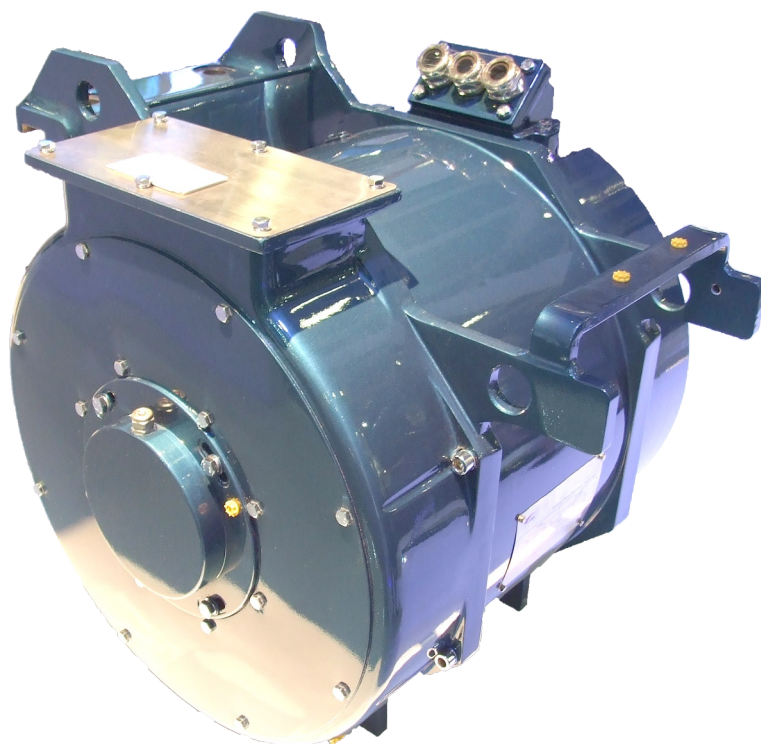




STAVBA ELEKTRICKÝCH STROJŮ 1

Seznam symbolů a zkratk

BLDC	bezkartáčový stejnosměrný stroj (brushless direct current machine)
CGS	systém jednotek centimert-gram-sekunda
ČSN	česká technická norma
<i>p.u.</i>	poměrná jednotka (per unit)
PMSM	synchronní motor s permanentními magnety (permanent magnet synchronous motor)
PMSG	synchronní generátor s permanentními magnety (permanent magnet synchronous generator)
PWM	pulzně-šířková modulace (pulse-width modulation)
SI	mezinárodní systém jednotek Le Système International d'Unités
TEFC	uzavřený stroj chlazený ventilátorem na hřídeli (totally enclosed fan cooled motor)
THD	celkové harmonické zkreslení (total harmonic distortion)

$2p$	počet pólů stroje	$[-]$
$2u$	počet cívkových stran v drážce	$[-]$
a	hloubka vniku	$[m]$
a_v	hloubka vniku v -té harmonické	$[m]$
a_+	počet paralelních větví stejnosměrného vinutí	$[-]$
a_-	počet paralelních větví střídavého vinutí	$[-]$
A	lineární proudová hustota	$[A.m^{-1}]$
A_i	lineární proudová hustota na vnitřním průměru axiálního stroje	$[A.m^{-1}]$
b	šířka lineárního stroje	$[m]$
b_d	šířka drážky	$[m]$
b_n	šíře pólového nástavce	$[m]$
b_o	šířka otevření drážky	$[m]$
b_p	šíře pólu	$[m]$
b_{PM}	šířka permanentního magnetu	$[m]$
b_t	šířka tyče vinutí	$[m]$
b_z	šířka zubu	$[m]$
B	indukce magnetického pole	$[T]$
B_1	základní harmonická indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře	$[T]$
B_d	indukce magnetického pole v drážce	$[T]$
B_{ef}	efektivní hodnota indukce magnetického pole	$[T]$
B_k	indukce magnetického pole pro kompenzaci komutace	$[T]$
B_j	indukce magnetického pole ve jhu stroje	$[T]$
B_m	střední hodnota indukce magnetického pole	$[T]$
B_{max}	maximální hodnota pulzů indukce magnetického pole	$[T]$
B_p	indukce magnetického pole v pólu	$[T]$
B_{p1}	amplituda pulzací indukce magnetického pole v zubech statoru	$[T]$
B_{p2}	amplituda pulzací indukce magnetického pole v zubech rotoru	$[T]$
B_{PM}	indukce magnetického pole v permanentním magnetu	$[T]$
B_r	remanentní hodnota indukce magnetického pole permanentního magnetu	$[T]$

B_{r20}	remanentní hodnota indukce magnetického pole při 20 °C	[T]
B_{ref}	referenční hodnota indukce magnetického pole pro určení ztrát v železe	[T]
B_z	indukce magnetického pole v zubu	[T]
B_z'	zdánlivá indukce magnetického pole v zubu	[T]
B_δ	amplituda indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře	[T]
B_v	amplituda indukce magnetického pole v-té harmonické	[T]
c	izolační vzdálenost mezi čely vinutí	[m]
c	jmenovatel počtu drážek na pól a fázi v racionálním tvaru	[-]
c	poměrná cena (kap. 3.4, 3.5)	[p.u.]
C	Essonův činitel	[VAmin.m ⁻³]
C	počet sloupců Tingleyho schématu (kap. 4.4)	[-]
C_1	činitel tvaru magnetického pole kotvy stroje s hladkým rotorem	[-]
C_{d1}	činitel tvaru magnetického pole kotvy v podélné ose	[-]
C_E	Essonův činitel momentové rovnice	[Nm.m ⁻³]
C_l	Essonův činitel lineárního stroje	[N.m ⁻²]
C_{q1}	činitel tvaru magnetického pole kotvy v příčné ose	[-]
d_0	průměr tvořící kružnice evolventy	[m]
D_1	průměr kotvy	[m]
D_2	průměr sekundární strany stroje	[m]
D_e	vnější průměr stroje	[m]
D_i	vnitřní průměr stroje (průměr hřídele)	[m]
D_j	střední průměr jha	[m]
D_k	průměr komutátoru	[m]
D_{kn}	střední průměr kruhu nakrátko	[m]
f	frekvence	[Hz]
f_p	frekvence pulzací magnetického pole	[Hz]
f_{ref}	referenční hodnota frekvence magnetického pole pro určení ztrát v železe	[Hz]
F	ochlazovací povrch stroje	[m ²]
F_0	magnetické napětí naprázdno	[A]
F_a	magnetické napětí kotvy	[A]
F_{ak}	kompenzované magnetické napětí kotvy	[A]
F_{an}	nekompenzované magnetické napětí kotvy	[A]
F_b	magnetické napětí budícího vinutí	[A]
F_{bn}	magnetické napětí budícího vinutí pro jmenovité zatížení	[A]
F_d	podélná složka magnetického napětí kotvy	[A]
F_{d1}	základní harmonická podélné složky magnetického napětí kotvy	[A]
F_k	magnetické napětí kompenzačního vinutí	[A]
F_m	amplituda magnetického napětí m-fázového vinutí	[A]
F_{m1}	amplituda magnetického napětí jedné fáze	[A]
F_{m100}	magnetické napětí kotvy pro jmenovitý magnetický tok	[A]
F_{pp}	magnetické napětí pomocných pólů	[A]
F_{PM}	magnetické napětí poskytované permanentním magnetem	[A]
F_q	příčná složka magnetického napětí kotvy	[A]
F_{q1}	základní harmonická příčné složky magnetického napětí kotvy	[A]

F_{tk}	třecí síla kartáčů	[N]
F_z	amplituda magnetického napětí jednoho závitu	[A]
F_1	základní harmonická magnetického napětí	[A]
F_δ	magnetické napětí kotvy připadající na vzduchovou mezeru	[A]
h_1	výška oblasti drážky s cívkou	[m]
h_d	hloubka drážky	[m]
h_j	výška jha	[m]
h_n	výška pólového nástavce	[m]
h_o	výška otevření drážky	[m]
h_p	výška pólu	[m]
h_{PM}	výška permanentního magnetu	[m]
h_v	výška vodiče	[m]
h_z	výška zubu	[m]
H	intenzita magnetického pole	[A.m ⁻¹]
H_c	koercivní intenzita magnetického pole permanentního magnetu	[A.m ⁻¹]
H_{c20}	koercivní intenzita magnetického pole při 20 °C	[A.m ⁻¹]
H_{ci}	intrinsic koercivní intenzita magnetického pole permanentního magnetu	[A.m ⁻¹]
$H_{c\theta}$	koercivní intenzita magnetického pole při jmenovité teplotě	[A.m ⁻¹]
H_{PM}	intenzita magnetického pole v permanentním magnetu	[A.m ⁻¹]
H_z	intenzita magnetického pole v zubu statoru	[A.m ⁻¹]
H_{zs}	střední hodnota intenzity magnetického pole v zubu statoru	[A.m ⁻¹]
H_δ	intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A.m ⁻¹]
i	časový průběh elektrického proudu (kap. 12.2)	[A]
i	elektrický proud	[p.u.]
i	izolační vzdálenost mezi kartáči	[-]
i_d	podélná složka elektrického proudu	[p.u.]
i_q	příčná složka elektrického proudu	[p.u.]
I	efektivní hodnota elektrického proudu	[A]
$I_{0\check{c}}$	činná složka proudu naprázdno	[A]
I_{0j}	jalová složka proudu naprázdno	[A]
I_a	proud kotvou	[A]
I_a	proud paralelní větví vinutí	[A]
I_b	budící proud	[A]
I_c	celkový proud strojem	[A]
I_d	efektivní hodnota elektrického proudu drážkou	[A]
I_{Fe}	ekvivalentní proud pro ztráty v železe	[A]
I_p	proud sadou kartáčů	[A]
I_v	efektivní hodnota elektrického proudu jedním vodičem	[A]
J	moment setrvačnosti (kap. 3.4, 3.5)	[kg.m ²]
J	proudová hustota	[A.m ⁻²]
J_b	proudová hustota budícího vinutí	[A.m ⁻²]
J_k	proudová hustota kartáčů	[A.m ⁻²]
k_B	činitel tvaru magnetického pole	[-]
k_C	Carterův činitel	[-]

k_{Cv}	Carterův činitel ventilačních kanálů	[-]
k_D	poměr vnějšího a vnitřního průměru statoru	[-]
k_{exc}	činitel přidavných ztrát v železe	$[W.kg^{-1}.Hz^{-1,5}T^{-2}]$
k_E	činitel elektromotorické síly	[-]
k_{Fe}	činitel plnění železa	[-]
k_h	činitel hysterezních ztrát	$[W.kg^{-1}.Hz^{-1}T^{-2}]$
k_I	převod proudu	[-]
k_j	činitel korekce magnetického napětí jha	[-]
k_m	činitel mechanických ztrát	[-]
k_p	činitel povrchových ztrát	[-]
k_{r1}	činitel rozlohy základní harmonické	[-]
k_{sat}	činitel nasycení magnetického obvodu	[-]
k_t	činitel smykového tření	[-]
k_{tj}	činitel nárůstu ztrát ve jhu vlivem technologie zpracování plechů	[-]
k_{tz}	činitel nárůstu ztrát v zubech vlivem technologie zpracování plechů	[-]
k_U	převod napětí	[-]
k_v	činitel ztrát vířivými proudy	$[W.kg^{-1}.Hz^{-2}T^{-2}]$
k_{v1}	činitel vinutí základní harmonické	[-]
k_{v1}	činitel vinutí základní harmonické statoru (kap. 11.2, 11.3)	[-]
k_{v2}	činitel vinutí základní harmonické rotoru (kap. 11.2, 11.3)	[-]
k_{y1}	činitel kroku základní harmonické	[-]
k_z	činitel odlehčení plechů	[-]
k_z	činitel zešíkmení drážek (kap. 11.2)	[-]
k_Z	převod impedancí	[-]
k_β, k_β'	činitel snížení rozptylu vlivem zkrácení kroku vinutí	[-]
k_δ	činitel pro volbu velikosti vzduchové mezery	[-]
k_σ	činitel mezipólového rozptylu	[-]
$k_\sim$	činitel nárůstu odporu vlivem průchodu střídavého proudu	[-]
K	počet lamel komutátor, počet cívek stroje	[-]
K_1	počet cívek vinutí ve svazku	[-]
K_f	počet cívek vinutí ve fázi	[-]
K_p	počet lamel mezi kartáči opačného potenciálu	[-]
l	délka statorového svazku	[m]
l_1	délka statorového svazku známého stroje	[m]
l_b	střední délka závitu cívky budícího vinutí	
l_c	střední délka závitu cívky	[m]
l_ζ	délka čela vinutí	[m]
l_d	délka drážky	[m]
l_{ef}	efektivní délka oceli statorového svazku s radiálními ventilačními kanály	[m]
l_{Fe}	délka oceli statorového svazku	[m]
l_{Fep}	délka oceli statorového svazku pólu	[m]
l_i	výpočtová délka vzduchové mezery	[m]
l_j	střední délka siločáry jha	[m]
l_{jred}	redukováná střední délka siločáry jha	[m]

l_k	délka kartáče	[m]
l_{kn}	délka segmentu kruhu nakrátko	[m]
l_n	délka rozptylové cesty mezi pólovými nástavci	[m]
l_p	délka rozptylové cesty mezi póly	[m]
l_{PM}	délka permanentního magnetu	[m]
l_s	délka plechového segmentu	[m]
l_t	délka tyče	[m]
l_v	délka vodiče vinutí	[m]
l_v	délka ventilačního kanálu (kap. 5.3.4)	[m]
l_{vyb}	délka výběhu vodiče z drážky	[m]
l_x	délka statorového svazku škálovaného stroje	[m]
L	aktivní délka lineárního stroje	[m]
$L_{1\sigma}$	rozptylová indukčnost statoru	[H]
$L_{2\sigma}$	rozptylová indukčnost rotoru	[H]
$L_{2\mu}$	magnetizační indukčnost klece nakrátko	[H]
L_d	podélná indukčnost indukčnost stroje	[H]
L_{dif}	diferenční rozptylová indukčnost	[H]
L_{kn}	rozptylová indukčnost kruhu nakrátko	[H]
L_{max}	maximální hodnota indukčnosti	[H]
L_{min}	minimální hodnota indukčnosti	[H]
L_n	délka pólového nástavce	[m]
L_p	délka pólu	[m]
L_q	příčná indukčnost indukčnost stroje	[H]
L_μ	magnetizační indukčnost	[H]
L_σ	rozptylová indukčnost vinutí	[H]
$L_{\sigma c}$	rozptylová indukčnost cívky	[H]
$L_{\sigma d}$	rozptylová indukčnost drážkové části cívky	[H]
$L_{\sigma t}$	rozptylová indukčnost tyče	[H]
$L_{\sigma v}$	rozptylová indukčnost vodiče	[H]
m	počet fází vinutí kotvy	[-]
m	hmotnost stroje (kap. 3.4, 3.5)	[kg]
m'	matematický počet fází vinutí kotvy	[-]
m_1	počet fází vinutí statoru	[-]
m_2	počet fází vinutí rotoru	[-]
m_{sk}	hmotnost skupiny strojů	[p.u.]
m_{Fe}	hmotnost železa stroje	[kg]
m_j	hmotnost jha	[kg]
m_s	specifická hmotnost stroje	[kg/VA]
m_z	hmotnost zubů	[kg]
M	moment stroje	[Nm]
M_i	vnitřní moment stroje	[Nm]
n	počet strojů ve skupině (kap. 3.5)	[-]
n	rychlost stroje	[ot.min ⁻¹]
n_p	počet paralelních vodičů	[-]

n_{PM}	počet permanentních magnetů	[-]
N_b	počet závitů cívky budicího vinutí	[-]
N_b	počet bariér rotoru (kap. 12.1)	[-]
N_c	počet závitů cívky	[-]
N_k	počet kartáčů v sadě	[-]
N_{pp}	počet závitů cívky pomocného pólu	[-]
N_r	počet pólů rotoru	[-]
N_s	počet závitů v sérii	[-]
N_{s1}	počet závitů v sérii statoru	[-]
N_{s2}	počet závitů v sérii rotoru	[-]
N_v	počet vodičů v sérii	[-]
o	obvod tvořící kružnice evolventy	[m]
p	počet pólů stroje	[-]
p_k	přítlak kartáčů	[Pa]
P	výstupní výkon stroje	[W]
P_2	počet fázorů rotorového vinutí	[-]
P_i	vnitřní výkon stroje	[W]
P_n	jmenovitý výkon stroje	[W]
P_p	příkon stroje	[W]
q	počet drážek na pól a fázi	[-]
q_0	čitatel počtu drážek na pól a fázi v racionálním tvaru	[-]
Q	počet drážek kotvy	[-]
Q_1	počet drážek statoru	[-]
Q_2	počet drážek rotoru	[-]
Q_t	počet tyčí	[-]
r	poloměr	[m]
r_a	odpor kotvy	[p.u.]
R	počet řádků Tingleyho schématu (kap. 4.4)	[-]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_1	elektrický odpor statoru	[Ω]
R_2	elektrický odpor rotoru	[Ω]
R_{1g}	poloměr Görgesovy kružnice	[A]
R_a	elektrický odpor kotvy	[Ω]
R_{a2}	elektrický odpor paralelní větve klece nakrátko	[Ω]
R_b	elektrický odpor budicího vinutí	[Ω]
R_{Fe}	ekvivalentní odpor železa	[Ω]
R_g	poloměr Görgesova obrazce	[A]
R_k	elektrický odpor segmentu kruhu nakrátko	[Ω]
R_p	délka průvodiče v Görgesově obrazci	[Ω]
R_t	odpor tyče vinutí	[Ω]
$R_{\sim}$	elektrický odpor při průchodu střídavého proudu	[Ω]
R_o	poloměr oka cívky	[m]
S	zdánlivý výkon stroje	[VA]
S_b	průřez vodiče budicího vinutí	[m ²]

S_c	počet svazků cívek střídavého vinutí	[-]
S_d	průřez drážky	[m ²]
S_f	počet svazků cívek ve fázi střídavého vinutí	[-]
S_i	vnitřní zdánlivý výkon stroje	[VA]
S_k	plocha kartáčů	[m ²]
S_{kn}	průřez kruhů nakrátko	[m ²]
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon stroje	[VA]
S_p	povrch pólových nástavců	[m ²]
S_t	průřez tyče	[m ²]
S_v	průřez vodiče vinutí	[m ²]
S_δ	plocha vzduchové mezery přes jednu pólovou rozteč	[m ²]
t	čas	[s]
t_d	drážková rozteč	[m]
t_{Fe}	tloušťka železné části plechů	[m]
t_{iz}	tloušťka izolace	[m]
t_j	pólová rozteč jha na úrovni dna drážek	[m]
t_k	rozteč lamel stroje	[m]
t_p	pólová rozteč	[m]
t_{p2}	pólová rozteč sekundární strany stroje	[m]
t_{pd}	pólová rozteč v počtu drážek	[-]
t_{pl}	tloušťka plechů	[m]
t_z	rozteč zešíkmení drážky	[m]
T_k	doba komutace	[s]
u	napětí	[p.u.]
u	časový průběh napětí (kap. 12.2)	[V]
u_i	časový průběh indukovaného napětí	[V]
u_i	indukované napětí	[p.u.]
u_r	časový průběh reaktančního napětí	[V]
U	efektivní hodnota svorkového napětí	[V]
U_b	budící napětí	[V]
U_{fn}	jmenovitá hodnota fázového napětí	[V]
U_i	efektivní hodnota indukovaného napětí	[V]
U_{i1}	indukované napětí statoru	[V]
U_{i2}	indukované napětí rotoru	[V]
U_{i20}	indukované napětí rotoru ve stavu nakrátko	[V]
U_{im}	amplituda indukovaného napětí	[V]
U_{iv}	indukované napětí do vodiče	[V]
U_k	úbytek napětí na kartáčích	[V]
U_l	mezilamelové napětí	[V]
U_n	jmenovité svorkové napětí stroje	[V]
U_r	reaktanční napětí komutace stroje	[V]
v	rychlost	[m.s ⁻¹]
v_k	povrchová rychlost komutátoru	[m.s ⁻¹]
V	počet vodičů stroje	[-]

V	objem stroje (kap. 3.4, 3.5)	$[m^3]$
V_d	počet vodičů v drážce	$[-]$
V_s	počet vodičů v sérii	$[-]$
w_m	hustota magnetické energie	$[J/m^3]$
W_m	magnetická energie	$[J]$
W_{m1}	magnetická energie jedné fáze	$[J]$
x	rozměr stroje	$[p.u.]$
x_d	podélná reaktance stroje	$[p.u.]$
x_q	příčná reaktance stroje	$[p.u.]$
x_σ	rozptylová reaktance stroje	$[p.u.]$
$X_{a\sigma}$	rozptylová reaktance stroje	$[\Omega]$
y	cívková rozteč v počtu cívkových stran	$[-]$
y_1	cívkový krok v počtu cívkových stran	$[-]$
y_{1d}	cívkový krok v počtu drážek	$[-]$
y_2	spojkový krok v počtu cívkových stran	$[-]$
y_k	krok na komutátoru v počtu lamel komutátoru	$[-]$
y_p	potenciálový krok na komutátoru v počtu lamel komutátoru	$[-]$
α	exponent frekvence v obecném vyjádření ztrát v železe (kap. 5.2)	$[-]$
α	úhel čel vinutí vůči axiální ploše	$[rad]$
α	teplotní součinitel odporu	$[K^{-1}]$
α_2	úhel mezi fázory fázorové hvězdice	$[rad]$
α_ξ	úhel čel vinutí vůči paketu	$[rad]$
α_m	mechanický činitel pólového krytí	$[-]$
α_{mech}	mechanický úhel mezi následujícími tyčemi	$[-]$
α_δ	elektromagnetický činitel pólového krytí	$[-]$
α_v	elektromagnetický činitel krytí v-té harmonické	$[-]$
β	činitel zkrácení kroku	$[-]$
β	exponent indukce v obecném vyjádření ztrát v železe (kap. 5.2)	$[-]$
γ	elektrická vodivost	$[S/m]$
γ	činitel magnetického toku Carterova činitele	$[-]$
δ	mechanická velikost vzduchové mezery	$[m]$
δ'	elektromagnetická velikost vzduchové mezery	$[m]$
δ''	sycená elektromagnetická velikost vzduchové mezery	$[m]$
δ_{max}	mechanická velikost vzduchové mezery na okrajích pólových nástavců	$[m]$
δ_{min}	minimální mechanická velikost vzduchové mezery	$[m]$
δ_{pp}	mechanická velikost vzduchové mezery pod pomocnými póly	$[m]$
Δ	převodový poměr mezi proudy v tyčích a kruzích nakrátko	$[-]$
Δp	poměrné ztráty stroje	$[W/kg]$
Δp_{Fe}	měrné ztráty v železe	$[W/kg]$
Δp_h	měrné ztráty v železe vzniklé hysterezí	$[W/kg]$
Δp_j	měrné ztráty v železe jha	$[W/kg]$
Δp_{ref}	měrné ztráty v železe pro referenční hodnoty frekvence a indukce	$[W/kg]$
Δp_v	měrné ztráty v železe vzniklé vířivými proudy	$[W/kg]$

Δp_z	měrné ztráty v železe zubů	[W/kg]
ΔP	celkové ztráty stroje	[W]
ΔP_b	Jouleovy ztráty v buzení	[W]
ΔP_d	přídavné ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_j	Jouleovy ztráty	[W]
ΔP_j	ztráty v železe jha	[W]
ΔP_k	Jouleovy ztráty na kartáčích	[W]
ΔP_{pulz}	pulzační ztráty	[W]
ΔP_{PWM}	ztráty vlivem pulzně-šířkové modulace	[W]
ΔP_{sin}	ztráty při sinusovém napájení stroje	[W]
ΔP_{tk}	ztráty vzniklé třením kartáčů	[W]
ΔP_z	ztráty v železe zubů	[W]
$\Delta \vartheta$	oteplení	[K]
ε	elektrický úhel zešikmení drážek	[rad]
ε	operátor pro výpočtovou volbu typu vinutí	[-]
ε	úhel sepnutí (kap. 12.2)	[rad]
ζ	poměrná hloubka vniku	[-]
ζ_v	poměrná hloubka vniku v-té harmonické	[-]
η	účinnost	[-]
ϑ	teplota	[°C]
Θ	magnetické napětí	[A]
Θ_j	magnetické napětí na jhu	[A]
Θ_p	magnetické napětí na pólech	[A]
Θ_{pn}	magnetické napětí na pólových nástavcích	[A]
Θ_{pp}	magnetické napětí na pomocných pólech	[A]
Θ_{PM}	magnetické napětí na permanentním magnetu	[A]
Θ_z	magnetické napětí na zubu	[A]
Θ_δ	magnetické napětí na vzduchové mezeře	[A]
κ_1	počet samostatných galvanických celků stejnosměrného vinutí	[-]
κ_2	počet ztotožnění fázorů drážek do jednoho směru	[-]
κ_I	korekční činitel převodu proudu	[-]
λ	poměr průměrů (kap. 12.3)	[-]
λ	štíhlostní poměr (kap. 11.1)	[-]
λ	vlnová délka lineárního stroje (kap. 12.4)	[-]
λ_ζ	činitel magnetické vodivosti čel vinutí	[-]
λ_d	činitel magnetické vodivosti drážky	[-]
λ_{do}	činitel magnetické vodivosti drážky s otevřením	[-]
λ_k	činitel magnetické vodivosti komutující cívky	[-]
λ_o	činitel magnetické vodivosti otevření drážky	[-]
Λ	reluktance	[H]
$\Lambda_{\zeta n}$	reluktance rozptylových cest mezi čely pólových nástavců	[H]
Λ_{pn}	reluktance rozptylových cest mezi pólovými nástavci	[H]
Λ_p	reluktance rozptylových cest mezi póly	[H]

Λ_{σ}	reluktance rozptylových cest	[H]
μ	řád prostorové harmonické	[-]
μ_{PM}	permeabilita permanentního magnetu	[-]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
μ_0	permeabilita vakua	[H.m ⁻¹]
ν	řád časové harmonické	[-]
ξ	úhlová poloha	[rad]
ξ	Hobartův činitel (kap. 9.3)	[H.m ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	měrný odpor	[Ω.m]
φ_0	fázový posuv mezi napětím a proudem ve stavu naprázdno	[rad]
φ_k	fázový posuv mezi napětím a proudem ve stavu nakrátko	[rad]
Φ	magnetický tok	[Wb]
Φ_d	magnetický tok drážkou	[Wb]
Φ_j	magnetický tok jhem	[Wb]
Φ_p	magnetický tok pólem	[Wb]
Φ_{PM}	magnetický tok permanentním magnetem	[Wb]
Φ_{td}	magnetický tok drážkovou roztečí	[Wb]
Φ_z	magnetický tok zubem	[Wb]
Φ_{δ}	magnetický tok vzduchovou mezerou	[Wb]
Φ_{σ}	rozptylový magnetický tok	[Wb]
ψ	fázový posuv mezi indukovaným napětím a proudem stroje	[-]
ψ	časový průběh spřaženého magnetického toku	[Wb]
τ_{dif}	činitel diferenční rozptylové indukčnosti	[-]
ω	mechanická úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]
ω_1	úhlová frekvence zdroje stroje	[rad.s ⁻¹]
ω_v	mechanická úhlová rychlost v-té harmonické	[rad.s ⁻¹]

Obsah

Úvod.....	15
1 Návrh elektrických strojů a legislativní kontext.....	17
2 Výkonová rovnice pro točivé elektrické stroje.....	19
3 Zákon podobnosti a růstu.....	26
3.1 Vlastnosti řady strojů s identickou lineární proudovou hustotou A	26
3.2 Vlastnosti řady strojů s identickou proudovou hustotou J	27
3.3 Vlastnosti řady strojů lineární proudovou hustotou úměrnou $\sqrt{x}$	28
3.4 Porovnání jednotlivých přístupů k návrhu výkonových řad strojů.....	28
3.5 Odhad hmotnosti skupiny strojů, nárůst hmotnosti stroje při nárůstu výkonu.....	30
4 Vinutí elektrických strojů.....	32
4.1 Distribuovaná vinutí.....	33
4.2 Systematika a nomenklatura vinutí obecně.....	36
4.3 Systematika a nomenklatura stejnosměrných vinutí.....	39
4.4 Systematika a nomenklatura střídavých vinutí.....	41
4.5 Čela vinutí.....	44
5 Magnetické obvody elektrických strojů točivých.....	48
5.1 Materiály pro magnetické obvody.....	48
5.2 Mechanismus vzniku ztrát v magnetickém obvodu.....	49
5.3 Výpočet magnetického obvodu stroje.....	52
5.3.1 Magnetické pole v zubech stroje.....	52
5.3.2 Magnetické pole ve jhu kotvy.....	55
5.3.3 Magnetické pole budících pólů a jha.....	57
5.3.4 Magnetické pole ve vzduchové mezeře.....	60
5.4 Nasycení magnetického obvodu stroje a vliv na charakteristiky.....	63
6 Parametry náhradního schématu.....	65
6.1 Odpor vinutí.....	65
6.2 Indukčnosti stroje.....	68
6.2.1 Magnetizační indukčnost.....	68
6.2.2 Rozptylová indukčnost.....	70
6.3 „Odpor železa“.....	72
7 Ztráty v elektrických strojích.....	73
7.1 Jouleovy ztráty.....	73
7.2 Ztráty v železe.....	74
7.2.1 Ztráty vlivem hlavního magnetického toku.....	74
7.2.2 Pulzační ztráty.....	75
7.2.3 Povrchové ztráty.....	76
7.3 Ztráty v permanentních magnetech.....	77
7.4 Mechanické ztráty.....	78
7.4.1 Ztráty způsobené pohybem rotoru.....	78
7.4.2 Ztráty vlivem tření kartáčů.....	79
7.5 Přídavné ztráty.....	80

7.6	Ztráty vlivem nesinusového napájení.....	80
7.7	Účinnost stroje.....	80
8	Obsahový postup při návrhu elektrického stroje.....	81
9	Specifika návrhu stejnosměrného stroje.....	83
9.1	Výpočet základních rozměrů stejnosměrného stroje.....	83
9.2	Návrh buzení stejnosměrných strojů.....	87
9.3	Návrh pomocných pólů a kompenzačního vinutí.....	90
9.4	Návrh komutátoru.....	94
10	Specifika návrhu synchronních strojů.....	96
10.1	Výpočet základních rozměrů synchronního stroje.....	97
10.2	Návrh buzení synchronních strojů.....	101
10.3	Návrh tlumiče.....	106
11	Specifika návrhu asynchronních strojů.....	108
11.1	Výpočet základních rozměrů asynchronního stroje.....	109
11.2	Návrh rotoru asynchronních strojů.....	112
11.3	Parametry náhradního schématu a významné body charakteristik.....	118
12	Poznámky k návrhu speciálních typů strojů.....	121
12.1	Synchronní reluktanční stroje.....	121
12.2	Spínané reluktanční stroje.....	123
12.3	Axiální stroje.....	125
12.4	Lineární stroje.....	127
Příloha 1:	Vývojový diagram návrhu stejnosměrného stroje.....	130
Příloha 2:	Vývojový diagram návrhu synchronního stroje.....	131
Příloha 3:	Vývojový diagram návrhu asynchronního stroje.....	132

Úvod

Vážení kolegové,

dostávají se Vám do rukou skripta Stavby elektrických strojů 1, tedy té části série předmětů tohoto názvu, která je zaměřená na elektromagnetický návrh točivých elektrických strojů. Vzhledem k řadě vazeb na další partie elektrotechniky, si tato skripta ani nemohou klást za cíl kompletní objasnění problematiky elektrických strojů včetně jejich návrhu, a jsou tak zaměřena na samotné jádro návrhu elektrických strojů jako takových. Tyto vazby zahrnují zejména znalost principu funkce elektrických strojů tak, jak jsou probírány v předmětech Elektrické stroje a Teorie elektrických strojů 1 a 2, dále pak znalosti z teorie elektromagnetického pole, ale i znalost elektrotechnických materiálů používaných pro elektrické stroje. Konkrétními konstrukčními provedeními pak na předmět Stavba elektrických strojů 1 navazuje stejnojmenný předmět s pořadovým číslem 2, kde je dále doplněn tepelně-ventilační pohled na návrh elektrických strojů.

Právě s ohledem na vazby na další předměty, ve kterých jsou probírány teoretické základy, které se v předmětu Stavba elektrických strojů 1 využívají, nejsou v těchto skriptech uvedena odvození řady fyzikálních jevů a jsou prezentovány pouze příslušné výsledky. Pokud jsou v těchto skriptech nějaká odvození přítomna, je tak učiněno jednak z důvodů demonstrace přístupu k řešení daného problému či jako doplnění a rozšíření dříve nabytých znalostí o partie, které se v jiných předmětech nevyskytují a jejich dohledání je v literatuře velmi obtížné.

Z hlediska zdrojové literatury se obsah těchto skript opírá zejména o dřívější práci doc. Ing. Josefa Červeného, CSc., který shrnul řadu poznatků z různé literatury a svého profesního života do svých dvou publikací *Přehled konstrukce elektrických strojů točivých* [1] a *Stavba elektrických strojů* [2], které tvořily první neoficiální skripta k předmětům Projektování elektrotechnických zařízení a Stavba elektrických strojů 1 a 2. Tyto základní partie byly doplněny o výpočetní metody uvedené v knihách *Berechnung elektrischer Maschinen* [3], *Stavba elektrických strojů* [4] a *Vinutí elektrických strojů točivých* [5]. Tato, z dnešního pohledu již klasická literatura, byla následně doplněna o nové poznatky, které vznikly jednak v rámci výzkumu vedeného na fakultě Elektrotechnické a jednak byly načerpány ze soudobých publikací z konferencí zaměřených na elektrické stroje. Vzhledem k tomu, že soudobá literatura často opomíjí teoretické základy jednotlivých partií výpočtu elektrických strojů, lze jako doplňující literaturu doporučit zejména publikace z 50. a 60. let 20. století, ne kterých jsou tyto základy matematicky důkladně rozebírány a analyzovány. Mezi tyto publikace lze zařadit například *Teorii elektrických strojů* od prof. Bašty [6] nebo pětidílnou sérii *Elektrische Maschinen* od Rudolfa Richtera, ze kterých vychází značná část všech následujících publikací o elektrických strojích, které vznikly na území bývalého Československa.

Skripta Stavby elektrických strojů 1 jsou rozdělena na dvě hlavní části – první část, kterou tvoří kapitoly 1 - 7 a jsou v ní uvedeny obecné návrhové postupy, které jsou univerzálně platné pro libovolný typ elektrického stroje, bez ohledu na způsob jeho provozu či topologii. Ve druhé části skript (kapitoly 8 - 12) jsou pak uvedené postupy aplikovány na konkrétní typy elektrických strojů a jsou doplněny o specifické partie, které se u ostatních typů či uspořádání nemusí vyskytovat. V přeneseném slova smyslu pak lze první část skript považovat za „ingredience“, jejichž znalost je nutná pro použití v „kuchařce“, kterou je druhá část těchto skript.



Jak již bylo uvedeno výše, není prakticky možné, aby tato skripta obsáhla celý pojem návrhu elektrických strojů, jakožto elektromechanických měničů. Z těch známějších typů či provedení, na které se zde nedostalo, lze jmenovat například drápkatý synchronní motor, asynchronní motor se stíněným pólem, dnes již exotická provedení elektrických strojů, jako byl třeba Schrage-motor. Přes historické rozšíření těchto topologií je již na ctěném čtenáři-studentovi stavby elektrických strojů, aby dohledal relevantní zdroje, ať již v tištěné podobě v knihovnách, či v elektronické podobě v databázích, k nimž nám univerzitní knihovna umožňuje přístup, neboť tato provedení již přesahují možnosti kurzu Stavba elektrických strojů 1.

I přes uvedená omezení věřím, že se tato skripta stanou Vaším zdrojem i po skončení studia a poskytnou Vám srozumitelně podaný ucelený přístup k návrhu elektrických strojů. Užívejte v míru.

V Přešticích, 23. 3. 2021

Karel Hruška