

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

HÜDROELEKTRIJAAMA VERTIKAALSÜNKROONGENERAATORI ARVUTUS

CALCULATION OF VERTICAL SYNCHRONOUS GENERATOR
FOR HYDROELECTRIC POWER PLANT

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Mihhail Terentjev

Üliõpilaskood: 134146 AAAB

Juhendaja: professor Anton Rassõlkin

Tallinn, 2020

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“20” mai 2020

Autor: Mihhail Terentjev

/ allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“20” mai 2020

Juhendaja: professor Anton Rassõlkin

/ allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....”2020.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Mihhail Terentjev

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Hüdrolektrijaama vertikaalsünkroongeneraatori arvutus

Kuupäev: 20.05.2020

98 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Anton Rassõlkin

HEJ projekteerimise algetapil peab arendaja väikeste HEJ-de võimalike konstruktsioonilahenduste leidmisel kindlaks määrama lõpliku arvu elemente. Määrata tuleb vähemalt HEJ tüüp, paisu tüüp ja geomeetria, derivatsioonisüsteemi tüüp ja geomeetria, veesamba kõrgus, turbiini ja generaatori tüüp ning nende võimsus.

Tehti arvutused 5300 kVA sünkroonmasina jaoks. Need arvutused on piiratud valemitega, mis on esitatud hüdrogeneraatorite ja sünkroonkompensaatorite projekteerimise õpikus kõrgkoolidele: Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов».

Osa parameetreid arvutamisel valib projekteerija. Need parameetrid mõjutavad ka materjalide kulusid ja generaatori põhinäitajad. Need muudatused on väheolulised, kuid vaatamata sellele need võivad olla positiivse investeerimisotsuse tegemisel otsustava tähtsusega.

Töös esitatud meetodikat võiks kasutada HEJ konstruktsioonilahenduse optimeerimise tööriista osana. MATLABis on koostanud optimeerimise tööriista, mis võimaldab geneetilise algoritmi abil generaatori disaini optimeerida.

Märksõnad: vertikaalsünkroongeneraatori arvutus, MATLAB

ABSTRACT

Author: Mihhail Terentjev

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Calculation of vertical synchronous generator for hydroelectric power plant

Date: 20.05.2020

98 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Professor Anton Rassõlkin

Abstract:

At the initial stage of HPP development developer must specify some finite number of elements as basis for possible HPP schemes. HPP scheme itself, dam type and geometry, derivation system type and its geometry, head, type of turbine and generator and their capacity are to be determined at least.

There were performed calculations for synchronous machine 5300 kVA in assignment.

Methodology described in Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов» can be used as part of tool for optimization of HPP scheme.

MATLAB has built in optimization tool that allow to perform optimization with genetic algorithm for optimization of design.

Some of parameters are really subject to be chosen by user i.e designer. Those ones also influence outcomes and costs of materials. These changes are minor, but might be considered with and under certain circumstances might be of crucial importance for positive investment decision taking.

Keywords: vertical synchronous generator calculation, MATLAB

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Hüdrolektriijaama vertikaalsünkroongeneraatori arvutus
Lõputöö teema inglise keeles:	Calculation of vertical synchronous generator for hydroelectric power plant
Üliõpilane:	Mihhail Terentjev, 134146 AAAB
Eriala:	AAAB
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Anton Rassõlkin
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2020

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Väiksete hüdrolektriijaamade arendamisel CAPEXi täpsem hindamine algsel etapil on tähtis võttes arvesse erainvestorite tasuvusenõuded. Elektromehaaniliste seadmete hindade osakaal projekti üldmaksumus on piisavalt suur, et isegi margninaalne parandamine algsel etapil vähendaks CAPEXi ja suurendaks projekti realiseerimise tõenäosuse. Generaatori osas algse arendamise etapi valikud on veelgi tähtsamad kuna mõjuavad CAPEXi, OPEXi ja toodangut.

2. Töö eesmärk

Teostada hüdrolektriijaama vertikaalsünkroongeneraatori arvutus, aru saada võimaliku edaspidise optimeerimise suunast ja vahenditest.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Sünkroongeneraatori parameetrite arvutus, järelalus optimeerimise võimaluste osas hüdrolektriijaama arendaja perspektiivist projekti arendamise algsel staadiumil.

4. Lähteandmed

Sünkroongeneraatori arvutamiseks oli võetud ühe projekti kohalike tingimustega ja jõe hüdroloogiaga tingitud algandmed: plaanitav võimsus 5300 kVA, nominaalpinge 6 kV, $\cos \varphi=0.9$, $f=50$ Hz, nominaalne pöörlemiskiirus 600 min^{-1} .

5. Uurimismeetodid

Arvutused tehakse vastavalt õpikule „Абрамов, А.И. „Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов“

6. Graafiline osa

Puudub.

7. Töö struktuur

EESSÕNA

Lühendite ja tähiste loetelu

Sissejuhatus

1. Põhiosa

1.1 Teooria

1.2 Algsed andmed

1.3 Sünkroonmasina arvutus

Kokkuvõtte

Kasutatud kirjandus

Lisa 1. Projekti lühikirjeldus

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Абрамов, А.И. „Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов“

Hydroelectric Power, A Guide for Developer and Investors, IFC, World Bank Group,
<http://documents.worldbank.org/curated/en/917841468188335073/pdf/99392-WP-Box393199B-PUBLIC-Hydropower-Report.pdf>

9. Lõputöö konsultandid

Puuduvad.

10. Töö etapid ja ajakava

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1) Algandmete kogumine | veebuar, 2020 |
| 2) Sünkoonamasina arvutus | märts.. aprill, 2020 |
| 3) Lõputöö koostamine ja esitamine | 20.05.2020 |

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
SISSEJUHATUS	12
SÜNKROONGENERAATORITE LIIGITUS.....	16
SÜNKROONGENERAATORI ARVUTUS.....	19
OPTIMEERIMINE.....	46
KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUS	53
LISA 1. HÜDROELEKTRIAAMA VÕIMSUSE ARVUTUS.....	54
LISA 2. MATLABI SKRIPT MAIN.M.....	55
LISA 3. FUNCTION_1V.M SKRIPT	77

EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema tekkis autori soovist arendada tarkvara hüdroelektrijaama arendaja jaoks, mis aitaks optimeerida hüdroelektrijaama skeemi arendamise algstaadiumil.

Käesoleva töö autor tänab professor Anton Rassõlkin koostöö eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

$\cos \phi$	nimivõimsustegur
P	aktiivvõimsus, kW
S	näivvõimsus, kVA
U	nimipinge, V
I	staatori nimivool, A
p	pooluspaaride arv
E_{rn}	vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud nimikoormusel, V
A	staatori lineaarkoormus, A/m
C_A	masinakonstant, m^3/J
Ω_n	niminurkkiirus, rad/s
T_J	inertsia konstant
J_p	rootori inertsmoment, $kg \cdot m^2$,
D_{max}	staatori südamiku maksimaalne siseläbimõõt, m
D_{min}	staatori südamiku minimaalne siseläbimõõt, m
D_{opt}	staatori südamiku optimaalne siseläbimõõt, m
D	staatori südamiku siseläbimõõt, m
v_a	ülejooksu ringkiirus, m/s
l_1	staatori magnetsüdamiku pikkus, m
w_1	järjestikuste faasikeerdude arv
U_{p1}	juhtmete efektiivarv uurdes
$I_{n_{min}}$	minimaalne soovitatud uure vool, A
$I_{n_{max}}$	maksimaalne soovitatud uure vool, A
a_1	rööpharude arv
q_1	uurete arv pooluse ja faasi kohta
Z_1	staatori uurete arv
y	mähisesamm
k_{w1}	staatori mähisetegur
$B_{\delta n}$	induktsioon õhupilus nimipingel, T
λ_u	isolatsiooni soojusjuhtivus, $W/(m \cdot C)$
ρ_1	staatorimähise resistiivsus, $Ohm \cdot m$
B_{δ}	maksimaalne induktsioon pilus tühijooksul nimipinge korral, T
x_{σ}	puistereaktants (suhtelistes ühikutes)
δ	minimaalne pilu staatori ja rootori vahel, mis lubab nõutud $x_{d, m}$, m

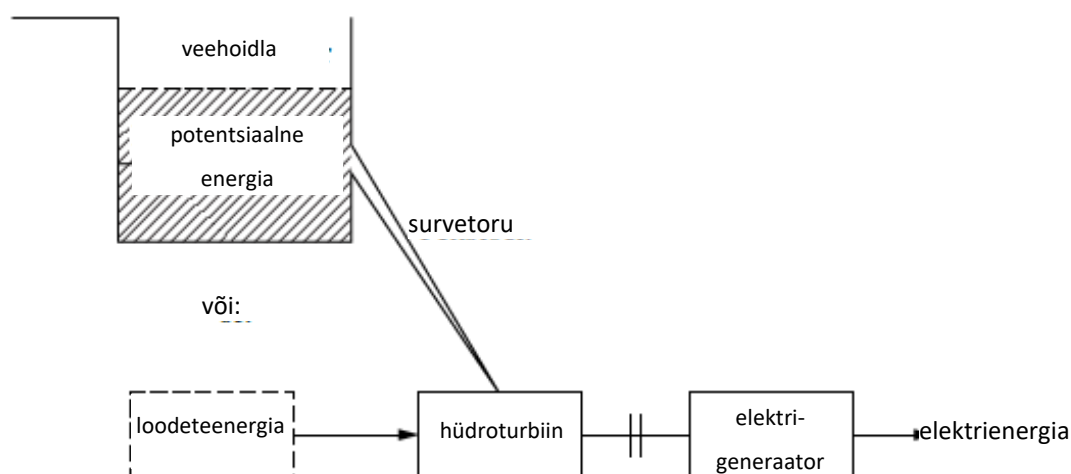
δ_m	maksimaalne pilu pooluse serva all, m
b_p	kanali laius südamikus, m
n_v	ventilatsioonikanalite arv staatori magnetsüdamikus
Φ_n	magnetvoog nimikoormusel, Wb
h_a	ikke kõrgus, m
D_a	staatori südamiku välisläbimõõt, m
b'_p	poolusekaare pikkus, m
R_p	poolusekinga raadius, m
l_M	poolusesüdamiku pikkus, m
t_{z2}	summutusmähise samm, m
d_c	summutusmähise südamiku läbimõõt, m
n_c	summutusmähise südamike arv
s_c	summutusmähise vasksüdamiku ristlõikepindala, m ²
l_p	summutusmähise südamiku pikkus, m
h_p	poolusekinga kõrgus, m
h_m	poolusesüdamiku kõrgus, m
k_δ	pilutegur
Φ_{tn}	voog poolusesüdamiku aluses nimikoormusel, Wb
D_{a2}	rootorivõru välisläbimõõt, m
l_{a2}	rootorivõru pikkus, m
h_{a2}	rootorivõru kõrgus, m
B_{z1}	induktsioon hamba ristlõikepindala 1/3 kõrgusel, T
B_{a1}	induktsioon staatori ikkes, T
X_{aq}	staatorimähise vastastikuse induktsiooni pikitelje reaktants, Ohm
λ_p	uurdepuiste aheldusvoo juhtivustegur
λ_Γ	hambatippude puiste voo juhtivustegur
β	mähise lühendamise sammutegur
k_β	tegur, mis võtab arvesse sammu lühendamise mõju kolmefaasilise kaksikkihtmähise uurdepuistele
$\lambda_{p\psi}$	uurdepuiste juhtivustegur
λ_l	lauppuiste juhtivustegur
Z_2	summutusmähise uurete ekvivalentarv
k_j	rootori väljepooluste mõju arvestav tegur
ξ	diferentsiaalpuistetegur staatori avatud uurete ja rootori summutusmähise korral

λ_d	diferentsiaalpuiste juhtivustegur
λ_σ	staatorimähise puiste juhtivustegur
X_σ	mähise puistereaktants, Ohm
$X_{*f\sigma}$	ergastusmähise puistereaktants, Ohm
λ_{fd}	diferentsiaalpuiste juhtivustegur ühe pooluse kohta
$\lambda_{f\psi}$	uurdepuiste aheldusvoo ja poolusepea puiste juhtivustegur ühe pooluse kohta
X_{*pd}	südämike puistereaktants, Ohm
k_{ok}	summutusmähise jaotustegur
$\lambda_{k,p\psi}$	summutusmähise uurdepuiste aheldusvoo ja poolusepea puiste juhtivustegur ühe
	uurde kohta
$\lambda_{k,g}$	summutusmähise diferentsiaalpuiste juhtivustegur ühe südämiku kohta
X_{*ld}	summutusmähise (laubaosa) lühisrõngaste puistereaktants, Ohm
$B_{\delta n}$	induktsioon õhupilus nimikoormusel, Wb
B_{z1n}	induktsioon staatorihammastes 1/3 kõrgusel nimikoormusel, Wb
B_{z2n}	induktsioon summutusmähise hammastes nimikoormusel, Wb
B_{a1}	induktsioon staatori magnetsüdämiku ikkes nimikoormusel, Wb
B_{mn}	induktsioon poolusel nimikoormusel, Wb
l_f	ergutusmähise poolkeeru keskmine pikkus, m
G_z	staatorisüdämiku hammaste mass, kg
G_a	südämiku ikke mass, kg
G_{mf}	ergutusmähise juhi mass, kg
G_c	summutusmähise südämike mass, kg
G_o	rootorivõru mass, kg
N_p	tugilaagrile mõjuv koormus
P_M	magnetkaod staatori südämikus, W
P_E	poolusekingade pinnal tekkivad lisakaod tühijooksul, W

SISSEJUHATUS

Suurem osa elektrienergiast „toodetakse peamiselt nii, et mehaanilist energiat üle kandev primaarajam (turbiin) ühendatakse elektrigeneraatoriga, mis muundab mehaanilise energia elektrienergiaks. Energia vahepealset vormi kasutatakse salvestamiseks elektrigeneraatoris. See on nn magnetvälja energia, mis salvestatakse peamiselt staatori (primaarne) ja rootori (sekundaarne) vahel.“ [5]

Vee potentsiaalne energia muundatakse mehaaniliseks energiaks hüdroelektrijaama (HEJ) turbiinides. Turbiinid käitavad elektrigeneraatoreid, mis toodavad elektrienergiat.



Joonis 1.1 Energia muundamine HEJ-s [5]

HEJ-sid liigitatakse paigaldatud võimsuse, veesamba kõrguse, tööpõhimõtte jne alusel. Kõige sagedamini on kasutusel liigitamine paigaldatud võimsuse (P) alusel:

1. väike $0,1 \text{ MW} < P < 10 \text{ MW}$ (väikese HEJ määratlus on erinevates riikides erinev, näiteks, mõnedel riikidel kuni 35 MW),
2. keskmine $10 \text{ MW} < P < 100 \text{ MW}$,
3. suur $P > 100 \text{ MW}$.

HEJ-d erinevad ka veesamba kõrguse poolest: kõrge veesammaga HEJdel on $H > 100 \text{ m}$, keskmise on $30 \text{ m} < H < 100 \text{ m}$, madalaga on $H < 30 \text{ m}$.

Tööpõhimõtte alusel liigitatakse HEJ-d otsevooluga, veehoidlaga ja pumphüdroelektrijaamadeks.

Selles dokumendis on vaatluse all otsevooluga HEJ-d. Sellised HEJ-d on jõe veevooluga seotud igal ajahetkel. Neid mõjutab vooluhulga muutumine ja seega on ka nende energiatoodang muutuv. Enamikul neist on piiratud salvestusvõimalus või ei ole seda üldse.

Energiatarbe pideva kasvu tõttu on vaja suuremat fossiilkütuste kasutamist (varud on piiratud), taastuvenergia kasutuselevõtmist (samuti omad piirangud) või märgatavat elustiili muutust, st leppimist madalama elukvaliteediga tulevikus.

Hüdroenergial, mis on üks taastuvatest energiaallikatest, on veel kasutamata potentsiaali.

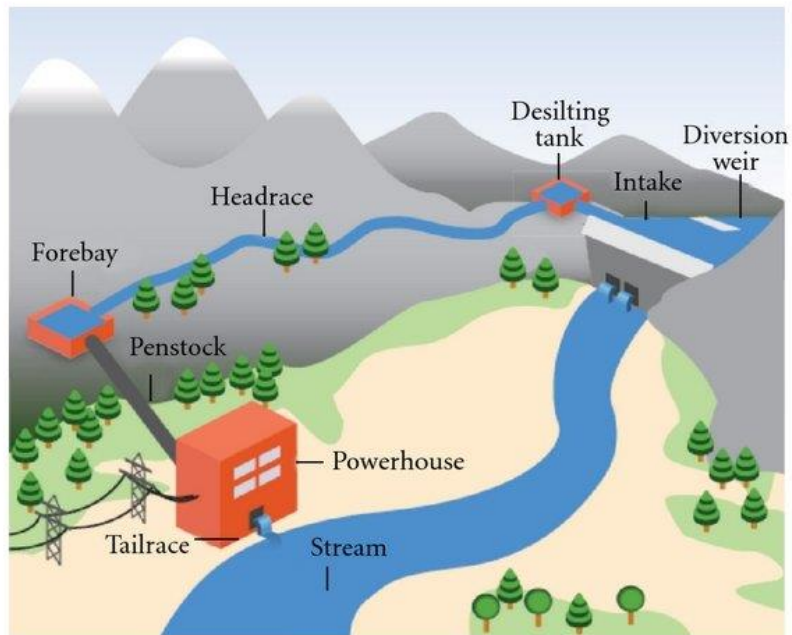
Kõrgetele kapitalikuludele vaatamata on veest elektrienergia tootmise kulu madal ja on piisavalt kohti, kus selliste jaamade keskkonnamõju on väike (eriti väikeste HEJ-de korral).

Tabel 1.1 Maailma regioonide hüdroenergia potentsiaal (TWh) [5]

	Potentsiaalne	Majanduslikult tasuv	Teostatav
Euroopa	5,584	2,070	1,655
Aasia	13,399	3,830	3,065
Aafrika	3,634	2,500	2,000
Ameerika	11,022	4,500	3,600
Okeaania	592	200	160
Kokku	34,231	13,100	10,480

Tabel 1.2 Kasutusel hüdroenergia osa potentsiaalist [5]

Aafrika	6%
Lõuna- ja Kesk-Ameerika	18%
Aasia	18%
Okeaania	22%
Põhja-Ameerika	55%
Euroopa	65%



Joonis 1.2 HEJ skeem [5]

HEJ peamised komponendid on:

1. ehitised (veehaarderatistid, juurdevoolukanal, elektrijaamahooned, äravoolukanal jne)
2. elektromehaanilised seadmed,
3. hüdrorajatiste terasstruktuurid,
4. elektrivõrguga ühendamise taristu.

HEJ-d projekteeritakse ja ehitatakse konkreetse asukoha tingimuste kohaselt (jõe hüdroloogia, topograafia, keskkonna- ja sotsiaalsed piirangud, riigi seadused, kohalik spetsiifiline taristu jne).

Asukohapõhised geoloogilised ja topograafilised tingimused mõjutavad ehitusmaksumust.

Hüdroloogilised tingimused määravad nii energiatootmise võimalused kui ka ehitusmaksumuse. Keskkonna- ja sotsiaalsed piirangud mõjutavad energiatootmist ja peamisi tegevuskulusid asjakohaste leevendusmeetmete maksumuse kaudu.

Olulisel määral sõltub HEJ üldine kasutegur ka generaatori valikust.

Sünkroongeneraatori konstrueerimine ja tootmine on suuremahuline inseneritöö, kuid HEJ arenduse algaasis pööratakse tavaliselt generaatori konstruktsiooni üksikasjadele vähem tähelepanu, sest seda ei peeta tõhusa ajakasutuse seisukohast otstarbekaks.

Tabel 1.3 Põhiliste kulurühmade jagunemine HEJ maksumuses, %

	Min	Mediaan	Keskmine	Max	Hälbetegur
Projekti arenduskulud	3,0	7,5	9,2	17,2	0,5
Ehitustööd	33,2	55,2	54,3	76,5	0,2
Elektromehaanilised seadmed	14,9	29,2	30,3	56,6	0,4
Muud	0,1	1,2	1,3	2,3	0,5
Ettenägematud kulud	5,4	9,8	9,1	12,6	0,3

Keskised ja suured generaatorid projekteeritakse projektipõhiselt, kuid väikeste hüdroelektrijaamade jaoks seadmetarnijad tihti pakuvad standardseid tooteid võtmed-kätte projekti osana.

Arvestades, et 1) väikese HEJ elektromehaanilise seadmetiku maksumus on suure osakaaluga (tabel 1) ja 2) inseneriarvutusteks on saadaval piisavalt tarkvara, saame eeldada, et väikese HEJ projekteerimise algstaadiumis on võimalik saavutada sünkroonmasina täpsemad ja projektikohasemad tehnilised omadused (seega ka tõhusamad kapitalikulud), mis võimaldavad täiustada otsustusprotsesse ja koostada tehnilise lähteülesande tootja jaoks.

Sünkroonmasina konstruktsioon on keerukas. Mehaanilistes, elektromagnetilistes ja soojuslikes arvutustes tuleb arvestada rohkem kui saja parameetriga, mistõttu selle dokumendi ülesanne ei ole detailsete arvutuste kajastamine.

Selles dokumendis on lühidalt kirjeldatud sünkroonmasina tööpõhimõtet. Esitatakse analüütiliste avaldiste loend sünkroongeneraatori selliste kadude arvutamiseks, mis tagavad vastavuse algsetele tehnilistele andmetele. Arvutuste osas on esitatud arvutuste põhilised etapid ja näide arvutustest tarkvaraga MATLAB. MATLAB-i geneetiline algoritm, mis võimaldab muuta ühte parameetrit, et aru saada, kas on võimalik saavutada optimaalsemat konstruktsiooni. Selle dokumendi järeluste osas korraldatakse kokkuvõtlikult põhilisi tähelepanekuid ja kirjeldatakse edasisi arenguideid.

SÜNKROONGENERAATORITE LIIGITUS

Elektrigeneraatoreid on kolm tüüpi: sünkroonsed, induktiivsed ning parameetrilised (magnetilise anisotroopia ja püsिमagnetitega).

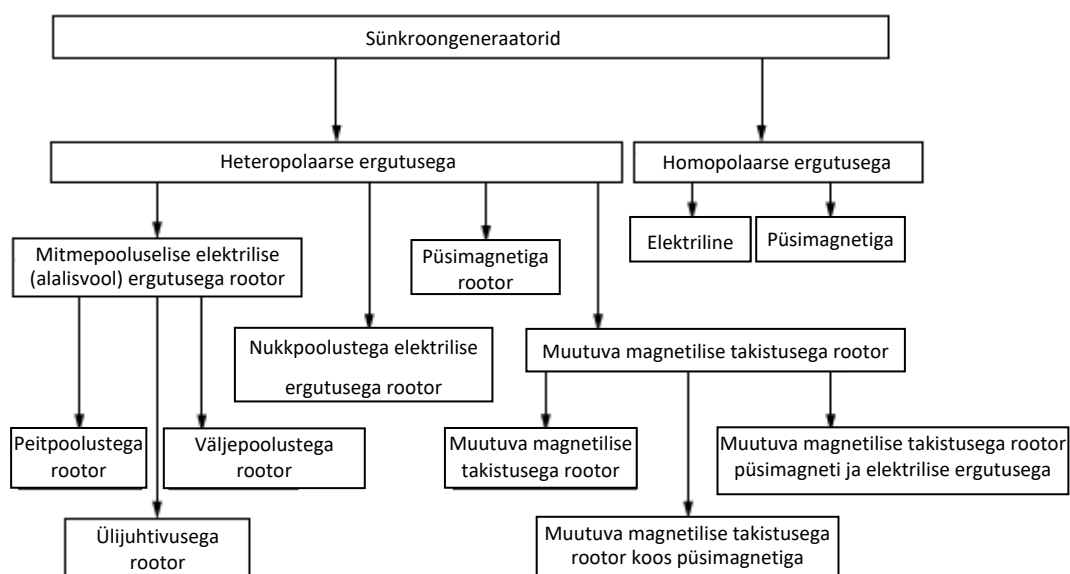
HEJ-des kasutatavaid generaatoreid võib liigitada ka:

- telje paiknemise järgi: horisontaalsed või vertikaalsed hüdrogeneraatorid, kusjuures vertikaalset paigutust kasutatakse keskmise suurusega rakendustes ning horisontaalset paigutust väikese kuni keskmise võimsusega rakendustes (väga harva kasutatakse ka kaldasetust)
- harjadeta või harjadega ergutusega generaatorid
- sünkroon- või asünkroongeneraatorid.

HEJ generaatorite arv ja paigaldatav võimsus määratakse kindlaks hüdroloogiliste tingimuste, turbiini konstruktsiooni ja energiasüsteemi piirangute alusel. Üldiselt arvestatakse, et kapitalikulud ja tegevuskulud on väiksemad, kui HEJ-s on vähem generaatoreid.

Töös kirjeldatakse sünkroongeneraatoriga seonduvat.

Sünkroongeneraatorid liigitatakse:



Joonis 1.3 Sünkroongeneraatorite liigitus [5]

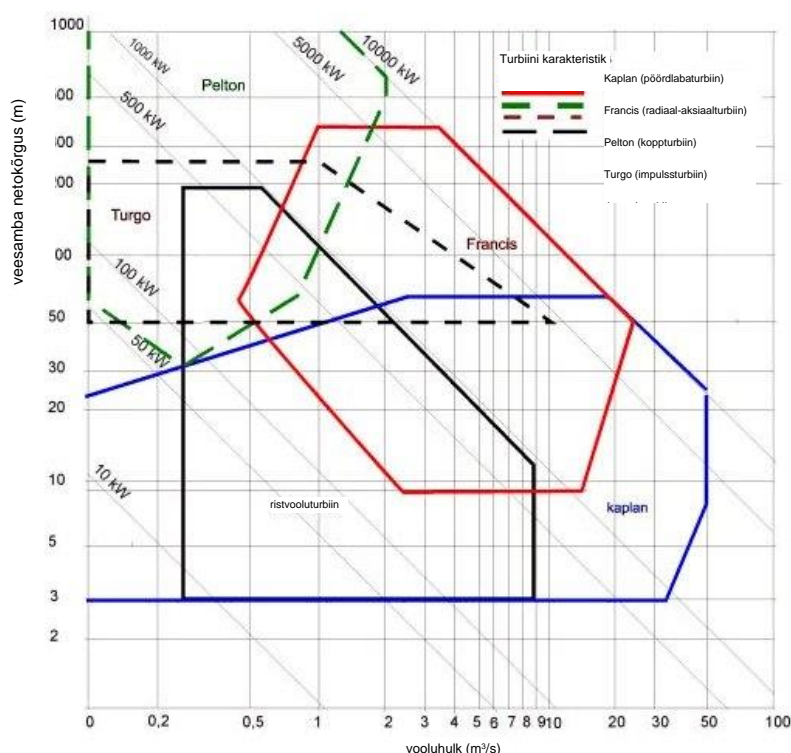
Sünkroongeneraatorite ühtlaste uuretega staatoril on lehtsüdamik, kus on kolme-, kahe- või ühefaasiline vahelduvvoolumähis ja alalisvooluga püsिमagnetiga ergutusega või muudetavate väljepoolustega rootor [5].

Sünkroongeneraatori kaks peamist osa on staator ja rootor. Rootor on lukustatud generaatori sünkroonkiirusele. Generaatoril on eraldi alalisvooluahel. See vool tekitab magnetvälja, mis pöörleb sama kiirusega kui rootor. Magnetväli indutseerib staatori mähises vahelduvpinge.

Hüdroturbiinide pöörlemisagedus on üsna väike. See sõltub vee vooluhulgast ja veesamba kõrgusest. Kõrge veesammas põhjustab turbiini suurema töökiiruse, ja suurem vooluhulk väiksema töökiiruse.

Tavaliselt valitakse madala veesambaga otsevooluga HEJ jaoks Kaplani turbiinidega aeglasekäigulised generaatorid. Francis'e ja Peltoni turbiinidega kiirekäigulised generaatorid valitakse kõrge veesambaga HEJ-de korral.

Vaatlusaluse projekti turbiinivalik põhineb veesamba kõrguse ja vooluhulga muutuste kohta teada olevatel andmetel. Turbiini algne valik põhineb objekti väliuuringutel. Võimaliku kasutatava vooluhulga ja veesamba kõrguse järgi valiti projekti jaoks Francis'e turbiin (veesamba kõrgus 212 m, vooluhulk 5 m³/s, pöörlemisagedus 1100 p/min) järgmise karakteristiku alusel:



Joonis 1.4 Võimalikud turbiinitüübid veesamba kõrgusest ja vooluhulgast olenevalt [3]

Paigaldatav võimsus kokku on umbes 9,4 MW. Arvestused on tehtud eeldusel, et paigaldatakse kaks võrdse võimsusega turbiini. Paigaldatav võimsus on sünkroongeneraatori suuruste määratlemisel üheks sisendiks.

Sünkroongeneraatori projekteerimine on keerukas insenertehniline ülesanne. Lahendada tuleb palju erinevaid ülesandeid. Tähtsamate hulgas on:

1. võimsustegur ja staatori peamine geomeetria
2. staatori uurete arv
3. staatorimähise konstruktsioon
4. staatori südamikü konstruktsioon

5. väljepoolustega rootori konstruktsioon
6. silindrilise rootori konstruktsioon
7. tühijooksu küllastuskarakteristik
8. ergutusvool täiskoormusel
9. staatori puisteinduktiivsuse, takistuse ja sünkroonreaktantsi arvutus
10. kadude ja kasuteguri arvutus
11. ajakonstandi ning mööduva ja ülিমööduva reaktantsi arvutus
12. jahutussüsteem ja soojuslik projekteerimine
13. harjade ja kontaktrõngaste (kui on) konstruktsioon
14. laagrite konstruktsioon
15. pidurite ja tõsteseadmete konstruktsioon
16. erguti konstruktsioon. [5]

Tootjad kasutavad projekteerimistarkvara, mis sisaldab ka konstruktsiooni optimeerimise valikuid. Kliendil selliseid võimalusi tavaliselt ei ole.

Kasutaja tehniliste andmete kohased sünkroonmasinate parameetrid võidakse esitada sünkroongeneraatori põhimõõtmete ja elektromagnetiliste koormuste erinevate kombinatsioonidena.

Optimaalne konstruktsioonilahendus valitakse mitme variandi võrdlemisel.

Optimeerimise kriteeriumiks on minimaalsed tootmis- ja käituskulud.

Enne projekteerimise algust peab kasutaja määratlema mõned konstruktsioonilised lähteparameetrid.

Selles dokumendis on lihtsustamise eesmärgil võetud sünkroongeneraatori arvutuste aluseks nominaalvõimsus S_n (st võimalik paigaldatav võimsus), võimsustegur pf , sagedus (määratud ühendusvõrgu tingimusega), väljundpinge nimipöörlemissagedusel ja väljundpinge.

Optimeerimise etapis on majanduslikult kõige mõistlikuma lahenduse valimisel sisendandmeteks materjali maksumus, maksumus püsihindades ja koormusest olenevad kaod.

SÜNKROONGENERAATORI ARVUTUS

Sünkroongeneraator (SG) arvutatakse vastavalt valemitele, mis on esitatud hüdrogeneraatorite ja sünkroonkompensaatorite projekteerimise õpikus kõrgkoolidele: Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов». Arvutused on teostatud piiratud mahus.

Sünkroongeneraatori põhimõõdmed on siseläbimõõt ja staatori magnetsüdamiku pikkus.

Need parameetrid olenevad arvutuslikust võimsusest ja pöörlemissagedusest.

Alginfo arvutamiseks on järgmine:

Näivvõimsus (S_n):	5300 kVA
Nimipinge (U_n):	6 kV
Võimsustegur ($\cos \phi_n$):	0,9
Sagedus (f):	50 Hz
Faaside arv (m):	3
Nimipöörlemisagedus (n_n):	600 min ⁻¹
Ülejooksu pöörlemisagedus (n_a):	1100 min ⁻¹
Pikitelje reaktants:	$x_d=0,8, x'_d=0,25$ [1]
Staatori mähise lekke reaktants (esialgne):	$x_{\sigma}=0,125$ [1]

Nimivõimsus

$$P_n = S_n \cos \phi_n = 5300 \cdot 0,9 = 4770 \text{ kW}, \quad (3.1)$$

kus S_n on näivvõimsus ja $\cos \phi_n$ on võimsustegur.

Nimipingel generaatoril on järgmised parameetrid:

faasi nimipinge (täheühendus)

$$U_H = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ V} \quad (3.0)$$

faasi nimivool

$$I_H = \frac{S_n}{3 \cdot U_n} = \frac{5300}{3 \cdot 3,464} = 510 \text{ A} \quad (3.1)$$

pooluspaaride arv

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_n} = \frac{60 \cdot 50}{600} = 5 \quad (3.2)$$

vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud nimikoormusel (esialgne)

$$E_{r_n} = k_E \cdot U_n = 1,08 \cdot 3637 = 3674 \text{ V}, \quad (3.5.)$$

$$\text{kus } k_E = \sqrt{1 + x_{*\sigma}(2 \sin \phi_n + x_{*\sigma})} = 1,06,$$

kus

$$\phi_H = \arccos(\cos \phi_n),$$

$$\sin(\phi_n) = 0,436$$

$x_{*\sigma} = 0,125$ on staatori mähise induktiivse hajumise esialgne väärtus.

Nimikoormuse korral on sünkroongeneraatori elektromotoorjõud suurem kui faasi nimipinge ($k_E > 1$). k_E sõltub staatorimähise puistereaktantsist $x_{*\sigma}$ ja võimsustegurist. Sünkroongeneraatori juhul, mille $\cos \phi_n = 0,9$ ja keskmine väärtus $x_{*\sigma} = 0,125$ $k_E = 1,08$. Arvutamiseks kasutame allpool esitatud valemid. [1]

Sünkroomasina peamised parameetrid olenevad arvutuslikust võimsusest S_p ja pöörlemissagedusest Arvutuslik võimsus

$$S_p = k_E \cdot S_n = 1,046 \cdot 5300 = 5620 \text{ kVA.} \quad (3.3)$$

Rootori poolusesamm oleks $S_H/2p = 5300/(2 \cdot 5) = 530 \text{ } \tau = 0,4 \text{ m}$ ([1], tabel 5.1).

Elektromagnetilise koormuse valikuks on vaja teada rootori poolusesammu. Arvestame samuti, et sünkroonmasinal on kaudne õhkjahutus (vesijahutuse või osalise vesijahutusega generaator on võimeline taluma suuremat lineaar- ja induktiivkoormust (vastavalt 1,8x ja 1,1x ning 1,2x ja 1,2x). Sünkroonmasina elektromagnetiline koormus on määratud jahutuse tüübiga ja rootori poolusesammu suurusega. Suurema poolusesammuga rootoriga sünkroonmasin talub suuremat koormust, seejuures püsib aktiivsete detailide temperatuur sobival tasemel. Sünkroonmasina elektromagnetiline koormus on määratud jahutuse tüübiga ja rootori poolusesammu suurusega. Suurema poolusesammuga rootoriga sünkroonmasin talub suuremat koormust, seejuures püsib aktiivsete detailide temperatuur sobival tasemel

Staatori lineaarkoormus on $A=540 \cdot 10^2 \text{ A/m}$ ([1], tabel 5.2).

Induktsioon pilus nimikoormuse korral on $B_{\delta n}=0.75 \text{ T}$ ([1], tabel 5.2).

Abramovi õpikus on näidatud, et sünkroongeneraatori aktiivosa mõõtmeid, nurkkiirust ja võimsust on võimalik kirjeldada masinakonstandiga C_A (esialgne)

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l \cdot \Omega_n}{S_p} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{w1} \cdot A \cdot B_{\delta n}} = 2,156 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{J}, \quad (3.4)$$

kus $\Omega_n = 2 \cdot \pi \cdot n$ nininurkkiirus ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$), $\alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{w1} \approx 0,729$ ([1], tabel 5.2).

C on konstant ja ei muutu A ja $B_{\delta n}$ muutmisega.

Sünkroonmasina peamiste parameetrite valimiseks on vaja kontrollida, kas rootori inertsmoment on piisavalt suur, et pidada vastu tsentrifugaaljõule ülejooksukiiruse korral.

Rootori inertsmoment

$$J_p = \frac{T_J \cdot S_n}{\Omega_n^2} = 5,398 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad (3.8)$$

kus $\Omega_n = 2\pi n_n = 62,83 \text{ rad/s}$ on nimirukkiirus,

$$T_J = 2.78 \cdot \sqrt[4]{S_n} = 2,65 \cdot \sqrt[4]{5,3} = 4,021 \text{ inertsimomendi konstant}[1].$$

Inertsimoment ei ole algandmete osa, seega võtame selle võrdseks minimaalse lubatava konstandiga T_J .

Staatori südamiku minimaalne siseläbimõõt

$$D_{min} = 0,035 * \sqrt{\frac{J_p \cdot \Omega_n}{\phi_J \cdot k_E \cdot S_n \cdot C_A}} = 2,138 \text{ m}, \quad (3.5)$$

kus $\phi_J = 0,75$ on koefitsient, mis sõltub rootori konstruktsioonist ja pooluste arvust (juhul, kui $p < 12$ ja kui rootori velg paigaldatakse otse võllile) [1].

Staatori südamiku maksimaalne siseläbimõõt

$$D_{max} = \frac{v_{max}}{\pi \cdot n_a} = 2,952 \text{ m}, \quad (3.10)$$

kus $n_a = n_n / 60 = 18,33 \text{ 1/s}$ ja $v_{max} = 170 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ vastavalt kasutatud metodoloogia soovitudele juhul kui $p < 12$.

Staatori südamiku optimaalne siseläbimõõt

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot f \cdot C_A \cdot S_n \cdot k_E}{\lambda_l \cdot \Omega_n^2}} = 1,408 \text{ m}, \quad (3.11)$$

$$\text{kus } \lambda_l = \frac{l_1}{\tau} = 2,2.$$

Ideaaljuhul on $D_{min} < D < D_{max}$, ja kui $D < D_{min}$, tuleb arvestada, et $D_{min} = D = 2,138 \text{ m}$. D peab olema väiksem kui D_{max} , sest D_{max} korral on nurkkiirus ülemise piiri juures.

Rootori pooluse samm valitud D korral

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 0,672 \text{ m}. \quad (3.6)$$

Ülejooksukiirus ei ole suurem kui aktsepteeritav väärtus

$$v_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_a}{60} = 123,14 \text{ m/s}. \quad (3.7)$$

Staatori magnetsüdamiku pikkus

$$l_1 = \frac{C_A \cdot S_n \cdot k_E}{\Omega_n \cdot D^2} = 0,42 \text{ m}. \quad (3.8)$$

Valime $l_1 = 0,9 \text{ m}$ λ_l suhe säilitamisel vastuvõetava diapasooni sees

$$\lambda_l = \frac{l_1}{\tau} \approx 1,3 \quad (3.9)$$

Sünkroonmasina põhimõõdmed olenevad nimivõimsusest, nimipöörlemissagedusest ja jahutuse tüübist. Optimaalse nimipöörlemissageduse ja jahutuse tüübi valimine on üsna keerukas tehnilis-majanduslik ülesanne.

Väljepoolustega sünkroonmasina staatoril on kolme faasiga sümmeetriline mähis, milles on tähtühenduses kolm identset faasimähist. Tavaliselt on sünkroonmasinatel kaksikiht-varrasmähis. Arvestades, et $p = 5$, $n_n = 600 \text{ min}^{-1}$, faasivool $I_n = 510 < 1000 \text{ A}$ ja nominaalpinge $U_n = 6 \text{ kV}$, valime kaksikiht-varrasmähise.

Mähise arvutus algab faasimähise järjestikuste keerdude arvu esialgsest arvutamisest

$$w_1 = \frac{k_E \cdot U_n}{4 \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{w1} \cdot f \cdot \tau \cdot l_1 \cdot B_{\delta n}} = 55,574 \quad (3.10)$$

Faasimähise järjestikuste keerdude edasist arvu võib muuta, arvestades pilude arvu. Et valida efektiivjuhtide arvu pilus, peame arvestama, et see peab olema paarisarv ja suurem kui 2.

Võtame arvesse efektiivjuhtide arvu uurdes $u_{p1} = 12$.

Maksimaalne ja minimaalne soovitatud voolud on ([1], tabel 6.1): $I_{n \min} = 2200 \text{ A}$, $I_{n \max} = 3200 \text{ A}$.

Maksimaalne ja minimaalne rööpharude arv

$$a_{\max} = \frac{u_{n1} \cdot I_n}{I_{n \min}} = 2,78 \quad (3.11)$$

$$a_{\min} = \frac{u_{n1} \cdot I_n}{I_{n \max}} = 1,91 \quad (3.12)$$

Maksimaalne rööpharude arv peab olema valitud vastavalt tingimusele $a_{\max} > a_1 > a_{\min}$ [1].

Rööpharude arv peab olema täisarv. Kui maksimaalse ja minimaalse vahel ei ole täisarvu, siis võib vaja olla muuta nimipinget ja korrigeerida vastavalt väärtusi $I_{n \min}$ ja $I_{n \max}$.

Valime $a_1 = 2$.

Valitud a_1 vastab ka valiku teise kriteeriumile ($\frac{2p}{a_1} = \frac{10}{2} = 5$ on täisarv).

Valitud a_1 -ga arvutame staatori uurde voolu

$$I_p = \frac{I_p \cdot u_{p1}}{a_1} = 3060 \text{ A.} \quad (3.13)$$

Uurete arv pooluse ja faasi kohta

$$q_1 = \frac{a_1 \cdot w_1}{u_{p1} \cdot p} = 1,85 \quad (3.14)$$

Valime $q_1 = 2$.

Staatori uurete arv

$$Z_1 = 6p \cdot q = 60 \quad (3.15)$$

Järjestikuste faasikeerdude arv

$$w_1 = \frac{q_1 \cdot u_{p1} \cdot p}{a_1} = 60. \quad (3.16)$$

Mähisesamm

$$y \approx 0,83\tau_{np} = 0,83 \cdot 6 \approx 5, \quad (3.17)$$

kus $\tau_p = \frac{z_1}{2p} = 6$.

Staatori mähisetegur

$$k_{w1} = k_{y1} \cdot k_{p1} = 0,933, \quad (3.18)$$

kus $k_{y1} = \sin \frac{y \cdot \pi}{2 \cdot \tau_p} = 0,966$ ja $k_{p1} = \frac{\sin(\pi/6)}{q_1 \cdot \sin[\pi/(6 \cdot q_1)]} = 0,966$.

Induktsioon õhupilus nimipingel

$$B_{\delta n} = \frac{k_E \cdot U_n}{4 \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_{w1} \cdot f \cdot \tau \cdot l_1 \cdot w_1} = 0,695 \text{ T} \quad (3.19)$$

Lõplik staatori lineaarkoormus

$$A = \frac{6 \cdot w_1 \cdot I_n}{\pi \cdot D} = 3,733 \cdot 10^5 \text{ A/m}. \quad (3.20)$$

Uure geomeetria jaoks on piirav tegur staatorimähise temperatuur, mis oleneb mähise voolust ja maksimaalsest lubatud induktsioonist.

Magnetahela mõõtmete arvutus algab uure laiuse arvutamisest ($b_n \leq t_{z1} - b'_z$). Selleks tuleb arvutada staatori hambasamm.

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z} = 0,112 \text{ m} \quad (3.07)$$

Tuleb valida uure b'_z , arvestades, et induktsioon selles ristlõikes ei oleks suurem kui 1,8–1,9 T kuumvaltsitud terasest südamikuga korral ja 1,95–2,05 T külmaltsitud terasest südamikuga korral. Uure peab olema piisavalt lai, et sinna paigutada juhid ja isolatsioonimaterjal ettenähtud pinge jaoks. Kõrgema pinge korral peab uure olema laiem. Lisakaod pooluste pinnas kasvavad uure laiuse suurenemisega.

Hamba laius kõige kitsamas kohas

$$b'_z = \frac{1,32 t_{z1} \cdot B_{\delta n}}{B_{z1}} = 0,055 \text{ m}. \quad (3.28)$$

kus $B_{z1} = 1,88 \text{ T}$ terase jaoks.

Urde laius

$$b_n = t_{z1} - b'_z = 0,057 \text{ m} \quad (3.29)$$

Voolutihedus staatorimähises valitakse vastavalt staatori lineaarkoormusele ja soovitud väärtustele Δ jaoks ([1], tabel 6.27)

$$\Delta_1 = \frac{\Delta \cdot A}{A} = 5,128 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2, \quad (3.30)$$

kus $\Delta A = 1400 \cdot 10^8 \text{ A}^2/\text{m}^3$ on soovitud väärtus $\tau = 0,4$ jaoks.

Uurete suuruste arvutamise esimene samm on staatorimähise efektiivjuhi ristlõikepindala arvutamine:

$$s_1 = \frac{I_n}{a_1 \cdot \Delta_1} = 49,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (3.31)$$

Staatorimähise efektiivjuhi kõrgus $a_s = 2,35 \text{ mm}$.

Isoleeritud juhtide kogulaius staatori uurde laiuse suhtes:

$$b_0 = b_p - 2\delta_i - \Delta b = 0,0516 \text{ m}, \quad (3.32)$$

kus $2\delta_i = 0,005 \text{ m}$ isolatsiooni laius ([1], tabel 6.6) ja $\Delta b = 0,001 \text{ m}$ on valmistamise tolerants.

Elementaar-varrasjuhi laius

$$b_{e1} = b_i - \Delta_i = \frac{b_0}{n_e} - \Delta_i = 0,011 \text{ m}, \quad (3.33)$$

kus $\Delta_i = 0,00028 \text{ m}$ on varrasjuhi isolatsioon laius mõlemal küljel ([1], tabel П1.3);

$n_e = 2$ – elementaarjuhtide arv uurde laiuses

Lõplik uurde laius

$$b_p = 2b_{e1} + 2\Delta_i + 2\delta_i + \Delta b = 0,0166 \text{ m}. \quad (3.21)$$

Juhtide arv vardas

$$c_e = \frac{s_1}{s_e} \approx 4. \quad (3.22)$$

Staatorimähise efektiivjuhtme ristlõikepindala

$$s_1 = c_e \cdot s_e = 47,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (3.37)$$

Voolutihedus staatori mähises

$$\Delta_1 = \frac{I_n}{a_1 \cdot s_1} = 5,357 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2, \quad (3.38)$$

mis erineb algsest väärtusest 0,04% võrra.

Elementaarjuhi laius ja kõrgus koos isolatsiooniga on vastavalt

$$a_i = a_e + \Delta_i = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad (3.23)$$

$$b_i = b_e + \Delta_i = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad (3.24)$$

kus staatorimähise efektiivjuhi kõrgus $a_e=2,35$ mm ja $\Delta_i=0,00028$ m on juhi isolatsiooni laius juhtme mõlemal küljel (1, tabel П1.3).

Isoleeritud elementaarjuhtide kogukõrgus ühes vardas

$$h_0 = c_e a_i / n_e = 5,26 * 10^{-3} \text{ m.} \quad (3.41)$$

Staatori uurde/hamba kõrgus

$$h_{\Pi} = h_z = 2h_0 + \delta_h + h_{kl} + h_{ch} + h_4 = 0,047 \text{ m,} \quad (3.25)$$

kus $h_{kl}=0,006$ m on kiilu kõrgus [1], $\delta_h = 19,2 * 10^{-3}$ m on isolatsiooni laius vastavalt tabelile 6.6 [1], $h_4 = 0,005$ m pilu ja uurde vahe suurus. [1].

Staatori uurde lõplik geomeetria tuleb üle kontrollida mähise keskmise temperatuuritõusu suhtes (θ_u peab olema $\leq 55^\circ\text{C}$).

$$\theta_u = \frac{\rho_1 * A * t_{z1} * \delta_u * k_r}{2 * (h_p - h_{kl}) * \lambda_u} = 33,6 \text{ }^\circ\text{C, kus} \quad (3.26)$$

$\lambda_u=0,2$ on isolatsiooni soojusjuhtivus, W/(m*C),

$\rho_1=0,0234*10^{-6}$ Ohm*m on staatorimähise resistiivsus Cu jaoks temperatuuril 105°C ,

$k_r = 1,2$ on kaod suurendav koefitsient.

Meie juhul $\theta_u \leq 55^\circ\text{C}$ on aktsepteeriva piiri sees[1], seega jätkame uurde mõõtmete arvatud väärtusega.

Minimaalne pilu staatori ja rootori vahel tuleb valida vastavalt algele pikitelje reaktantsile.

Maksimaalne induktioon pilus tühijooksul nimipinge korral

$$B_\delta = \frac{B_{\delta n}}{k_E} = 0,64 \text{ T.} \quad (3.27)$$

Puistereaktants (suhtelistes ühikutes):

$$x_\sigma = ((0,6 + 0,08\lambda_1)10^{-6} \cdot (A/B_\delta)(h_p/(b_p q_1) + \tau/\lambda_1) \cdot 10^{-6} = 0,147. \quad (3.28)$$

Minimaalne pilu staatori ja rootori vahel, mis tagaks valitud x_d suuruse

$$\delta = \frac{\sqrt{2}\mu_0 \tau k_{w1} k_{ad} A}{\pi k_\delta x_{ad} B_\delta} = 0,002 \text{ m} \quad (3.29)$$

kus

k_{w1} - staatori mähisetegur(3.24),

$k_{ad} \approx 0,84$ on reaktsioonitegur pikitelje sihis [1],

$k_\delta = 1,12$ on kiilutegur [1],

$\mu_0 = 4*\pi*10^{-7}$ on pilu magnetiline läbitavus,

$x_{ad} = x_d - x_\sigma = 0,554$ on induktiivreaktantsi väärtus pikitelje sihis.

Pärast minimaalse pilu arvutamist tuleb arvutada maksimaalne pilu pooluse serva all

$$\delta_M = \delta \cdot 1,5 = 0,0225 \text{ m} \quad (3.30)$$

Ette on nähtud n_B staatori magnetsüdamikus jahutuse radiaalkanali jaoks. Kanali laius b_p on tavaliselt 0,01 m.

Ventilatsioonikanalite arv staatori magnetsüdamikus

$$n_B = \frac{l_1 - l'_1}{b_p + l'_1} = 14. \quad (3.31)$$

Staatori südamikupaketi pikkus

$$l' = \frac{l_1 - n_B b_p}{n_B + 1} = 0,051 \text{ m}. \quad (3.32)$$

Staatori paketi kogupikkus

$$l_M = l'_1 (n_B + 1) = 0,76 \text{ m} \quad (3.33)$$

Ikke kõrgus on määratud magnetvooga nimikoormuse korral ja lubatava induktiooniga B_a .

Magnetvoog nimikoormusel

$$\Phi_H = k_E U_n / (4k_B k_{w1} f w_1) = 0,3 \text{ Wb}, \quad (3.34)$$

kus $k_B = 1,11$ – välja vormi koefitsient ([1], 6.7)

Ikke kõrgus

$$h_a = \frac{\Phi_n}{2l_m B_a k_c} = 0,136 \text{ m}, \quad (3.35)$$

kus $B_a = 1,5 \text{ T}$ – maksimaalne induktiooni väärtus staatori ikkes,

$k_c = 0,95$ – staatori paketi täitetegur 0,5 mm paksuse elektrotehnilise lehtterase juhul.

Lõplik staatori südamiku välisläbimõõt

$$D_a = D + 2h_p + 2h_a = 2,81 \text{ m}. \quad (3.36)$$

Rootori pooluse suurus ja pooluste vahekaugus sõltuvad mõlemad magnetvoost koormuse korral, välja magneetimisjõust ja pooluse komponentidele rakenduvatest mehaanilistest jõududest. Pooluse suuruse saab määrata pärast magnetahela ja ergutusvoolu ning asjakohaste rootori mehaaniliste arvutuste tegemist

Kõigepealt tuleb arvutada poolusekaare pikkus

$$b'_p = \alpha \tau = 0,463 \text{ m}, \quad (3.37)$$

kus $\alpha = 0,69$ – on pooluse ülekattetegur ([1], tabel 5.2).

Pooluse raadius

$$R_p = D/[2 + 8D(\delta_m - \delta)/b_p^2] = 0,765 \text{ m.} \quad (3.38)$$

Poolusesüdamiku pikkus

$$l_M = l_1 + 0,04\tau = 0,927 \text{ m.} \quad (3.39)$$

Summutusmähise samm

$$t_{z2} = t_{z1} * 0.87 = 0,0975 \text{ m.} \quad (3.40)$$

Summutusmähis parandab sünkroongeneraatori dünaamilist ja staatilist karakteristikut.

Summutusmähise varda läbimõõt (esialgne)

$$d_c = 0,3t_{z2} = 0,0292 \text{ m.} \quad (3.41)$$

Varraste arv valitakse arvestusega, et peab olema 1 cm erinevus külgmise summutusvarda ja pooluse pikenduse serva vahel:

$$n_c = 1 + (b'_p - d_c - 2b)/t_{z2} = 5,25. \quad (3.42)$$

Valime $n_c = 5$.

Hea summutusefekti saavutamiseks peab summutusmähisel olema väike aktiivtakistus. Vastavalt ([1], §6) arvutatakse järgmisena summutusmähise vaskvarda ristlõikepindala, mis selle tulemuse tagab

$$s_c = \frac{0,15\tau A}{n_c A_1} = 102,8 * 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (3.43)$$

Summutusmähise lühissegmendi ristlõikepindala on valitud umbes pool ühe pooluse summutusmähise varda ristlõikepindalast

$$s_k = 0,4s_c n_c = 282,743 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (3.61)$$

Arvestame,

et summutusmähise uurde suurused on $b_{sh2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ja $h_4 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ [1]. (3.44)

Summutusmähise varda uurde pikkus valitakse võimalikult lühike ja määratakse lõplikult tootmisjooniste etapis. Seda võib arvutada edasiste arvutuste jaoks järgmiselt

$$l_c = l_p = l_m + 0,2\tau = 1,0344 \text{ m.} \quad (3.62)$$

Poolusepikenduse kõrgus valitakse, arvestades, et kõrgem poolusepikendus põhjustab suurema maksumuse ja lühike poolusepikendus ei pruugi olla piisav, et vastu pidada koormusele ülekiirusel.

Poolusepikenduse kõrgus summutusmähise korral h_p

$$h_p = 0,054(1 + 2,5/p)\tau + d_c \approx 0,07 \text{ m.} \quad (3.45)$$

Poolusepikenduse serva arvatatud kõrgus

$$h_{pm} = \frac{(2h_p + h'_p)}{3} = 0,057 \text{ m}, \quad (3.46)$$

kus h'_p on poolusekinga otsa kõrgus $h'_p = h_p - b_p^2 / (8 \cdot R_p) = 0,03 \text{ m}$ (3.47)

Poolusesüdamiku kõrgus h_m

$$h_m = 0,48 \cdot \left(\frac{1,77}{0,15 + \sqrt{\tau}} - 1 \right) \tau = 0,265 \text{ m} \quad (3.48)$$

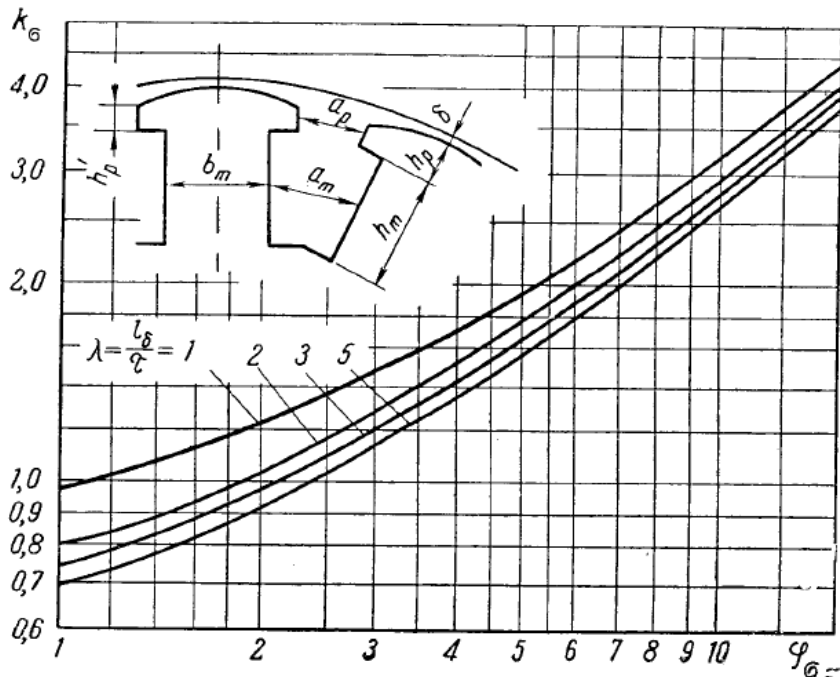
Pooluse otspindade keskmine vahekaugus

$$a_p = \frac{\pi(D - 2d_m - h'_p)}{2p} - b_p = 0,18 \text{ m}. \quad (3.49)$$

Poolusesüdamiku külgpindade keskmine vahekaugus (ligikaudu)

$$a_m = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - h_m)}{2p} - b_p + h_p \approx 0,14 \text{ m}. \quad (3.68)$$

k_σ on tegur, mis tuleb leida λ_1 ja ϕ_σ kohaselt joonise 1.5 järgi.



Joonis 1.5 Graafik k_σ määratlemiseks [1]

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1,072; \\ \phi_\sigma &= (h_m \cdot a_p) / (h_{pm} \cdot a_m) = 6,53, \\ k_\sigma &= 2. \end{aligned} \quad (3.69)$$

Pooluste puistetegur (esialgne)

$$\sigma_m = 1 + 10k_\delta \delta h_{pT} k_\sigma / (a_\delta \tau a_p) = 1,259. \quad (3.70)$$

kus

$a_\delta = 0,68,$
 $\delta/\delta_m = 1,5,$
 pilutegur

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_{\delta 3} = 0,992, \quad (3.71)$$

kus

$k_{\delta 1}$ – staatori uurde mõjutegur magnetväljale,

$$\gamma_1 = \frac{(b_{p1}/\delta)^2}{5 + b_{p1}/\delta} = 0,118; \quad (3.50)$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} = 1,021;$$

$k_{\delta 2}$ – summutusmähise uurde mõjutegur magnetväljale,

$$\gamma_2 = \frac{(b_{sh2}/\delta)^2}{5 + b_{sh2}/\delta} = 0,004; \quad (3.51)$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \delta} = 1,001;$$

$k_{\delta 3}$ – radiaalkanalite mõjutegur magnetväljale.

$$\gamma_3 = \frac{(b_b/\delta)^2}{5 + b_b/\delta} = 0,045; \quad (3.52)$$

$$k_{\delta 3} = \frac{l_1}{l_1 - 2\delta - n_b \gamma_3 \delta} = 0,971.$$

Voog poolusesüdamikute aluses nimikoormusel

$$\Phi_{tn} = (\Phi_n/k_e) \cdot [E_r + (\sigma_T - 1)F_f] = 0,289 \text{ Wb}, \quad (3.53)$$

kus $E_r = 1,07$ – vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud,

$E_f = 1,3$ – ergutuse magneetiv jõud.

Poolusesüdamiku laius

$$b_T = \Phi_{tn}/(k_{tc} l'_t B_t) = 0,228, \quad (3.54)$$

kus $k_{tc} = 0,95$ – südamiku täitetegur ja $B_m = 1,7 \text{ T}$ – induktsioon südamiku aluse juures nimikoormusel. Võtame arvesse $b_m = 0,23 \text{ m}$.

Roorivõru välisläbimõõt

$$D_{a2} = D - 2\delta - 2h_p - 2h_T \approx 1,44 \text{ m}. \quad (3.55)$$

Roorivõru pikkus (esialgne)

$$l_{a2} = l_m + \delta_i + 2b_e + \Delta = 1,11 \text{ m}, \quad (3.56)$$

kus $b_e = 0,050 \text{ m}$ – mähisetraadi laius,

$\delta_i = 0,01$ m – paigaldamise tolerants,

$\Delta = 0,07$ m – mähise ja rootori pikkuste erinevus.

Rootorivõru kõrgus (esialgne)

$$h_{a2} = 0,5(D_{a2} - D_B) = 0,672 \text{ m.} \quad (3.79)$$

Magnetahel arvutatakse tühijooksu tingimustel pärast magnetahela ja staatorimähise geomeetria väljaarvutamist.

Magnetahel tühijooksul arvutatakse, et saada magneetimiskarakteristik $\Phi_f = f(F_f)$ ja tühijooksu parameeter $E_f = f(F_f)$. Määratakse ergutusmähise magnetomootorjõud F_f mitmete Φ_f väärtuste jaoks ja vastastikune induksioon E_f .

Ideaalse konstruktsiooni korral iseloomustavad magnetvälja tavaliselt järgmised masina magnetahela arvutamise tegurid:

k_f – ergutusvälja kujutegur,

k_ϕ – ergutusvoo tegur,

α_δ – pooluste ülekatte arvutatud tegur,

k_v – emj vormi koefitsient,

k_δ – pilu tegur,

$k_{\delta m}$ – maksimaalse vahemiku tegur.

Määrame need tegurid ja arvutame magnetvälja tühijooksu korral:

$$k_{\delta m} = k_{\delta 1m} \cdot k_{\delta 2m} \cdot k_{\delta 3m} = 0,958,$$

kus (57.80)

$k_{\delta 1m}$ – vahemiku faktor, arvestades staatori uurde mõju pilu magnetilisele takistusele

$$\gamma_{1m} = \frac{(b_{p1}/\delta_m)^2}{5 + b_{p1}/\delta_m} = 0,055 \quad (58.81)$$

$$k_{\delta 1m} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_{1m}\delta} = 1,015,$$

$k_{\delta 2m}$ - vahemiku faktor, arvestades summutusmähiseuurde mõju

$$\gamma_{2m} = \frac{(b_{sh2}/\delta_m)^2}{5 + b_{sh2}/\delta_m} = 0,002, \quad (3.82)$$

$$k_{\delta 2m} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_{2m}\delta_m} = 1,001,$$

$k_{\delta 3m}$ - vahemiku faktor, arvestades radiaalkanalite mõju

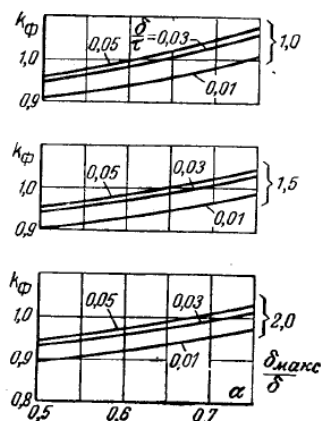
$$\gamma_{3m} = \frac{(b_b/\delta_m)^2}{5 + b_b/\delta_m} = 0,02 \quad (3.83)$$

$$k_{\delta 3m} = \frac{l_1}{l_1 - 2\delta_m - n_b \gamma_{3m} \delta_m} = 0,943.$$

Magnetvoog pilus on tühijooksu korral staatori elektromotoorjõu funktsioon

$$\Phi = \frac{k_\phi \cdot E_f}{\sqrt{2} \pi f w_1 k_{ob1}} = 0,281 \text{ Wb} \quad (3.84)$$

Määratakse esialgne k_ϕ vastavalt joonisele 7, kui $\delta/\delta_m = 1,5$



Joonis 1.6 Graafikud k_ϕ määratlemiseks [1]

Induktsioon pilus

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\tau \cdot \alpha_\delta \cdot l_1} = 0,698 \text{ Wb} \quad (3.85)$$

Magnetpinge

$$F_\delta = B_\delta \delta k_\delta / \mu_0 = 1,0584 \cdot 10^4 \text{ A} \quad (3.86)$$

Induktsioon hambasektsioonis 1/3 kõrgusel

$$B_{z1} = \frac{B_\delta \cdot l_1 \cdot t_{z1}}{k_c \cdot l_m \cdot b_{1/3}} = 0,73 \text{ T}, \quad (3.87)$$

kus $b_{1/3} = t_{1/3} - b_{p1} = 0,11 \text{ m}$ and $t_{1/3} = \pi(D + (2/3)h_p)/Z_1 = 0,10 \text{ m}$.

Staatori ikke induktsioon

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2l_m h_a k_c} = 1,2083 \text{ T}. \quad (3.88)$$

Staatori ikke magnetpinge

$$F_{a1} = \zeta L_{a1} H_{a1} = 46,02 \text{ A} \quad (3.89)$$

kus ζ – on induktsiooni ebaühtluse tegur ikkes ([1], joonis 6.17),

$$L_{a1} = \pi \frac{D_a - h_a}{4p} = 0,372 \text{ m} - \text{magnetjõujoonte hinnanguline pikkus ikkes},$$

$$H_{a1} = 271,45 \text{ A/m} \text{ valitud terase jaoks ([1], tabel П2.4).}$$

Induktsioon pooluse hambas

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{k_{mc} \cdot b_{z2}} = 0,763 \text{ T} \quad (3.90)$$

kus $b_{z2} = t_{z2} - 0,94d_c = 0,086 \text{ m}$.

Pooluse hamba magnetiline intensiivsus

$$F_{z2} = L_{z2}H_{z2} = 6,22 \text{ A} \quad (3.91)$$

kus $L_{z2} = h_4 + d_c = 0,015 \text{ m}$ – hamba kõrgus varraste vahel ja $H_{z2} = 414,93 \text{ A/m}$ ([1], tabel П2.3)

Magnetiline intensiivsus pilus pooluse ja staatori ikke vahel

$$F_1 = F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1} + F_{z2} = 1,08 * 10^4 \text{ A} \quad (3.92)$$

Küllastustegur

$$k_{za} = \frac{F_1}{F_{\delta}} = 1,007 \quad (3.93)$$

Pooluse dispersioonitegur tühijooksul

$$\sigma_m = 1 + \mu_0 l_1 \lambda_{f\phi} F_1 / \Phi = 1,186 \quad (3.94)$$

kus $\lambda_{f\phi}$ – voo magnetjuhtivus

$$\lambda_{f\phi} = \lambda_p + \lambda_{pm} + \lambda_{m\pi} = 1,0084, \quad (3.95)$$

kus

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D} = 0,0613 \text{ m},$$

$$c_p = \tau - b_p - \pi d_t / p = 0,167 \text{ m},$$

$$\lambda_p = \lambda'_p + 1,75(a_p/c_p + 0,2) - 1,27(a_p/c_p - 0,5)^2 = 2,30,$$

$$\lambda'_p = 4,44 \cdot (d_t/c_p - 0,25) = 0,49,$$

$$\lambda_{pm} = 1,75h_m/c_m = 0,888,$$

$$c_m = c'_m - b_m = 0,5243 \text{ m},$$

$$c'_m = \tau - \pi \frac{h_m + 2(h_p + \delta)}{2p} = 0,534 \text{ m},$$

$$\lambda_{m\pi} = 1,17b_m/l'_m = 0,2968.$$

Pooluse voog

$$\Phi_m = \sigma_m \Phi = 0,2895 \text{ Wb} \quad (3.96)$$

Pooluse induktsioon

$$B_m = \Phi_m / (k_{mc} l'_m b_m) = 1,483 \text{ T} \quad (3.97)$$

Poolusesüdamiku magnetiline intensiivsus

$$F_m = h_m H_m = 336,63 \text{ A} \quad (3.98)$$

kus $H_m = f(B_m) = f(1,483) = 227 \text{ A/m}$ St235 for 1,5 mm ([1], tabel П2.2)

Magnetiline intensiivsus poolusesüdamiku ja pooluse ning rootori ikke pilu vahel

$$F_2 = F_m + F_{\delta m} = 1,57 \cdot 10^4 \text{ A} \quad (3.99)$$

Summaarne magnetiline intensiivsus, mis on võrdne ergutusmähise elektromotoorjõuga tühijooksu korral

$$F_f = F_1 + F_2 = 8614,8 + 1240,76 = 1,053 \cdot 10^4 \text{ A.} \quad (3.100)$$

Mähise reaktants tingimustel

$$k_{za} = 1 \quad (3.101)$$

Välja kujutegur pikitelje sihis

$$k_d = k_f \cdot k_{ad} = 0,869, \quad (3.59)$$

kus $k_f = 1,022$ – välja kujutegur ([1], joonis 6.14);

$k_{ad} = 0,84$ – reaktsioonitegur risttelje sihis ([1], joonis 6.18).

$$\frac{\delta'_M}{\delta} = \frac{k_M + k_{z.a} - 1}{k_{z.a}} = 1,452. \quad (3.103)$$

Välja kujutegur risttelje sihis

$$k_q = k_f \cdot k_{aq} = 0,498, \quad (3.104)$$

kus $k_{aq} = 0,488$ – reaktsioonitegur risttelje sihis ([1], joonis 6.19).

Staatorimähise emj vastastikuse induktsiooni pikitelje reaktants

$$X_{ad} = \frac{4 \cdot m_1 \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot k_{w1}^2 \cdot k_d}{\pi \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot p} = 3,89 \text{ Ohm.} \quad (3.105)$$

$$\text{kus } l_1 = 0,9 \text{ m} \quad (3.106)$$

Staatorimähise emj vastastikuse induktsiooni risttelje reaktants

$$X_{aq} = \frac{4 m_1 \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_1 \cdot w_1^2 \cdot k_{w1}^2 \cdot k_q}{\pi \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot p} = 2,234 \text{ Ohm.} \quad (3.107)$$

$$\text{kus } l_1 = 0,9 \text{ m} \quad (3.108)$$

Uurdepuiste aheldusvoo juhtivustegur

$$\lambda_{\pi} = \frac{h_1}{3 \cdot b_p} + \frac{h_2}{b_p} = 1,2549 \quad (3.109)$$

Hambatippude puistevoo juhtivustegur

$$\lambda_G = \frac{0,35 \cdot \delta}{b_p} = 0,4118 \quad (3.110)$$

Mähise lühendamise sammutegur

$$\beta = \frac{2 \cdot p \cdot y}{Z_1} = 0,833 \quad (3.111)$$

Tegur, mis võtab arvesse sammu lühendamise mõju kolmeefaasilise kaksikkihtmähise uurdepuistele

$$k_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot \beta}{4} = 0,8750 \quad (3.112)$$

Uurdepuiste juhtivustegur

$$\lambda_{p\psi} = (\lambda_p + \lambda_{\tau}) \cdot k_{\beta} = 1,4583 \quad (3.113)$$

Juhtivuse moodultegur

$$k_{\lambda} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot q_1 \cdot k_{w1} \cdot k_d}{\pi \cdot k_f} = 2,53. \quad (3.114)$$

Lauppuiste juhtivustegur

$$\lambda_1 = \frac{0,15 \cdot \beta \cdot \tau}{q_1 \cdot l_1} \cdot (\lambda_{1d} + \lambda_{1q}) = 0,56 \quad (3.115)$$

Summutusmähise uurete ekvivalentarv

$$Z_2 = \frac{\pi D}{t_{z2}} \approx 69. \quad (3.116)$$

Rootori väljepooluste mõju arvestav tegur

$$k_j = \frac{2 \cdot \alpha_{\delta}}{1 + \frac{k_q}{k_d}} \approx 0,87. \quad (3.117)$$

diferentsiaalpuistetegur staatori avatud uurete ja rootori summutusmähise korral

$$\xi = 2 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \cdot k_{\beta} + k_{w1}^2 \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 = 2,17. \quad (3.118)$$

Diferentsiaalpuiste juhtivustegur

$$\lambda_{\pi} = \frac{\xi \cdot t_{z1} \cdot k_j}{12 \cdot k_{\delta} \cdot \delta} = 0,88. \quad (3.119)$$

Staatorimähise puiste juhtivustegur

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{p\psi} + \lambda_l + \lambda_d = 2,91. \quad (3.120)$$

Mähise puistereaktants

$$X_{\sigma} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_{\sigma}}{p \cdot q_1} = 0,744 \text{ Ohm}. \quad (3.121)$$

$$X_{*\sigma} = X_{\sigma} \cdot \frac{I_n}{U_n} = 0,11. \quad (3.122)$$

Ergutusmähise puistereaktants

$$X_{*f\sigma} = \frac{2 \cdot k_{ad}}{k_f} \cdot (\lambda_{fd} + \lambda_{f\psi} + \lambda_{f1}) \cdot \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\tau} \cdot X_{*ad} = 0,170 \text{hm}. \quad (3.123)$$

kus

λ_{fd} – diferentsiaalpuiste juhtivustegur ühe pooluse kohta

$$\lambda_{fd} = \frac{k_f}{2 \cdot k_{ad}} \cdot \frac{\tau}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot k_{ad} \cdot k_{\phi} - 1 \right) = 2,37; \quad (3.124)$$

$\lambda_{f\psi}$ – uurdepuiste aheldusvoo ja poolusepea puiste juhtivustegur ühe pooluse kohta

$$\lambda_{f\psi} = \lambda_p + \frac{\lambda_{m\pi}}{1,53} = 2,88; \quad (3.125)$$

$\lambda_{f\psi}$ – aheldusvoo juhtivustegur

$$\lambda_{f\psi} = \frac{\lambda_{m\pi}}{2,65} = 0,112 \quad (3.126)$$

Varda puistereaktants

$$X_{*pd} = \frac{2 \cdot k_{ad}}{k_f} \cdot (\lambda_{pd} + \lambda_{dd}) \cdot \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\tau} \cdot X_{*ad*oe} = 0,170 \text{hm}, \quad (3.127)$$

kus λ_{pd} – uurdepuiste aheldusvoo ja poolusepea puiste juhtivustegur summutusmähise ühe pooluse hammaste kohta pikitelje sihis

$$\lambda_{pd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (\lambda_{kp\psi} + \lambda_{kg}) \cdot l_p}{n_c \cdot (1 - k_{ok}) \cdot l_1} = 5,12; \quad (3.128)$$

Summutusmähise diferentsiaalpuiste juhtivustegur ühel poolusel pikitelje sihis

$$\lambda_{pd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{kd} \cdot l_p}{n_c \cdot (1 - k_{ok}) \cdot l_1} = 0,90; \quad (3.129)$$

Summutusmähise jaotustegur

$$k_{ok} = \frac{\sin\left(n_c \cdot \frac{\pi \cdot t_{z2}}{\tau}\right)}{n_c \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_{z2}}{\tau}\right)} = 0,34; \quad (3.130)$$

Summutusmähise uurdepuiste aheldusvoo juhtivustegur ühe uurde kohta

$$\lambda_{k\psi} = 0.62 + \frac{h_4}{b_{sh2}} = 1,62 \quad (3.131)$$

Summutusmähise hambatippude diferentsiaalpuiste juhtivustegur

$$\lambda_{kg} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(1 + \ln \frac{\delta}{2 \cdot b_{sh2}} \right) = 0,7019; \quad (3.132)$$

Summutusmähise diferentsiaalpuiste juhtivustegur ühe varda kohta

$$\lambda_{kd} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} = 0,409. \quad (3.133)$$

Summutusmähise (laubaosa) lühisrõngaste puistereaktants

$$X_{*ld} = \frac{2k_{ad}}{k_f} \cdot \lambda_{ld} \cdot \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\tau} \cdot X_{*ad} = 0,006 \text{ Ohm} \quad (3.134)$$

kus λ_{ld} – summutusmähise lühisrõngaste puiste aheldusvoo juhtivustegur pikitelje sihis

$$\lambda_{ld} = \frac{0,18 \cdot \tau}{(1 - k_{ok}) \cdot l_1} = 0,207. \quad (3.135)$$

Summutusmähise puistereaktants

$$X_{*k\sigma d} = X_{*pd} + X_{*ld} = 0,192. \quad (3.136)$$

Summutusmähise südamike puistereaktants

$$X_{*pq} = 0,75 \cdot X_{*pd} = 0,1322. \quad (3.137)$$

Summutusmähise lühisrõngaste puistereaktants

$$X_{*lq} = 1,5 \cdot X_{*ld} = 0,013. \quad (3.138)$$

Summutusmähise puistereaktants

$$X_{*k\sigma q} = X_{*pq} + X_{*lq} = 0,144 \quad (3.139)$$

Nulljärgnevusreaktants

$$X_{*0} = \frac{\pi^2}{k_{w1}^2 \cdot k_d} \cdot \left(\frac{\lambda_{po} + \lambda_{do} + \lambda_{lo}}{m_1 \cdot q_1} \right) \cdot \frac{\delta \cdot k_{\delta}}{\tau} \cdot X_{*ad} = 0,044 \text{ Ohm}, \quad (3.140)$$

kus λ_{po} – uurdepuiste aheldusvoo juhtivustegur nulljärgnevusvoolude korral

$$\lambda_{po} = \frac{\lambda_{p\psi} \cdot k_{\beta 0}}{k_{\beta}} = 0,833; \quad (3.141)$$

$$k_{\beta 0} = 3 \cdot \beta - 2 = 0,5; \quad (3.142)$$

λ_{do} – diferentsiaalpuiste juhtivustegur nulljärgnevusvoolude korral

$$\lambda_{do} = 0,5 \cdot \frac{\sqrt{2} k_{\beta 0} \cdot k_{p1}^2 \cdot m_1 \cdot q_1}{2\pi^2} \quad (3.143)$$

= 0,348;

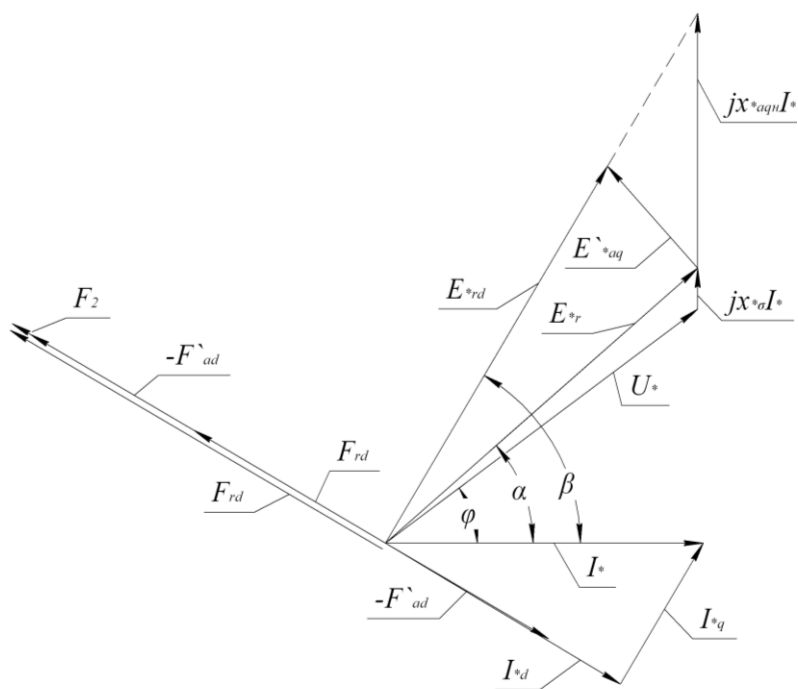
Lauppuiste juhtivustegur nulljärgnevusvoolude korral

$$\lambda_{l_0} = \frac{0,087 \cdot \beta \cdot \tau \cdot q_1}{l_1} = 0,1083. \quad (3.144)$$

Emj arvutamine vastaval §6.8 Abramovi õpikus. Arvutustulemused $U^*=1$; $l^*=0, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0$ on toodud tabelis 4.

Tabel 1.4 emj arvutustulemused

l^*	0	0.25	0.5	0.75	1
E^*_{*r}	1	1,012	1,025	1,039	1,053
ζ_d	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
ζ_q	0,985	0,986	0,986	0,986	0,986
k_{qd}	0	0	0	0	0
E^*_{rd}	1	1,01	1,017	1,022	1,027
F_{rd}, A	10854,742	10963,296	11038,751	11096,315	11147,792
Φ_{rd}, Wb	0,281	0,284	0,286	0,287	0,289
F'_{ad}, A	0	857,614	1941,947	3199,267	4585,044
F_{1f}, A	10854,742	11820,91	12980,698	14295,583	15732,835
Φ_o, Wb	0,052	0,057	0,062	0,069	0,076
Φ_m, Wb	0,333	0,341	0,348	0,356	0,364
F_2, A	2515,113	3021,171	3532,051	4238,393	5352,05
F_f, A	13369,855	14842,081	16512,749	18533,975	21084,885
F^*_{*f}	1	1,11	1,235	1,386	1,577



Joonis 7. Sünkroongeneratori vektoridiagramm [1].

Tabeli 4 arvutused olid teostatud vastavalt alltoodud valemitele:

$$E_{*rH} = \sqrt{U_*^2 + I_* \cdot X_{*\sigma} \cdot (2 \cdot U_* \cdot \sin \phi_n + I_* \cdot X_{*\sigma})} \quad (3.145)$$

Nurk I^* ja emj E^* (joonis 7):

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{U_* \cdot \sin \phi_n + I_* \cdot X_{*\sigma}}{E_{*rH}} \right) \quad (3.146)$$

Küllastustegur

$$k_{za} = \frac{F_{*1n}}{F_{*\delta n}} \quad (3.147)$$

$$\frac{\delta'_M}{\delta'} = \frac{k'_m + k_{za} - 1}{k_{za}} \quad (3.148)$$

$$k'_{qd} = \frac{k_{qd} \cdot \tau}{\delta'} \quad (3.149)$$

Staatori mähise piki risttelge peamise induktiivtakistuse küllastunud väärtus

$$X_{*aqn} = \xi_q \cdot X_{aq} \quad (3.150)$$

OQ vektori moodul

$$OQ = \sqrt{U_*^2 + I_* \cdot X_{*qn} (2U_* \cdot \sin \phi_n + I_* \cdot X_{*qn})} \quad (3.151)$$

kus $X_{*qn} = X_{*\sigma} + X_{*a_{qn}}$

Nurk OQ ja I* vahel

$$\beta = \arcsin\left(\frac{U_* \cdot \sin \phi_n + I_* \cdot X_{*qn}}{OQ}\right) \quad (3.152)$$

emj E_{*r} projektsioon d teljele

$$E_{*rdn} = E_{*rn} \cdot \cos(\beta - \alpha) \quad (3.153)$$

Vastavalt $E_{*f} = f(F_* 1)$ leiame emj $F_{*rdn} = 0.948$ ja arvutame emj absoluutühikutes:

$$F_{rdn} = F_{*rdn} \cdot F_{fx} \quad (3.154)$$

$$F'_{adn} = \xi_d \cdot k_{ad} \cdot F_{dn} + k'_{qd} \cdot |F_{qH} \quad (3.155)$$

kus

$$F_{dn} = F_{an} \cdot I_* \cdot \sin \beta \quad (3.156)$$

$$F_{qn} = F_{an} \cdot I_* \cdot \cos \beta \quad (3.157)$$

$$F_{an} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\right) \frac{m_1 \cdot I_n \cdot w_1 \cdot k_{w1}}{p} \quad (3.160)$$

Magnetpinge külnevate pooluste naastude vahel

$$F_{1fn} = F_{rdn} + F_{adn} \quad (3.161)$$

Pooluse südamiku voog

$$\Phi_{mn} = \Phi_{rdn} + \Phi_{\sigma n} \quad (3.170)$$

Ergutuse emj nimikoormusel

$$F_{fn} = F_{1fn} + F_{2n} \quad (3.171)$$

emj suhtelistes ühikutes

$$F_{*fn} = F_{fn} / F_{fx} \quad (3.172)$$

Induktsioon õhupilus nimikoormusel

$$B_{\delta H} = \frac{\Phi_{rn}}{\tau \cdot l_1 \cdot \alpha_{\delta}} = 0,72 \text{ T}, \quad (3.173)$$

kus $\Phi_{rn} = \Phi_{rdn} \frac{E_{*rn}}{E_{*rdn}} = 0,29 \text{ Wb}$.

Induktsioon staatorihammastes 1/3 kõrgusel nimikoormusel

$$B_{z1n} = \frac{B_{\delta n} \cdot l_1 \cdot t_{z1}}{k_c \cdot l_M \cdot b_{1.3}} = 1,008 \text{ T.} \quad (3.174)$$

Induktsioon summutusmähise hammastes nimikoormusel

$$B_{z2n} = \frac{B_{\delta n} \cdot t_{z2}}{k_{tc} \cdot b_{z2}} = 0,859 \text{ T.} \quad (3.175)$$

Induktsioon staatori magnetsüdamiku ikkes nimikoormusel

$$B_{a1} = \frac{\Phi_{rn}}{2l_M \cdot h_a \cdot k_c} = 1,247 \text{ T} \quad (3.176)$$

Induktsioon poolusel nimikoormusel

$$B_{mn} = \frac{\Phi_{mn}}{l_2 \cdot b_m \cdot k_{tc}} = 1,859 \text{ T.} \quad (3.177)$$

Vastavalt [1] tabelile 6.7 on see veidi suurem kui aktsepteeritav ulatus. Jätkame arvutusi väärtusega 1,9 T

Ergutusmähise poolkeeru keskmine pikkus (esialgne)

$$l_f = b_m + l_m + 0,07\tau + \pi \cdot \delta_i = 1,317 \text{ m,} \quad (3.178)$$

kus $\delta_i = 0,004 \text{ m}$ vastavalt tabelile 6.8, [1].

Voolutihedus ergutusmähises

$$\Delta_f = \frac{\alpha_f \cdot \theta_f \cdot k_k \cdot h_m}{\rho_t \cdot F_{fn}} = 3,847 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2, \quad (3.179)$$

kus α_f – soojuse Konvektsiooni tegur:

$$\alpha_f = 22 \cdot (1 + 4,4 \cdot \sqrt{\tau}) = 101,3615 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}; \quad (3.180)$$

$\theta_f = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ – ergutusmähise temperatuuri tõus,

$K_k = 0,97$ – mähise kõrguse täitetegur vasega,

$\Delta_{sh} = 0,015$ ([1], tabel 6.8);

$\rho_t = 0,0242 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ – mähise vase takistus, kui temperatuur ületab 75°C .

Traadi laius (esialgne)

$$b_f = \frac{\rho_t}{\alpha_f \cdot \theta_f} \cdot \left(\frac{F_{fn}}{k_k \cdot h_m} \right)^2 = 0,021 \text{ m} \quad (3.181)$$

Traadi kõrgus

$$a_{fmin} = \frac{b_f}{16} = 0,0013 \text{ m} \quad (3.182)$$

Traadi maksimaalne lubatud kõrgus

$$a_{fmax} = b_f/6 = 0,004 \text{ m.} \quad (3.183)$$

Traadi ristlõikepindala

$$s_f = 112 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (3.184)$$

Liigtemperatuur valitud suurustel

$$\theta_f' = \frac{\rho_t}{\alpha_f \cdot b_f} \left(\frac{F_{fn}}{k_k \cdot h_m} \right)^2 = 75^\circ \text{C.} \quad (3.185)$$

Voolutihedus valitud suurustel

$$\Delta_f = \frac{\alpha_f \cdot \theta_f' \cdot k_k \cdot h_m}{\rho_t \cdot F_{fn}} = 3,847 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}. \quad (3.186)$$

Ergutuse nimivool (esialgne)

$$I_{fn} = \Delta_f \cdot s_f = 288 \text{ A} \quad (3.187)$$

Ergutasmähise keerdude arv

$$w_f = \frac{F_{fn}}{I_{fn}} \approx 73 \quad (3.188)$$

Ergutuse nimivool

$$I_{fn} = \frac{F_{fn}}{w_f} = 288,76 \text{ A} \quad (3.189)$$

Ergutasmähise takistus temperatuuril $t=130^\circ \text{C}$

$$r_{f130} = \frac{4\rho_{130} \cdot p \cdot w_f \cdot l_f}{s_f} = 0,64 \text{ Ohm,} \quad (3.190)$$

kus $\rho_{130} = 0,0252 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm x m.}$

Ergutasmähise takistus temperatuuril $t=15^\circ \text{C}$

$$r_{f15} = \frac{r_{f130}}{1,46} = 0,64 \text{ Ohm} \quad (3.191)$$

Ergutusvool ilma koormuseta ja nimipinge korral

$$I_{fx} = \frac{F_{fx}}{w_f} = 288,76 \text{ A.} \quad (3.192)$$

Poolkeeru keskmine pikkus

$$l_{sr} = l_1 + 1,8\tau = 2,11 \text{ m} \quad (3.193)$$

Elementaarjuhtide arv uurde kõrguses

$$m_e = \frac{c_e}{n_e} \cdot u_{p1} = 24 \quad (3.194)$$

Elektromagnetvälja sissetungi sügavus vaskjuhi juhul, kui $f = 50 \text{ Hz}$ ja $t = 75 \text{ °C}$

$$h = 0,0104 \cdot \sqrt{\frac{b_p}{n_e \cdot b_1}} = 0,013 \text{ m} \quad (3.195)$$

Elementaarjuhi efektiivkõrgus

$$\xi = \frac{a_e}{n} = 0,147 \quad (3.196)$$

Staatori hamba keskmine laius

$$b_{z1/2} = \frac{\pi \cdot (D + h_p)}{Z_1} = 0,11 \text{ m} \quad (3.197)$$

Staatori südamikuhamba mass

$$G_z = g_c \cdot l_m \cdot k_c \cdot h_p \cdot b_{z1} \cdot Z_1 = 2094,4 \text{ kg} \quad (3.198)$$

kus $g_c = 7650 \text{ kg/m}^3$.

Südamiku ikke mass

$$G_a = g_c \cdot l_m \cdot k_c \cdot \pi(D_a - h_a)h_a = 3508,1 \text{ kg} \quad (3.199)$$

Staatori mähise juhtmete mass

$$G_{M1} = g_M \cdot s_1 \cdot u_{p1} \cdot l_{sr} \cdot Z_1 = 567,091 \text{ kg} \quad (3.200)$$

kus $g_M = 8900 \text{ kg/m}^3$ vase jaoks.

Ergutusmähise juhtmete mass

$$G_{mf} = g_M \cdot s_f \cdot 4p \cdot l_f \cdot w_f = 1280 \text{ kg} \quad (3.201)$$

Summutusmähise südamike mass

$$G_c = g_M \cdot s_c \cdot 2p \cdot l_c \cdot n_c = 168,363 \text{ kg} \quad (3.202)$$

Summutusmähise rõngaste mass

$$G_k = 2g_M \cdot s_k \cdot \pi(D - 2\delta - h_k) = 32,01 \text{ kg} \quad (3.203)$$

Pooluste terase mass

$$G_m = g_c \cdot 2\pi \cdot l'_m \cdot k_{s2}(b_m \cdot h_m + 0,8h_p \cdot b_p) = 3637 \text{ kg} \quad (3.204)$$

Rootorivõru mass

$$G_o = \frac{\pi \cdot g_c}{4} 2l_{a2}(D_{a2}^2 + D'_{a2}{}^2)k_o = 12385 \text{ kg}, \quad (3.205)$$

kus $k_o=0,9$.

Rootori mass

$$G_p = 1.35(G_o + G_m + G_{mf} + G_c + G_k) = 23472 \text{ kg.} \quad (3.206)$$

Tugilaagrile mõjuv koormus

$$N_{II} = k_p \cdot G_p \cdot g = 8,634 \cdot 10^5 \text{ N.} \quad (3.207)$$

Magnetkaod staatori südamikus

$$P_m = k_{da} p_a G_{aa} + k_{dz} p_z G_z = 35152 \text{ W} \quad (3.208)$$

kus $k_{da} = 1,3$ и $k_{dz} = 1,7$ on empiirilised kaod;

$p_{1/50} = 1,5 \text{ W/kg}$ on kaod terases;

$p_a = p_{1/50} \cdot B_{a1}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 3,375 \text{ W/kg}$ on kaod ankrus;

$p_z = p_{1/50} \cdot B_{z1}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 1,524 \text{ W/kg}$ on kaod hambades.

Lisakaod pooluste tippude pinnasel tühijooksul

$$P_{po} = 2p \cdot a \cdot \tau \cdot l_1 \cdot k_d \cdot (Z_1 \cdot \Omega)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_{z1})^2 = 593 \text{ W,} \quad (3.209)$$

kus $B_0 = B_\delta(k_{\delta 1} - 1) = 0,015 \text{ T}$

$\Omega = 2\pi n_n = 52.36 \text{ rad/sek.}$

Kaod terases tühijooksul

$$P_{MO} = P_M + P_{po} = 35745 \text{ W.} \quad (3.210)$$

Elektrikaod staatori mähises temperatuuril $t=75^\circ\text{C}$

$$P_e = 3(r_a/k_r)I_n^2 = 44410 \text{ W} \quad (3.211)$$

Staatorimähise lisakaod

$$P_{ed} = (k_r - 1)P_e = 514 \text{ W} \quad (3.212)$$

Täiendavad kaod staatori hammastes

$$P_{kz} = 10,7p_{1/50}B_z^{5/4}G_z = 2196 \text{ W,} \quad (3.213)$$

kus $B_1 = 0,32$ и $B_2 = 2,2$ ([1], joonis 6.29);

$A_{3m} = B_2B_1 - 0,7 = 0,004$;

$A_1 = 0,42$ и $A_2 = 0,24$ ([1], joonis 6.30);

$A_{3d} = A_1A_2 = 0,101$;

$B_3 = B_{z1}(A_{3m}x_{*d} + 1,27A_{3d}x_{*ad}) = 0,1127\text{T.}$

Lisakaod pooluste tippude pinnasel lühisel

$$P_{pk} = 0,2 \left(\frac{2pX_{*ad}}{Z_1(k_{d1} - 1)} \right)^2 P_{po} = 2953 \text{ W} \quad (3.214)$$

$$P'_{pk} = (2,1\sqrt[3]{q_1}) \left(\frac{k' \cdot X_{ad}}{k_{d1} - 1} \right)^2 P_{po} = 3228,7 \text{ W}, \quad (3.215)$$

kus $k' = 0,055$ ([1], lk. 235)

Lisakaode summa

$$P_{kd} = P_{ed} + P_{kz} + P_{pk} + P'_{pk} = 8893,4 \text{ W} \quad (3.216)$$

Kaod kokku nimivoolul

$$P_{kn} = P_e + P_{kd} = 53303 \text{ W} \quad (3.217)$$

Ergutuse kaod

$$P_f = \frac{r_f I_{fn}^2}{\eta_f} = 19306 \text{ W}, \quad (3.218)$$

kus $\eta_f = 0,92$.

Ventilatsiooni kaod

$$P_v = k_v Q = 22750 \text{ W} \quad (3.219)$$

kus $k_v = k_Q g_0 v^2 = 1,4 \cdot 1,22 \cdot 54,98 = 6279,17$;

$k_Q = 1,4$;

$g_0 = 1,22 \text{ kg/m}^3$ gaasi jaoks;

$v = 2f\tau = 67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Q – gaasi kulu

$$Q = (P_f \eta_f + P_{po} + P_k + P'_{pk} + P_e + P_{ed} + P_m + P_{kz}) / (c_v \theta_r - k_v) = 2,94 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.220)$$

Laagrite hõõrdekaod

$$P_n = k_N \sqrt{N_p^3 \Omega^3} = 68226 \text{ W}, \quad (3.221)$$

kus $k_N = 1,45 \cdot 10^{-7}$

Mehaanilise kaod kokku

$$P_T \approx P_v + 0,5P_n \approx 56863 \text{ W} \quad (3.222)$$

Kaod nimikoormusel kokku

$$\Sigma P = P_{mo} + P_{kn} + P_f + P_T \approx 165220 \text{ W}. \quad (3.223)$$

Kasutegur nimikoormusel

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{S_n \cdot \cos \varphi_n + \Sigma P} = 0,9665. \quad (3.224)$$

On tehtud sünkroongeneraatori konstruktsiooni arvutused. Materjalide hinda ja tarnimisvõimalusi teades ning täiustatud arvutusmeetodeid rakendades on arendustöö algfaasis võimalik maksumust täpsemalt hinnata. Kaasaegse arvutusmeetodid võimaldavad arendajal arvesse võtta pea kõiki tingimusi juba projekti varases arendusfaasis.

Eeldame, et arvatud sünkroongeneraator on realistlik variant.

OPTIMEERIMINE

Iga optimeerimisülesande eesmärk on leida parim võimalik lahendus kõikide teostatavate lahenduste hulgast.

Optimeerimisel on vaja teada algset konstruktsiooniarvutust ja selliseid konstruktsioonilisi muutväärtusi, nagu staatori diameeter, uurde laius, uurde/hammaste suhe, staatori koormusvool, staatori pinnakoormus, elektrotehnilise terase tehnilised andmed, vootihedused, nimivõimsus, võimsustegur jne. Valitud muutujate jaoks on vaja ette anda miinimum- ja maksimumväärtused, üks või mitu optimeerimisfunktsiooni ning määrata piirangud (temperatuuripiirangud, mõned parameetrid võivad olla ainult täisarvud või jagatavad kindla arvuga jms). [5]

Optimaalse konstruktsiooni leidmiseks tuleb valida matemaatiline meetod, arvestades sihifunktsiooni, kehtestatud piiranguid ning muutujate ülemisi ja alumisi piire. [5]

Optimeerimismeetodeid on palju. Mõnes projekteerimistarkvaras on kasutusel Monte Carlo optimeerimismeetod. Kadude ja tootmiskulude vähendamiseks rakendatakse teatud sünkroongeneraatori osade (nt rootori poolused) optimeerimiseks evolutsioonistrateegiaid ja geneetilisi algoritme.

Geneetiline algoritm on üks otsingupõhine optimeerimismeetod. MATLAB-i globaalne optimeerimise tööriistakast pakub geneetiliste algoritmide valikut. Kasutaja peab ette andma sihifunktsiooni piirangutega, ülesande ulatuse ja sõltumatute muutujate piirid.

Esimene samm MATLABis optimeerimisülesande püstitamisel on sihifunktsiooni koostamine.

Siin kirjeldatud juhul võib sihifunktsiooniks olla generaatori komponentide materjali maksumuse ja kadude maksumuse minimeerimine.

Materjali maksumuse leidmisel kasutame rootori, staatori ja mähiste massi. Kadude maksumus varieerub suures ulatuses ja oleneb generaatori suurusest 1 kWh sama hinna korral.

Objektiivne funktsioon oleks

$$\text{costs} = \text{weight_steel} * \text{price_steel} + \text{losses} * \text{kWh_price} + \text{weight_copper} * \text{price_copper}.$$

Töös arvestame sellega, et $\text{price_copper} = 4.9$ EUR/kg, $\text{price_steel} = 0.4$ EUR/kg and $\text{kWh_price} = 0.03$ EUR/kWh.

Sõltumatute muutujate piirid defineeritakse ülemise ja alumise piirina pöörlemissageduste 300 p/min ja 100 p/min jaoks. MATLAB-i pakutud vaikumisväärtusi kasutatakse muude optimeerimisparameetrite jaoks.

Sümkroonmasina peamised parameetrid on staatori magnetsüdamiku siseläbimõõt ja pikkus. Need parameetrid olenevad arvutuslikust võimsusest ja pöörlemissagedusest. MATLAB GA korral on sihifunktsiooni miinimumi saavutamiseks kasutusel suurem pöörlemissagedus.

Tabel 1.5 MATLABi algandmed.

1	Naiivvõimsus	5300	KVA
2	Nominaalpinge	6	kV
3	Võimsustegur	0,9	
4	Sagedus	50	Hz
5	Faaside arv	3	
6	Nimipöörlemissagedus	600	rpm
7	Ülejooksu pöörlemissagedus	1100	rpm

Tabel 1.6 MATLABi main.m skripti arvutustulemused.

1	Naiivvõimsus	5300	KVA
2	Nominaalpinge	3464,1	kV
3	Võimsustegur	0.9	
4	Sagedus	50	Hz
5	Faaside arv	3	
6	Nimipöörlemissagedus	600	rpm
7	Ülejooksu pöörlemissagedus	1100	rpm
8	Kasutegur nimikoormuse korral	0,96652	
9	Täiskaod nimikoormuse korral	165216	W
10	Vase kaal	1364,64	kg
11	Terase kaal	22796,1	kg
12	Kulud	15810	EUR

Masinate kaalu vähendamiseks tuleb optimeerida uurete arv, staatori läbimõõt ja pikkus.

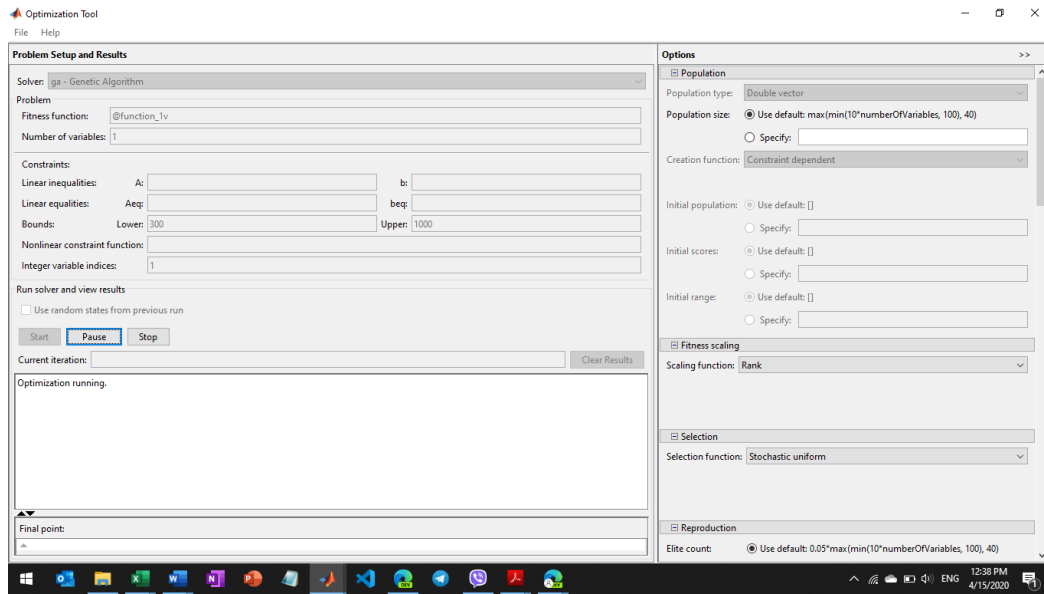
Sama võimsuse, võimsusteguri jms korral kontrollime, kas oleks võimalik ühe parameetri abil mõne materjali kulusid optimeerida.

MATLABis GA-ga optimeerimiseks muudame nimipöörlemissageduse vahemikus 300–1000.

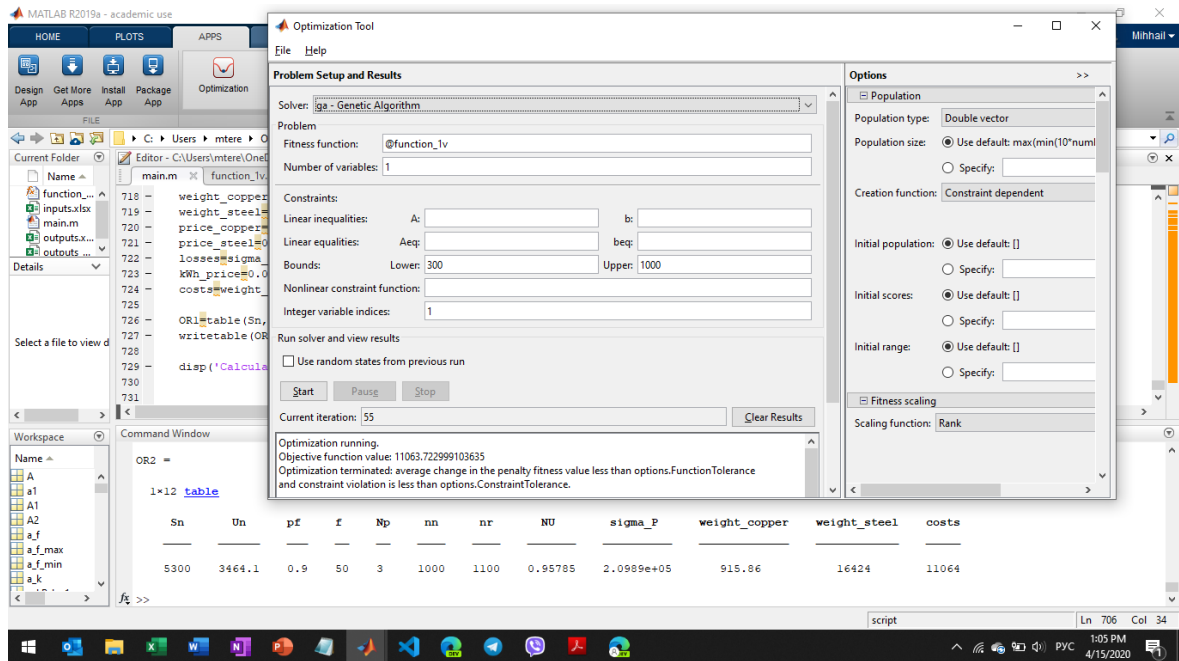
Samuti piirame selle väärtust ainult täisarvudega.

MATLABi skripti main.m kasutati funktsioonis_v1.m väiksemate muudatustega.

Joonis 1.8 MATLAB GA algoritmi ekraanipilt.



Joonis 1.9 MATLAB GA algoritmi ekraanipilt pärast 55 iteratsiooni



Tabel 1.7 MATLABi GA optimeerimise tulemused.

1	Naiivvõimsus	5300	KVA
2	Nominaalpinge	3464,1	kV
3	Võimsustegur	0,9	
4	Sagedus	50	Hz
5	Faaside arv	3	
6	Nimipöörlemisagedus	1000	rpm
7	Ülejooksu pöörlemisagedus	1100	rpm
8	Kasutegur nimikoormuse korral	0,95785	
9	Täiskaod nimikoormuse korral	209890	W
10	Vase kaal	915	kg
11	Terase kaal	16424	kg
12	Kulud	11064	EUR

Sünkroongeneraatori põhimõtted on siseläbimõõt ja staatori magnetsüdamiku pikkus. Need parameetrid olenevad arvutuslikust võimsusest ja pöörlemisagedusest. MATLABi GA tõstab nimipöörlemisageduse sihtfunktsiooni miinimumi saavutamiseks.

KOKKUVÕTE

HEJ projekteerimise algetapil peab arendaja väikeste HEJ-de võimalike konstruktsioonilahenduste leidmisel kindlaks määrama lõpliku arvu elemente.

Määrata tuleb vähemalt HEJ tüüp, paisu tüüp ja geomeetria, derivatsioonisüsteemi tüüp ja geomeetria, veesamba kõrgus, turbiini ja generaatori tüüp ning nende võimsus.

Valitud asukohas jõe vooluhulga kestuskõvera ja projekti muutujate alusel saab koostada HEJ tööomaduste, investeringu-, käitus- ja hoolduskulude ning majandusliku tasuvuse arvmudeli.

Osa parameetreid arvutamisel valib projekteerija. Need parameetrid mõjutavad ka materjalide kulusid ja generaatori põhinäitajad. Need muudatused on väheolulised, kuid vaatamata sellele need võivad olla positiivse investeerimisotsuse tegemisel otsustava tähtsusega.

Tehti arvutused 5300 kVA sünkroonmasina jaoks. Need arvutused on piiratud valemitega, mis on esitatud hüdrogeneraatorite ja sünkroonkompensaatorite projekteerimise õpikus kõrgkoolidele: Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов».

Töömahu vähendamiseks ei tehtud arvutusi täies ulatuses, sest eesmärk oli aru saada, kas seda meetodikat on võimalik kasutada ja millised on optimeerimise võimalused MATLAB-i rakenduste abil. Generaatori potentsiaalse maksumuse leidmisel kasutati optimeerimist üksiku kriteeriumi põhjal.

Töös esitatud meetodikat võiks kasutada HEJ konstruktsioonilahenduse optimeerimise tööriista osana. MATLABis on koostanud optimeerimise tööriista, mis võimaldab geneetilise algoritmi abil optimeerimist, kui on ette antud sihifunktsioon. Arvutustarkvara ja sihifunktsiooni saab edaspidi kohandada mitme kriteeriumi alusel optimeerimiseks. Tulemus näitab, et optimeerimine toimus eelduste kohaselt. Paremaid tulemusi võib saada multikriteeriaalse optimeerimisega.

MATLAB-i võib käsitada tööriistadena, kuna sellel on juba optimeerimise algoritmid, kui neile on lisatud muutujate võrrand ja piirid. Tarkvara täpne valik sõltub arendaja asjaoludest (valmisolek litsentside eest maksta jne).

Lõpuks saab välja töötada HEJ arendaja tööriista kapitalikulude hindamiseks nii peamise elektromehaanilise seadmestiku kui ka üldise konstruktsioonilahenduse jaoks, mis 1) aitab kaasa optimeerimisele arenduse algetapis ning 2) maksumuse vähendamisele läbirääkimistel elektromehaanilise seadmestiku tarnijaga, sest osapooltel on sarnasem ettekujutus tegelikest tingimustest.

SUMMARY

At the initial stage of HPP development developer must specify some finite number of elements as basis for possible HPP schemes. HPP scheme itself, dam type and geometry, derivation system type and its geometry, head, type of turbine and generator and their capacity are to be determined at least.

Based on flow duration curve of the river in chosen location and above-mentioned variables there might be created numerical model to simulate performance of HPP.

Knowing load-dependent losses and future price of materials for given periods it would be possible to optimize design solution vs costs i.e. give opportunities to improve payback time on initial stage as well.

It's appeared within calculation in main part that some of parameters are really subject to be chosen by user i.e designer. Those ones also influence outcomes and costs of materials. These changes are minor, but might be considered with and under certain circumstances might be of crucial importance for positive investment decision taking.

Being done once those calculation might be automated with MATLAB, Python, etc.

There were performed calculations for synchronous machine 5300 kVA in assignment.

Amount of calculations was limited to series of equations provided in Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов». Calculations were performed in volume that would allow to understand if this methodology might be used for further development and also to understand possibilities of optimization with MATLAB built-in apps.

Methodology described in Абрамов, А.И. «Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов» can be used as part of tool for optimization of HPP scheme.

MATLAB has built in optimization tool that allow to perform optimization with genetic algorithm when provided objective function. Result has shown that optimization was performed as expected. Better results may be achieved then power factor will be included as variable for example. Calculation script itself and objective function might be adjusted in further to perform multicriteria optimization.

MATLAB can be considered as tools as it has already optimization algorithms when provided with equation and limit boundaries for variables. Exact choice of software would be dependent on developer circumstances (willingness to pay for licenses, etc.)

Finally developer tool for estimation of capital expenditures not only for main E&M equipment, but overall scheme might be developed which will 1) assist to project development at initial phase for scheme optimization and 2)also assist in cost reduction during negotiations with potential E&M suppliers as information asymmetry will be less between parties.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Абрамов, А.И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов: учебное пособие для вузов / А.И. Абрамов, А.В. Иванов-Смоленский. – 2-е издание, переработанное и дополненное – М.: Высш. шк., 2001. – 389 стр.
- [2] <http://documents.worldbank.org/curated/en/917841468188335073/pdf/99392-WP-Box393199B-PUBLIC-Hydropower-Report.pdf> (Visited 22.04.2019)
- [3] <https://www.pumpfundamentals.com/turbine%20selection%20chart.htm> (Visited 22.04.2019)
- [4] Source: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-typical-run-of-river-hydropower-system-4_fig6_258404306 (Visited 17.04.2020)
- [5] The Electric Generators Handbook, Volume 1, Synchronous Generator, Boldea, I., 2006

LISA 1. HÜDROELEKTRIAAMA VÕIMSUSE ARVUTUS

Hüdroturbiin muundab vee rõhu potentsiaalse energia generaatoriga ühendatud turbiini võlli kineetiliseks energiaks.

HEJ paigaldatud võimsus sõltub veesamba kõrgusest ja vooluhulgast.

Kui veesamba netokõrgus on 212 m ja vooluhulk 5 m³/s, siis lihtsustatud valemi järgi võimalik paigaldatud võimsus on:

$$P = \frac{\eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{10^6} \approx 9.4 \text{ MW, kus}$$

P – paigaldatud võimsus,

η – HEJ üldine kasutegur ($\eta = \eta_{\text{turbiin}} \cdot \eta_{\text{generaator}} = 0.95 \cdot 0.95 = 0.9$),

ρ – vee tihedus (1000 kg/m³),

g – raskuskiirendus (9,81 m/s²),

Q – mahtvooluhulk läbi turbiini (m³/s),

H – veesamba netokõrgus (m).

LISA 2. MATLABI SKRIPT MAIN.M

```
clear all
```

```
%initial data
```

```
disp('Reading inputs...')
```

```
[num]=xlsread('inputs.xlsx', 1, 'D3:D12'); %reads inputs from cells of inputs.xls
```

```
Sn=num(1);
```

```
Unl=num(2);
```

```
pf=num(3);
```

```
f=num(4);
```

```
Np=num(5);
```

```
nn=num(6);
```

```
nr=num(7);
```

```
xd1=num(8);
```

```
xd2=num(9);
```

```
xd3=num(10);
```

```
disp(' ');
```

```
disp('Initial parameters:'); %Shows read values
```

```
disp(' ');
```

```
disp(['Sn = ', num2str(Sn), ' KVA']);
```

```
disp(['Unl = ', num2str(Unl), ' kV']);
```

```
disp(['power factor = ', num2str(pf),]);
```

```
disp(['f = ', num2str(f), ' Hz']);
```

```
disp(['Number of phases = ', num2str(Np),]);
```

```
disp(['Nominal speed = ', num2str(nn), ' rpm']);
```

```
disp(['Runaway speep = ', num2str(nr), ' rpm']);
```

```
disp(['Inductive resistance along the longitudinal axis = ', num2str(xd1)]);
```

```
disp(['Inductive resistance along the longitudinal axis = ', num2str(xd2)]);
```

```
disp(['Stator winding armature leakage reactance (preliminary): = ', num2str(xd3)]);
```

```
% Active power
```

```

Pn=Sn*pf
% Under nominal load generator has following parameters
Un=Unl*1000/sqrt(3) %nominal phase voltage (star connection)
In=round(Sn*1000/(3*Un)) %nominal phase current
p=(60*f)/nn %N of pole pairs
kE=sqrt(1+xd3*(2*0.6+xd3))
Ern=kE*Un %emf of mutual induction at nominal load


```


```
(preliminary)

% disp(['Pn = ',num2str(Pn),' kW']);
% disp(['Un = ',num2str(Un),' V']);
% disp(['In = ',num2str(In),' a']);
% disp(['p = ',num2str(p),'']);
% disp(['Ern = ',num2str(Ern),' V']);

%Main parameters of synchronous machine depend from calculated power of S? and rotational
speed

Sp=kE*Sn %calculated power
pperp=Sn/(2*p) %[Abramov, table 5.1] with indirect air
cooling
tau=0.4
Ad=540e+02 %ampere density [Abramov, table 5.2]
Btn=0.75 %induction in gap at rated load [Abramov,
table 5.2]
a_kB_kw1=0.744 %induction in gap at rated load
[Abramov, table 5.2]
Ca=2/(3.14*a_kB_kw1*Ad*Btn) %C constant (preliminary)

% disp(['Sp = ',num2str(Sp),' VA']);
% disp(['tau = ',num2str(tau),' kVA']);
% disp(['Ad = ',num2str(Ad),' A/m']);
% disp(['Ca = ',num2str(Ca),' m3/J']);
% disp(['Btn = ',num2str(Btn),' T']);

```


```


```



```
%Rotor moment of inertia
```

```
Tj=2.65*((Sn*10^(-3))^(1/4))
```

```
Omega_n=2*3.14*nn/60
```

```
Jp=Tj*Sn*10^3/(Omega_n^2)
```

```
% disp(['Omega_n = ',num2str(Omega_n),'rad/s']);
```

```
% disp(['Jp = ',num2str(Jp),'kg/m2']);
```

```
%Minimal internal diameter of stator core
```

```
phi_j=0.75 %where  $\phi_j=0,75$  is coefficient depending from rotor design and  
number of s (under  $\phi_j < 12$  and when the rim of the rotor is mounted directly on the shaft
```

```
Dmin=0.035*((Jp*Omega_n/((phi_j*kE*Sn*1000*Ca)))^(1/2))
```

```
v_max=170
```

```
n_ug=18.333
```

```
Dmax=v_max/(3.14*n_ug)
```

```
% disp(['Dmin = ',num2str(Dmin),'m']);
```

```
% disp(['Dmax = ',num2str(Dmax),'m']);
```

```
%Optimal internal diameter of stator core
```

```
lambda_j=2.6
```

```
Dopt=((4*f*Ca*Sn*1000*kE)/(lambda_j*(Omega_n)^2))^(1/3)
```

```
% disp(['Dopt = ',num2str(Dopt),'m']);
```

```
if Dopt>Dmax
```

```
    D=Dmax;
```

```
elseif Dopt<Dmin
```

```
    D=Dmin;
```

```
else
```

```
    D=Dopt
```

```
end
```

```

disp(['D = ',num2str(D),'m']);

tau=3.14*D/(2*p) % at chosen D

%disp(['tau = ',num2str(tau),'m']);

%Runaway speed

v Ug=3.14*D*n Ug

if v Ug<125
    disp(['v Ug= ',num2str(v Ug),'m/s is not higher that acceptable value']);
else
    disp('Runaway speed is higher that acceptable value')
end

%length of magnetic stator core

ll=(Ca*Sn*kE*10^3)/(Omega_n*D^2)

criteria1=ll/tau
if (1.1<criteria1) && (criteria1<4)
    disp('Length ratio of magnetic core stator is in acceptable interval')
else
    disp('Length ratio of magnetic core stator is not in acceptable interval. Let us consider ')
    ll=round(1.3*tau,1)
end

w1=(kE*Un)/(4*a_kB_kw1*Btn*f*tau*ll) %Number of sequential phase coils
(preliminary)
un1=12 %Number of effective conductors in slot

%Maximum and minimum recommended currents [Abramov, table 6.1]
Inmin=2200

```

```
Inmax=3200
```

```
%Maximum and minimum number of parallels
```

```
amax= (un1*In)/Inmin
```

```
amin = (un1*In)/Inmax
```

```
a1=2
```

```
Ip=In*un1/a1 %Stator slot current
```

```
%disp(['amax= ',num2str(amax),'A']);
```

```
%disp(['amin= ',num2str(amin),'A']);
```

```
q1=round((a1*w1)/(un1*p)) %Number of slots for and phase
```

```
Z1=6*p*q1 % number of slots in stator
```

```
w1=(q1*un1*p)/a1 % maximum number of parallels
```

```
% step of winding
```

```
tau_n=Z1/(2*p)
```

```
y=round(0.83*tau_n)
```

```
%stator winding coefficient
```

```
ky1=sin((3.14*y)/(2*tau_n))
```

```
kp1=sin(3.14/6)/(q1*sin((3.14/(6*q1))))
```

```
k_ob_1=ky1*kp1
```

```
B_sigma_n=(kE*Un)/(4*a_kB_kw1*f*tau*Il*w1) %induction under nominal voltage
```

```
A=(6*w1*In)/(3.14*D) %linear load
```

```
%disp(['B_sigma_n= ',num2str(B_sigma_n),'T']);
```

```
%disp(['A= ',num2str(A),'A/m']);
```

```

%Stator slot

t_z1=(3.14*D)/Z1 %tooth
Bz1=1.88
bz1=(1.32*t_z1*B_sigma_n)/Bz1 %tooth width in the most narrow section
bn1=t_z1-bz1 % width of slot

%disp(['bz1= ',num2str(bz1),'m']);
%disp(['bn1= ',num2str(bn1),'m']);

%Current density (preliminary)
delta1A=1400*10^8
delta1=delta1A/A %

%disp([' delta1= ',num2str( delta1),'A/m2']);

%Cross-section of effective conductor of stator winding
s1=ln/(a1*delta1)
%disp(['s1 = ',num2str(s1),'m2']);

%Hight of effective conductor of stator winding
ae1=2.35*10^(-3)
%The total width of insulated conductors across the width of the stator slot
gamma_u=(5.5*10^(-3))/2 %[Abramov, table 6.6]
delta_b=0.5*10^(-3) %assembly tolerance

b0=bn1-2*gamma_u-delta_b
delta_u=0.28*10^(-3) %conductor insulation width for both side of wire [Abramov, table ?1.3]
ne=2 %number of conductors
be1=b0/ne-delta_u

be1=5*10^(-3)
se=11.9*10^(-6)

%Slot width finally

```

```

bn1=2*be1+2*delta_u+2*gamma_u+delta_b

%disp(['bn1 = ',num2str(bn1),'m']);

%number of conductor in rod

ce=round(s1/se)

%cross-section of effective conductor of stator winding

s1=ce*se

%current density in stator winding

delta1=ln/(a1*s1)

%disp(['delta1 = ',num2str(delta1),'A/m2']);

%width and height of elementary conductor with insulation

a_u1=ae1+delta_u
b_u1=be1+delta_u

%overall height of insulated elementary conductors of one rod

h0=a_u1*(ce/2+1)

%height of slot/teeth of stator
h_kl=0.006
sigma_h=19.2*10^(-3)
h4=0.001
h_n=2*h0+sigma_h+h_kl+h4+0.005

%the choice of the gap between the stator and the rotor
B_sigma=B_sigma_n/kE %maximum induction in the gap at idle and nominal voltage

```

```
x_beta=(0.6+0.8*1.3)*(A/B_sigma)*((h_n/(bn1*q1))+tau/1.3)*10^(-6) %Inductive resistance to scattering (approximately in relative units)
```

```
%assign new value to x_beta
```

```
x_beta=0.246
```

```
%the minimum gap between the stator and the rotor which provides the specified value of xd  
gamma=0.02
```

```
%maximum clearance under the edge of the
```

```
gamma_m=gamma*1.5
```

```
%dimensions of stator magnetic core
```

```
b_p_1=0.01
```

```
l1_ap=0.05
```

```
n_b =round((l1-l1_ap)/(b_p_1+l1_ap))
```

```
%length of stator core
```

```
l_ap_1=(l1-n_b*b_p_1)/(n_b+1)
```

```
%overall length
```

```
l_m=l_ap_1*(n_b+1)
```

```
%the height of yoke
```

```
%magnetic flux at rated load
```

```
k_b=1.11
```

```
PHI_n=(kE*Un)/(4*k_b*k_ob_1*f*w1)
```

```
%height of yoke
```

```
k_c=0.95
```

```
B_a=1.5
```

```
h_a=PHI_n/(2*l_m*B_a*k_c)
```

```
%outside diameter of stator core
```

```
D_a=D+2*h_n+2*h_a
```

```
%rotor magnetic circuit and damper winding size
```

```
% arc
```

```
alpha=0.69
```

```

b_ap_p=alpha*tau
% radius
R_p=D/(2+8*D*(gamma_m-gamma)/(b_ap_p)^2)
% core length
l_m=round(l+0.04*tau,1)
%step of damper winding
t_z2=t_z1*0.87
%diameter of damper winding bar (preliminary)
d_c=0.3*t_z2
%number of bars
b=0.01
n_c=round(1+(b_ap_p-d_c-2*b)/t_z2)
%required cross-section of copper bar for damper winding
s_c=0.15*tau*A/(n_c*delta1)
%assign values
d_c=0.012
s_c=1.13e-04
n_c=5
%cross-section of damper winding short-circuiting segment
s_k=0.5*s_c*n_c
%short-circuiting ring size
h_k=s_k/(0.7*d_c)
%Let's consider as damper winding slot size
b_sh_2=0.003
h4=0.003
%length of damper winding bar
l_p=l_m+0.2*tau
% shoe height
h_p=0.054*(1+2.5/p)*tau+d_c
% core height
h_m=0.48*(1.77/(0.15+(tau)^(1/2))-1)*tau
% core width
%calculated shoe height
h_ap_p=round(h_p-(b_ap_p^2)/(8*R_p),2)
%?alculated shoe height

```

$h_{pm}=(2*h_p+h_{ap_p})/3$
 $a_p=3.14*(D-2*\gamma-h_{ap_p})/(2*p)-b_{ap_p}$
 %average face-to-face distance side surfaces of core (approximately)
 $a_m=\text{round}(3.14*(D-2*\gamma-2*h_p-h_m)/(2*p)-b_{ap_p}+h_p,2)$
 $\lambda_1=1.072$
 $\phi_\sigma=\text{round}((h_m*a_p)/(h_{pm}*a_m),2)$
 %s scattering coefficient (preliminary)
 $k_\sigma=0.992$
 $\alpha_\sigma=0.68$
 $\sigma_t=1+(10*k_\sigma*\gamma*h_{pm}^2)/(\alpha_\sigma*\tau*a_p)$
 %flux in core base under nominal load (preliminary)
 $E_r=1.07$ %emf of mutual induction
 $F_f=1.3$ %magnetizing force of excitation
 $\Phi_{tn}=\Phi_n/kE*(E_r+(\sigma_t-1)*F_f)$
 %width of core
 $k_{tc}=0.95$ %core stacking coefficient
 $B_t=1.9$ %induction at core base under nominal load.
 $b_t=\text{round}(\Phi_{tn}/(k_{tc}*l_m*B_t),2)$
 %outer diameter of rotor rim
 $D_{a2}=\text{round}(D-2*\gamma-2*h_p-2*h_m,2)$
 %length of rotor rim (preliminary)
 $b_e=0.05$ %width of winding wire
 $\gamma_{u_1}=0.04$ %assembly allowance
 $\delta=0.07$ %difference in between length of coil or rotor
 $l_{a2}=l_m+\gamma_{u_1}+2*b_e+\delta$
 %hight of rim (preliminary)
 $h_{a2}=\tau$

 $b_{n1}=0.017$
 $t_{z1}=0.112$
 $b_{sh2}=0.003$
 $b_v=0.01$
 $y_{1m}=(b_{n1}/\gamma_m)^2/(5+b_{n1}/\gamma_m)$
 $k_{\gamma_1m}=t_{z1}/(t_{z1}-y_{1m}*\gamma_m)$
 $y_{2m}=(b_{sh2}/\gamma_m)^2/(5+b_{sh2}/\gamma_m)$

$k_{\gamma 2m} = t_{z2} / (t_{z2} - y_{2m} \cdot \gamma_m)$
 $y_{3m} = (b_v / \gamma_m)^2 / (5 + b_v / \gamma_m)$
 $k_{\gamma 3m} = l / (l + 2 \cdot \gamma_m - n_b \cdot y_{3m} \cdot \gamma_m)$
 $k_{\sigma m} = k_{\gamma 1m} \cdot k_{\gamma 2m} \cdot k_{\gamma 3m}$

%Induction in section of a tooth on 1/3 heights

$t_{one_third} = 3.14 \cdot (D + 2 \cdot h_p / 3) / Z_1$
 $b_{one_third} = t_{one_third} - b_{p1}$
 $B_{z1} = (B_{\sigma} \cdot l \cdot t_{z1}) / (k_c \cdot l_m \cdot b_{one_third})$

%emf of mutual induction under $E_f = U_n$

$E_f = U_n$

%Magnetic flux in gap

$k_{\phi} = 1.03$
 $\Phi = (k_{\phi} \cdot E_f) / (2^{1/2} \cdot 3.14 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{ob1})$

%induction in gap

$B_{\gamma} = \Phi / (\tau \cdot \alpha_{\sigma} \cdot l)$

%magnetic stress in gap

$\nu_0 = 4 \cdot 3.14 \cdot 10^{-7}$
 $F_{\gamma} = B_{\gamma} \cdot \sigma_h \cdot k_{\sigma} / \nu_0$

%stator yoke induction

$B_{a1i} = \Phi / (2 \cdot l_m \cdot h_a \cdot k_c)$

%stator yoke magnetic voltage

$L_{a1} = 3.14 \cdot (D_a - h_a) / (4 \cdot p)$
 $H_{a1} = 271.45$
 $F_{a1i} = 0.455 \cdot L_{a1} \cdot H_{a1}$

%induction in the teeth of the

$b_{z2} = t_{z2} - 0.94 \cdot d_c$
 $B_{z2} = B_{\sigma} \cdot t_{z2} / (k_{tc} \cdot b_{z2})$

%magnetic voltage teeth

$L_{z2} = h_4 + d_c$

$$H_{z2}=414.93$$

$$F_{z2}=L_{z2}*H_{z2}$$

%magnetic tension of the teeth and yoke of the stator, gap and teeth of the

$$H_{z1}=169.126$$

$$F_{z1}=h_n+H_{z1}$$

$$F1=F_{\gamma}+F_{z1}+F_{a1i}+F_{z2}$$

%saturation factor

$$k_{za}=F1/F_{\gamma}$$

% dispersion coefficient at idle

$$d_t=h_p+\gamma-b_{ap_p}^2/(4*D)$$

$$c_p=\tau-b_{ap_p}-3.14*d_t/p$$

$$\lambda_{ap_p}=\text{round}(4.44*(d_t/c_p-0.25),2)$$

$$\lambda_p=\lambda_{ap_p}+1.75*(a_p/c_p+0.2)-1.27*(a_p/c_p-0.5)^2$$

$$c_{ap_m}=\tau-3.14*(h_m+2*(h_p+\gamma))/(2*p)$$

$$b_m=\text{PHI}_{tn}/(k_{tc}*1.9*I_m)$$

$$c_m=c_{ap_m}-b$$

$$\lambda_{pm}=1.75*h_m/c_m$$

$$\lambda_{tl}=1.17*(b_m/I_m)$$

$$\lambda_{f\phi}=\lambda_p+\lambda_{pm}+\lambda_{tl}$$

$$\sigma_m=1+\nu_0*I_{ap_1}*\lambda_{f\phi}*F1/\text{PHI}$$

% flow

$$\text{PHI}_m=\sigma_m*\text{PHI}$$

% induction

$$B_m=\text{PHI}_m/(k_{tc}*I_m*b_m)$$

% core magnetic voltage

$$H_{polus}=227$$

$$H_m=H_{polus}*B_m$$

$$F_m=h_m*H_m$$

F_gamma_i=158

F2=F_m+F_gamma_i

%Resulting magnetic intensity

Ff=F1+F2

%field form factor on longitude axis

k_ap_m=1.452

sigma_ap_sigma_ap_m=(k_ap_m+k_za-1)/k_za

k_f=1.022

k_ad=0.851

k_d=k_f*k_ad

%field form factor on transverse axis

k_aq=0.488

k_q=k_f*k_aq

%inductive resistance of mutual induction of the stator winding along the longitudinal axis

m1=3

k_w_1=0.933

X_ad=(4*m1*f*nu_0*tau*0.9*w1^2*k_w_1^2*k_d)/(3.14*k_gamma_1m*gamma*p)

%inductive resistance of mutual induction of the stator winding along the transverse axis

X_aq=(4*m1*f*nu_0*tau*0.9*w1^2*k_w_1^2*k_q)/(3.14*k_gamma_1m*gamma*p)

%conductivity coefficient for slot scattering

h1=0.022

h2=0.011

lambda_n=h1/(3*b_n1)+(h2+h4)/b_n1

%conductivity coefficient for diffusion flux over the heads of teeth

lambda_g=0.35*gamma/b_n1

%pitch coefficient

beta=2*p*y/Z1

%coefficient taking into account the effect of shortening the step on the slot scattering of two-layer three-phase winding

$$k_{\beta}=(1+3\beta)/4$$

%conduction ratio of slot scattering

$$\lambda_{n\gamma}=(\lambda_n+\lambda_g)*k_{\beta}$$

%conduction modular ratio

$$\lambda_{l_d}=2.5*q_1^2-((2*m_1/3.14)*q_1*(k_{ob_1}*k_d)/k_f)*1.23*q_1$$

%frontal scattering conductivity coefficient

$$\lambda_{l_q}=2.4*q_1^2$$

$$\lambda_l=0.15*\beta*\tau/(q_1*0.9)*(\lambda_{l_d}+\lambda_{l_q})$$

%equivalent number of slots damper winding

$$Z_2=\text{round}(3.14*D/t_{z2})$$

%coefficient to take into account for the influence of the polar of the rotor

$$k_{\gamma}=2*\alpha_{\sigma}/(1+k_q/k_d)$$

%differential scattering coefficient with open slots on the stator and damping winding on the rotor

$$d_{sh}=2*Z_1/Z_2*k_{\beta}+((k_{ob_1}*Z_1)/Z_2)^2$$

%differential conductivity coefficient

$$\lambda_d=d_{sh}*t_{z1}*k_{\gamma}/(12*k_{\sigma}*\gamma)$$

%conductivity coefficient for stator winding dissipation

$$\lambda_{\sigma}=\lambda_{n\gamma}+\lambda_l+\lambda_d$$

%dissipation inductive impedance for winding

$$X_{\sigma}=4*3.14*f*\nu_0*0.9*w_1^2*\lambda_{\sigma}/(p*q_1)$$

$$X_{\sigma_o}=\text{round}(X_{\sigma}*ln/Un,2)$$

%dissipation inductive resistance of the excitation winding

$\lambda_{f_d} = k_f / (2 * k_{ad}) * (\tau / (\gamma * 0.992)) * (4 / 3.14 * k_{ad} * k_{\phi} - 1)$ %differential
conductivity coefficient per mdba

$\lambda_{f_{\omega}} = \lambda_p + \lambda_{pm} / 1.53$

$\lambda_{f_l} = \lambda_{tl} / 2.65$

$X_{f_{\sigma}} = (2 * k_{ad} / k_f) * (\lambda_{f_d} + \lambda_{f_{\phi}} + \lambda_{f_l}) * (\gamma * k_{\sigma} / \tau) * 0.588$

%inductive scattering rod resistance

$\lambda_{k_p_{\omega}} = 0.62 + h^4 / 0.003$

$\lambda_{k_g} = 1 / 3.14 * (1 + \log(\gamma / (2 * 0.003)))$

$a_k = 3.14 * t_{z2} / \tau$

$k_{o_k} = \sin(n_c * a_k) / (n_c * \sin(a_k))$

$\lambda_{n_d} = 2 * 3.14 * (\lambda_{k_p_{\omega}} + \lambda_{k_g}) * l_p / (n_c * (1 - k_{o_k}) * l_m)$

$\lambda_{k_d} = t_{z2} / (12 * \gamma * k_{\sigma})$

$\lambda_{d_d} = 2 * 3.14 * \lambda_{k_d} * l_p / (n_c * (1 - k_{o_k}) * l_m)$

$X_{ad_{oe}} = X_{ad} / 6.79$

$X_{p_d} = 2 * k_{ad} / k_f * (\lambda_{n_d} + \lambda_{d_d}) * (\gamma * k_{\sigma} / \tau) * X_{ad_{oe}}$

%inductive resistance to scattering of short-circuiting rings (frontal parts) of the damper winding

$\gamma_{l_d} = 0.18 * \tau / ((1 - k_{o_k}) * l_m)$

$x_{ld_{ov}} = (2 * k_{ad} / k_f) * (\gamma_{l_d}) * (\gamma * k_{\sigma} / \tau) / X_{ad_{oe}}$

$x_{pd_{ov}} = 0.175$

%inductive dissipation resistance of the damper winding along the transverse axis

$x_{k_{\sigma}_d_{ov}} = x_{pd_{ov}} + x_{ld_{ov}}$

$x_{pq_{ov}} = 0.75 * x_{pd_{ov}}$ %inductive resistance of the scattering of the rods of the damper winding

$x_{lq_{ov}} = 0.009$

$x_{lq_{ov}} = 1.5 * x_{lq_{ov}}$ %inductive resistance to scattering of short-circuiting damping coil rings

$x_{k_{\sigma}_q_{ov}} = x_{pq_{ov}} + x_{lq_{ov}}$ %inductive impedance dissipation damping winding

%inductive resistance of zero sequence

$k_{\beta_0} = 3 * \beta - 2$

$\lambda_{n_0} = (\lambda_{n_{\gamma}} * k_{\beta_0}) / k_{\beta}$

%conductivity coefficient for groove scattering flux linkage at zero sequence currents

$m = 3$

$$\lambda_{b0} = 0.5 \cdot (2^{1/2}) \cdot k_{\beta 0} \cdot 0.933 \cdot m \cdot q_1 / (2 \cdot 3.14^2) \cdot (\tau / (\gamma \cdot k_{\sigma})) \cdot (1 / (3 \cdot q_1)^2 + 0.13 \cdot k_{\beta 0} - 0.11 \cdot k_{\beta 0}^2 + 0.037)$$

$$\lambda_{l0} = 0.087 \cdot \beta \cdot \tau \cdot q_1 / l_m$$

$$X_{0ov} = (3.14^2 / (k_{ob1} \cdot k_d)) \cdot ((\lambda_{n0} + \lambda_{b0} + \lambda_{l0}) / (m \cdot q_1)) \cdot (\gamma \cdot k_{\sigma} / \tau) \cdot X_{ad_{oe}}$$

%induction in the air gap at nominal load

$$PHI_{rdn} = 0.289$$

$$E_{rn_{ov}} = 1.053$$

$$E_{rd_{ov}} = 1.027$$

$$PHI_r = PHI_{rdn} \cdot E_{rn_{ov}} / E_{rd_{ov}}$$

$$B_{\sigma_n} = PHI_r / (\tau \cdot \alpha_{\sigma} \cdot l_m)$$

%induction in the teeth of the stator to 1/3 of the height at rated load

$$B_{z1} = B_{\sigma_n} \cdot l_m \cdot t_{z1} / (k_c \cdot 0.099 \cdot R_p)$$

%induction in the teeth of the damper winding at rated load

$$B_{z2} = B_{\sigma_n} \cdot t_{z2} / (k_{tc} \cdot 0.086)$$

%induction in the yoke of the stator magnetic circuit at rated load

$$B_{a1} = PHI_r / (2 \cdot l_m \cdot h_a \cdot k_c)$$

% induction at rated load

$$B_{tn} = PHI_{tn} / (l_m \cdot b_m \cdot k_{tc})$$

%average length of a half winding field winding (preliminary)

$$l_f = b_m + l_m + 0.07 \cdot \tau + 3.14 \cdot \gamma_{u1}$$

%current density in field winding

$$a_f = 22 \cdot (1 + 4.4 \cdot \tau^{1/2}) \quad \% \text{heat convection coefficient}$$

$$O_f = 75 \quad \% \text{excitation winding temperature rise in C}$$

$$k_k = 0.97 \quad \% \text{copper fill factor of coil height}$$

$$\omega_{sh} = 0.015 \quad \% \text{Abramov, table 6.8}$$

$$\rho_{ot} = 0.0242 \cdot 10^{-6} \quad \% \text{resistivity of copper when temperature exceeding 75C}$$

$$F_{fn} = 2.108 \cdot 10^4 \quad \%W$$

$$\text{delta}_f = a_f \cdot O_f \cdot k \cdot h_m / (\text{ro}_t \cdot F_{fn})$$

%wire width (preliminary)

$$b_f = \text{ro}_t / (a_f \cdot O_f) \cdot (F_{fn} / (k \cdot h_m))^2$$

%minimum wire height

$$a_{f_min} = b_f / 16$$

%maximum allowable wire height

$$a_{f_max} = b_f / 6$$

%square

$$s_f = a_{f_max} \cdot b_f$$

%excess temperature at selected sizes

$$O_{ap_f} = \text{ro}_t / (a_f \cdot b_f) \cdot (F_{fn} / (k \cdot h_m))^2$$

%current density at selected sizes

$$\text{delta}_f_c = a_f \cdot O_{ap_f} \cdot k \cdot h_m / (\text{ro}_t \cdot F_{fn})$$

%excitation rated current (preliminary)

$$I_{fn} = \text{delta}_f_c \cdot s_f$$

%number of turns in the excitation coil

$$w_f = \text{round}(F_{fn} / I_{fn})$$

%excitation rated current

$$I_{fn} = F_{fn} / w_f$$

%excitation winding resistance at t=130?

$$\text{ro}_{130} = 0.0252 \cdot 10^{-6}$$

$$r_{f130} = 4 \cdot \text{ro}_{130} \cdot p \cdot w_f \cdot l_f / s_f$$

%excitation current at no load and rated voltage

$$I_{fn} = F_{fn} / w_f$$

%voltage on the rings of the excitation winding at rated load and 130?

$$U_{f130} = r_{f130} \cdot I_{fn}$$

%average length of a semi-turn

$$l_{sr} = l_m + 1.8 \cdot \tau$$

%number of elementary conductors at the height of the slot

$$b_{\sigma} = 2 \cdot 0.005$$

$$h = 0.0104 \cdot (b_{n1} / b_{\sigma})^{1/2}$$

%effective height of elementary conductor

$$eh = 0.002 / h$$

%average stator tooth width

$$b_{z12} = 3.14 \cdot (D + h_{ap_p}) / Z1$$

%mass of teeth of the stator core

$$g_m = 8900$$

$$g_c = 7650$$

$$G_z = g_c \cdot l_m \cdot k_c \cdot h_n \cdot b_{z12} \cdot Z1$$

%core yoke mass

$$G_a = g_c \cdot l_m \cdot k_c \cdot 3.14 \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a$$

%exciter wires mass

$$G_{m1} = g_m \cdot s_f \cdot 4 \cdot p \cdot l_f \cdot w_f$$

%mass of demper wire rods

$$G_c = g_m \cdot s_c \cdot 2 \cdot p \cdot l_p \cdot n_c$$

%mass of short-circuiting rings of damping wire

$$G_k = 2 \cdot g_m \cdot s_k \cdot 3.14 \cdot (D - 2 \cdot \gamma - h_k)$$

%s steel mass

$$G_m = g_c * 2 * 3.14 * l_m * k_{tc} * (h_m * b_m + 0.8 * h_p * b_{ap_p})$$

%rotor rim mass

$$D_{a_{ap}} = D_a^2 - 2 * h_{a2}$$

$$k_0 = 0.9$$

$$G_0 = (3.14 * g_c) / 4 * l_{a2} * (D_a^2 - D_{a_{ap}}^2) * k_0$$

%mass of the rotor taking into account the mass of the shaft and other rotating parts

$$G_p = 1.35 * (G_0 + G_c + G_{m1} + G_m + G_k)$$

%bearing load

$$k_{p_load} = 3.75$$

$$g_g = 9.81$$

$$N_n = k_{p_load} * G_p * g_g$$

%magnetic losses in the stator core

$$p_{1_50} = 1.5 \text{ \% W/kg losses in steel}$$

$$k_{da} = 1.3$$

$$k_{dz} = 1.7$$

$$p_{a_losses} = p_{1_50} * (B_a)^2 * (f/50)^{1/3}$$

$$p_{z_losses} = p_{1_50} * (B_{z1})^2 * (f/50)^{1/3}$$

$$P_m = k_{da} * p_{a_losses} * G_a + k_{dz} * p_{z_losses} * G_z$$

%additional losses on the surface of the tips when idling

$$k_{\delta} = 195$$

$$OO = 2 * 3.14 * 10$$

$$B_0 = B_{\sigma_n} * (k_f - 1)$$

$$P_{p0} = 2 * p * \alpha * \tau * l_m * k_{\delta} * (Z_1 * OO)^{1.5} * (B_0 * t_{z1})^2$$

%losses in steel at idle

$$P_{m0} = P_{p0} + P_m$$

%main electrical losses in the stator winding at 75C

$$EE = 0.002/h$$

```

O=1+0.09*EE^4
SH=0.33*EE^4
m_e=(4/2)*12
k_ap=(9*beta+7)/16
k_ra=O+(SH/3)*(k_ap*m_e^2-1)
k_r=1+(l_m/l_sr)*(k_ra-1)
ro_75=2.14*10^(-8)
r_a=k_r*ro_75*2*l_sr*w1/(a1*s1)
P_e=3*(r_a/k_r)*ln^2

```

%additonal losses in stator winding

```
P_ed=(k_r-1)*P_e
```

%additional losses in the teeth of the stator from the third harmonic component of the field during a short circuit

```

p_one_and_half=1.5
B1=0.32
B2=2.2
A_zm=B1*B2-0.7
A1=0.42
A2=0.24
A_zd=A1*A2
B_z=B_z1*(A_zm*9.588+1.27*A_zd*X_ad_oe)
P_kz=10.7*p_one_and_half*B_z^(5/4)*Gz

```

%additional losses on the surface of the tips from the stator serration during a short circuit

```
P_pk=0.2*(2*p*X_ad_oe)/(Z1*(k_sigma-1))^2*P_p0
```

%additional losses on the surface of the tip from the higher harmonic components of the stator during a short circuit

```

k_ap=0.055
P_ap_p_k=(2.1*(q1)^(1/3))*(k_ap*X_ad_oe/(k_f-1))^2*P_p0

```

%sum of the additional losses in the short circuit

```
P_kd=P_ed+P_kz+P_pk+P_ap_p_k
```

%total losses due to short circuit and at rated stator current

$$P_{kn}=P_e+P_{kd}$$

%excitation losses

$$\nu_f=0.92$$

$$r_f=0.213$$

$$P_f=r_f \cdot I_{fn}^2 / \nu_f$$

%ventilation losses

$$v=2 \cdot f \cdot \tau$$

$$g_0=1.22 \text{ \%kg/m}^3 \text{ for gas}$$

$$k_q=1.4$$

$$k_v=k_q \cdot g_0 \cdot v^2$$

$$c_v=1100 \text{ \%J/(m}^3\text{/C)}$$

$$O_g=25 \text{ \%C}$$

$$Q=(P_f \cdot \nu_f + P_{p0} + P_{ap} + P_k + P_e + P_{ed} + P_m + P_e + P_{pk}) \cdot (c_v \cdot O_g - k_v) / 10000000000 \text{ \%gas flow}$$

$$P_v=k_v \cdot Q$$

%friction loss in bearings (thrust bearing and guide bearing)

$$k_N=1.45 \cdot 10^{-7}$$

$$N_N=9.633 \cdot 10^5$$

$$P_N=k_N \cdot ((N_N^3) \cdot \Omega_n^3)^{1/2}$$

%mechanical losses total

$$P_T=P_v+0.5 \cdot P_N$$

%full losses at nominal load

$$\sigma_P=P_{m0}+P_{kn}+P_f+P_T$$

%efficiency at nominal load

$$\eta=1-\sigma_P / (S_n \cdot 1000 \cdot \text{pf} + \sigma_P)$$

$$\text{weight}_{\text{copper}}=G_{m1}+G_c+G_k$$

```
weight_steel=Ga+G_m+G_0
price_copper=4.9
price_steel=0.4
losses=sigma_P/1000 %kWh
kWh_price=0.03
costs=weight_steel*price_steel+losses*kWh_price+weight_copper*price_copper

OR1=table(Sn,Un,pf,f,Np,nn,nr,NU,sigma_P,weight_copper,weight_steel,costs)
writetable(OR1,'outputs.xlsx','Sheet',1,'Range','A3:L5');

disp('Calculation is finished. For main results open outputs.xls');
```

LISA 3. FUNCTION_1V.M SKRIPT

```
function costs = main(nn)
```

```
%%updated main
```

```
disp('Reading inputs...')
```

```
[num]=xlsread('inputs.xlsx', 1, 'D3:D12'); %reads inputs from cells of inputs.xls
```

```
Sn=num(1);
```

```
Unl=num(2);
```

```
pf=num(3);
```

```
f=num(4);
```

```
Np=num(5);
```

```
%%nn=num(6);
```

```
nr=num(7);
```

```
xd1=num(8);
```

```
xd2=num(9);
```

```
xd3=num(10);
```

```
disp(' ');
```

```
disp('Initial parameters:'); %Shows read values
```

```
disp(' ');
```

```
disp(['Sn = ', num2str(Sn), ' KVA']);
```

```
disp(['Unl = ', num2str(Unl), ' kV']);
```

```
disp(['power factor = ', num2str(pf),]);
```

```
disp(['f = ', num2str(f), ' Hz']);
```

```
disp(['Number of phases = ', num2str(Np),]);
```

```
disp(['Nominal speed = ', num2str(nn), ' rpm']);
```

```
disp(['Runaway speep = ', num2str(nr), ' rpm']);
```

```
disp(['Inductive resistance along the longitudinal axis = ', num2str(xd1)]);
```

```
disp(['Inductive resistance along the longitudinal axis = ', num2str(xd2)]);
```

```
disp(['Stator winding armature leakage reactance (preliminary): = ', num2str(xd3)]);
```

```

% Active power
nn
Pn=Sn*pf
% Under nominal load generator has following parameters
Un=Unl*1000/sqrt(3) %nominal phase voltage (star connection)
In=round(Sn*1000/(3*Un)) %nominal phase current
p=(60*f)/nn %N of pole pairs
kE=sqrt(1+xd3*(2*0.6+xd3))
Ern=kE*Un %emf of mutual induction at nominal load


```


```
(preliminary)

% disp(['Pn = ',num2str(Pn),' kW']);
% disp(['Un = ',num2str(Un),' V']);
% disp(['In = ',num2str(In),' a']);
% disp(['p = ',num2str(p),'']);
% disp(['Ern = ',num2str(Ern),' V']);

%Main parameters of synchronous machine depend from calculated power of S? and rotational
speed

Sp=kE*Sn %calculated power
pperp=Sn/(2*p) %[Abramov, table 5.1] with indirect air
cooling
tau=0.4
Ad=540e+02 %ampere density [Abramov, table 5.2]
Btn=0.75 %induction in gap at rated load [Abramov,
table 5.2]
a_kB_kw1=0.744 %induction in gap at rated load
[Abramov, table 5.2]
Ca=2/(3.14*a_kB_kw1*Ad*Btn) %C constant (preliminary)

% disp(['Sp = ',num2str(Sp),' VA']);
% disp(['tau = ',num2str(tau),' kVA']);
% disp(['Ad = ',num2str(Ad),' A/m']);

```


```


```

```
% disp(['Ca = ',num2str(Ca),' m3/J']);
```

```
% disp(['Btn = ',num2str(Btn),'T']);
```

```
%Rotor moment of inertia
```

```
Tj=2.65*((Sn*10^(-3))^(1/4))
```

```
Omega_n=2*3.14*nn/60
```

```
Jp=Tj*Sn*10^3/(Omega_n^2)
```

```
% disp(['Omega_n = ',num2str(Omega_n),'rad/s']);
```

```
% disp(['Jp = ',num2str(Jp),'kg/m2']);
```

```
%Minimal internal diameter of stator core
```

```
phi_j=0.75 %where  $\phi_j=0,75$  is coefficient depending from rotor design and  
number of s (under  $\phi_j < 12$  and when the rim of the rotor is mounted directly on the shaft
```

```
Dmin=0.035*((Jp*Omega_n/((phi_j*kE*Sn*1000*Ca)))^(1/2))
```

```
v_max=170
```

```
n_ug=18.333
```

```
Dmax=v_max/(3.14*n_ug)
```

```
% disp(['Dmin = ',num2str(Dmin),'m']);
```

```
% disp(['Dmax = ',num2str(Dmax),'m']);
```

```
%Optimal internal diameter of stator core
```

```
lambda_j=2.6
```

```
Dopt=((4*f*Ca*Sn*1000*kE)/(lambda_j*(Omega_n)^2))^(1/3)
```

```
% disp(['Dopt = ',num2str(Dopt),'m']);
```

```
if Dopt>Dmax
```

```
    D=Dmax;
```

```
elseif Dopt<Dmin
```

```
    D=Dmin;
```

```

else
    D=Dopt
end

disp(['D = ',num2str(D),'m']);

tau=3.14*D/(2*p)                                % at chosen D

%disp(['tau = ',num2str(tau),'m']);

%Runaway speed

v Ug=3.14*D*n Ug

if v Ug<125
    disp(['v Ug = ',num2str(v Ug),'m/s is not higher that acceptable value']);
else
    disp('Runaway speed is higher that acceptable value')
end

%length of magnetic stator core

ll=(Ca*Sn*kE*10^3)/(Omega_n*D^2)

criteria1=ll/tau
if (1.1<criteria1) && (criteria1<4)
    disp('Length ratio of magnetic core stator is in acceptable interval')
else
    disp('Length ratio of magnetic core stator is not in acceptable interval. Let us consider ')
    ll=round(1.3*tau,1)
end

w1=(kE*Un)/(4*a_kB_kw1*Btn*f*tau*ll)           %Number of sequential phase coils


```


```


```
(preliminary)
un1=12 %Number of effective conductors in slot

```


```


```


```



```

%Maximum and minimum recommended currents [Abramov, table 6.1]
Inmin=2200
Inmax=3200

%Maximum and minimum number of parallels
amax= (un1*In)/Inmin
amin = (un1*In)/Inmax

a1=2

Ip=In*un1/a1 %Stator slot current

%disp(['amax= ',num2str(amax),'A']);
%disp(['amin= ',num2str(amin),'A']);

q1=round((a1*w1)/(un1*p)) %Number of slots for and phase

Z1=6*p*q1 % number of slots in stator
w1=(q1*un1*p)/a1 % maximum number of parallels

% step of winding

tau_n=Z1/(2*p)
y=round(0.83*tau_n)

%stator winding coefficient

ky1=sin((3.14*y)/(2*tau_n))
kp1=sin(3.14/6)/(q1*sin((3.14/(6*q1))))
k_ob_1=ky1*kp1

B_sigma_n=(kE*Un)/(4*a_kB_kw1*f*tau*ll*w1) %induction under nominal voltage
A=(6*w1*In)/(3.14*D) %linear load

```

```

%disp(['B_sigma_n= ',num2str(B_sigma_n),'T']);
%disp(['A= ',num2str(A),'A/m']);

%Stator slot

t_z1=(3.14*D)/Z1 %tooth
Bz1=1.88
bz1=(1.32*t_z1*B_sigma_n)/Bz1 %tooth width in the most narrow section
bn1=t_z1-bz1 % width of slot

%disp(['bz1= ',num2str(bz1),'m']);
%disp(['bn1= ',num2str(bn1),'m']);

%Current density (preliminary)
delta1A=1400*10^8
delta1=delta1A/A %

%disp([' delta1= ',num2str( delta1),'A/m2']);

%Cross-section of effective conductor of stator winding
s1=ln/(a1*delta1)
%disp(['s1 = ',num2str(s1),'m2']);

%Hight of effective conductor of stator winding
ae1=2.35*10^(-3)
%The total width of insulated conductors across the width of the stator slot
gamma_u=(5.5*10^(-3))/2 %[Abramov, table 6.6]
delta_b=0.5*10^(-3) %assembly tolerance

b0=bn1-2*gamma_u-delta_b
delta_u=0.28*10^(-3) %conductor insulation width for both side of wire [Abramov, table ?1.3]
ne=2 %number of conductors
be1=b0/ne-delta_u

be1=5*10^(-3)

```

```

se=11.9*10(-6)

%Slot width finally
bn1=2*be1+2*delta_u+2*gamma_u+delta_b

%disp(['bn1 = ',num2str(bn1),'m']);

%number of conductor in rod

ce=round(s1/se)

%cross-section of effective conductor of stator winding

s1=ce*se

%current density in stator winding

delta1=ln/(a1*s1)

%disp(['delta1 = ',num2str(delta1),'A/m2']);

%width and height of elementary conductor with insulation

a_u1=ae1+delta_u
b_u1=be1+delta_u

%overall high of insulated elementary conductors of one rod

h0=a_u1*(ce/2+1)

%height of slot/teeth of stator
h_kl=0.006
sigma_h=19.2*10(-3)
h4=0.001
h_n=2*h0+sigma_h+h_kl+h4+0.005

```

```

%the choice of the gap between the stator and the rotor
B_sigma=B_sigma_n/kE %maximum induction in the gap at idle and nominal voltage
x_beta=(0.6+0.8*1.3)*(A/B_sigma)*((h_n/(bn1*q1))+tau/1.3)*10^(-6) %Inductive resistance to
scattering (approximately in relative units)
%assign new value to x_beta
x_beta=0.246

%the minimum gap between the stator and the rotor which provides the specified value of xd
gamma=0.02

%maximum clearance under the edge of the
gamma_m=gamma*1.5

%dimensions of stator magnetic core
b_p_1=0.01
l1_ap=0.05
n_b =round((l1-l1_ap)/(b_p_1+l1_ap))

%length of stator core
l_ap_1=(l1-n_b*b_p_1)/(n_b+1)

%overall length
l_m=l_ap_1*(n_b+1)

%the height of yoke
%magnetic flux at rated load
k_b=1.11
PHI_n=(kE*Un)/(4*k_b*k_ob_1*f*w1)
%height of yoke
k_c=0.95
B_a=1.5
h_a=PHI_n/(2*l_m*B_a*k_c)
%outside diameter of stator core
D_a=D+2*h_n+2*h_a

```

```

%rotor magnetic circuit and damper winding size
% arc
alpha=0.69
b_ap_p=alpha*tau
% radius
R_p=D/(2+8*D*(gamma_m-gamma)/(b_ap_p)^2)
% core length
l_m=round(l+0.04*tau,1)
%step of damper winding
t_z2=t_z1*0.87
%diameter of damper winding bar (preliminary)
d_c=0.3*t_z2
%number of bars
b=0.01
n_c=round(1+(b_ap_p-d_c-2*b)/t_z2)
%required cross-section of copper bar for damper winding
s_c=0.15*tau*A/(n_c*delta1)
%assign values
d_c=0.012
s_c=1.13e-04
n_c=5
%cross-section of damper winding short-circuiting segment
s_k=0.5*s_c*n_c
%short-circuiting ring size
h_k=s_k/(0.7*d_c)
%Let's consider as damper winding slot size
b_sh_2=0.003
h4=0.003
%length of damper winding bar
l_p=l_m+0.2*tau
% shoe height
h_p=0.054*(1+2.5/p)*tau+d_c
% core height
h_m=0.48*(1.77/(0.15+(tau)^(1/2))-1)*tau
% core width

```

```

%calculated shoe height
h_ap_p=round(h_p-(b_ap_p^2)/(8*R_p),2)
%?alculated shoe height
h_pm=(2*h_p+h_ap_p)/3
a_p=3.14*(D-2*gamma-h_ap_p)/(2*p)-b_ap_p
%average face-to-face distance side surfaces of core (approximately)
a_m=round(3.14*(D-2*gamma-2*h_p-h_m)/(2*p)-b_ap_p+h_p,2)
lambda1=1.072
phi_sigma=round((h_m*a_p)/(h_pm*a_m),2)
%s scattering coefficient (preliminary)
k_sigma=0.992
alpha_sigma=0.68
sigma_t=1+(10*k_sigma*gamma*h_pm^2)/(alpha_sigma*tau*a_p)
%flux in core base under nominal load (preliminary)
Er=1.07 %emf of mutual induction
Ff=1.3 %magnetizing force of excitation
PHI_tn=PHI_n/kE*(Er+(sigma_t-1)*Ff)
%width of core
k_tc=0.95 %core stacking coefficient
B_t=1.9 %induction at core base under nominal load.
b_t=round(PHI_tn/(k_tc*I_m*B_t),2)
%outer diameter of rotor rim
D_a2=round(D-2*gamma-2*h_p-2*h_m,2)
%length of rotor rim (preliminary)
b_e=0.05 %width of winding wire
gamma_u_1=0.04 %assembly allowance
delta=0.07 %difference in between length of coil or rotor
l_a2=l_m+gamma_u_1+2*b_e+delta
%hight of rim (preliminary)
h_a2=tau

b_n1=0.017
t_z1=0.112
b_sh2=0.003
b_v=0.01

```

$y_{1m}=(b_{n1}/\gamma_m)^2/(5+b_{n1}/\gamma_m)$
 $k_{\gamma_{1m}}=t_{z1}/(t_{z1}-y_{1m}*\gamma_m)$
 $y_{2m}=(b_{sh2}/\gamma_m)^2/(5+b_{sh2}/\gamma_m)$
 $k_{\gamma_{2m}}=t_{z2}/(t_{z2}-y_{2m}*\gamma_m)$
 $y_{3m}=(b_v/\gamma_m)^2/(5+b_v/\gamma_m)$
 $k_{\gamma_{3m}}=l/(l+2*\gamma_m-n_b*y_{3m}*\gamma_m)$
 $k_{\sigma_m}=k_{\gamma_{1m}}*k_{\gamma_{2m}}*k_{\gamma_{3m}}$

%Induction in section of a tooth on 1/3 heights

$t_{one_third}=3.14*(D+2*h_p/3)/Z1$
 $b_{one_third}=t_{one_third}-b_{p_1}$
 $B_{z1}=(B_{\sigma}*l*t_{z1})/(k_c*l_m*b_{one_third})$

%emf of mutual induction under $E_f=U_n$

$E_f=U_n$

%Magnetic flux in gap

$k_{\phi}=1.03$
 $\Phi=(k_{\phi}*E_f)/(2^{(1/2)}*3.14*f*w1*k_{ob_1})$

%induction in gap

$B_{\gamma}=\Phi/(\tau*\alpha_{\sigma}*l)$

%magnetic stress in gap

$\nu_0=4*3.14*10^{(-7)}$
 $F_{\gamma}=B_{\gamma}*\sigma_h*k_{\sigma}/\nu_0$

%stator yoke induction

$B_{a1}=\Phi/(2*l_m*h_a*k_c)$

%stator yoke magnetic voltage

$L_{a1}=3.14*(D_a-h_a)/(4*p)$
 $H_{a1}=271.45$
 $F_{a1}=0.455*L_{a1}*H_{a1}$

%induction in the teeth of the

$b_{z2}=t_{z2}-0.94*d_c$
 $B_{z2}=B_{\sigma}*t_{z2}/(k_{tc}*b_{z2})$

%magnetic voltage teeth

$$L_{z2}=h_4+d_c$$

$$H_{z2}=414.93$$

$$F_{z2}=L_{z2}*H_{z2}$$

%magnetic tension of the teeth and yoke of the stator, gap and teeth of the

$$H_{z1}=169.126$$

$$F_{z1}=h_n+H_{z1}$$

$$F_1=F_{\gamma}+F_{z1}+F_{a1}+F_{z2}$$

%saturation factor

$$k_{za}=F_1/F_{\gamma}$$

% dispersion coefficient at idle

$$d_t=h_p+\gamma-b_{ap}p^2/(4*D)$$

$$c_p=\tau-b_{ap}p-3.14*d_t/p$$

$$\lambda_{ap}=\text{round}(4.44*(d_t/c_p-0.25),2)$$

$$\lambda_p=\lambda_{ap}p+1.75*(a_p/c_p+0.2)-1.27*(a_p/c_p-0.5)^2$$

$$c_{apm}=\tau-3.14*(h_m+2*(h_p+\gamma))/(2*p)$$

$$b_m=\text{PHI}_{tn}/(k_{tc}*1.9*I_m)$$

$$c_m=c_{apm}-b$$

$$\lambda_{pm}=1.75*h_m/c_m$$

$$\lambda_{tl}=1.17*(b_m/I_m)$$

$$\lambda_{f\phi}=\lambda_p+\lambda_{pm}+\lambda_{tl}$$

$$\sigma_m=1+\nu_0*I_{ap1}*\lambda_{f\phi}*F_1/\text{PHI}$$

% flow

$$\text{PHI}_m=\sigma_m*\text{PHI}$$

% induction

$$B_m=\text{PHI}_m/(k_{tc}*I_m*b_m)$$

% core magnetic voltage

$$H_{\text{polus}}=227$$

$$H_m = H_{\text{polus}} * B_m$$

$$F_m = h_m * H_m$$

$$F_{\text{gamma}_i} = 158$$

$$F_2 = F_m + F_{\text{gamma}_i}$$

%Resulting magnetic intensity

$$F_f = F_1 + F_2$$

%field form factor on longitude axis

$$k_{\text{ap}_m} = 1.452$$

$$\sigma_{\text{ap}} \sigma_{\text{ap}_m} = (k_{\text{ap}_m} + k_{\text{za}} - 1) / k_{\text{za}}$$

$$k_f = 1.022$$

$$k_{\text{ad}} = 0.851$$

$$k_d = k_f * k_{\text{ad}}$$

%field form factor on transverse axis

$$k_{\text{aq}} = 0.488$$

$$k_q = k_f * k_{\text{aq}}$$

%inductive resistance of mutual induction of the stator winding along the longitudinal axis

$$m_1 = 3$$

$$k_{w_1} = 0.933$$

$$X_{\text{ad}} = (4 * m_1 * f * \nu_0 * \tau * 0.9 * w_1^2 * k_{w_1}^2 * k_d) / (3.14 * k_{\text{gamma}_1m} * \text{gamma} * p)$$

%inductive resistance of mutual induction of the stator winding along the transverse axis

$$X_{\text{aq}} = (4 * m_1 * f * \nu_0 * \tau * 0.9 * w_1^2 * k_{w_1}^2 * k_q) / (3.14 * k_{\text{gamma}_1m} * \text{gamma} * p)$$

%conductivity coefficient for slot scattering

$$h_1 = 0.022$$

$$h_2 = 0.011$$

$$\lambda_n = h_1 / (3 * b_{n1}) + (h_2 + h_4) / b_{n1}$$

%conductivity coefficient for diffusion flux over the heads of teeth

$$\lambda_g = 0.35 * \text{gamma} / b_{n1}$$

%pitch coefficient

$$\text{beta}=2*p*y/Z1$$

%coefficient taking into account the effect of shortening the step on the slot scattering of two-layer three-phase winding

$$k_beta=(1+3*beta)/4$$

%conduction ratio of slot scattering

$$\text{lambda_n_gamma}=(\text{lambda_n}+\text{lambda_g})*k_beta$$

%conduction modular ratio

$$\text{lambda_l_d}=2.5*q1^2-((2*m1/3.14)*q1*(k_ob_1*k_d)/k_f)*1.23*q1$$

%frontal scattering conductivity coefficient

$$\text{lambda_l_q}=2.4*q1^2$$

$$\text{lambda_l}=0.15*beta*\tau/(q1*0.9)*(\text{lambda_l_d}+\text{lambda_l_q})$$

%equivalent number of slots damper winding

$$Z2=\text{round}(3.14*D/t_z2)$$

%coefficient to take into account for the influence of the polar of the rotor

$$k_ya=2*\alpha_sigma/(1+k_q/k_d)$$

%differential scattering coefficient with open slots on the stator and damping winding on the rotor

$$d_sh=2*Z1/Z2*k_beta+((k_ob_1*Z1)/Z2)^2$$

%differential conductivity coefficient

$$\text{lambda_d}=d_sh*t_z1*k_ya/(12*k_sigma*\gamma)$$

%conductivity coefficient for stator winding dissipation

$$\text{lambda_sigma}=\text{lambda_n_gamma}+\text{lambda_l}+\text{lambda_d}$$

%dissipation inductive impedance for winding

$$X_sigma=4*3.14*f*nu_0*0.9*w1^2*\text{lambda_sigma}/(p*q1)$$

$X_{\sigma_o} = \text{round}(X_{\sigma} \cdot \ln / U_n, 2)$

%dissipation inductive resistance of the excitation winding

$\lambda_{f_d} = k_f / (2 \cdot k_{ad}) \cdot (\tau / (\gamma \cdot 0.992)) \cdot (4 / 3.14 \cdot k_{ad} \cdot k_{\phi} - 1)$ **%differential**

conductivity coefficient per mbd

$\lambda_{f_{\omega}} = \lambda_p + \lambda_{pm} / 1.53$

$\lambda_{f_l} = \lambda_{tl} / 2.65$

$X_{f_{\sigma}} = (2 \cdot k_{ad} / k_f) \cdot (\lambda_{f_d} + \lambda_{f_{\phi}} + \lambda_{f_l}) \cdot (\gamma \cdot k_{\sigma} / \tau) \cdot 0.588$

%inductive scattering rod resistance

$\lambda_{k_p_{\omega}} = 0.62 + h^4 / 0.003$

$\lambda_{k_g} = 1 / 3.14 \cdot (1 + \log(\gamma / (2 \cdot 0.003)))$

$a_k = 3.14 \cdot t_{z2} / \tau$

$k_{o_k} = \sin(n_c \cdot a_k) / (n_c \cdot \sin(a_k))$

$\lambda_{n_d} = 2 \cdot 3.14 \cdot (\lambda_{k_p_{\omega}} + \lambda_{k_g}) \cdot l_p / (n_c \cdot (1 - k_{o_k}) \cdot l_m)$

$\lambda_{k_d} = t_{z2} / (12 \cdot \gamma \cdot k_{\sigma})$

$\lambda_{d_d} = 2 \cdot 3.14 \cdot \lambda_{k_d} \cdot l_p / (n_c \cdot (1 - k_{o_k}) \cdot l_m)$

$X_{ad_{oe}} = X_{ad} / 6.79$

$X_{p_d} = 2 \cdot k_{ad} / k_f \cdot (\lambda_{n_d} + \lambda_{d_d}) \cdot (\gamma \cdot k_{\sigma} / \tau) \cdot X_{ad_{oe}}$

%inductive resistance to scattering of short-circuiting rings (frontal parts) of the damper winding

$\gamma_{l_d} = 0.18 \cdot \tau / ((1 - k_{o_k}) \cdot l_m)$

$x_{ld_{ov}} = (2 \cdot k_{ad} / k_f) \cdot (\gamma_{l_d}) \cdot (\gamma \cdot k_{\sigma} / \tau) / X_{ad_{oe}}$

$x_{pd_{ov}} = 0.175$

%inductive dissipation resistance of the damper winding along the transverse axis

$x_{k_{\sigma_d_{ov}}} = x_{pd_{ov}} + x_{ld_{ov}}$

$x_{pq_{ov}} = 0.75 \cdot x_{pd_{ov}}$ **%inductive resistance of the scattering of the rods of the damper winding**

$x_{lq_{ov}} = 0.009$

$x_{lq_{ov}} = 1.5 \cdot x_{lq_{ov}}$ **%inductive resistance to scattering of short-circuiting damping coil rings**

$x_{k_{\sigma_q_{ov}}} = x_{pq_{ov}} + x_{lq_{ov}}$ **%inductive impedance dissipation damping winding**

%inductive resistance of zero sequence

$k_{\beta_0} = 3 \cdot \beta - 2$

$\lambda_{n_0} = (\lambda_{n_{\gamma}} \cdot k_{\beta_0}) / k_{\beta}$

%conductivity coefficient for groove scattering flux linkage at zero sequence currents

m=3

$\lambda_{b_0} = 0.5 \cdot (2^{1/2} \cdot k_{\beta_0} \cdot 0.933 \cdot m \cdot q_1 / (2 \cdot 3.14^2)) \cdot (\tau / (\gamma \cdot k_{\sigma})) \cdot (1 / (3 \cdot q_1)^2 + 0.13 \cdot k_{\beta_0} - 0.11 \cdot k_{\beta_0}^2 + 0.037)$

$\lambda_{l_0} = 0.087 \cdot \beta \cdot \tau \cdot q_1 / l_m$

$X_{0_{ov}} = (3.14^2 / (k_{ob_1} \cdot k_d)) \cdot ((\lambda_{n_0} + \lambda_{b_0} + \lambda_{l_0}) / (m \cdot q_1)) \cdot (\gamma \cdot k_{\sigma} \cdot \sin \alpha / \tau) \cdot X_{ad_{oe}}$

%induction in the air gap at nominal load

PHIrdn=0.289

E_rn_ov=1.053

E_rd_ov=1.027

PHlr=PHIrdn*E_rn_ov/E_rd_ov

B_sigma_n=PHlr/(tau*alpha_sigma*l_m)

%induction in the teeth of the stator to 1/3 of the height at rated load

$B_{z1} = B_{\sigma_n} \cdot l_m \cdot t_{z1} / (k_c \cdot 0.099 \cdot R_p)$

%induction in the teeth of the damper winding at rated load

$B_{z2} = B_{\sigma_n} \cdot t_{z2} / (k_{tc} \cdot 0.086)$

%induction in the yoke of the stator magnetic circuit at rated load

$B_{a1} = PHlr / (2 \cdot l_m \cdot h_a \cdot k_c)$

% induction at rated load

$B_{tn} = PHI_{tn} / (l_m \cdot b_m \cdot k_{tc})$

%average length of a half winding field winding (preliminary)

$l_f = b_m + l_m + 0.07 \cdot \tau + 3.14 \cdot \gamma \cdot u_1$

%current density in field winding

$a_f = 22 \cdot (1 + 4.4 \cdot \tau^{1/2})$ %heat convection coefficient

O_f=75 %excitation winding temperature rise in C

k_k=0.97 %copper fill factor of coil height

omega_sh=0.015 %Abramov, table 6.8

ro_t=0.0242*10⁽⁻⁶⁾ %resistivity of copper when temperature exceeding 75C

F_fn=2.108*10⁴ %W

delta_f=a_f*O_f*k_k*h_m/(ro_t*F_fn)

%wire width (preliminary)

b_f=ro_t/(a_f*O_f)*(F_fn/(k_k*h_m))^2

%minimum wire height

a_f_min=b_f/16

%maximum allowable wire height

a_f_max=b_f/6

%square

s_f=a_f_max*b_f

%excess temperature at selected sizes

O_ap_f=ro_t/(a_f*b_f)*(F_fn/(k_k*h_m))^2

%current density at selected sizes

delta_f_c=a_f*O_ap_f*k_k*h_m/(ro_t*F_fn)

%excitation rated current (preliminary)

I_fn=delta_f_c*s_f

%number of turns in the excitation coil

w_f=round(F_fn/I_fn)

%excitation rated current

I_fn=F_fn/w_f

%excitation winding resistance at t=130?

ro_130=0.0252*10⁽⁻⁶⁾

r_f130=4*ro_130*p*w_f*I_fn/s_f

%excitation current at no load and rated voltage

$$I_{fn} = F_{fn} / w_f$$

%voltage on the rings of the excitation winding at rated load and 130?

$$U_{f130} = r_{f130} * I_{fn}$$

%average length of a semi-turn

$$l_{sr} = l_m + 1.8 * \tau$$

%number of elementary conductors at the height of the slot

$$b_{\sigma} = 2 * 0.005$$

$$h = 0.0104 * (b_{n1} / b_{\sigma})^{(1/2)}$$

%effective height of elementary conductor

$$eh = 0.002 / h$$

%average stator tooth width

$$b_{z12} = 3.14 * (D + h_{ap_p}) / Z1$$

%mass of teeth of the stator core

$$g_m = 8900$$

$$g_c = 7650$$

$$G_z = g_c * l_m * k_c * h_n * b_{z12} * Z1$$

%core yoke mass

$$G_a = g_c * l_m * k_c * 3.14 * (D_a - h_a) * h_a$$

%exciter wires mass

$$G_{m1} = g_m * s_f^4 * p * l_f * w_f$$

%mass of demper wire rods

$$G_c = g_m * s_c^2 * p * l_p * n_c$$

%mass of short-circuiting rings of damping wire

$$G_k = 2 * g_m * s_k * 3.14 * (D - 2 * \gamma - h_k)$$

%s steel mass

$$G_m = g_c * 2 * 3.14 * l_m * k_{tc} * (h_m * b_m + 0.8 * h_p * b_{ap_p})$$

%rotor rim mass

$$D_{a_{ap}} = D_a - 2 * h_{a2}$$

$$k_0 = 0.9$$

$$G_0 = (3.14 * g_c) / 4 * l_{a2} * (D_a^2 - D_{a_{ap}}^2) * k_0$$

%mass of the rotor taking into account the mass of the shaft and other rotating parts

$$G_p = 1.35 * (G_0 + G_c + G_{m1} + G_m + G_k)$$

%bearing load

$$k_{p_load} = 3.75$$

$$gg = 9.81$$

$$N_n = k_{p_load} * G_p * gg$$

%magnetic losses in the stator core

$$p_{1_50} = 1.5 \text{ \% W/kg losses in steel}$$

$$k_{da} = 1.3$$

$$k_{dz} = 1.7$$

$$p_{a_losses} = p_{1_50} * (B_a)^2 * (f/50)^{(1/3)}$$

$$p_{z_losses} = p_{1_50} * (B_{z1})^2 * (f/50)^{(1/3)}$$

$$P_m = k_{da} * p_{a_losses} * G_a + k_{dz} * p_{z_losses} * G_z$$

%additional losses on the surface of the tips when idling

$$k_{\Delta} = 195$$

$$OO = 2 * 3.14 * 10$$

$$B_0 = B_{\sigma_n} * (k_f - 1)$$

$$P_{p0} = 2 * p * \alpha * \tau * l_m * k_{\Delta} * (Z_1 * OO)^{(1.5)} * (B_0 * t_{z1})^2$$

%losses in steel at idle

$$P_{m0} = P_{p0} + P_m$$

%main electrical losses in the stator winding at 75C

$$EE=0.002/h$$

$$O=1+0.09*EE^4$$

$$SH=0.33*EE^4$$

$$m_e=(4/2)*12$$

$$k_{ap}=(9*\beta+7)/16$$

$$k_{ra}=O+(SH/3)*(k_{ap}*m_e^2-1)$$

$$k_r=1+(l_m/l_{sr})*(k_{ra}-1)$$

$$ro_{75}=2.14*10^{-8}$$

$$r_a=k_r*ro_{75}*2*l_{sr}*w1/(a1*s1)$$

$$P_e=3*(r_a/k_r)*I_n^2$$

%additonal losses in stator winding

$$P_{ed}=(k_r-1)*P_e$$

%additional losses in the teeth of the stator from the third harmonic component of the field during a short circuit

$$p_{one_and_half}=1.5$$

$$B1=0.32$$

$$B2=2.2$$

$$A_{zm}=B1*B2-0.7$$

$$A1=0.42$$

$$A2=0.24$$

$$A_{zd}=A1*A2$$

$$B_z=B_{z1}*(A_{zm}*9.588+1.27*A_{zd}*X_{ad_oe})$$

$$P_{kz}=10.7*p_{one_and_half}*B_z^{5/4}*Gz$$

%additional losses on the surface of the tips from the stator serration during a short circuit

$$P_{pk}=0.2*(2*p*X_{ad_oe})/(Z1*(k_{\sigma}-1))^2*P_{p0}$$

%additional losses on the surface of the tip from the higher harmonic components of the stator during a short circuit

$$k_{ap}=0.055$$

$$P_{ap_p_k}=(2.1*(q1)^{1/3})*(k_{ap}*X_{ad_oe}/(k_f-1))^2*P_{p0}$$

%sum of the additional losses in the short circuit

$$P_{kd}=P_{ed}+P_{kz}+P_{pk}+P_{ap_p_k}$$

%total losses due to short circuit and at rated stator current

$$P_{kn}=P_e+P_{kd}$$

%excitation losses

$$\nu_f=0.92$$

$$r_f=0.213$$

$$P_f=r_f \cdot I_{fn}^2 / \nu_f$$

%ventilation losses

$$v=2 \cdot f \cdot \tau$$

$$g_0=1.22 \text{ %kg/m}^3 \text{ for gas}$$

$$k_q=1.4$$

$$k_v=k_q \cdot g_0 \cdot v^2$$

$$c_v=1100 \text{ %J/(m}^3\text{/C)}$$

$$Og=25 \text{ %C}$$

$$Q=(P_f \cdot \nu_f + P_{p0} + P_{ap_p_k} + P_e + P_{ed} + P_m + P_e + P_{pk}) \cdot (c_v \cdot Og - k_v) / 1000000000; \text{ %gas flow}$$

$$P_v=k_v \cdot Q$$

%friction loss in bearings (thrust bearing and guide bearing)

$$k_N=1.45 \cdot 10^{-7}$$

$$N_N=9.633 \cdot 10^5$$

$$P_N=k_N \cdot ((N_N^3) \cdot \Omega_n^3)^{1/2}$$

%mechanical losses total

$$P_T=P_v+0.5 \cdot P_N$$

%full losses at nominal load

$$\sigma_P=P_{m0}+P_{kn}+P_f+P_T$$

%efficiency at nominal load

$$\text{NU}=1-\sigma_P / (S_n \cdot 1000 \cdot \text{pf} + \sigma_P)$$

```
weight_copper=G_m1+G_c+G_k
weight_steel=Ga+G_m+G_0
price_copper=4.9
price_steel=0.4
losses=sigma_P/1000 %kWh
kWh_price=0.03
costs=weight_steel*price_steel+losses*kWh_price+weight_copper*price_copper
OR2=table(Sn,Un,pf,f,Np,nn,nr,NU,sigma_P,weight_copper,weight_steel,costs)
end
```