by bolo možné vysvetliť tým, že z nejakého dôvodu program nepočítal s ventilačnými stratami. Straty trením sú však lineárne závislé na otáčkach, preto nemožno zmeniť strmosť krivky účinnosti zmenou strát trením. Zmenami týchto strát možno ovplyvňovať len výškovú polohu krivky v rámci grafu. V prípade určenia krivky účinnosti výpočty programu Maxwell sklamali.

Chyby vo výpočtoch mohli byť spôsobené obmedzenou možnosťou zadávania záťaže stroja, ktorá bola určená typom, zdanlivým výkonom a napätím pri určitých otáčkach, takisto vysokými hodnotami výkonov a príkonov v jednotlivých bodoch meraní, resp. výpočtov.

Je zrejmé, že v podrobnejšom návrhu je počítané aj s rozložením magnetického poľa, ktoré je však potrebné počítať ako trojrozmerné z dôvodu tvaru pólových nadstavcov. Takto podrobný návrh je však predmetom prác vyššej úrovne.



Záver

Cieľom tejto práce bola analýza automobilového alternátora ako stroju a hlavnej súčasti vybavenia vozidiel. Zo súčasného trendu v automobilovej technike je nepochybné, že alternátory ostanú najdôležitejšou súčasťou vo výbave vozidiel aj pre ďalšie desaťročia. Počet elektrických spotrebičov neustále rastie; výrobcovia neprestávajú vymýšľať, ako možno zjednodušiť užívanie práve ich výrobkov a preto je možno už skoro všade nájsť elektromotorčeky a krokové motory, bohužiaľ niekedy aj tam, kde by ich nebolo potreba alebo by bolo možné použiť iné riešenie. Práve z tohto dôvodu bude potrebné neustále zvyšovať výkony alternátorov. Nemožno úplne presne odhadnúť kam to povedie, no pravdepodobne z výšeni prevádzkového napätia v elektrickej sieti automobilov. Už v súčasnosti je menovité napätie v sieti väčšiny úžitkových vozidiel a kamiónov dvojnásobok napätia osobných automobilov, t.j. 24 V. To však, pri odmyslení armádnych vozidiel, nie je z dôvodu nadmerného zaťaženia elektrickými spotrebičmi, ale z dôvodu väčšieho štartéru. K zvyšovaniu výkonov nepochybne dôjde, avšak dodávaný prúd alternátorov do siete v automobiloch nemožno donekonečna zvyšovať, pretože prierezy satorových vinutí by museli byť stále väčšie aby podobné prúdy dokázali preniesť. Možno teda očakávať, že vývojový trend alternátorov povedie práve týmto smerom.

Návrh alternátora prebiehal v programe Ansys Maxwell 16.0.2, resp. v jeho nástroji RMxpert podľa žiadaných hodnôt získaných meraním konkrétneho stroja. Návrh však neprebíhal bez problémov. Jeden z hlavných problémov bola absencia možnosti vykonať meranie tak, ako je vykonávané na reálnych strojoch, t.j. pri meraní prúdovo otáčkovej charakteristiky mať konštantné napätie 13,5 V. Tento problém bol vyriešený tak, že alternátor bol navrhovaný podľa nameranej prúdovo otáčkovej charakteristiky a snaha bola o dosiahnutie podobnej krivky v programe. Značnou chybou bol ovplyvnený výpočet krivky účinnosti ako je vidno na obr.24. To možno prisúdiť obmedzenou možnosťou zadávania záťaže stroja, ktorá bola určená typom, zdanlivým výkonom a napätím pri určitých otáčkach. Takisto, ako bolo už spomenuté, nebolo možné udržiavať napätie alternátora konštantné, tým pádom bol výkon a následne aj príkon omnoho vyšší, čo mohlo práve ovplyvniť účinnosť navrhnutého stroja až do takej miery, že jej hodnoty dosahovali nereálnych hodnôt pre tento alternátor. Riešením pre overenie tohto návrhu by bolo pokúsiť sa podľa neho vytvoriť alternátor v inom používanom programe, ktorý by umožnil viac možností pri meraní charakteristík, prípadne podľa tohto návrhu vytvoriť alternátor a zmerať ho v laboratórnych podmienkach.



Použitá literatura

- [1] DENTON, Tom. *Automobile electrical and electronic systems: automotive technology : vehicle maintenance and repair*. 4. vyd. New York: Routledge, 2012, 703 s. ISBN 978-0-08-096942-8.
- [2] JAN, Zdeněk. *Elektrotechnika motorových vozidel* 1. 1. vyd. Brno: Avid, 2001, 199 s.
- [3] Tecnoficio.com. *El alternador del automóvil* [online]. [cit. 7.12.2013]. Dostupné z: http://www.tecnoficio.com/electricidad/alternador_del_automovil.php
- [4] KUBÍN, Pavel. *Elektrická zařízení osobních automobilů*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1985, 348 s.
- [5] Alternator (automotive). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 10.12.2013]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Alternator_%28automotive%29
- [6] BRAIN. *HowStuffWorks* [online]. Raleigh, N.C.: HowStuffWorks, Inc [cit. 11.3.2014]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/alternator.htm>
- [7] SearchAutoParts.com. MARTIN, Tony. *Alternator design and diagnosis* [online]. 2011 [cit. 23.5.2014]. Dostupné z: <http://m.searchautoparts.com/motorage/maintenance-repair-service-repair/alternator-design-and-diagnosis>



Prílohy

Príloha A - Tabuľka nameraných hodnôt

Tab. 1: Namerané hodnoty alternátoru Magneton typ 9 510 110

n [min ⁻¹]	I _Z [A]	M [Nm]	P ₁ [W]	P ₂ [W]	η [%]
1530	10,8	1,96	314	146	46,5
1599	13,2	2,17	363	179	49,3
1806	19,2	2,63	496	260	52,4
1980	23,1	2,86	594	313	52,7
2214	27,2	3,03	702	368	52,4
2394	29,6	3,09	775	400	51,6
2515	31,2	3,12	822	422	51,3
2585	31,8	3,12	844	429	50,8
2823	33,9	3,09	913	459	50,3
3012	35,3	3,04	957	477	49,8
3256	36,8	2,97	1014	497	49,0
3507	38,0	2,88	1059	514	48,5
3753	39,1	2,80	1099	527	48,0
4005	40,0	2,70	1132	539	47,6
5004	42,2	2,38	1246	570	45,7
5992	43,9	2,14	1342	593	44,2
7027	44,8	1,94	1427	606	42,5
8015	45,4	1,78	1497	613	40,9
8984	45,9	1,67	1575	620	39,4
10005	46,2	1,59	1666	624	37,5



Príloha B - Tabuľka vypočítaných hodnôt

Tab. 2: Vypočítané hodnoty navrhnutého alternátoru z programu Maxwell

n [min ⁻¹]	I _Z [A]	U _Z [V]	P ₂ [W]	η [%]	P ₁ [W]
1500	12,572	13,5	169,722	60,179	282,029
1700	14,448	13,5	195,048	61,967	314,761
1900	16,323	13,5	220,361	63,181	348,777
2100	18,179	13,5	245,417	63,969	383,649
2300	19,996	13,5	269,946	64,434	418,950
2500	21,760	13,5	293,760	64,647	454,406
2700	23,457	13,5	316,670	64,654	489,791
2900	25,078	13,5	338,553	64,491	524,962
3100	26,575	13,5	358,763	64,143	559,317
3300	27,988	13,5	377,838	63,676	593,376
3500	29,315	13,5	395,753	63,102	627,163
3700	30,559	13,5	412,547	62,436	660,751
3900	31,722	13,5	428,247	61,685	694,248
4000	32,274	13,5	435,699	61,282	710,974
5000	36,840	13,5	497,340	56,412	881,621
6000	40,025	13,5	540,338	50,538	1069,171
7000	42,284	13,5	570,834	44,306	1288,390
8000	43,917	13,5	592,880	38,204	1551,878
9000	45,100	13,5	608,850	32,546	1870,737
10000	45,967	13,5	620,555	27,515	2255,332



Príloha C - Návrhový list (design sheet) navrhnutého alternátoru

CLAW-POLE ALTERNATOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Apparent Power (kVA): 0.568
Rated Power Factor: 1
Number of Phases: 3
Rated Voltage (V): 14
Number of Poles: 12
Frequency (Hz): 150
Frictional and Windage Loss (W): 140.625
Operating Temperature (C): 75
Given Exciting Current (A): 4
Load Type: Independent Generator

STATOR DATA

Number of Stator Slots: 36
Outer Diameter of Stator (mm): 108
Inner Diameter of Stator (mm): 74

Type of Stator Slot: 3

Stator Slot

hs0 (mm): 1.1
hs1 (mm): 0.9
hs2 (mm): 10.1525
bs0 (mm): 2.4
bs1 (mm): 3.48316
bs2 (mm): 5.25961
rs (mm): 1.5

Top Tooth Width (mm): 3.32485

Bottom Tooth Width (mm): 3.32485

Skew Width (Number of Slots): 0

Length of Stator Core (mm): 21

Stacking Factor of Stator Core: 0.99

Type of Steel: m1000-100A

Designed Wedge Thickness (mm): 0.899998

Slot Insulation Thickness (mm): 0



Layer Insulation Thickness (mm): 0
End Length Adjustment (mm): 0
Number of Parallel Branches: 1
Number of Conductors per Slot: 17
Type of Coils: 11
Average Coil Pitch: 3
Number of Wires per Conductor: 1
Wire Diameter (mm): 1.18
Wire Wrap Thickness (mm): 0.1
Armature Half Turn Length (mm): 59.6433
Slot Area (mm²): 56.5915
Net Slot Area (mm²): 51.3041
Limited Slot Fill Factor (%): 75
Stator Slot Fill Factor (%): 54.2896

ROTOR DATA

Air Gap (mm): 0.25
Shaft Diameter (mm): 17.3
Yoke Diameter (mm): 38.5
Slot Depth (mm): 9.5
Tip Thickness (mm): 4.2
Root Thickness (mm): 8.5
Tip Embrace: 0.5294
Root Embrace: 1.1765
Length of Pole (mm): 17.2
Length of Rotor (mm): 46.8
Shoe Thickness (mm): 11
Type of Steel: m1000-100A

Rotor Winding Type: Round Wire
Limited Diameter of Rotor Winding (mm): 56.5
Shoe Insulation (mm): 0
Yoke Insulation (mm): 0
Rotor Winding Turns: 435
Rotor Wires per Conductor: 1
Rotor Wire Wrap (mm): 0
Rotor Wire Diameter (mm): 0.67
Field Half Turn Length (mm): 73.7363
Magnetic Shaft: No

Length of Magnet (mm): 0



MATERIAL CONSUMPTION

Armature Copper Density (kg/m³): 8900
Field Copper Density (kg/m³): 8900
Permanent Magnet Density (kg/m³): 7800
Armature Core Steel Density (kg/m³): 7800
Rotor Core Steel Density (kg/m³): 7800

Armature Copper Weight (kg): 0.355269
Field Copper Weight (kg): 0.624374
Permanent Magnet Weight (kg): 0
Armature Core Steel Weight (kg): 0.457743
Rotor Core Steel Weight (kg): 0.937521
Total Net Weight (kg): 2.37491

Armature Core Steel Consumption (kg): 1.998
Rotor Core Steel Consumption (kg): 0.937521

NON-SATURATED PARAMETERS

Stator Winding Factor: 1
D-Axis Reactive Reactance X_{ad} (ohm): 1.15236
Q-Axis Reactive Reactance X_{aq} (ohm): 0.849162
D-Axis Reactance $X_1 + X_{ad}$ (ohm): 1.40663
Q-Axis Reactance $X_1 + X_{aq}$ (ohm): 1.10343
Armature Leakage Reactance X_1 (ohm): 0.254268
Zero-Sequence Reactance X_0 (ohm): 0.254268
Armature Phase Resistance R_1 (ohm): 0.241434
Armature Phase Resistance at 20C (ohm): 0.198599

D-Axis Reactive Inductance L_{ad} (H): 0.00122269
Q-Axis Reactive Inductance L_{aq} (H): 0.000900989
D-Axis Inductance $L_1 + L_{ad}$ (H): 0.00149248
Q-Axis Inductance $L_1 + L_{aq}$ (H): 0.00117078
Armature Leakage Inductance L_1 (H): 0.000269787
Zero-Sequence Inductance L_0 (H): 0.000269787

Field Leakage Inductance L_f (H): 0.209711
Field Resistance R_f (ohm): 3.9484
Field Resistance at 20C (ohm): 3.24788



NO-LOAD MAGNETIC DATA

Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.802162
Stator-Teeth Flux Density (Tesla): 1.32564
Stator-Yoke Flux Density (Tesla): 1.35365
Rotor-Pole Flux Density (Tesla): 1.72985
Rotor-Shoe Flux Density (Tesla): 1.33909
Rotor-Yoke Flux Density (Tesla): 1.89471

Air-Gap Ampere Turns (A.T): 230.537
Stator-Teeth Ampere Turns (A.T): 5.52023
Stator-Yoke Ampere Turns (A.T): 4.00013
Rotor-Pole Ampere Turns (A.T): 87.3966
Rotor-Shoe Ampere Turns (A.T): 13.4805
Rotor-Yoke Ampere Turns* (A.T): 396.707
Total Ampere Turns* (A.T): 1078.57

No-Load Excting MMF* (A.T): 1078.57
(* Note: The data are for two poles, or one pole pair)

Leakage-Flux Factor: 1.35482
Correction Factor for Magnetic
Circuit Length of Stator Yoke: 0.569922
Saturate Factor: 2.33927

Cogging Torque (N.m): 0.357149

No-Load Induced Voltage (V): 14
No-Load Excting Current (A): 2.47948

FULL-LOAD DATA

Exciting Current at Rated
Short-Circuit Current (A): 0.933945

Load Resistance (ohm): 1.03521
Phase Current (A): 13.4162
Phase Voltage (V): 13.8886
Apparrent Power (VA): 558.996
Power Factor: 1
Induced Phase Voltage (V): 17.4641
Full-Load Exciting Current (A): 4



Specific Electric Loading (A/mm): 35.3182
Armature Current Density (A/mm²): 12.268
Armature Thermal Load (A²/mm³): 433.285

Frictional and Windage Loss (W): 140.625
Iron-Core Loss (W): 33.4561
Armature Copper Loss (W): 130.37
Field Copper Loss (W): 63.1744
Total Loss (W): 367.625
Output Power (W): 558.996
Input Mechanical Power (W): 863.447
Total Input Power (W): 926.621
Efficiency (%): 60.3262

Synchronous Speed (rpm): 1500
Rated Torque (N.m): 5.89905

WINDING ARRANGEMENT

The 3-phase, 1-layer winding can be arranged in 6 slots as below:

AZBXC Y

Angle per slot (elec. degrees): 60
Phase-A axis (elec. degrees): 90
First slot center (elec. degrees): 0

TRANSIENT FEA INPUT DATA

For Armature Winding:

Number of Turns: 102
Parallel Branches: 1
Terminal Resistance (ohm): 0.241434
End Leakage Inductance (H): 7.79228e-005

For Field Winding:

Number of Turns: 435
Parallel Branches: 1
Terminal Resistance (ohm): 3.9484
End Leakage Inductance (H): 0.209711

Mechanical Data:

Estimated Rotor Inertia (kg m²): 0.000908559