

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

autor: Jakub Štěpán

Plzeň 2009

vedoucí práce: Ing. Pavel Jarolím

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ŠTĚPÁN**
Osobní číslo: **E09B0240P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru nakrátko**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Motor navrhnete pro parametry: výkon 20 kW, synchronní otáčky 1500/min, napětí 3x400/230 V, 50 Hz, krytí IP 23.
2. Proveďte elektromagnetický výpočet motoru, stanovte ztráty a účinnost.
3. Nakreslete kružnicový diagram motoru a odvoďte momentovou charakteristiku $M(s)$.
4. Nakreslete schématicky vinutí statoru.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bhag S. Guru: Electric Machinery and Transformers. Oxford University, Press. 2001.
2. Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A.: Transformer Engineering, Marcel Dekker, Inc., 2004.
3. List, V.: Elektrotechnika III.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Jarolím

Katedra teoretické elektrotechniky

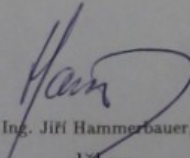
Konzultant bakalářské práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.

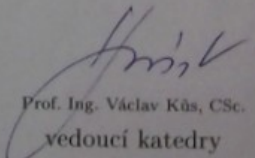
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011

Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci vypracovanou na závěr bakalářského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 12.5.2012

.....

Jakub Štěpán

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi velmi pomohli s vytvořením této práce. Chtěl bych tedy poděkovat panu Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc., za jeho pomoc a odborné rady a vedoucímu této bakalářské práce Ing. Pavlu Jarolímovi.

Anotace

Téma bakalářské práce je elektromagnetický návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko s parametry: $P = 20 \text{ kW}$, $U = 3 \times 400/230 \text{ V}$, $\omega_s = 1500 \text{ ot/min}$, $m = 3$, IP 23, $f = 50 \text{ Hz}$. Dále nákres kružnicového diagramu, odvození momentové charakteristiky $M(s)$ a schématický nákres vinutí statoru.

Klíčová slova

asynchronní motor, kotva nakrátko, elektromagnetický návrh, volba hlavních rozměrů, výpočet statoru, výpočet rotoru, výpočet magnetického obvodu, kružnicový diagram, schéma vinutí statoru

Anotation

Theme of my work is describing and constructing electric engine with these parameters:

$P = 20 \text{ kW}$, $U = 3 \times 400/230 \text{ V}$, $\omega_s = 1500$ turns per second, $m = 3$, IP 23, $f = 50 \text{ Hz}$.

Next deal is draw circle diagram and diagram of the stator winding.

Key words

induction motor, squirrel-cage, electromagnetic design, calculate the rotor, calculate the stator, calculate of the magnetic circuit, diagram of the stator winding, choice of main dimensions

Úvod

Historie asynchronních motorů odstartoval objev Nikola Tesly roku 1888. Tento velikán zjistil, že natočením 2 cívek do pravého úhlu lze vytvořit točivé magnetické pole. Podmínkou vzniku pole je fázový posuv taktéž o 90° . [1]

Princip asynchronního motoru je přeměna elektrické energie vstupního střídavého napětí na mechanickou energii a naopak. Tato přeměna je umožněna díky magnetické indukci mezi statorem a rotorem. To dělá z asynchronních motorů jedny z nejjednodušších elektrických motorů z hlediska spolehlivosti, údržby, konstrukce a ekonomické stránky. Z hlediska provedení napájení známe motory jednofázové a trojfázové. Asynchronní motory se vyrábí ve velkém rozsahu výkonů od několika wattů až po 20 MW. Motory je možné charakterizovat i podle otáček, které mohou být od několika desítek po 100 000 otáček za minutu. [2]

Asynchronní motory se dále dělí podle provedení rotoru. Nejčastějším typem rotoru je kotva nakrátko, kdy rotor je tvořen z masivních tyčí, spojenými nakrátko kruhy, které jsou přivařeny na konce tyčí. Materiály pro tyče jsou hliník, měď a mosaz. Další možností provedení rotoru je vinutá kotva, která má vinutí na rototu. Vinutí je spojení do hvězdy a vyvedeno na sběrací kroužky, přivařené na hřídel. Poslední typ je speciální provedení.

Základní popis asynchronního motoru je velmi jednoduchý. Stator je tvořen ze statorový plechů připevněných na kostru motoru do tvaru dutého válce. V těchto plechách jsou vytvořeny drážky pro vložení rotorového vinutí. [3] Ve statoru se střídavým vstupním napětím tvoří točivé magnetické pole, které působí na rotor motoru, kde se indukují napětí a stroj se roztáčí. Regulace momentu hřídele závisí na typu kotvy. U rotorů s vinutou kotvou je regulování otáček umožněno díky kluzným kontaktům. U rotoru s klecí nakrátko není umožněné řízení otáček z důvodu konstrukce kotvy, rychlost otáčení rotoru se úpravou napájecího napětí na statoru. Točivý moment u asynchronního motoru vzniká indukci napětí. Proud v rotoru vzniklý indukci vyvolá moment, který otáčí hřídel. Z tohoto důvodu má rotor zpoždění za točivým polem statoru. Zpoždění rotoru za točivým polem se nazývá skluz. Existence skluzu u asynchronních motorů je podmínkou pro provoz těchto strojů, jelikož pokud by byl skluz 0, což by znamenalo, že se rotor otáčí stejnou rychlostí jako točivé pole statoru, a proto se v něm neindukuje žádné napětí a motor nemá moment.

Způsoby rozběhů asynchronních motorů se liší podle výkonu stroje. Stroje malých výkonů, řádově jednotek wattů, se spouští přímým připojením na síť, zatímco u výkonostně větších strojů je již potřeba regulace. Důvodem jsou záběrné proudy, které mohou být 4 - 8 násobkem jmenovitého proudu. [4]

Obsah

Návrh motoru.....	1
Návrh hlavních rozměrů.....	1
Výška osy.....	1
Výška osy.....	1
Vnější průměr.....	2
Vnější průměr.....	2
Vnitřní průměr statoru.....	2
Vnitřní průměr statoru.....	2
Pólová rozteč a výpočtový vnitřní výkon	3
Pólová rozteč a výpočtový vnitřní výkon	3
Elektromagnetická zatížení.....	4
Elektromagnetická zatížení.....	4
.....	5
.....	5
Výpočet činitelů $\alpha\delta$, kB a $kV1$	5
Výpočet činitelů $\alpha\delta$, kB a $kV1$	5
Synchronní úhlová rychlost hřídele ω_s	6
Synchronní úhlová rychlost hřídele ω_s	6
Ideální délka vzduchové mezery l_i	6
Ideální délka vzduchové mezery l_i	6
.....	7
.....	7
Výpočet statoru.....	7
Drážky statoru.....	7
Drážky statoru.....	7
Počet drážek na pól a fázi.....	8
Počet drážek na pól a fázi.....	8
Jmenovitý proud statoru.....	8
Jmenovitý proud statoru.....	8
Počet efektivních vodičů v drážce.....	9
Počet efektivních vodičů v drážce.....	9
Počet závitů ve fázi.....	9
Počet závitů ve fázi.....	9
Proudová hustota.....	9
Proudová hustota.....	9
Určení statorového vinutí.....	10
Určení statorového vinutí.....	10
Činitel vinutí.....	10
Činitel vinutí.....	10
Činitel rozlohy.....	11
Činitel rozlohy.....	11
Magnetický tok.....	11
Magnetický tok.....	11
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře.....	12
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře.....	12
Lineární hustota proudu.....	12
Lineární hustota proudu.....	12
Efektivní průřez vodiče.....	12

Efektivní průřez vodiče.....	12
Rozměry drážek a zubů statoru.....	14
Rozměry drážek a zubů statoru.....	14
.....	14
.....	14
Výška jha statoru.....	14
Výška jha statoru.....	14
Šířka zubu.....	15
Šířka zubu.....	15
Hloubka drážky.....	16
Hloubka drážky.....	16
Otevření drážky	17
Otevření drážky	17
.....	17
.....	17
Plocha příčného průřezu drážky.....	17
Plocha příčného průřezu drážky.....	17
Světlé rozměry drážky.....	17
Světlé rozměry drážky.....	17
Volba vzduchové mezery	19
Určení rotoru	19
Hlavní rozměry	19
Tyč rotoru.....	20
Rozměr drážky.....	21
Rozměr drážky.....	21
Kruh nakrátko.....	22
Kruh nakrátko.....	22
Výpočet magnetického obvodu.....	23
Hodnoty indukci	23
Hodnoty indukci	23
Magnetické napětí.....	24
Magnetické napětí.....	24
Odpory a reaktance.....	27
Odpor jedné fáze statorového vinutí	27
Odpor jedné fáze statorového vinutí	27
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí.....	28
Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí.....	28
Poměrné hodnoty odporů a reaktancí.....	32
Poměrné hodnoty odporů a reaktancí.....	32
Návrh vinutí.....	33
Výpočet ztrát.....	34
Kružnicový diagram.....	38
Přehled vypočtených hodnot.....	39

Návrh motoru

Samotný návrh stroje začíná určením hlavních rozměrů. Mezi tyto parametry se řadí vnitřní průměr statoru D , ideální délka vzduchové mezery l_i . Tyto veličiny jsou ovšem vázány s výkonem, úhlovou rychlostí ω_s a elektromagnetickým zatížením tzv. strojovou konstantou.[5]

Základní rovnice:[5]

$$\frac{D^2 \cdot l_i \cdot \omega_s}{P_i} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta} \quad (1)$$

kde

P_i vnitřní výkon [W]

A lineární proudová hustota [$A \cdot m^{-1}$]

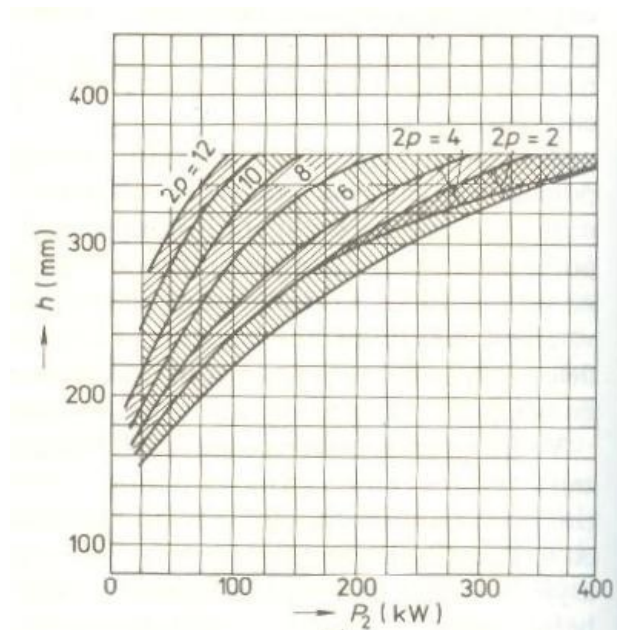
B_δ indukce ve vzduchové mezeře [T]

α_δ, k_B, k_v ... jsou činitelé

Návrh hlavních rozměrů

Výška osy

Výška osy stroje se určuje v závislosti na výkonu P_2 z tabulek na obr.1. Jako důležité parametry pro správné určení hledané hodnoty jsou počet pólů $2p$ a stupeň krytí.[5] Pro náš stroj jsme zvolili hodnotu $h = 0,18$ m. Musíme brát na zřetel, že hodnota velikosti výšky h musí odpovídat hodnotám z normalizovaných řad výšek os.[5]



Obr.1 Výšky os v závislosti na výkonu a otáčkách pro motory s krytím IP 23

Vnější průměr

Vnější průměr D_e odečítáme z tabulky 1, ve které jsou normalizované velikosti výšek os v závislosti na vnějším průměru D_e . [5]

h [mm]	53	63	71	80	90	100	112	132
D_e [m]	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h [mm]	160	180	200	225	250	280	315	355
D_e [m]	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,53	0,59	0,66

Tab.1 Výšky os elektrických strojů a jim odpovídající vnější průměry statorových plechů pro asynchronní motory řady 4A [5]

$$D_e = 0,313 \text{ m}$$

Vnitřní průměr statoru

Vnitřní průměr statoru lze snadno určit z vnějšího průměru D_e , výšky j_{ha} a hloubky drážky zubů statoru h_d . Tento předpoklad však nelze použít v této fázi výpočtu. Důvodem je prozatimní

neznalost hodnot výšky jha statoru h_{j1} a hloubku drážky zubu statoru h_{d1} . Proto určování těchto hodnot je založeno na empirickém zkoumání a na úvaze, kdy při stejné indukci v jednotlivých úsecích magnetického obvodu elektrických strojů se stejným D bude jha statoru úměrné magnetickému toku, pólové rozteči a nepřímo úměrná počtu pólů. Po této úvaze dostáváme přibližný vztah:

$$D = K_D \cdot D_e \quad (3)$$

Přičemž hodnoty koeficientů jsou uvedeny v tabulce 2. Tyto koeficienty charakterizují poměry vnitřních a vnějších průměrů statorů.[5]

2p	2	4	6	8	10 – 12
K_D	0,52 – 0,57	0,62 – 0,68	0,7 – 0,72	0,74 – 0,75	0,75 – 0,77

Tab. 2 Poměr $K_D = \frac{D}{D_e}$ pro různé počty pólů asynchronních motorů řady 4A[5]

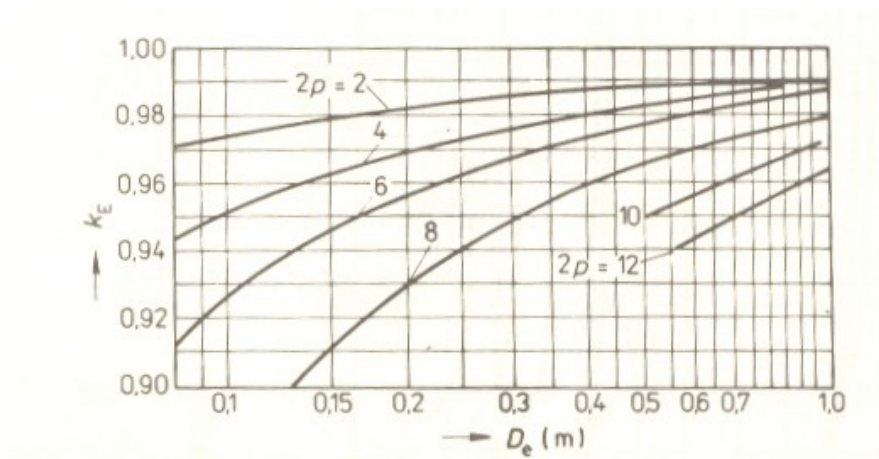
$$K_D=0,64 \text{ a } D = 0,64 \cdot 0,31 = 0,2m$$

Pólová rozteč a výpočtový vnitřní výkon

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 0,16m \quad (4)$$

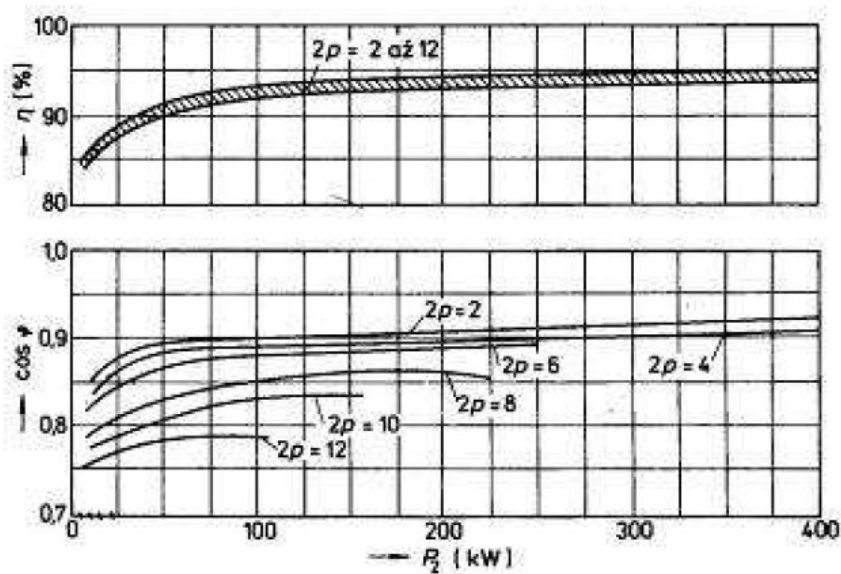
$$P_i = m \cdot I \cdot U_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi} = 25,86kVA \quad (5)$$

kdy k_E je poměr indukovaného napětí vinutí statoru ku jmenovitému napětí, který se určí z obr.2 a P_2 je výkon na hřídeli motoru.[5]



Obr.2 Hodnoty činitele k_E [5]

Hotnoty η a $\cos\varphi$ nejsou zadány, avšak je lze snadno určit z grafů na obr.3, kde jsou vyobrazeny závislosti účinnosti a účiníku na výkonu P_2 . [5]

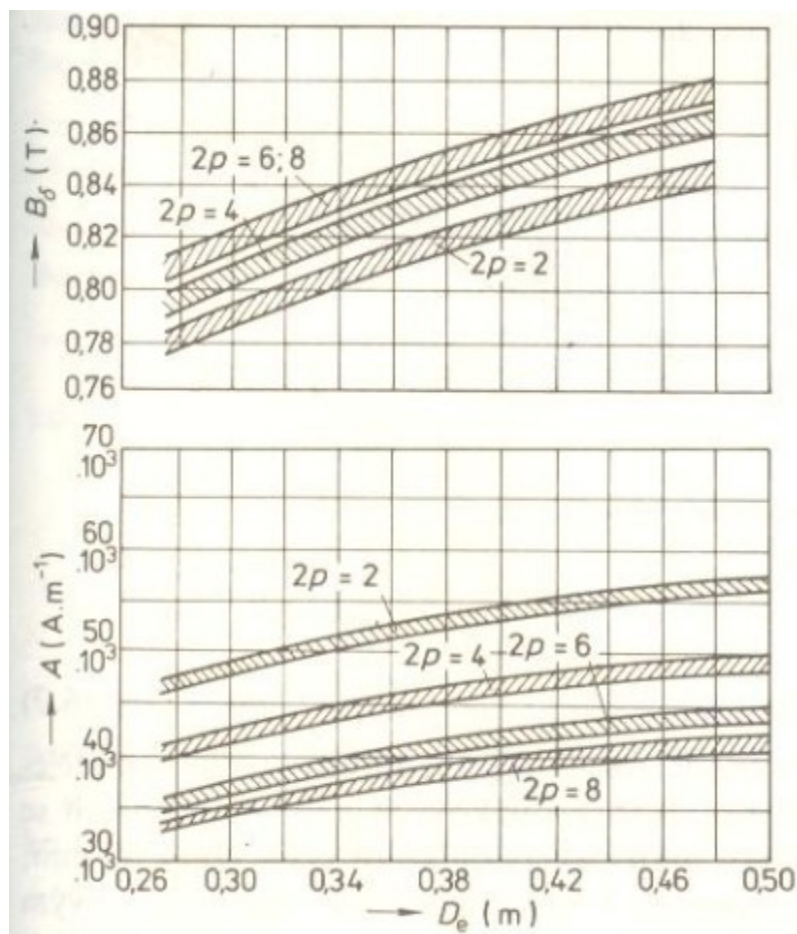


Obr.3 Přibližné hodnoty účinnosti a účiníku v závislosti na výkonu P_2 pro motory s krytím IP 23 [5]

Elektromagnetická zatížení

Při návrhu elektromagnetického zatížení, to znamená indukce ve vzduchové mezeře B_δ a lineární proudové hustoty A , je nutné postupovat velmi pečlivě. Ze vztahu (1) je vidět, že hlavní rozměry stroje závisí na součinu A a B_δ a jsou ovlivněny i vzájemným poměrem mezi těmito dvěma veličinami. V obr.4 jsou uvedené veličiny vyneseny v grafech v závislosti na vnějším průměru

statoru D_e . Tyto závislosti jsou vytvořeny z údajů naměřených na vyrobených motorech s vlastnosti odpovídající normám ČSN.[5]



Obr.4 Závislosti lineární proudové hustoty a magnetické indukce ve vzduchové mezeře na vnějším průměru statoru pro motory s krytím IP 23[5]

$$B_\delta = 0,81 \text{ T}$$

$$A = 42500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Výpočet činitelů α_δ , k_B a k_{V1}

Vlivem nasycení zubů statoru ve vzduchové mezeře se křivka magnetického pole zplošťuje. Toto udává činitele pólového krytí α_δ a tvaru pole k_B . Přesné hodnoty těchto činitelů lze stanovit až po výpočtu magnetického obvodu. Pro zjednodušení předpokladů je výhodnější uvažovat pole sinusové.[5]

$$\alpha_{\delta} = \frac{2}{\pi} \cong 0,64 \quad (6)$$

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cong 1,11 \quad (7)$$

Hodnota činitele k_{v1} se volí podle typu vinutí zatím jako předběžná a pro dvouvrstvá a jedno-dvouvrstvá vinutí je veliskost $k_{v1}=0,91 - 0,92$. [5]

$$k_{v1}=0,92$$

Synchronní úhlová rychlost hřídele ω_s

Vztah pro výpočet ω_s : [5]

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

kdy

n_1 jsou synchronní otáčky [min^{-1}]

f_1 je napájecí frekvence [Hz]

ppočet pólových dvojic

$$\omega_s=157 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Ideální délka vzduchové mezery l_i

Ze vztahu (1) s uvažováním činitele α_{δ} lze rovnici pro výpočet ideální délky vzduchové mezery psát: [5]

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_{\delta}} [m] \quad (9)$$

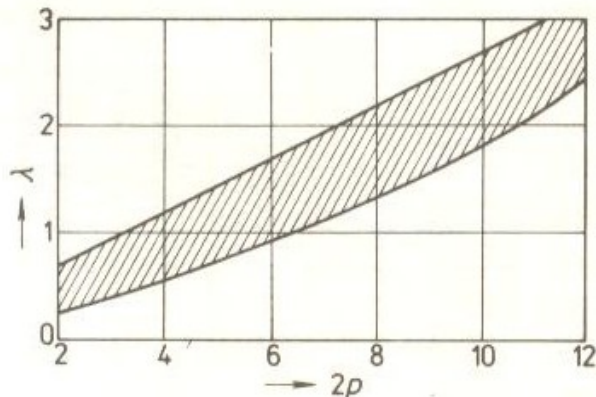
$$l_i=0,01m$$

Důležitým parametrem pro správnou volbu D a l_i je štíhlostní poměr: [5]

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} \quad (10)$$

Tento poměr je však omezen křivkami na obr.5. Pokud poměr vychází jiný, než jakou

dovoluje oblast mezi křivkami, je nutné pozměnit výšku h.[5]



Obr.5 Štíhlostní poměr $\lambda = \frac{l_i}{t_p}$ pro asynchronní motory s krytím IP 23[5]

$$\lambda=0,09$$

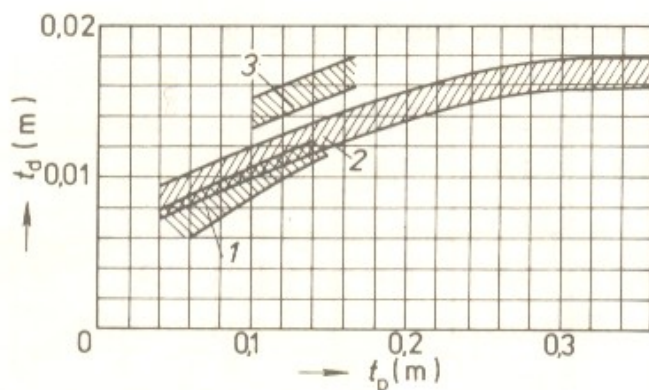
Tímto určení hlavních rozměrů končí. Jsou určeny základní parametry jako pólová rozteč, výška osy, vnitřní a vnější průměr statoru a délka vzduchové mezery.[5]

Výpočet statoru

Pro další výpočty je nutné určit počet drážek statoru Q_1 a počet závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí N_1 . Počet závitů ve fázi musí být natolik veliké, aby lineární proudová hustota a magnetická indukce ve vzduchové mezeře co možno nejvíce souhlasily s hodnotami zvolenými v předchozích výpočtech a Q_1 musí být schopné svou velikostí zajistit dostatečně rovnoměrné rozložení vinutí.[5]

Drážky statoru

Před výpočtem počtu drážek statoru se nejprve volí drážková rozteč t_{d1} dle typu vinutí, jmenovitého napětí a pólové rozteče. U strojů s rovnoměrně rozloženým vinutím je velký počet



drážek a drážková rozteč je malá. Hodnoty t_{d1} určit z grafů na obr.6, kde jsou vyznačeny 3 oblasti. Oblast 1 vyznačuje hodnoty t_{d1} pro motory s $h \leq 90$ mm, plocha 2 je pro $250 \geq h \geq 90$ mm a oblast 3 vymezuje mnohápólové stroje s $h \geq 280$ mm se

vsypávaným vinutím.[5]

Obr.6 Drážková rozteč statoru se vsypávaným vinutím[5]

Pak je hodnota $t_{d1min}=0,012$ m a $t_{d1max}= 0,014$ m.

Vzorec pro výpočet počtu drážek Q_1 : [5]

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = 44,93 \quad (11)$$

$$Q_{2max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} = 52,42 \quad (12)$$

Volím tedy $t_{d1}=0,013$ m a poté $Q_1=48$.

Počet drážek na statoru musí být číslo dělitelné počtem fází.[5]

Počet drážek na pól a fázi

Počet drážek na pól a fázi musí být pro většinu asynchronních motorů číslo celé. Při porušení tohoto pravidla hrozí nesymetrie magnetomotorického napětí.[5]

Vztah pro výpočet q : [5]

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = 4 \quad (13)$$

Pro konečnou volbu je nutné udělat kontrolu, kdy q je zpětně dosazené do vzorce: [5]

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 0,0131 \text{ m} \quad (14)$$

Tato vypočtená hodnota se nesmí lišit o více jak 10 % od již dříve počtené t_{d1} . [5]

Jmenovitý proud statoru

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (15)$$

$$I_{1N} = 38,32 \text{ A}$$

Počet efektivních vodičů v drážce

Pro počet efektivních vodičů v drážce platí pravidlo, že V_d musí být číslo celé a pro dvouvrstvá vinutí musí být toto číslo dělitelné 2. Nedodržení tohoto pravidla se dovoluje jen ve výjimečných případech a velmi to komplikuje technologii výroby. Proto se vypočtené V_d zaokrouhlí na nejbližší sudé či celé číslo, dle druhu vinutí.[5]

Aby chyba zaokrouhlení byla nejmenší, provádí se předběžný výpočet V'_d :[5]

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = 14,54 \quad (16)$$

Následné dopočetění V_d je dohledání takového počtu paralelních větví, aby konečná hodnota splňovala výše zmíněné požadavky:[5]

$$V_d = a \cdot V'_d \quad (17)$$

Zvolil jsem dvouvrstvé vinutí, tedy $a = 2$. Vyjde $V_d = 29,07$, a aby bylo sponěny požadavky je tato hodnota zaokroulena na $V_d = 30$.

Počet závitů ve fázi

Konečný počet závitů N_1 :[5]

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = 120 \quad (18)$$

Proudová hustota

Konečná hodnota A se smí od dříve vypočtené hodnoty lišit jen velmi nepatrně, protože tato hodnota je ovlivněna pouze efektivním počtem vodičů v drážce V_d . Konečnou hodnotu je třeba srovnat s hodnotami vymezenými v grafem na obr.4.[5]

Vztah pro výpočet:[5]

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D} = 43\,858,17 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Určení statorového vinutí

Typ vinutí se u strojů volí s ohledem na konstrukci a předpokladanou technologii výroby. Motory do 15 kW se mají většinou jednovrstvé soustředné vinutí. Vinutí dvouvrstvá se vyskytují převážně u větších strojů a jsou zhotovena z pásků.[5]

Činitel vinutí

Činitel vinutí k_v je hodnota, která zvažuje zmenšení indukovaného napětí ve fázi vinutí uloženého v drážkách oproti napětí, které by se indukovalo do stejného počtu závitů vinutí, ale s plným krokem. Vztah pro výpočet:[5]

$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,97$$

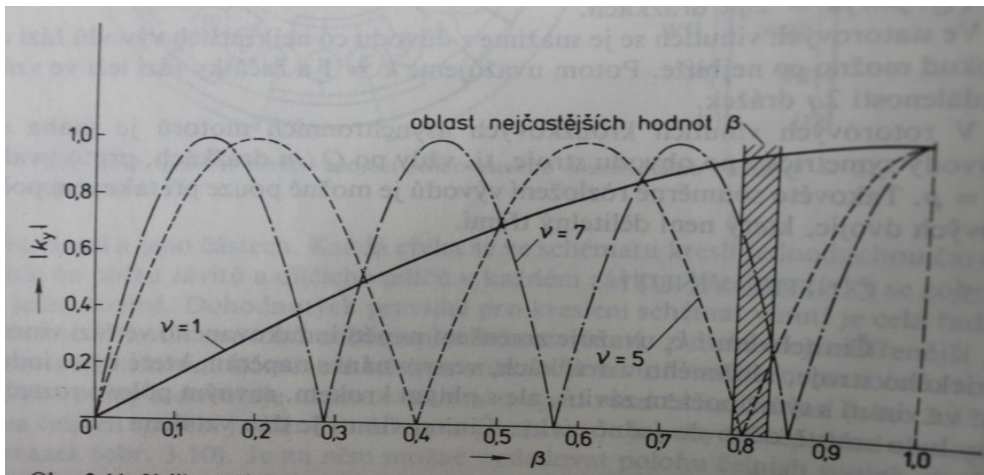
(19)

kdy

k_y činitel zkrácení kroku, který se vypočte vztahem:[5]

$$k_y = \sin \left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = 0,97 \quad (20)$$

Hodnota zkrácení kroku β se u střídavých strojů pohybuje v rozmezí 0,79 až 0,833, což odpovídá vyznačené ploše na obr.7 a tomu odpovídají hodnoty k_y . [5]



Obr.7 Velikost činitele zkrácení kroku v závislosti na zkrácení kroku pro 1., 5. a 7. harmonickou[5]

Činitel rozlohy

Vinutí fáze je většinou rozprostřeno ve více než 2 drážkách, indukované napětí v každém závitě cívky má určité zpoždění, které odpovídá prostorovému posunu závitů cívky podél obvodu stroje. Jednotlivá napětí je pak potřeba sčítat pouze fázorově. Výsledný fázorový součet je menší nebo roven algebraickému součtu napětí jednotlivých závitů.[6]

Proto se zavádí činitel rozlohy k_r , který respektuje snížení indukovaného napětí:[6]

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \quad (21)$$

$$k_r = 0,999986595$$

Magnetický tok

Dle vztahu:[5]

$$\phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = 0,0087 \text{ Wb} \quad (22)$$

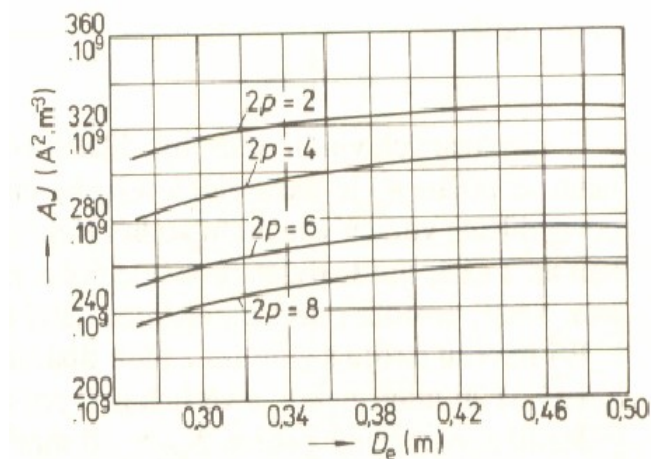
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Dle vztahu:[5]

$$B_\delta = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = 0,8087 \text{ T} \quad (23)$$

Lineární hustota proudu

Z hlediska největšího využití aktivních materiálů je hustota proudu vysoká, avšak s tím se objevuje efekt vyšších ztrát ve vinutí a s tím spojená vyšší pracovní teplota a nižší účinnost motoru. Proto se zavádí kritérium, tzv. A-J kritérium, jehož grafické znázornění je vidět na obr.8.[5]



Obr.8 Střední hodnoty součinu A J u asynchronních motorů[5]

Pro náš návrh je $AJ = 295 \cdot 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^2$

Vztah pro výpočet:[5]

$$J = \frac{AJ}{A} = 6,726 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (24)$$

Efektivní průřez vodiče

Vztah pro výpočet:[5]

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = 2,849 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (25)$$

Dle tabulky na obr.9 navrhнем konečnou podobu měděného izolovaného drátu dle norem ČSN 34 73.[5]

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm ²)	Střední odpor při 20 °C (Ω · km ⁻¹)	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
1,06	0,882	19,880							
1,12	0,985	17,807							
1,18	1,094	16,042							
1,25	1,227	14,296	0,27		0,27	0,27	0,095	0,14	0,14
1,32	1,369	12,820							
1,40	1,539	11,397							
1,50	1,767	9,927 8							
1,60	2,011	8,725 6							
1,70	2,270	7,729 1	0,275	—					
1,80	2,545	6,895 0							
1,90	2,835	6,187 6							
2,00	3,142	5,584 3			0,3	0,3	0,12	0,18	—
2,12	3,530	4,969 9							
2,24	3,941	4,451 7	0,325						
2,36	4,374	4,010 6							
2,50	4,909	3,574 1		—					
2,65	5,515	3,180 7							
2,80	6,158	2,849 1	0,335						
3,00	7,069	2,481 9	0,385		0,345	0,365	0,15	0,24	
3,15	7,793	1,962 0							
Teplotná třída izolace			A	A	F	H	B	B	F

Obr.9 Tabulka pro měděné izolovaná dráty vinutí dle normy ČSN 33 73[5]

Dle uvedených hodnot v tabulce je konečný návrh vodiču: $d = 2 \text{ mm}$

$$S = 3,142 \text{ mm}^2$$

$$R_{stř, 20°C} = 5,5843 \text{ Ω} \cdot \text{km}^{-1}$$

Ke zvoleným hodnotám je důležité uvažovat oboustranný izolační přírůstek $d_i = 0,325 \text{ mm}$.[5]

Pro ruční zakládání drátů do drážek je maximální průměr drátu 1,7 mm. Toto kritérium námi navržený drát nesplňuje, proto ho rozdělíme na 2 dílčí vodiče $n_p = 2$.[5]

Kdy dílčí vodič má parametry:

$$d = 1 \text{ mm}$$

$$S = 0,785 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{stř; } 20^\circ\text{C}} = 22,332 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$d_i = 0,22 \text{ mm}$$

Pro konečné určení proudové hustoty J:[5]

$$J_1 = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v \cdot n_p} = 12,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (26)$$

Rozměry drážek a zubů statoru

Rozměry drážky je nutné volit v závislosti na rozměrech vodičů vinutí a jejich izolace. Tvar drážek a zubů je dán výkonem stroje a typem vinutí. Výpočet vychází z dovolených indukcií, které jsou uvedeny v tabulce na obr.10.[5]

Část magnetického obvodu	Označení	IP 44					IP 23					
		2p	2	4	6	8	10 a 12	2	4	6	8	10
Jho statoru	B_{j1}	1,4 až 1,6			1,15 až 1,35	1,1 až 1,2	1,45 až 1,6			1,2 až 1,4		1,1, až 1,3
Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)	B_{z1}	1,7 až 1,9			1,6 až 1,8	1,9 až 2,1	1,8 až 2,0			1,7 až 1,9		
Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozavřené F	$B_{z1\text{max}}$	1,75 až 1,95				1,9 až 2,1	1,8 až 2,0					
drážky otevřené N, M		1,6 až 1,8				1,7 až 1,9						

Obr.10 Dovolené hodnoty B [T] pro různé části motoru[5]

Zvolené hodnoty:

$$B_{j1} = 1,5 \text{ T}$$

$$B_{z1} = 1,8 \text{ T}$$

Výška jha statoru

Kdy:[5]

$$h_{j1} = \frac{\phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = 0,027 \text{ m} \quad (27)$$

Koeficient k_{Fe} vybereme v tabulce na obr.11, kde jsou uvedeny i doporučené způsoby izolace.[5]

h (mm)	U (V)	Stator		Rotor nakrátko	
		způsob izolace	k_{Fe}	způsob izolace	k_{Fe}
50 až 250	< 660	vrstva oxidu	0,97	vrstva oxidu	0,97
280 až 355	< 660	lakování	0,95	lakování	0,95
400 až 560	6000	lakování	0,95	lakování	0,95

Obr.11 Doporučené způsoby izolace a koeficient k_{Fe} pro stator a rotor[5]

$$k_{Fe} = 0,97$$

Šířka zubu

Nejprve musíme upravit vrtání statoru D o klínovou část. Podle tabulky D 4.1 z [5] je tato výška $h_1 = 2,5 \text{ mm}$.[5]

Vztah pro výpočet upraveného vrtání statoru D_1 : [5]

$$D_1 = D + 2 \cdot h_1 = 0,2 + 2 \cdot 0,0025 = 0,2025 \text{ m} \quad (28)$$

Výpočet upravené drážkové rozteče t'_{d1} : [5]

$$t'_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q_1} = 0,01325 \text{ m} \quad (29)$$

Následně předběžná šířka zubu b_{z1} : [5]

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t'_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = 0,00615 \text{ m} \quad (30)$$

Šířka drážky v horní části zubu získáme ze vzorce: [5]

$$b_1 = t'_{d1} - b_{z1} = 0,0071 \text{ m} \quad (31)$$

Výsledná hodnota se zaokrouhlí na nejbližší normovanou hodnotu dle tabulky D 4.1

na obr.12.[5]

b_1	Drážka S a L					Drážka V			Drážka K			
	b_0	h_0	h_1	u_1	λ_z	b_0	h_0	λ_z	d	b_0	h_0	λd
2,6								1,435	3			
2,8								1,460	3,3			
3								1,484	3,5	0,8	0,5	1,248
3,2	—	—	—	—	—	0,8	0,5	1,505	3,7			
3,4								1,524	4			
3,6								1,542	4,2			
3,8								1,558	4,4			
4	2,2		0,90	1,50	0,561			1,573	4,6			
4,2			1,00	1,40	0,587			1,595	5	1,0		1,323
4,4			0,95	1,55	0,517			1,610	5,2			
4,6	2,5		1,05	1,45	0,540			1,623	5,5		0,7	
4,8			1,15	1,35	0,562			1,636	6			
5			1,25	1,25	0,583	1,0	0,7	1,648	6,5			
5,2			1,35	1,15	0,603			1,659	7			
5,5	2,8	0,5	1,35	1,25	0,553			1,674	7,5			1,090
5,8			1,50	1,10	0,580			1,689	8			
6			1,50	1,00	0,550			1,697	8,5			
6,2	3,0		1,60	0,90	0,567			1,357	9	1,5		
6,5			1,75	0,75	0,590			1,372	9,5			
6,8			1,90	0,60	0,613			1,385	10			
7			1,90	0,50	0,585			1,394	10,5		1,0	1,290
7,2	3,2		2,00	0,40	0,599		0,7	1,402	11			
7,5			1,60	1,40	0,477	1,5		1,414	11,5			
7,8	3,5		1,72	1,28	0,493			1,425	12			
8			1,80	1,20	0,503			1,433	12,5			

Obr. 12 Rozměry drážek dle vinutí

$$b_1 = 7,2 \text{ mm}$$

Hloubka drážky

Hloubka drážky:[5]

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = 0,028 \text{ m} \quad (32)$$

Hloubka části jen pro vodiče s vyloučením klínové části:[5]

$$h_2 = h_d - h_1 = 0,028 - 0,0025 = 0,0255 \text{ m} \quad (33)$$

Šířka drážky v horní části:[5]

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_2) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1} = 0,01 \text{ m} \quad (34)$$

Otevření drážky

Otevření drážky b_0 je normalizovaná hodnota. Velikost této veličiny závisí na průměru izolovaného vodiče s přičtením 1,5-2 mm. Obvyklá hodnota bývá u malých strojů 1,8 mm a velkých motorů až 4 mm. Střední hodnoty b_0 najdeme v tabulce 3 v závislosti na $2p$ a h . [5]

h[mm]	počet pólů 2p					
	2	4	6	8	10	12
50-63	1,8	1,8	1,8			
71	2	2	2			
80-90	3	3	2,7			
100-112	3,5	3,5	3			
132	4	3,5	3,5			
160-250	4	3,7	3,7			
280-315					4	4

Tab.3 Střední hodnoty otevření polozavřených drážek b_0 [mm][5]

$$b_0 = 3,7 \text{ mm}$$

Plocha příčného průřezu drážky

Dle vztahu:[5]

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} h_2 = \frac{0,0072 + 0,01}{2} \cdot 0,0255 = 0,000219 \text{ m} \quad (35)$$

Světlé rozměry drážky

Pro výpočet činitele je nutné znát plochu drážky, kterou zaujímá izolace a plochu izolační vložky v drážce a je nutné znát i vůle na složení plechů Δb_d a Δh_d , které odečteme v tabulce 4, světlých rozměrů drážky b'_1 a b'_2 . [5]

výška osy h [mm]	Přidavky [mm]	
	na šířku Δb_d	na výšku Δh_d
50 až 132	0,1	0,1
160 až 250	0,2	0,2
280 až 355	0,3	0,3
400 až 560	0,4	0,3

Tab.4 Vůle plechů Δb_d a Δh_d v závislosti na výšce osy h [5]

$$\Delta b_d = 0,2 \text{ mm}$$

$$\Delta h_d = 0,2 \text{ mm}$$

Pak vztahy pro dopočet světých ploch bude:[5]

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 0,0072 - 0,0002 = 0,007 \text{ m} \quad (36)$$

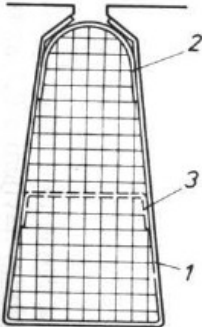
$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 0,01 - 0,0002 = 0,0998 \text{ m} \quad (37)$$

$$h'_2 = h_2 - \Delta h_d = 0,0255 - 0,0002 = 0,0253 \text{ m} \quad (38)$$

Plocha drážky pro drážkovou izolaci:[5]

$$S_i = b_i \cdot (2 \cdot h_d + b_1 + b_2) = 0,0004 \cdot (2 \cdot 0,028 + 0,0072 + 0,01) = 0,000029 \text{ m}^2 \quad (39)$$

kdy b_i je jednostranná tloušťka izolace v drážce, kterou nalezneme na obr.12.

Vinutí	Typ vinutí	h (mm)	Pozice	Tloušťka (mm)	Počet vrstev	Jednostranná tloušťka izolace (mm)
	jednovrstvá	50 až 80	1 2	0,2 0,3	1 1	0,2 0,3
		90 až 132	1 2	0,25 0,35	1 1	0,25 0,35
		160	1 2	0,4 0,5	1 1	0,4 0,5
	dvouvrstvá	180 až 250	1 2 3	0,4 0,5 0,4	1 1 1	0,4 0,5 0,4

Obr.12 Izolace vsypávaných vinutí asynchronních motorů[5]

Plocha drážky zbývající pro vinutí se určí vztahem:[5]

$$S'_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_2 - S_i - S_{vl} = \frac{0,007 + 0,0988}{2} \cdot 0,0253 - 0,000029 - 0,01188 = 0,00071 \text{ m} \quad (40)$$

kdy S_{vl} je plocha vložek mezi vrstvami vinutí v drážce pro motory a $h = 180-250 \text{ mm}$:[5]

$$S_{vl} = (0,4 \cdot b_1 + 0,9 \cdot b_2) = 0,01188 \text{ m}^2 \quad (41)$$

Volba vzduchové mezery

Šířka vzduchové mezery velmi ovlivňuje energetické ukazatele stroje. Na velikosti mezery závisí magnetický odpor a s tím magnetického napětí, které vytváří magnetomotorické napětí stroje. Se zmenšením δ se zmenšuje magnetomotorické napětí a tím i magnetizační proud motoru. Při návrhu se vychází z minima výsledných ztrát, protože s navyšující se δ roustou i ztráty ve vinutí, avšak ztráty pulzní a povrchové klesají. Tyto výpočty se provádějí v simulačních programech. Pro návrh použijí empirických vztahů:[5]

$$\delta \approx (0,25 + D) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,2) \cdot 10^{-3} = 0,45 \text{ mm} \quad (42)$$

Tato hodnota se zaokrouhluje na 0,05 mm pokud je $\delta < 0,5$ mm.[5] Výsledná hodnota δ je 0,45 mm.

Určení rotoru

Dle zadání bude v navrhovaném motoru rotor nakrátko. Tento specifický rotor je tvořen měděnými tyčemi spojenými nakoncích mosaznými kruhy.[7] Toto vinutí rotoru nemá určitý počet fází a pólů. Tento fakt dovoluje použití jednoho typu rotoru u strojů navržených pro různý počet pólů.[5] Počet drážek na rotoru Q_2 volí podle doporučených hodnot z tabulky na obr.13. Platí, že $Q_2 < Q_1$. [5]

Volím tedy drážky nenatočené a $Q_2 = 34$.

Hlavní rozměry

Vnější průměr rotoru:[5]

$$D_2 = D - 2\delta = 0,2 - 2 \cdot 0,00045 = 0,1991 \text{ m} \quad (43)$$

Délka rotoru:[5]

$$l_d = l_1 = l_2 = l_{Fel} = l_i = 0,11 \text{ m} \quad (44)$$

Drážková rozteč:[5]

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,1991}{34} = 0,0184 \text{ m} \quad (45)$$

Vnitřní průměr rotoru:[5]

Vnitřní průměr závisí na vnitřním průměru hřídele D_e a činiteli k_h , který je uveden v tab. 4.

[5]

h[mm]	71-250
2p	2 až 8
k_h	0,23

Tab.4 činitel k_h pro výpočet průměru hřídele

$$k_h = 0,23$$

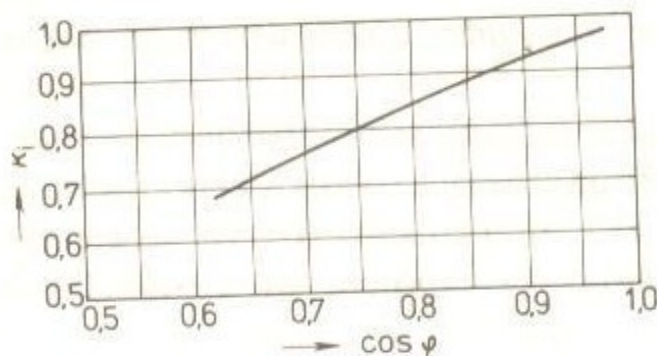
$$D_h \approx k_h \cdot D_e = 0,0713 \text{ m} \quad (46)$$

Tyč rotoru

Proud tyčí:[5]

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,89 \cdot 38,34 \cdot 19,48 = 664,36 \text{ A} \quad (47)$$

kdy k_i je činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů na poměr $\frac{I_1}{I_2}$. Tento činitel získáme z obr.14 a p_i je koeficient přepočtu proudů.[5]



Obr.14 Činitel k_i v závislosti na $\cos\varphi$ [5]

$$k_i = 0,89$$

Koeficient p_i se vypočítá ze vztahu:[5]

$$p_i = \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,92}{34} = 19,48 \quad (48)$$

Proudová hustota:[5]

$$J_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

Proudová hustota se pro zavřené odlévané rotory volí mezi $(2,5 \text{ až } 3,5) \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. [5]

Průřez tyče:[5]

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{664,36}{3 \cdot 10^6} = 2,21 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (49)$$

Rozměr drážky

V asynchronních motorech s výškou osy h 160 až 250 mm se používají zavřené drážky s rozměry $b_0 = 1,5 \text{ mm}$, $h_0 = 0,7 \text{ mm}$ a u motorů s $2p \geq 4$ je výška můstku nad drážkou $h'_0 = 0,3 \text{ mm}$. Další rozměry zjistíme z průřezu tyče S_t . [5]

Šířka zubu rotoru:[5]

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_2}{B_{z2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0184 \cdot 0,11}{1,9 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 0,008086 \text{ m} \quad (50)$$

Kdy B_{z2} je magnetická indukce v zubech rotoru. Její hodnotu určíme z tab na obr. 10.

$$B_{z2} = 1,9 \text{ T}$$

Průměr zaoblení horní části:[5]

$$b_1 = \frac{\pi (D_2 - 2h_0 - 2h'_0) - Q_2 b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi (0,1991 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 34 \cdot 0,0080686}{\pi + 34} = 0,00927 \text{ m} \quad (51)$$

Průměr zaoblení dolní části:[5]

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0,00927^2 \cdot \left(\frac{34}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot 0,000221}{\frac{34}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 0,00442 \text{ m} \quad (52)$$

Vzdálenost středů zaoblení:[5]

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Q_2}{2\pi} = (0,00927 - 0,00442) \frac{34}{2\pi} = 0,0262 \text{ m} \quad (53)$$

Nyní provedeme přesnější dopočet průřezu tyče:[5]

$$S_t = \frac{\pi}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1 = 0,000221 \text{ m} \quad (54)$$

Upřesnění šířky zubu

Protože velikostí šířek b_1 a b_2 jsou zaokrouhlené, je nutné provést dopočet výsledné šířky zubu ve 2 průřezech. Výsledné velikosti jsou již definitivní.[5]

Vztah pro první průřez:[5]

$$b_2' = \pi \frac{D_2 - 2h_0 - b_1}{Q_2} - b_1 = \pi \frac{0,1991 - 2 \cdot 0,0007 - 0,00927}{34} - 0,00927 = 0,0174 \text{ m} \quad (55)$$

Vztah pro druhý průřez:[5]

$$b_{22}'' = \pi \frac{D_2 - 2h_{d2} - b_2}{Q_2} - b_2 = \pi \frac{0,1991 - 2 \cdot 0,033745 - 0,00442}{34} - 0,00442 = 0,00733 \text{ m} \quad (56)$$

kdy h_{d2} je hloubka drážky:[5]

$$h_{d2} = \frac{1}{2}(b_1 + b_2) + h_1 + h_0 = \frac{1}{2}(0,00927 + 0,00442) + 0,0262 + 0,0007 = 0,033745 \text{ m} \quad (57)$$

Konečnou šířku zubu upravíme pro další výpočty na hodnotu $b_{22} = 0,00733 \text{ m}$.

Kruh nakrátko

Proud kruhem získáme ze vztahu:[5]

$$I_{kn} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{664,36}{0,3696} = 1797,5 \text{ A} \quad (58)$$

$$\text{kdy } \Delta = 2 \sin \frac{p \cdot \pi}{Q_2} = 2 \sin \frac{2 \cdot \pi}{34} = 0,3696 \quad (59)$$

Proudová hustota:[5]

$$J_{kn} = 0,8 \cdot J_2 = 0,8 \cdot 3000000 = 2400000 A \cdot m^{-2} \quad (60)$$

Proudová hustota se v kruzích volí z důvodu zlepšení rozběhových charakteristik. Kruhy v rotoru fungují i jako ventilátor. Proudová hustota se v tyčích volí o 15 až 20 % menší než J v tyčích.
[5]

Následný výpočet průřezu kruhu nakrátko:[5]

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{1797,5}{2400000} = 0,000749 \text{ m}^2 \quad (61)$$

Kruh nakrátko má tvar nepravidelného lichoběžníka. Střední výška bývá větší nebo rovna výšce drážky rotoru s přidáním 25 % výšky drážky:[5]

$$a_{kn} = 1,25 \cdot h_{d2} = 1,25 \cdot 0,033745 = 0,042 \text{ m} \quad (62)$$

Ze vztahu pro výpočet průřezu kruhu:[5]

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 0,0007476 \text{ [m}^2\text{]} \quad (63)$$

Vzorec upravíme pro výpočet šířky kruhu nakrátko:[5]

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{0,000749}{0,042} = 0,0178 \text{ m} \quad (64)$$

Střední průměr kruhu nakrátko:[5]

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 0,1571 \text{ m} \quad (65)$$

Výpočet magnetického obvodu

Při výpočtu magnetického obvodu se uvažuje chod motoru naprázdno. Při tomto ději je typické pro asynchronní stroje velké sycení zubů jak statoru, tak i rotoru. To má za následek zploštění křivky pole ve vzduchové mezeře.

Hodnoty indukci

Zub statoru:[5]

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,013 \cdot 0,11}{0,00615 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,77 \text{ T} \quad (66)$$

Zub rotoru:[5]

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,81 \cdot 0,0184 \cdot 0,11}{0,008086 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ T} \quad (67)$$

Jho statoru:[5]

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2h'_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0087}{2 \cdot 0,027 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 1,51 \text{ T} \quad (68)$$

kde h'_{j1} je dáno vztahem:[5]

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{0,31 - 0,2}{2} - 0,028 = 0,027 \text{ m} \quad (69)$$

Jho rotoru:[5]

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2h'_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0087}{2 \cdot 0,0411 \cdot 0,11 \cdot 0,97} = 0,99 \text{ T} \quad (70)$$

kde h'_{j2} je dáno vztahem:[5]

$$h'_{j2} = \frac{2 + p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \left(\frac{0,1991}{2} - 0,033745 \right) = 0,0411 \text{ m} \quad (71)$$

Magnetické napětí

Výpočet Cartelova činitele:[5]

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,013}{0,013 - 5,11 \cdot 0,00045} = 1,21 \quad (72)$$

$$\text{kdy } \gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0037}{0,00045} \right)^2}{5 + \frac{0,0037}{0,00045}} = 5,11 \quad (73)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře je dáno vztahem:[5]

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,8087 \cdot 0,00045 \cdot 1,21 = 701,26 \text{ A} \quad (74)$$

Magnetické napětí na zubu statoru vypočítáme:[5]

$$U_{z1} = 2h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,028 \cdot 1400 = 78,4 \text{ A} \quad (75)$$

kdy h_{z1} je výpočtová výška statoru, kterou získáme ze vztahu:[5]

$$h_{z1} = h_1 + h_2 = 0,0025 + 0,0255 = 0,028 \text{ m} \quad (76)$$

a H_{z1} odečtem z tabulky magnetické charakteristiky oceli na obr. 15.[5]

B (T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A · m ⁻¹)									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	543	554	564	575
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1 020	1 050	1 080	1 110
1,7	1 150	1 180	1 220	1 250	1 290	1 330	1 360	1 400	1 440	1 480
1,8	1 520	1 570	1 620	1 670	1 720	1 770	1 830	1 890	1 950	2 010
1,9	2 070	2 160	2 250	2 340	2 430	2 520	2 640	2 760	2 890	3 020
2,0	3 150	3 320	3 500	3 680	3 860	4 040	4 260	4 480	4 700	4 920
2,1	5 140	5 440	5 740	6 050	6 360	6 670	7 120	7 570	8 020	8 470
2,2	8 920	9 430	9 940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Obr. 15 Magnetická charakteristika oceli 1013 pro zuby motoru[5]

$$H_{z1(B=1,77 \text{ T})} = 1400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Magnetické napětí na zubu statoru získáme ze vztahu:[5]

$$U_{z2} = 2h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,033745 \cdot 2070 = 139,7 \text{ A} \quad (77)$$

kdy $h_{z2}=h_{d2}=0,033745 \text{ m}$ je výpočtová výška zubu rotoru a H_{z2} je magnetická intenzita zubu rotoru, kterou odečtem z tabulky na ob. 15.[5]

$$H_{z2} = 2070 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Činitel nasycení zubů:[5]

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{78,4 + 139,7}{701,26} = 1,3 \quad (78)$$

Výsledná hodnota činitele by se měla pohybovat mezi 1,2 až 1,5. Pokud by byla výsledná hodnota vyšší, značí to buď přesyčování zubů nebo malou vzduchovou mezeru. Kdyby hodnota vycházela menší, železo v zubech je málo syceno nebo vzduchová mezera je příliš úzká.

Magnetické napětí jha statoru:[5]

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,222 \cdot 722 = 160,28 \text{ A} \quad (79)$$

kdy H_{j1} určíme z tabulky na obr. 15 a hodnota l_{j1} je délka magnetické indukční čáry, kterou určíme podle vztahu:[5]

$$l_{j1} = \frac{\pi (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi (0,31 - 0,027)}{4} = 0,222 \text{ m} \quad (80)$$

$$H_{j1} = 722 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Magnetické napětí jha rotoru:[5]

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0323 \cdot 320 = 10,33 \text{ A} \quad (81)$$

kdy H_{j2} určíme z tabulky na obr. 15 a hodnota l_{j2} je délka magnetické indukční čáry, kterou určíme podle vztahu:[5]

$$l_{j2} = \frac{\pi (D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi (0,0713 - 0,0302)}{4} = 0,0323 \text{ m} \quad (82)$$

$$\text{kde } h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{0,1991 - 0,0713}{2} - 0,033745 = 0,0302 \text{ m} \quad (83)$$

$$H_{j2} = 320 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Konečné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici je dáno vztahem:[5]

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1089,96 \text{ A} \quad (84)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu je dle vztahu:[5]

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1089,96}{701,26} = 1,55 \quad (85)$$

Magnetizační proud je dán vztahem:[5]

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1089,96}{0,9 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,92} = 7,31 \text{ A} \quad (86)$$

Poměrný magnetizační proud:[5]

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1N}} = \frac{7,31}{38,32} = 0,2 \quad (87)$$

Tato poměrná veličina by se měla svou hodnotou pohybovat v rozmezí 0,2 až 0,35 pro čtyřpólové stroje.[5]

Odpor a reaktance

Odpor jedné fáze statorového vinutí

Střední šířka cívky je dána vztahem

$$b_c = \frac{\pi (D + h_{d1})}{2p} \beta = \frac{\pi (0,2 + 0,028)}{4} = 0,1787 \text{ m} \quad (89)$$

kde β je poměrný činitel zkrácení kroku vinutí statoru. Pro dvouvrstvá a vsypávaná vinutí je uvážován $\beta_1 = 1$. [5]

Délku čela vypočítáme ze vztahu:[5]

$$l_{\epsilon} = K_{\epsilon} \cdot b_c + 2B = 1,3 \cdot 0,1787 + 2 \cdot 0,01 = 0,2523 \text{ m} \quad (90)$$

kdy B u vsypávaných vinutí uvažujeme $B=0,01$ a činitele K_{ϵ} odečtem z tabulky na obr. 16.[5]

$K_{\epsilon}=1,3$

počet pólů 2p	cívky statoru			
	čela neizolovaná		čela izolovaná páskou	
	K_{ϵ}	K_v	K_{ϵ}	K_v
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5

Tab. 5 Koeficienty cívek statoru k výpočtu rozměrů čel[5]

střední délka závitu je dána vztahem:[5]

$$l_{av} = 2(l_d + l_{\epsilon}) = 2(0,11 + 0,2523) = 0,7246 \text{ m} \quad (91)$$

kde l_d je délka drážkové části, která je rovna délka statorového svazku:[5]

$$l_d = l_1 = l_2 = l_i \quad (92)$$

Celková délka vodičů jedné fáze vinutí:[5]

$$L = l_{av} \cdot N = 86,95 \text{ m} \quad (93)$$

Celková odpor jedné fáze vinutí:[5]

$$R_1 = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{94,55}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,669 \Omega \quad (94)$$

Pracovní teplota je 75°C , avšak rezistivita mědi se uvádě pro 20°C a má hodnotu $\rho_{20} = \frac{1}{56} \mu\Omega \cdot m$

Přepočítáním na požadovanou rezistivitu pro pracovní teplotu stroje:[5]

$$\rho_{75} = \rho_{20} \cdot 1,22 \quad (95)$$

Odpor fáze rotorového vinutí

Odpor tyče je dán vztahem:[5]

$$R_t = \rho_t \frac{l_2}{S_t} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{0,11}{0,000221} = 1,08 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (96)$$

Velikost odporu kruhu nakrátko získáme ze vzorce:[5]

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{\pi \cdot 0,1571}{34 \cdot 0,0007476} = 4,23 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (97)$$

Odpor jedné fáze rotorového vinutí:[5]

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 1,08 \cdot 10^{-5} + 2 \frac{4,23 \cdot 10^{-7}}{0,3696^2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (98)$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí po přepočítání na počet závitů je dán vztahem:[5]

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,073 \Omega \quad (99)$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážky získáme ze vztahu:[5]

$$\lambda_{d1} = \frac{h_2 - u}{3b_1} \cdot k_\beta + \left(\frac{u}{b_1} + \frac{3h_a}{b_1 + 2b_0} + \frac{h_b}{b_0} \right) \cdot k' \beta \quad (100)$$

$$\lambda_{d1} = \frac{0,0255 - 0,0004}{3 \cdot 0,0072} \cdot 0,812 + \left(\frac{0,0004}{0,0072} + \frac{3 \cdot 0,002}{0,0072 + 2 \cdot 0,0032} + \frac{0,0005}{0,0032} \right) \cdot 0,7495 = 2,25$$

$$\text{kde } k'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,666) = 0,7495 \quad (101)$$

$$\text{když } \beta = \frac{y_{1d}}{\frac{Q_1}{2p}} = \frac{8}{12} = 0,25 \quad (102)$$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3k'_\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,7495) = 0,812 \quad (103)$$

Koeficienty u , h_a , h_b udávají rozměry klínu a klínové drážky. Velikosti těchto hodnot jsou uvedeny na obr.12.[5]

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel je dán vztahem:[5]

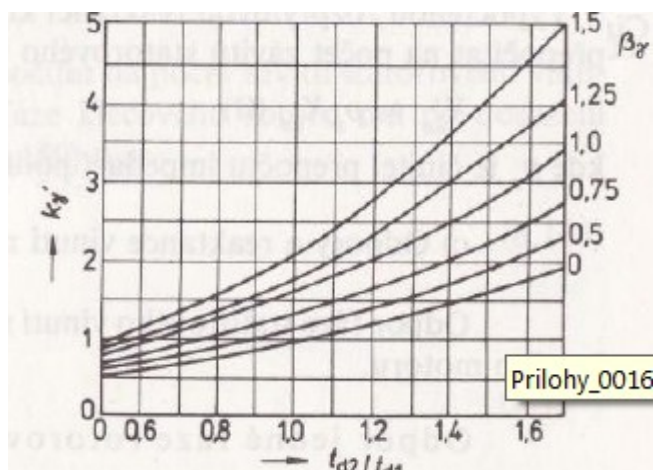
$$\lambda_{e1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_i} (l_\varepsilon - 0,64\beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{0,11} (0,2523 - 0,64 \cdot 0,666 \cdot 0,16) = 2,28 \quad (104)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu čel je dán vztahem:[5]

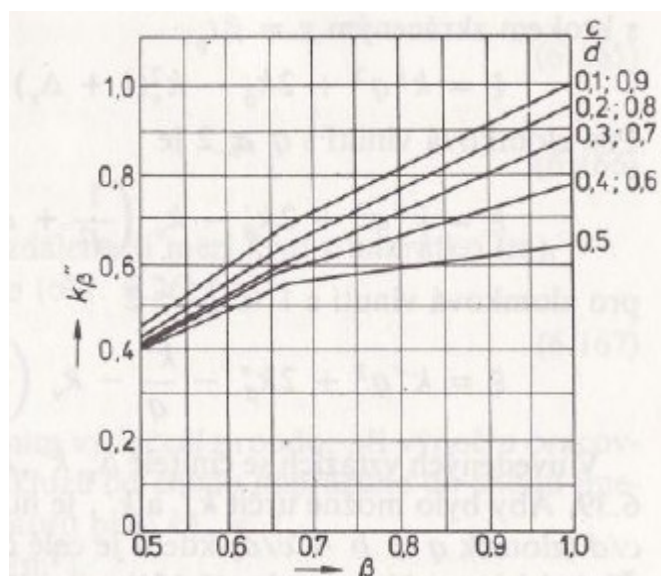
$$\lambda_{dif1} = \xi \cdot \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} = \frac{0,131}{12 \cdot 0,0045 \cdot 1,21} \cdot 0,13 = 2,61 \quad (105)$$

$$\text{kde } \xi = 2 \cdot k'_\gamma \cdot k_\beta - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_\gamma^2) = 2 \cdot 1,5 \cdot 0,6 - 0,92^2 \cdot \left(\frac{0,0184}{0,0131} \right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0,13 \quad (106)$$

činitel $k'_\gamma = 2,5$ a určíme ho z tabulky na obr. 16, kde je vykreslena závislost poměrů drážkových roztečí na k'_γ . Konečnou hodnotu získáme zvolením křivky $\beta_\gamma = 1$. Koeficient k_β odečítáme z grafické závislosti na obr. 17.[5]



Obr. 16 Činitel k'_γ v závislosti na poměru drážkových roztečí



Obr. 17 Závislost k''_β na β

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí je dána vztahem:[5]

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{pq} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{e1} + \lambda_{dif1}) \quad (107)$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{120}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,11}{2 \cdot 4} \cdot (2,25 + 2,28 + 2,61) = 1,117 \Omega \quad (108)$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:[5]

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_1}{3b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b_1} \right] \cdot k_d + \frac{h_0}{b_0} \quad (109)$$

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{0,0262}{3 \cdot 0,00927} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,00927^2}{8 \cdot 0,000221} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,0032}{2 \cdot 0,00927} \right] \cdot 1 + \frac{0,0005}{0,032} = 1,4 \quad (110)$$

Při jmenovitém chodu je $k_d = 1$. [5]

Činitel magnetické vodivosti čel je dán vztahem: [5]

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} = \frac{2,3 \cdot 0,1571}{34 \cdot 0,11 \cdot 0,3696^2} = 0,71 \quad (111)$$

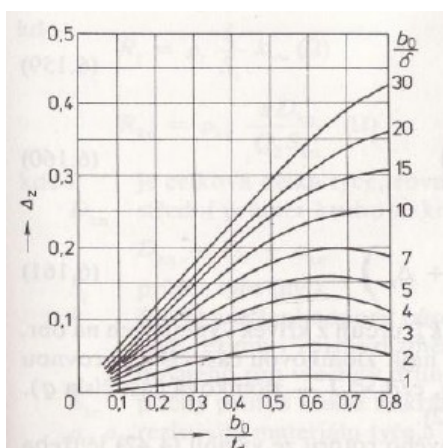
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu: [5]

$$\lambda_{dif2} = \xi \cdot \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} = \frac{0,0184}{12 \cdot 0,0045 \cdot 1,21} \cdot 0,505 = 0,142$$

$$\text{kde } \xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{34} \right)^2 - \frac{0,5}{1 - \left(\frac{2}{34} \right)^2} = 0,505 \quad (113)$$

činitel $\Delta_z = 0,5$ a odečet je z tabulky na obr. 18, kde je vykreslena grafická závislost poměrů

na $\frac{b_0}{t_d}$. [5]



Obr. 18 Grafická závislost $\frac{b_0}{\sigma}$ na Δ_z

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí je dána vztahem:[5]

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} \quad (114)$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,11 \cdot (1,4 + 0,71 + 0,142) \cdot 10^{-6} = 9,78 \cdot 10^{-6}$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí po přepočítání na počet závitů je dána vztahem:[5]

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 9,78 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,042 \quad (115)$$

Poměrné hodnoty odporů a reaktancí

Poměrné hodnoty odporu fáze statoru a rotoru pro jednu fázi jsou dány vztahem:[5]

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,669 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,111 \quad (116)$$

$$r'_2 = R'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,073 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,0121 \quad (117)$$

Poměrné hodnoty rozpylových reaktancí fáze statoru a rotoru pro jednu fázi jsou dány vztahem:[5]

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 1,117 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,186 \quad (118)$$

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,042 \cdot \frac{38,32}{230} = 0,007 \quad (119)$$

Návrh vinutí

Parametry pro výpočet:

vinutí – smyčkové, dvouvrstvé, nekřížené, paralelní, počet cívkových stran v celé cívce:

$$2u = 2; m' = 6; m = 3; q = 6; a = 1; p = 3; Q = 54$$

Výpočet:[5]

$$\text{Počet cívek: } K = u \cdot Q = 1 \cdot 48 \quad (120)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q_1}{2p} = \frac{48}{4} = 12 \quad (121)$$

Krok na komutátoru v počtu lamel:

$$y_k = \varepsilon \cdot K \pm \frac{a}{p} = \frac{a}{p} = \frac{2}{2} = 1 \quad (122)$$

Koeficient $\varepsilon = 0$ pro smyčková vinutí a koeficient $a = p$ pro paralelní vinutí.[5]

Cívkový krok mezi přední a zadní stranou téže cívky udané v počtu drážek:

$$y_{1d} = \frac{Q_p}{2p} = \frac{12}{4} = 3 \quad (123)$$

Cívkový krok mezi přední a zadní stranou téže cívky udané v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 + 1 = 13 \quad (124)$$

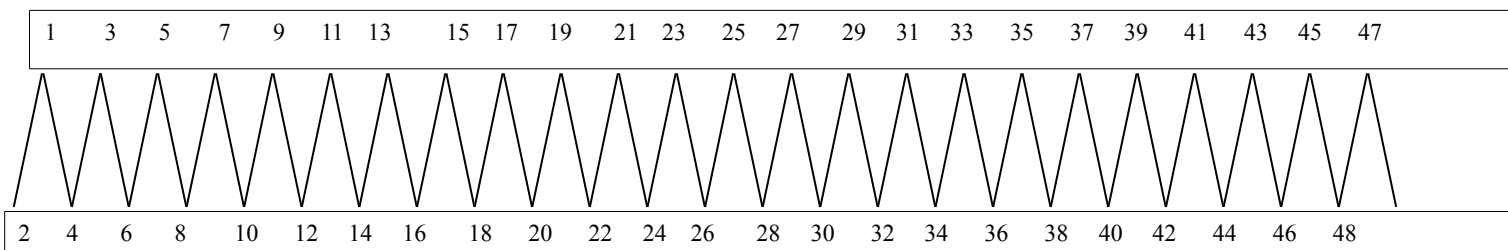
Cívkový krok mezi přední cívkovou stranou jedné cívky a přední cívkovou stranou cívky následující udané v počtu cívkových stran:

$$y = 2 \cdot y_k = 2 \cdot 1 = 2 \quad (125)$$

Cívkový krok mezi zadní cívkovou stranou jedné cívky a přední cívkovou stranou cívky následující udané v počtu cívkových stran:

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 13 = -11$$

(126)



Výpočet ztrát

Ztráty v asynchronních motorech dělíme na ztráty v železe, ty se dělí dále na hlavní a dodatečné, ve vinutí, ventilační, mechanické a dodatečné při zátěži.[5]

Hlavní ztráty v železe vlivem hystereze:[5]

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (127)$$

$$\Delta P_{Feh} = 2 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^2 \cdot (1,6 \cdot 1,51^2 \cdot 19,98 + 1,8 \cdot 1,77^2 \cdot 6,88) = 223,37 \text{ W}$$

kde $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty oceli zvolené z obr. 19, m_{j1} a m_{z1} jsou hmotnosti železa jha a zubů statoru. Dále pro stroje do výkonu 250 kW se uvažují činitelé $k_{dj}=1,6$ a $k_{dz}=1,8$. [5]

$$\Delta p_{1,0} = 2,0 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Elektrotechnická ocel třídy		Tloušťka plechů (mm)	$\Delta p_{1,0/50}$ (W · kg ⁻¹)	β
GOST	2013, 2011, 2211	0,5	2,5 až 2,6	1,5
	2312	0,5	1,75	1,4
	2411	0,5	1,6	1,3
ČSN	Ei 45	0,5	2,0	1,5
	Ei 55	0,5	2,6	
	Ei 70	0,5	3,0	
	Et 130	0,35	1,3	

Obr. 19 Tabulka měrných ztrát elektrotechnických ocelí

Hmotnost železa jha statoru získáme ze vztahu:[5]

$$m_{j1} = \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe1} \cdot \gamma_{Fe} \quad (128)$$

$$m_{j1} = \pi \cdot (0,31 - 0,027) \cdot 0,027 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 19,98 \text{ kg}$$

kdy uvažujeme $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3$

Hmotnost zubu statoru získáme ze vztahu:[5]

$$m_{z1} = h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe1} \cdot \gamma_{Fe} = 0,028 \cdot 0,00615 \cdot 48 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 6,88 \text{ kg} \quad (129)$$

Povrchové ztráty v rotoru[5]

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \quad (130)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = 334,92 \cdot (0,0184 - 0,0015) \cdot 34 \cdot 0,11 = 21,17 \text{ W}$$

kdy $p_{\delta p2}$ je hustota povrchových ztrát v rotoru, kterou určíme ze vztahu:

$$p_{\delta p2} = \beta_{02} \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 \quad (131)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,367 \cdot 0,013 \cdot 10^3)^2 = 334,92 \text{ W}$$

kde činitel k_{02} repektuje opracování hlav na zubu statoru a u motorů do 160 kW se uvádí hodnoty 1,4 až 1,8. Hodnotu indukce nad hlavami zubu statoru B_{02} získáme ze vztahu:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,375 \cdot 1,21 \cdot 0,8087 = 0,367 \quad (132)$$

Hodnota β_{02} pro zuby rotoru se určí z obr. 20.

$$\beta_{02}=0,375$$

Pulsní ztráty v zubech rotoru[5]

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,0579 \right)^2 \cdot 7,72 = 14,76 \text{ W} \quad (133)$$

kde hmotnost zubů rotoru se určuje vztahem:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 0,033745 \cdot 0,008086 \cdot 34 \cdot 0,11 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,721 \text{ kg} \quad (134)$$

pro pulzní indukci je vztah:

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} = \frac{4,7 \cdot 0,00045}{2 \cdot 0,0184} = 0,0579 \text{ T} \quad (135)$$

$$\text{a koeficient } \gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0035}{0,00045} \right)^2}{5 + \frac{0,0035}{0,00045}} = 4,7 \quad (136)$$

Jouleovy ztráty[5]

$$\text{Pro stator } \Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,669 \cdot 38,32^2 = 2,95 \text{ kW} \quad (137)$$

$$\text{Pro rotor } \Delta P_{j2} = Q_2 \cdot R_2 \cdot I_t^2 = 34 \cdot 0,000000423 \cdot 664,36^2 = 6,35 \text{ W} \quad (138)$$

Celkové ztráty[5]

Celkové dodatečné ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p2} = 21,17 + 14,76 = 35,93 \text{ W} \quad (139)$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 223,37 + 35,93 = 259,3 \text{ W} \quad (140)$$

Mechanické ztráty[5]

$$\Delta P_{mech} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_e^4 = 0,897 \cdot \left(\frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,31^4 = 186,38 \text{ W} \quad (141)$$

kdy pro motory $2p \geq 4$ platí:

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_e) = 1,3 \cdot (1 - 0,31) = 0,897 \quad (142)$$

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_{1N} = 0,005 \cdot \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{20000}{0,89} = 112,36 \text{ W} \quad (143)$$

Proud a účinník naprázdno, nakrátko[5]

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{oc}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,8^2 + 7,31^2} = 7,35 \text{ A} \quad (144)$$

kdy činná složka $I_{oc} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j10}}{m_1 \cdot U_{1N}} = \frac{259,3 + 186,38 + 107,24}{3 \cdot 230} = 0,8 \text{ A}$ (145)

kde elektrické ztráty ve vinutí při chodu naprázdno:

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,669 \cdot 7,31^2 = 107,24 \text{ W} \quad (146)$$

Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{oc}}{I_0} = \frac{0,8}{7,35} = 0,109 \quad (147)$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{1,34} = 171,51 \text{ A} \quad (148)$$

kdy: Impedance nakrátko:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + jX_k^2} = \sqrt{0,742^2 + 1,117^2} = 1,34 \Omega \quad (149)$$

Činný odpor nakrátko:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 0,669 + 0,073 = 0,742 \Omega \quad (150)$$

Jalový odpor nakrátko:

$$jX_k = X_{\delta_1} + X_{\delta_2} = 1,117 + 0,00000978 = 1,117\Omega \quad (151)$$

Účinitel nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,742}{1,34} = 0,55 \quad (152)$$

Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + P_d} \quad (153)$$

$$\eta = \frac{20000}{20000 + 2950 + 6,35 + 186,38 + 259,3 + 35,93} = 0,85$$

Kružnicový diagram

Kružnicový diagram je grafické znázornění proudů, napětí, momentu, skluzu, ztrát pro různé režimy zatížení u asynchronního motoru.[8]

Na jeho sestavení jsou potřeba následující parametry:

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{oc}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,8^2 + 7,31^2} = 7,35A \quad (144)$$

$$\varphi_0 = 83,75^\circ$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1N}}{Z_k} = \frac{230}{1,34} = 171,51A \quad (148)$$

$$\varphi_0 = 56,4^\circ$$

Odpory vinutí statoru a klece rotoru:

$$R_1 = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \rho_v \cdot \frac{L}{S_v \cdot a} = \frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \cdot \frac{94,55}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,669\Omega \quad (154)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,699 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(120 \cdot 0,92)^2}{34} = 0,073 \Omega \quad (155)$$

Přehled vypočtených hodnot

Název	Index	Hodnota
počet pólových dvojic	p	2
otáčky	n ₁	1500 min ⁻¹
výška osy	h	180 mm
vnější průměr statoru	D _e	0,31 m
vnitřní průměr statoru	D	0,2 m
koeficient K _D	K _D	0,64
pólová rozteč	t _p	0,16 m
vnitřní výkon	P _i	25,86 kVA
předběžná účinnost	η	0,85
účinník	cosφ	0,85
činitel poměru indukovaného napětí vinutí statoru	k _E	0,98
předběžná lineární hustota proudu	A	42500 A · m ⁻¹
předběžná indukce ve vzduchové mezeře	B _δ	0,81 T
činitel pólového krytí	α _δ	0,68
činitel tvaru pole	k _B	1,11
činitel statorového vinutí	k _{v1}	0,92
synchronní úhlová rychlost motoru	ω _s	157,08 rad · s ⁻¹
ideální délka stroje	l _i	0,11 m
štíhlostní poměr	λ	0,68
minimální drážková rozteč	t _{d1min}	0,012 m
maximální drážková rozteč	t _{d2min}	0,014 m
počet drážek na statoru	Q ₁	48
počet drážek na pól a fázi	q	4
drážková rozteč	t _{d1}	0,0131 m
předběžný počet efektivních vodičů v drážce	V' _d	14,54
počet efektivních vodičů v drážce	V _d	30

jmenovitý proud vinutí statoru	I_{IN}	38,32 A
počet paralelních větví	a	2
konečný počet závitů ve fázi	N_1	120
konečná lineární hustota proudu	A	$43858,17 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
činitel vinutí	k_v	0,97
činitel kroku	k_r	0,999987
činitel zkrácení kroku	k_y	0,97
magnetický tok	Φ	0,0087 Wb
magnetická indukce ve vzduchové mezeře	B_δ	0,8087 T
předběžná proudová hustota vinutí statoru	J_1	$6,726 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
přířez efektivního vodiče vinutí statoru	S_{efl}	$2,849 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
oboustranný izolační přírůstek vodiče	d_i	0,325 mm
celkový průměr vodiče s izolací	d_{vi}	2,325 mm
počet dílčích vodičů	n_p	2
konečná proudová hustota vinutí statoru	J_1	$12,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$
výška jha statoru	h_{j1}	0,027 m
dovolená indukce ve jhu statoru	B_{j1}	1,5 T
dovolená indukce v zubu statoru	B_{z1}	1,8 T
činitel plnění železa	k_{Fe}	0,97
upravený průměr statoru	D_1	0,2025 m
výška jha statoru	h_{j1}	0,027 m
šířka drážky u paty zubu	b_1	0,0071 m
upravená drážková rozteč	t'_{d1}	0,01325 m
předběžná šířka zubu	b_{z1}	0,00615 m
hloubka drážky	h_{d1}	0,028 m
šířka bez uvažování klínové části drážky	h_2	0,0255 m
šířka drážky v horní části	b_2	0,01 m
otevření drážky	b_0	3,7 mm
plocha příčného řezu drážky	S_d	219 mm^2
světlé rozměry drážky na šířku	b'_1 b'_2 h'_2	0,007 m 0,0998 m 0,0253 m
uvažované vůle na složení plechů na šířku	Δb_d	0,2 mm
uvažované vůle na složení plechů na výšku	Δh_d	0,2 mm
plocha drážky zbývající pro vinutí	S'_d	$0,00071 \text{ m}^2$

plocha zaujímající drážková izolace	S_i	0,000029 m ²
jednostranná tloušťka izolace v drážce	b_i	0,0004 m
hodnota vzduchové mezery	δ	0,45 mm
počet drážek rotoru nenatočených	Q_2	34
vnější průměr rotoru	D_2	0,1991 m
délka rotoru	l_2	0,11 m
drážková rozteč rotoru	t_{d2}	0,0184 m
vnitřní průměr rotoru	D_i	0,0713 m
činitel pro výpočet průměru hřídele	k_h	0,23
proud v tyči rotoru	I_t	664,36 A
činitel	k_i	0,89
činitel přepočtů proudů	p_i	19,48
průřez tyče	S_t	$2,21 \cdot 10^{-4}$ m ²
dovolená šířka zubu rotoru	b_{z2dov}	0,008086 m
dovolená magnetická indukce v zubech rotoru	B_{z2dov}	1,9 T
průměr zaoblení horní části	b_1	0,00927 m
průměr zaoblení dolní části	b_2	0,00442 m
vzdálenost středů zaoblení	h_1	0,0262 m
konečná šířka zubu rotoru v průřezu	b'_z b''_z	0,0174 m 0,0073 m
hloubka drážky rotoru	h_{d2}	0,033745 m
proud kruhem nakrátko	I_{kn}	1797,5 A
Δ	Δ	0,37
proudová hustota v kruhu nakrátko	J_{kn}	240 000 A · m ⁻²
průřez kruhu nakrátko	S_{kn}	0,000749 m ²
střední výška kruhu nakrátko	a_{kn}	0,04 m
střední šířka kruhu nakrátko	b_{kn}	0,0178 m
střední průměr kruhu nakrátko	D_{kn}	0,1571 m
indukce zubu statoru	B_{z1}	1,77 T
indukce zubu rotoru	B_{z2}	1,9 T
indukce jha statoru	B_{j1}	1,51 T
výpočtová výška jha statoru	h'_{j1}	0,027 m
indukce jha rotoru	B_{j2}	0,99 T
výpočtová výška jha rotoru	h'_{j2}	0,0411 m
carterův činitel	k_c	1,21

	γ	5,11
magnetické napětí vzduchové mezery	U_{δ}	701,26 A
permeabilita vzduchu	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$
magnetické napětí zubu statoru	U_{z1}	78,4 A
výpočtová výška zubu statoru	h'_{z1}	0,028 m
intenzita magnetického pole na zubu statoru	H_{z1}	$1400 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
magnetické napětí zubu rotoru	U_{z2}	139,7 A
výpočtová výška zubu rotoru	h'_{z2}	0,033745 m
intenzita magnetického pole rotoru	H_{z2}	$2070 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
činitel syčení zubů	k_z	1,3
magnetické napětí jha statoru	U_{j1}	160,28 A
délka střední magnetické indukční čáry ve statoru	l_{j1}	0,222 m
intenzita magnetického pole ve jhu statoru	H_{j1}	$722 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
magnetické napětí jha rotoru	U_{j2}	10,33 A
délka střední magnetické indukční čáry v rotoru	l_{j2}	0,0323 m
intenzita magnetického pole ve jhu rotoru	H_{j2}	$320 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
výsledné magnetické napětí na jednu pól. dvojici	F_m	1089,96 A
činitel nasycení magnetického obvodu	k_{μ}	1,55
magnetizační proud	I_{μ}	7,31 A
poměrná jednotka magnetizačního proudu	i_{μ}	0,2
střední šířka cívky	b_c	0,1787 m
délka čela	l_{ξ}	0,2523 m
činitel	K_{ξ}	1,3
střední délka závitů	l_{av}	0,724 m
délka drážkové části	l_d	0,11 m
celková délka vodičů jedné fáze	L_1	86,95 Ω
výsledný odpor jedné fáze vinutí statoru	R_1	0,67 Ω
rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě	ρ_{θ}	$\frac{1,22 \cdot 10^{-6}}{56} \Omega \cdot \text{m}$
odpor tyče	R_t	$1,08 \cdot 10^{-5} \Omega$
odpor kruhu nakrátko	R_{kn}	$4,23 \cdot 10^{-7} \Omega$
odpor jedné fáze vinutí rotoru	R_2	$1,699 \cdot 10^{-5} \Omega$
odpor fáze rotoru přepočítaný na počet závitů statoru	R'_2	0,073 Ω
poměrná hodnota odporu fáze rotoru	r'_2	0,11

poměrná hodnota odporu fáze rotoru	r_1	0,01
činitel magnetické vodivosti drážky statoru	λ_{d1}	2,25
činitel	k_β	0,81
činitel	k'_β	0,75
výška klínu	u	0 m
činitel magnetické vodivosti čel statoru	$\lambda_{\varepsilon 1}$	2,28
činitel magnetické vodivosti rozptylu vinutí statoru	λ_{dif1}	2,61
činitel (stator)	ξ	0,13
rozptylová reaktance fáze statorového vinutí	$X_{1\sigma}$	1,12 Ω
poměrná hodnota rozptylové reaktance statoru	$x_{1\sigma}$	0,19
činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu rotoru	λ_{d2}	1,4
činitel	k_d	1
činitel magnetické vodivosti čel rotoru	$\lambda_{\varepsilon 2}$	0,71
činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru	λ_{dif2}	0,14
činitel (rotor)	ξ	0,51
rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí	$X_{2\sigma}$	$9,78 \cdot 10^{-6} \Omega$
rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí přepočítaná na stator	$X'_{2\sigma}$	0,042 Ω
poměrná hodnota rozptylové reaktance rotorového vinutí	$x'_{2\sigma}$	0,01
hlavní ztráty v železe vlivem hystereze	ΔP_{Feh}	223,37 W
počet cívek	K	48
počet drážek na pól	Q_p	12
krok na komutátoru	y_k	13
měrné ztráty použité oceli	$\Delta p_{1,0,50}$	2 W·m ²
činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku	k_{dj} k_{dz}	1,6 1,8
hmotnost železa jha statoru	m_{j1}	19,98 kg
hustota oceli	γ_{Fe}	7800
hmotnost železa zubů statoru	m_{z1}	6,88 kg
povrchové ztráty v rotoru	$\Delta P_{\delta p2}$	334,92 W
hustota povrchových ztrát v rotoru	$p_{\delta p2}$	21,17 W
činitel respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru	k_{02}	1,5

Jouleovo ztráty ve statoru	ΔP_{j1}	2,95 kW
Jouleovo ztráty v rotoru	ΔP_{j2}	6,35 W
indukce nad hlavami zubů ve statoru	B_{02}	0,37 T
pulsní ztráty v zubech rotoru	ΔP_{p2}	14,76 W
hmotnost železa zubů rotoru	m_{z2}	7,721 kg
součet dodatečných ztrát v železe	ΔP_{Fed}	35,93 W
celkové ztráty v železe	ΔP_{Fe}	259,3 W
mechanické ztráty	ΔP_{mech}	186,38 W
činitel pro motory $2p \geq 4$	K_T	0,95
dodatečné ztráty při jmenovitém chodu	ΔP_d	112,36 W
proud naprázdno	I_0	7,35 A
činná složka proudu naprázdno	$I_{0\epsilon}$	0,8 A
elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno	$\Delta P_{j1,0}$	107,24 W
účinník naprázdno	$\cos\varphi_0$	0,11
proud nakrátko	I_K	171,51 A
impedance při stavu nakrátko	Z_K	1,34 Ω
jalová složka impedance nakrátko	jX_K	1,12 Ω
účinník nakrátko	$\cos\varphi_K$	0,55
odpor nakrátko	R_K	0,74
účinnost stroje	η	85,00%

Závěr

Téma této bakalářské práce byl návrh asynchronního motoru o výkonu 20 kW. V rámci elektromagnetického návrhu jsem se snažil přiblížit každou položku, se kterou jsem pracoval a počítal. Samotný elektromagnetický návrh je dlouhý a poměrně komplikovaný proces, při kterém se vypočítané hodnoty postupně ověřují, jiné hodnoty jsem odečítal z tabulek a obrázků, které jsou ukázány u částí výpočtů, kde byly potřeba a využívány. Můj návrh ještě zdaleka není úplný. Motor je potřeba otestovat a vypočíst tepelný výpočet a zjistit reálné chování motoru za chodu atd.

Jako představa o chodu stroje může sloužit križnicový diagram, který byl taktéž součástí zadání práce a je přiložen v příloze.

Zdroje

- [1] *Nikola Tesla* [online]. 2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
- [2] *ASYNCHRONNÍ (INDUKČNÍ) STROJE (MOTORY)* [online]. 2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr_motor_teorie.pdf
- [3] BARTOŠ, Václav. ZČU. *Elektrické stroje*. ZČU Fakulta elektrotechnická: ZČU, 1995. ISBN S61595 .
2012, 12.5. [cit. 2012-05-19]
- [4] *Asynchronní stroje* [online]. [cit. 2012-05-20].
Dostupné z: www.pslib.cz/pe/skola/.../motory/...motor/asynchr_motor_teorie.pdf
- [5] KOPYLOV A KOL., I.P. *Stavba elektrických strojů*. Moskva: Mir, 1988. ISBN D403.
- [6] *Asynchronní stroje* [online]. 2009 [cit. 2012-06-04]. Dostupné z: www.spse.dobruska.cz/download/AM.pdf
- [7] *Asynchronní motor* [online]. 13.5.2012 [cit. 2012-06-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD_motor
- [8] *Kružnicový diagram* [online]. 2010, 2011 [cit. 2012-06-08]. Dostupné z: <http://leccos.com/index.php/clanky/kruznicovy-diagram>