

Tehnologija izrade statorskog segmentnog lima sinkronog hidrogeneratora

Broz, Marko

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:755482>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-01**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ

MARKO BROZ

**TEHNOLOGIJA IZRADE STATORSKOG
SEGMENTNOG LIMA SINKRONOG
HIDROGENERATORA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ

MARKO BROZ

**TEHNOLOGIJA IZRADE STATORSKOG
SEGMENTNOG LIMA SINKRONOG
HIDROGENERATORA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor

Dipl. ing. Marijan Brozović

Karlovac, 2016.

SAŽETAK

Završni rad sastoji se od teorijskog dijela, tehnološkog procesa izrade magnetske jezgre (paketa statora) i tehnologije izrade statorskog segmentnog lima.

Teorijski dio ukratko prikazuje princip rada sinkronog hidrogeneratora opisujući i njegove glavne dijelove. Uz sve bitne dijelove sinkronog generatora kao što su stator, rotor i uzbuda ukratko je opisan i statorski paket (magnetska jezgra) koji čini vrlo važan dio aktivnog dijela stroja. U teorijskom dijelu opisno su prikazani i ostali dijelovi (pozicije) koji se koriste u izradi magnetske jezgre, te magnetska svojstva materijala za izradu statorskog segmentnog lima kao najvažnije komponente lamelirane jezgre.

Opisom tehnološkog postupaka izrade paketa statora predstavljamo tehnološki proces, kao dio proizvodnog procesa u koji su uključene sve one aktivnosti koje se odvijaju pri izradi dijelova, sklopova i podsklopova, a ugrađuju se u finalni proizvod.

U završnom dijelu rada prikazana je kompletna tehnologija izrade statorskog segmentnog lima kao dio proizvodnog procesa koji obuhvaća sve aktivnosti na radnom predmetu od ulaska materijala pa sve do njegovog izlaska u vidu gotovog proizvoda spremnog za ugradnju. Na uzorcima koji su uzeti iz proizvodnje provedena su sva potrebna ulazna i međufazna ispitivanja s prikazom dobivenih rezultata.

Priprema uzoraka, kao i sva međufazna ispitivanja prema internim kontrolno ispitnim propisima i ISO normama provedena su u tvornici Končar GiM-a u Zagrebu, dok je dimenzionalna kontrola štancanog uzorka lima provedena u tvornici Kralj Metala Alati d.o.o. iz Zagreba.

ABSTRACT

The final work consists of a theoretical part, the technological process of magnetic core stacking (stator package) and technology of stator segment sheet production.

The theoretical part summarizes the working principle of synchronous hydro generator and describing its most important parts. With all the essential parts of a synchronous generator, such as stator, rotor and excitation, briefly is described and the stator packaging process (magnetic core) which makes very important part of the active part of the machine. The theoretical part describes other parts of that are used in production of magnetic core and magnetic properties of materials for production of the stator segment sheet as the most important component of a laminated core.

Description of the technological processes of stator core production we present technological process as part of the manufacturing process that involves all the activities that takes place in the preparation of parts, assemblies and subassemblies which are installed in the final product.

In the final part of the paper, complete technology of stator segment sheet is presented as part of the production process which includes all activities on the workpiece material from entering the process until his release in the form of a finished product ready for installation. On the samples that are taken from the production all the necessary incoming and intermediate tests are carried out showing the measured results.

Sample preparation and all intermediate tests are carried according to internal control testing regulations and ISO standards at the factory Koncar GIM in Zagreb, while the dimensional control stamped sheet sample was conducted at the factory King Metal Tools Ltd. from Zagreb.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. HIDROGENERATOR (SINKRONI STROJ)	2
2.1. Princip rada sinkronog stroja	4
2.2. Izvedbe sinkronih strojeva	5
3. PAKET STATORA	6
4. MATERIJALI ZA IZRADU MAGNETSKIH KRUGOVA (PAKETA STATORA)	8
4.1. Ponašanje u magnetskom polju	8
4.1.1. Permeabilitet	9
4.1.2. Petlja histereze	10
4.1.3. Gubici kod magnetiziranja	11
4.1.4. Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja	12
4.2. Podjela magnetskih materijala	12
4.2.1. Mekomagnetske jezgre	13
4.2.2. Tvrde magnetske jezgre (Permanentni magneti)	14
4.3. Izvedbe jezgri	14
4.4. Materijali za meke magnete	15
4.4.1. Tehnički čisto željezo i meki čelici	15
4.4.2. Grupa ferosilicijskih legura	16
4.4.3. Grupa feronikalnih legura	17
4.4.4. Praškaste mekomagnetske jezgre	19
4.4.4.1. Metalne praškaste jezgre	19
4.4.4.2. Feritne (magnetno keramičke) jezgre	20
4.5. Materijali za tvrde magnete (Permanentni magneti)	20
4.5.1. Ugljični i legirani čelici	21
4.5.2. Disperzno kaljeni	22
4.5.3. Duktilni materijali	22
4.5.4. Kobalt - rijetke zemlje	22
4.5.5. Oksidni magneti (Feriti, Keramički magneti)	23
5. OSNOVNI DIJELOVI (POZICIJE) PAKETA STATORA	24
5.1 Statorski segmentni lim	24

5.1.1. Sustavi tlačenja paketa statora	24
5.2. Lim s odstojnim ulošcima	26
5.3. Segment tlačne ploče s tlačnim prstima	26
5.4. Trapezna letva	27
5.5. Latica	28
6. TEHNOLOŠKI POSTUPAK IZRADE PAKETA STATORA	29
6.1. Centriranje kućišta statora i mjernog stupa	29
6.2. Slaganje probnih paketa (donjeg i gornjeg)	30
6.3. Postavljanje latica	32
6.4. Postavljanje trapeznih letvi	32
6.5. Postavljanje segmenata donjih (PS) tlačnih ploča	33
6.6. Postupak paketiranja	33
6.6.1. Korekcija razlika visine paketa	36
6.7. Prešanje statorskog paketa	37
6.7.1. Međuprešanje I-IV	38
6.7.2. Završna prešanja preko matica V i VI	39
6.8. Kontrola geometrije statorskog paketa	40
6.9. Zagrijavanje i vibriranje statorskog paketa (paket sa „palačinkama“)	41
7. TEHNOLOGIJA IZRADE STATORSKOG SEGMENTNOG LIMA	
HIDROGENERATORA	43
7.1. Nabava feromagnetskog dinamo lima i provjera karakteristika istog	43
7.1.1. Tehnički zahtjevi za nabavku dinamo lima u kvaliteti M230-50A	45
7.1.2. Ispitivanje magnetskih karakteristika dinamo lima M230-50A	49
7.1.2.1. Mjerenje gubitaka vatmetričkom metodom Epstein aparatom	50
7.2. Izrada statorskog segmentnog lima tehnikom štancanja (obrada bez odvajanja čestica postupkom rezanja)	56
7.2.1. Mjerenje veličine srha statorskog segmentnog lima nakon štancanja	59
7.3. Skidanje srha na statorskim segmentnim limovima brušenjem	61
7.4. Izolacija statorskog segmentnog lima na stroju „GENERAL“	64
7.4.1. Ispitivanje tehnoloških svojstava lakiranih (izoliranih) limova	67
7.4.1.1. Mjerenje debljine izolacijskog sloja statorskog segmentnog lima	67
7.4.1.2. Mjerenje faktora punjenja i mjerenje probvoja izolacionog laka	70

7.4.1.2.1. Određivanje faktora punjenja	70
7.4.1.2.2. Mjerenje proboja izolacionog laka	73
8. ZAKLJUČAK	76
12. LITERATURA	77

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer cijevnog hidrogeneratora s turbinom uronjenog u tok vode [4]	2
Slika 2. Primjer statora hidrogeneratora [4]	5
Slika 3. Primjer paketa statora u izradi (5 dionih paketa) [9]	7
Slika 4. Ovisnost permeabiliteta o magnetskoj indukciji [6]	9
Slika 5. Petlja histereze [6]	10
Slika 6. Statorski segmentni lim [9]	24
Slika 7. Lim s odstoynim ulošcima [7]	26
Slika 8. Segmentne tlačne ploče [9]	27
Slika 9. Trapezne letve i latice zavarene na prirubnicu kućišta statora [9]	28
Slika 10. Kućište statora s osnovnim dijelovima [9]	29
Slika 11. Donji probni paket [9]	30
Slika 12. Gornji probni paket [12]	31
Slika 13. Postavljanje trapeznih letvi [9]	32
Slika 14. Krajnji lijepljeni dioni paket izrađen od „palačinki“ [9]	34
Slika 15. Dioni paketi razdvojeni limovima s odstoynim ulošcima [9]	36
Slika 16. Prešanje paketa statora po fazama tijekom procesa izrade [8]	38
Slika 17. Završno prešanje paketa statora preko matica [9]	39
Slika 18. Dijagram zagrijavanja paketa statora [5]	41
Slika 19. Odnos permeabiliteta i gubitaka pojedinih kvaliteta feromagnetskog lima za vrijednost 1.5T [12]	44
Slika 20. Prikaz Epsteinova aparata s kvadratično formiranom jezgrom [13]	51
Slika 21. Jezgra i kontrolna jedinica Epstein aparata [14]	51
Slika 22. Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u magnetskim limovima [9]	51
Slika 23. Prikaz štance na preši Metalna DRS – V125 [9]	56
Slika 24. Prikaz mjerenih kota po X – osi statorskog segmentnog lima [9]	58
Slika 25. Mjerenje veličine srha optičkim srhomjerom s prikazom veličine srha [9]	59
Slika 26. Proces skidanja srha s limova na brusilici MO/D-1300 [9]	61
Slika 27. Proces ulaska limova na u brusilicu MO/D-1300 [94]	62
Slika 28. Linija za lakiranje „GENERAL“ u tvornici Končar GiM-a [9]	64
Slika 29. Uređaja za nanošenje laka (Tomanin) [9]	66

Slika 30. Mjerenje debljine izolacionog laka na statorskom segmentnom limu LEPTOSKOPOM [9]	67
Slika 31. Vaganje limova [9]	71
Slika 32. Slaganje limova u prešu, tlačenje limova, i mjerenje rastojanja ploča preše [9]	72
Slika 33. Izmjerene vrijednosti rastojanja ploča preše, tj. debljine sloga limova [9]	72
Slika 34. Slog od 2 lima u preši [9]	73
Slika 35. Slog od 40 limova u preši [9]	73
Slika 36. Razvodni ormar za postupak mjerenja limova, te gornji i donji „šiljak“ na pločama preše [9]	74

POPIS TABLICA

Tablica 1: Curieve temperature [6]	12
Tablica 2: Tablica 2. Usporedba hladno i toplo valjanih FeSi limova [6]	17
Tablica 3: Okvirni pregled svojstava FeNi legura [6]	18
Tablica 4: Međusobna usporedba ferosilicijskih i feronikalnih legura [6]	18
Tablica 5: Interesantne veličine kod permanentnih magnetskih materijala [6]	21
Tablica 6. Geometrijska svojstva i dopuštena odstupanja (debljina, širina, dužina, zakrivljenost bridova, valovitost te, zaostala zakrivljenost) [10]	46
Tablica 7. Karakteristike površinske izolacije [10]	48
Tablica 8. Klasifikacija površinske izolacije za dinamo limove (dio iz EN 10342) [11]	49
Tablica.9 Ulazni podaci uzorkovanog lima prije mjerenja magnetskih svojstava	52
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti uzorkovanog lima za vrijednost indukcije 1.5T	52
Tablica 11. Izračunate vrijednosti uzorkovanog lima za vrijednost indukcije 1.5T	55
Tablica 12. Izmjereni vrijednosti kota po X – osi statorskog segmentnog lima	57
Tablica 13. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja srha na uzorkovanom limu nakon štancanja	60
Tablica 14. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja srha na uzorkovanom limu nakon brušenja	63
Tablica 15. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja debljine premaza izolacije nakon prvog lakiranja	68
Tablica 16. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja debljine premaza izolacije nakon prvog lakiranja	69
Tablica 17. Mase vaganih limova	71
Tablica 18. Dozvoljene vrijednosti otpora izolacije za ispitne uzorke [21]	75

POPIS PRILOGA

Prilog 1 - Tvornički certifikat neorijentiranog dinamo lima M230-50A

Prilog 2 - Rezultati mjerenja Epstein aparatom

Prilog 3 - Crtež statorskog segmentnog lima

Prilog 4 - Primjer kompletnog mjernog izvješća za statorski segmentni lim

Prilog 5 - Rezultati mjerenje faktora punjenja

Prilog 6 - Rezultati mjerenja proboja izolacionog laka

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
p	[-]	Broj parova polova
n	[o/min]	Brzina vrtnje rotora
f	[Hz]	Frekvencija
P_{el}	[W]	Električna snaga
P_{meh}	[W]	Mehanička snaga
B	[T]	Magnetska indukcija
l	[mm]	Duljina
I	[A]	Jakost struje
μ	[H/m]	Permeabilitet
H	[A/m]	Jačina magnetskog polja
B_m	[T]	Indukcija zasićenja
B_r	[T]	Remanencija
H_c	[A/m]	Koercitivna sila
N_{Fe}	[W/kg]	Gubici histereze
H_v	[W/kg]	Gubici vrtložnih struja
ρ	[$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	Specifični otpor
η	[-]	Konstanta materijala
σ	[-]	Konstanta materijala
κ	[-]	Konstanta materijala
AKZ	[-]	Antikorozivna zaštita
PS	[-]	Pogonska strana stroja
SS	[-]	Strana spojeva stroja
WPS	[-]	Welding Procedure Specification
ρ	[g/cm ³]	Gustoća
T	[°C]	Temperatura
U	[V]	Napon
m	[kg]	Masa
p	[W/kg]	Specifični gubici
N	[zav]	Broj zavoja

F_0	[-]	Faktor valnog oblika
F_{sin}	[-]	Faktor oblika za sinusoidni napon
f_{pu}	[g/cm ³]	Faktor punjenja
r	[kg]	Računska masa
A	[dm ²]	Površina
h_{sr}	[mm]	Srednja visina paketa
C_A	[-]	Konstanta ampermetra
α	[-]	Otklon ampermetra očitano u dijelovima skale

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu "**Tehnologija izrade statorskog segmentnog lima sinkronog hidrogenatora**" izradio samostalno uz potrebne konzultacije, savjete, uporabu navedene literature i uređaja za ispitivanje.

Marko Broz

ZAHVALA

Zahvaljujem prof. Marijanu Brozoviću, dipl. ing., na ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva, te na savjetima i pomoći pri izradi Završnog rada.

Zahvaljujem svim kolegama i suradnicima iz tvrtke Končar – Generatori i motori d.d. na suradnji i stečenim znanjima.

Posebno zahvaljujem kolegama iz odjela Nabave, Tehnologije, Ulazne i Međufazne kontrole, kao i kolegama iz Proizvodnje tvornice Končar GiM na susretljivosti, nesebičnoj pomoći, strpljenju i korisnim sugestijama, kao i na ustupljenim podacima i literaturi.

Na kraju bih se zahvalio svojoj obitelji na moralnoj podršci, te povjerenju koje su mi ukazali tokom studija.



1. UVOD

Energija vodotoka (tj. rijeka – ili hidroenergija) je obnovljivi izvor energije koji ne zagađuje okoliš i ne ispušta štetne plinove u atmosferu. Da je danas potpuno razvijen, hidropotencijal bi pokrивao pola svjetske potražnje za električnom energijom, a ovako u opskrbi sudjeluje sa manje od 20%. Time se vidi da je neiskorišteni potencijal za izgradnju hidroelektrana još uvijek velik, posebno jer je tehnologija poznata i provjerena, te već sada konkurentna fosilnim oblicima energije. Od svih obnovljivih izvora hidroelektrane su najrazvijenije i čine najveći udio u proizvodnji električne energije u svijetu. Hidroelektrana je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine, te konačno u električnu energiju u hidrogeneratoru.

Proizvodnja električnih generatora svih navedenih vrsta ima u Hrvatskoj dugu tradiciju. Prema vlastitim projektnim, konstrukcijskim i tehnološkim rješenjima, zagrebačka tvornica, danas Končar – Elektroindustrija, proizvodi od 1949. hidrogeneratore, dizelske generatore, asinkrone generatore i generatore istosmjernoga napona i struje. U toj je tvornici do 1995. izrađeno 330 različitih vertikalnih i horizontalnih hidrogeneratora ukupne snage veće od 11 000 MVA, u što je uključeno 15 tzv. cijevnih hidrogeneratora ukupne snage 330 MVA. Oko 100 velikih hidrogeneratora ukupne snage 4000 MVA izvezeno je u 24 države na pet kontinenata [1].

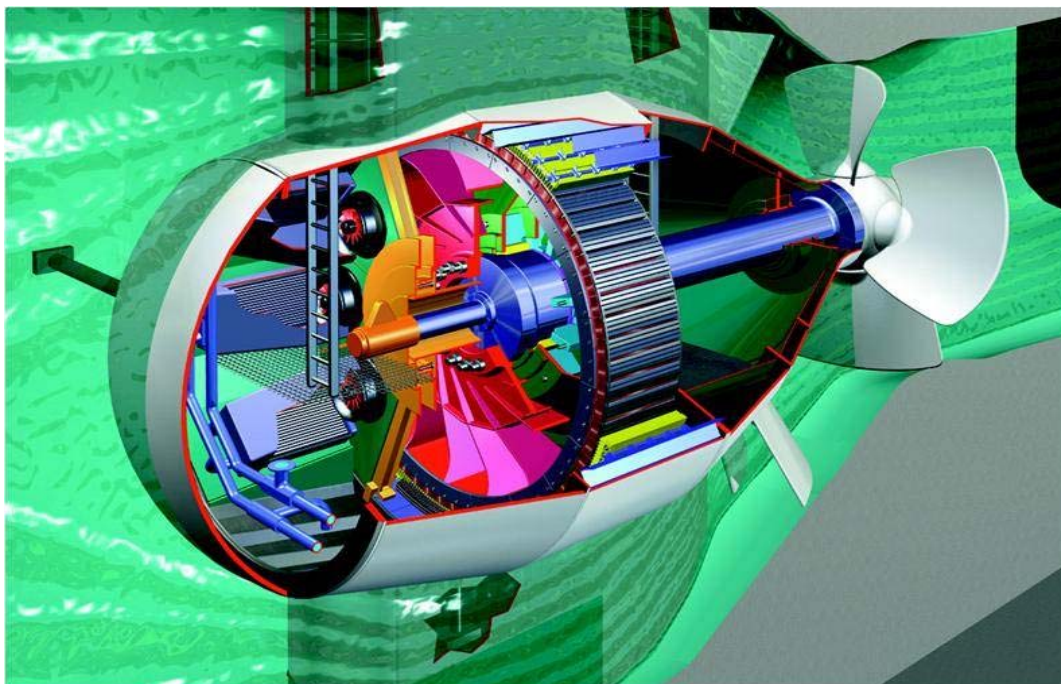
Glavna prednost hidroelektrana je njihova sposobnost da pokriju sezonsku i dnevnu vršnu potražnju za električnom energijom. Kada se smanji potražnja, brana jednostavno pohranjuje više vode, koja onda daje snažniji tok. Neke hidrocentrale koriste brane za pohranu viška energije (često tijekom noći) tako da hidrogenerator koriste kao pumpu koja vodu vraća u akumulaciju. Električna se energija može opet generirati u slučaju porasta potražnje. Ne zahtijevaju sve hidroelektrane branu: neke koriste protok samo dijela toka rijeke, što je karakteristika manjih hidroelektrana.

2. HIDROGENERATOR (SINKRONI STROJ)

Hidrogeneratori su najčešće sporohodni strojevi, izvedeni s istaknutim polovima. Pogoni ih vodna turbina, po čemu su i dobili naziv. Brzina vrtnje turbine jako ovisi o količini vode i pritisku (pad vode) i obično se kreće 50 –1000 o/min. Generator treba biti prilagođen turbini, pa i on mora imati istu brzinu vrtnje. Mala brzina vrtnje rotora n zahtijeva veliki broj pari polova p hidrogenatora prema relaciji:

$$p = \frac{60f}{n}$$

Tako za slučaj brzine vrtnje turbine $n = 50$ o/min i za frekvenciju $f = 50$ Hz potreban broj pari polova hidrogenatora iznosi $p = 60$, odnosno broj polova je $2p = 120$. Rotor hidrogenatora se izvodi uvijek s izraženim polovima na kojima je smješten koncentrirani uzбудni namot. Takav rotor može za veliki broj polova imati jako veliki promjer (gotovo 20 m), pa su obodne brzine znatne (~100 m/s). Tako i ovi rotori mogu biti jako napregnuti centrifugalnim silama. Hidrogeneratori se izvode najčešće s vertikalnom osovinom. Postoje i izvedbe s horizontalnom osovinom, posebno kod cijevnih generatora koji su uronjeni u tok vode, a turbina je napravljena poput propelera (slika 1) [2].



Slika 1. Primjer cijevnog hidrogenatora s turbinom uronjenog u tok vode [4]



Na statoru sinkronog stroja je u većini slučajeva smješten armaturni namot (najčešće trofazni) koji je simetrično raspoređen u utorima po obodu stroja.

Naziv *armaturni* označava dio stroja u kojem se pod utjecajem promjene magnetskog toka inducira napon i kroz koji teku struje opterećenja. Mora biti dimenzioniran tako da može trajno podnositi nazivne vrijednosti napona i struja. Osnovni cilj je dobiti tri uravnotežena sinusna napona koji sadrže vrlo malo viših harmonika (harmonici napona i struje su štetni za stroj i ostalu opremu). Da bi se ostvario odgovarajući napon armature, taj se namot slaže od niza vodiča formiranih u zavoje i svitke. Svi međusobno spojeni svici tvore fazni namot. Iznos induciranog napona na namotima statora je funkcija jakosti magnetskog polja, brzine vrtnje rotora i broja namota na statoru. Vodiči se smještaju u utore kontinuirano po cijelom obodu statora. Presjeci vodiča dimenzioniraju se za odgovarajuće struje, a kod najvećih generatora ti se vodiči izvode od većeg broja dionih vodiča, da ne bi presjek tih elementarnih bakrenih vodiča bio prevelik i da bi se smanjili dodatni gubici zbog potiskivanja struje [2].

Uzbudni namot je smješten na rotoru, na posebno oblikovanim istaknutim polovima, kod izvedbe za manje brzine (hidrogeneratori) ili u utorima cilindričnog rotora za izvedbe strojeva većih brzina (turbogeneratori). Uzbudnim namotom teče istosmjerna struja i stvara uzbudno protjecanje, odnosno magnetski tok [2].

Napajanje uzbude na rotoru ostvaruje se preko kliznih kolutova koji se ugrađuju na rotor i četkica na statoru koje kližu po rotorskim kolutima. Osim tog klasičnog sustava napajanja uzbude postoje i takozvani beskontaktni sustavi uzbude kod kojih se istosmjerna struja dobiva iz rotacijskog izmjeničnog uzbudnika s armaturom na rotoru i rotirajućeg ispravljača. Namot uzbude za generatore s istaknutim polovima (hidrogeneratore) koji imaju koncentrirani namot oko polova bitno se razlikuje u izvedbi od onog za generatore s cilindričnim rotorom (turbogeneratore) kod kojih je uzbudni namot smješten u utorima. Uzbudni je namot kod generatora s istaknutim polovima izveden od koncentričnih svitaka. Svitak je kod malih strojeva izveden s mnogo zavoja izoliranih najčešće staklenim opletom učvršćenim lakom. Kod velikih strojeva broj zavoja na polu se smanjuje pa se taj namot najčešće radi od plosnatog neizoliranog bakra u jednoslojnoj izvedbi. Zavoji se međusobno izoliraju ulošcima, prema polnoj jezgri odgovarajućim folijama, a s gornje i donje strane namota tvrdim izolacijskim pločama. Prednost jednoslojnih namota je u učinkovitijem hlađenju jer uz svaki vodič struji rashladni zrak [2].

Moguće su i izvedbe sinkronih strojeva bez uzbudnog namota. Sinkroni strojevi se rijetko izvode s uzbudom na statoru, a armaturom na rotoru.

Magnetsko polje koje stvara uzbuda na rotoru vrti se uslijed mehaničke vrtnje rotora. U vodičima statorskog namota inducira se elektromotorna sila, i kad je stroj opterećen poteku struje. Struje u statorskom namotu stvore okretno protjecanje koje se vrti jednakom brzinom kao i rotor, dakle sinkrono s rotorom. Po tome je ova vrsta stroja i nazvana sinkroni stroj [3].

2.1. Princip rada sinkronog stroja

Svi veliki generatori su trofazni strojevi. Pri pretvorbi energije s jedne strane je električna, a s druge strane mehanička snaga. I jedna i druga snaga mogu se dovesti ili odvesti iz stroja ako postoji :

$$P_{el} = E I = v B l I$$

$$P_{meh} = F v = I l B v$$

- magnetsko polje indukcije
- vodič koji duljinom l leži u polju indukcije
- mogućnost relativnog gibanja vodiča prema silnicama magnetskog polja nekom brzinom v
- priključci vodiča na vanjski strujni krug preko kojih se može vodiču dovesti ili od njega odvesti struja I
- mehanički uređaj za prijenos sila i momenta od vodiča do osovine, ili obratno

Kao što je poznato, kada kroz vodič protječe struja oko vodiča se stvara magnetsko polje. Namatanjem vodiča povećava se iznos magnetskog polja unutar zavoja, a pritom se ne povećava iznos struje koja stvara polje. U generatoru je ukupno magnetsko polje rezultat magnetskog polja koje stvara uzbudna struja i magnetskog polja koje stvaraju struje armature. Protjecanjem uzbudne struje kroz uzbudni namot na rotoru dobivamo elektromagnet. Budući da se rotor vrti sinkronom brzinom, može se reći i da se magnetsko polje koje stvara uzbudna struja također vrti, tj. da postoji okretno magnetsko polje. Da bi magnetsko polje koje stvaraju struje armature također bilo okretno polje konstantne amplitude, osi triju faza namota armature međusobno su pomaknute za 120 stupnjeva. Uz pomoć matematičke analize pokazuje se da ako tri sinusne struje (jednakog iznosa i pomaknute za 120 stupnjeva električkih) teku kroz namote u zračnom rasporu stroja koji su međusobno pomaknuti za 120 stupnjeva, stvoriti će se magnetsko polje konstantnog iznosa. Frekvencija kojom magnetsko polje rotira jednaka je frekvenciji kojom struje teku kroz namote [3].

Konstantni iznos magnetskog toka omogućuje da se stotine megawata pretvore, u električnom stroju, iz mehaničke energije u električnu energiju i obratno, bez većih mehaničkih ograničenja. Važno je zapamtiti da konstantni iznos magnetskog toka proizvodi konstantni iznos momenta.

2.2. Izvedbe sinkronih strojeva

Stator sinkronog stroja je napravljen u obliku šupljeg valjka koji se naziva statorski paket. Sastavljen je od prstenastih, međusobno izoliranih magnetskih limova koji su složeni paralelno tako da tvore takozvani paket. S unutarnje strane prstenova, u limovima su izrezani utori. To su otvori odgovarajućih oblika koji su simetrično raspoređeni po presjeku lima. Slaganjem limova oblikuju utore uzduž statorskog paketa, u provrtu statora. Kružni vijenac između utora i vanjskog promjera statorskog paketa se naziva jaram statora (slika 2) [3].



Slika 2. Primjer statora hidrogenatora [4]

Dijelovi limova između utora su zubi. U utore se smješta armaturni, višefazni, obično dvoslojni namot. Pretežno se koristi trofazni namot u zvijezda spoju. Namot svake faze čine serijski vezani svici koji se sastoje od jednog ili više zavoja.

Kod strojeva s istaknutim polovima svaki pol ima jezgru, uzbudni namot i polnu papuču. Uzbudni namot može biti napravljen od bakrenih vodiča okruglog ili profilnog oblika, složenih u jedan ili više slojeva. Uzbudni namot je tako spojen da se naizmjenično nalaze sjeverni i južni magnetski polovi. U rotoru je magnetski tok uzbuđen istosmjernom strujom, pa je i on istosmjernan. Stoga svi dijelovi na rotoru mogu biti od masivnog željeza. Međutim, često se izvode od limova zbog smanjenja dodatnih gubitaka, a i zbog konstrukcijskih razloga [3]. Jaram rotora mora biti magnetski i mehanički dimenzioniran da vodi potreban magnetski tok i da podnese centrifugalnu silu kojom je napregnut cijeli rotor pri vrtnji. Kod velikih strojeva s istaknutim polovima promjer rotora je jako velik, pa je između jarma i osovine potrebno staviti glavinu (zvijezdu rotora). Glavina rotora ne vodi magnetski tok, već služi samo za mehaničku vezu između jarma i osovine. Osovina se vrti u ležajevima, a može biti postavljena horizontalno ili vertikalno [3].

Vertikalne izvedbe se koriste uglavnom kod hidrogeneratora. Horizontalne izvedbe se koriste i kod cijevnih generatora. To su generatori za protočne elektrane. Pri tome je cijeli generator u odgovarajućem kućištu uronjen u tijek vode, koja ga oplakuje sa svih strana. Kućište sinkronih strojeva se radi od čelika, a može biti različitih oblika. Služi kao zaštita paketa i namota, te kao nosač čitavog stroja [3].

3. PAKET STATORA

Statorski paket čini vrlo važan dio aktivnog dijela stroja. Paket se slaže iz hladno valjanih neorjentiranih dinamo limova debljine 0,35mm i najčešće 0,5 mm, da bi se izbjegle vrtložne struje, a prema tome i gubici (slika 3). Gubici su dio elektromagnetske energije, koja se pretvara u toplinu. Kod velikih strojeva paket se slaže iz segmenta u prsten. Slaganje paketa može biti s 1/2 ili 1/3 preklopa nakon svakog sloja. U Končar GiM-u se statorski lim slaže s preklopom u svakom sloju, izuzetak je lijepljeni sloj na krajevima paketa. Segmenti se na taj način slažu u diobene pakete između kojih se nalaze odstojni ulošci koji omogućuju strujanje zraka i ravnomjerno hlađenje paketa i namota. Paket se, ovisno o izvedbi sustava tlačenja, pomoću trapeznih letvi ili svornjaka, učvršćuje u kućište te se tlači u kućištu s tlakom od 0,6 do 1,5 MPa i na kraju se učvršćuje s tlačnim pločama na kojima su zavareni tlačni prsti [5].

Statorski paket mora biti kompaktan kako bi se spriječile vibracije, trošenje materijala i izvijanje lima. Iskustvene i dokazane vrijednosti tlakova prešanja od 0,6 do 1,5 MPa u praksi koriste se za dimenzioniranje tlačnih elemenata statorskog paketa.

Funkcija sustava tlačnih elemenata je zadržati što veći dio tlaka u paketu nakon prešanja i na taj način osigurati dovoljan ostatni tlak u paketu neovisno o termičkim utjecajima ili dugotrajnom slijeganju paketa. Statorski paket velikih hidrogeneratora izloženi su značajnim vibracijama i toplinskim utjecajima, pa je zadatak tlačnih elemenata kompenzirati deformacije uslijed tih utjecaja i osigurati dovoljan ostatni tlak paketa [5].



Slika 3. Primjer paketa statora u izradi (5 dionih paketa) [9]

Kod generatora kod kojih postoji velika temperaturna razlika između temperature kućišta i samog paketa potrebno je paziti na termičke ekspanzije paketa i kontrakcije kućišta,



te ostaviti dovoljan zazor između trapezne letve i lastinog repa na limu kako se paket ne bi naslonio na kućište i tako povećao unutrašnja naprezanja što dovodi do gubitka geometrije statorskog paketa. Karakteristika ovog problema je pojava valovitosti statorskog paketa.

Cirkularni zazor između segmenta lima također mora biti dovoljan da ne bi došlo do izvijanja lima uslijed termičke ekspanzije lima pri radnoj temperaturi hidrogeneratora. Tlak u paketu je ograničen čvrstoćom izolacijskog laka.

Ako je tlak prevelik izolacijski lak se može oštetiti i vremenom istisnuti pa dva lima mogu doći u kontakt, te se time povećavaju gubici željeza, a ako je tlak premalen može doći do razlistavanja paketa u radu, povećanih vibracija i trošenja materijala.

Promjer je znatno veći od duljine kod sporohodnih hidrogeneratora. Kućišta se radi velikih promjera, a zbog transporta izrađuju u dijelovima i transportiraju s u njima ugrađenim segmentima paketa. Postoje izvedbe gdje je kućište višedijelno, ali se paket slaže na elektrani u krug i čini jednodijelni paket. Time se postiže velika monolitnost paketa [5].

4. MATERIJALI ZA IZRADU MAGNETSKIH KRUGOVA (PAKETA STATORA)

Magnetski materijali za izradu statorskog segmentnog lima tj. za izradu paketa statora imaju osnovni zadatak da usmjereno vode magnetski tok i time omogućuju elektromagnetske pretvorbe na kojima se zasniva njihova funkcija. Za izradu statorskog segmentnog lima koriste se materijali koji izrazito dobro vode magnetski tok. Praktički svi materijali su magnetski, ali su samo feromagnetski i ferimagnetski od praktičke važnosti u tehnologiji, jer se lako magnetiziraju relativno slabim poljem (H), pa ćemo na te materijale i misliti kad govorimo o magnetskim materijalima [6].

Prirodni feromagnetski materijali su željezo, nikal, kobalt, gadolinij, te neke legure koje mogu biti sastavljene i od elemenata koji nisu feromagnetici.

4.1. Ponašanje u magnetskom polju

Vrijednost materijala za izradu magnetske jezgre ne mjerimo samo vodljivošću magnetskog toka nego i po cijelom nizu ostalih svojstava, kako ponašanja u magnetskom polju tako i ostalih (električkih, tehnoloških). Jedan od prvih kriterija je veličina magnetskog toka, koji taj materijal propusti pri određenom magnetskom polju (6).

Uvodimo pojam magnetske indukcije (B), to jest gustoće magnetskog toka (Vs/m^2) ili (T). Dok je kod zraka, paramagnetskih i diamagnetskih materijala taj odnos linearan, kod feromagnetskih materijala on to nažalost nije. Krivulja ovisnosti magnetske indukcije o veličini magnetskog polja naziva se krivulja magnetiziranja ili B/H karakteristika [6].

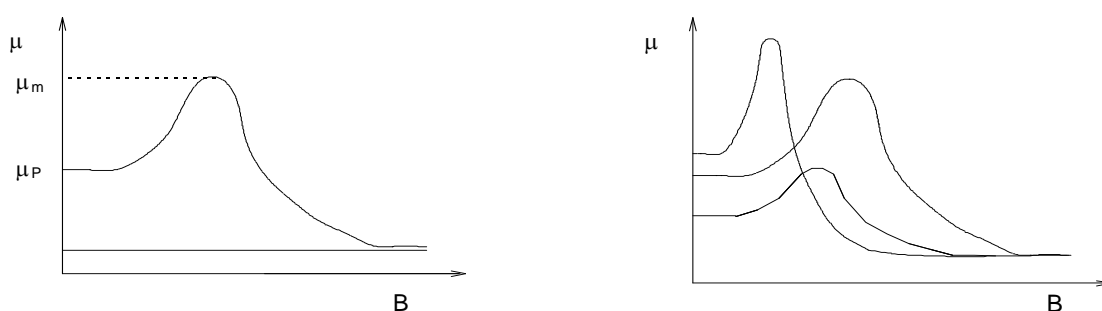
4.1.1. Permeabilitet

Permeabilitet (μ) je ustvari magnetska vodljivost, a definiran je kao odnos magnetske indukcije i magnetskog polja (slika 4).

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left(\frac{Vs}{Am} \right)$$



Slika 4. Ovisnost permeabiliteta o magnetskoj indukciji [6]

Uvedena je veličina relativni permeabilitet (μ_r), koji nam ustvari govori koliko neki materijal bolje vodi magnetski tok od zraka odnosno vakuuma. Kako je krivulja magnetiziranja nelinearna, tako je i permeabilitet (slika 4) promjenjiva veličina, pri čemu su za nas naročito interesantne dvije veličine i to [6] :

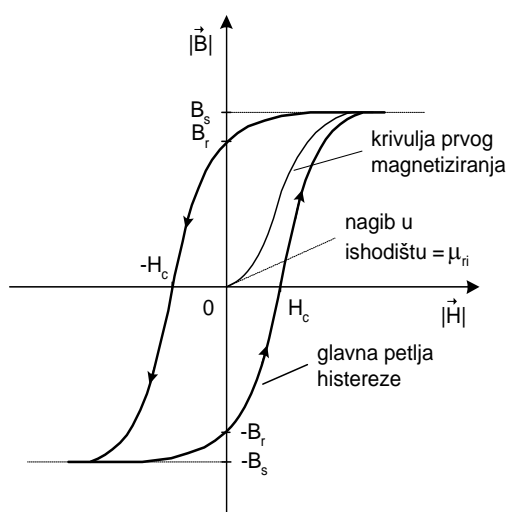
- početni permeabilitet (μ_p) određen početnim nagibom krivulje magnetiziranja (mjeri se kod vrlo malog polja reda veličine 10^{-5} A/m) te,
- maksimalni permeabilitet (μ_m) određen maksimalnim nagibom krivulje magnetiziranja,
- diferencijalni permeabilitet određen je strminom krivulje magnetiziranja u bilo kojoj točki.

Iz svega do sada navedenog vidljivo je da permeabilitet ovisi o:

- vrsti feromagnetika,
- stupnju magnetiziranja,
- stanju strukture,
- temperaturi.

4.1.2. Petlja histereze

Kako je krivulja magnetiziranja ireverzibilna magnetiziranje i razmagnetiziranje ne ide istim putem. Ukoliko bi izvršili cijeli krug magnetiziranja što znači: materijal namagnetizirati do



zasićenja, razmagnetizirati ga, namagnetizirati ga u suprotnom smjeru do zasićenja te ga ponovo razmagnetizirati dobili bi petlju histereze (slika 5). Karakteristične točke na krivulji su:

B_m (B_z) indukcija zasićenja, maksimalna indukcija do koje se može materijal namagnetizirati

B_r remanencija, gustoća magnetskog toka koja ostane u materijalu koji je, nakon magnetiziranja do zasićenja, izvađen iz polja.

Slika 5. Petlja histereze [6]

H_c koercitivna sila, jakost polja suprotnog smjera potrebna da se materijal, magnetiziran do zasićenja, razmagnetizira. Površina obuhvaćena histerezom znači ustvari akumuliranu energiju magnetiziranja, koja je zadržana u materijalu, a to su ustvari gubici magnetiziranja.

Osim statičke postoji i dinamička petlja histereze. Razlika je u tome što dinamička petlja histereze obuhvaća i dodatne gubitke zbog magnetske tromosti materijala. Viša frekvencija - šira petlja histereze [7].

Ove veličine su za razne materijale veoma različite, od vrlo malih do vrlo velikih. Indukcija zasićenja (B_m) može biti od nekoliko dijelova Tesla pa do preko 2 Tesla, isto tako i remanencija (B_r),

a koercitivna sila (H_c) se kreće od nekoliko desetinki A/m pa do stotinjak kA/m. Koercitivna sila je ujedno veličina po kojoj se magnetski materijali u primjeni dijele na meke, koji imaju male koercitivne sile i tvrde koji imaju velike koercitivne sile [7].

4.1.3. Gubici kod magnetiziranja

Gubici magnetiziranja dijele se u dva dijela, i to gubitke histereze i gubitke vrtložnih struja. Gubici histereze ovise o magnetskim svojstvima materijala (širina petlje histereze, permeabilitet, magnetsko kašnjenje), a gubici vrtložnih struja ovise o električkim svojstvima materijala (specifični električni otpor) [6].

gubici histereze:

$$N_h = \eta f B_m^2$$

gubici vrtložnih struja:

$$N_v = \sigma f^2 B_m^2 \quad \sigma = \kappa \frac{a^2}{\rho}$$

gdje je:

- η , σ i κ konstante materijala,
- B_m = maksimalna indukcija do koje je izvršeno magnetiziranje,
- f = frekvencija struje magnetiziranja,
- a = površina kroz koju se zatvaraju vrtložne struje,
- ρ = specifični električni otpor,

sveukupni gubici magnetiziranja su dakle:

$$N = N_h + N_v = \eta f B_m^2 + \sigma f^2 B_m^2$$

Iz ovih formula je vidljivo da su gubici vrtložnih struja naročito opasni kod visokih frekvencija, jer rastu s kvadratom frekvencije. Ujedno je vidljiv i način borbe protiv njih, a to su smanjenje površine kroz koju se zatvaraju vrtložne struje (lameliranje jezgre), te povećanje specifičnog otpora (upotreba legura) [6].

4.1.4. Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja

Porastom temperature slabe magnetska svojstva materijala. Indukcija zasićenja pada, a krivulja se linearizira, da bi pri određenoj temperaturi prerasla u pravac, te se materijal počeo ponašati kao paramagnetski materijali [6].

Taj proces je reverzibilan, jasno ako materijal nije prethodno termički obrađen, kako bi se dobila neka specijalna struktura u svrhu poboljšanja magnetskih svojstava, te nakon hlađenja materijal poprima svoja prethodna svojstva. Ukoliko je materijal bio prethodno termički obrađen, trajno gubi svojstva postignuta tom obradom. Temperatura kod koje se feromagnetski materijal počeo ponašati kao paramagnetski naziva se Curieva točka ili Curieva temperatura, a za pojedine feromagnetske elemente iznosi kako je pokazano u tablici 1 [6].

Tablica 1. Curieve temperature [6]

Element	Željezo (Fe)	Kobalt (Co)	Nikal (Ni)	Gadolinij (Gd)
Temperatura (°C)	769	1125	356	16

Iz navedenih temperatura je vidljivo zašto gadolinij pri normalnim temperaturama slabo pokazuje feromagnetski efekt, i ima malu praktičnu vrijednost.

4.2. Podjela magnetskih materijala

Magnetske materijale, odnosno magnetske jezgre sa stanovišta ponašanja pri magnetiziranju i razmagnetiziranju dijelimo na meke i tvrde magnetske materijale.

Mekim magnetskim materijalima smatramo one u kojima već veoma malo vanjsko magnetiziranje stvara veliki magnetski tok, a kad vanjsko polje nestane tok se gubi ili je zanemariv. Idealno bi bilo da nema histereze.

Tvrđima magnetskim materijalima smatramo one u kojima nakon magnetiziranja i uklanjanja vanjskog polja zaostane značajan magnetski tok, pri čemu za tvrdoću nije bitno kako veliko magnetiziranje smo trebali da stvorimo taj tok.

U tvrdima magnetskim materijalima ostane značajna akumulirana energija. Tok postoji i kad nema vanjskog uzbudnog polja. Idealno što šira histereza [6].



Razlika je dakle u:

- strmini krivulje magnetiziranja,
- širini petlje histereze,

a to znači u μ i H_c . Razlika se može vidjeti već po samom H_c (granica $\cong 1000$ A/m).

- B_z i B_r nisu odlučujući, odnosno nisu karakteristika po kojoj se može prepoznati meki od tvrdog magnetskog materijala.
- μ i H_c su fizikalne veličine koje zavise jedna od druge i obrnuto su proporcionalne.

Zato meki magnetski materijali imaju veliki μ i mali H_c , pri čemu je oboje važno za praksu, a tvrdi magnetski materijali imaju veliki H_c i mali μ koji nije važan za praksu [6].

4.2.1. Mekomagnetske jezgre

Upotrebljavaju se u istosmjernim i izmjeničnim magnetskim krugovima, raznih frekvencija, za transformaciju struje i napona, kao induktivni elementi:

- transformatori svih vrsta,
- većina električnih strojeva,
- većina releja,
- elektromagneti,
- polni nastavci.

Zahtjevi na materijal su:

- strma krivulja magnetiziranja, veliki μ obavezno,
- uska petlja, mali H_c obavezno,
- veliki B_z , B_r poželjno,
- mala temperaturna ovisnost,
- dobra toplinska postojanost,
- dobre tehnološke sposobnosti,

ponekad: pravokutnost, linearnost, anizotropija, te za izmjenične struje još i veliki ρ zbog vrtložnih struja.

Pod tehnološkim sposobnostima smatramo mogućnost izrade limova, tehnologiju praha, mogućnost lijevanja, štancanja, rezanja i dobro izoliranje.



4.2.2. Tvrde magnetske jezgre (Permanentni magneti)

Služe za trajne izvore magnetskog polja, bez vanjskog magnetiziranja kao što su:

- zvučnici,
- mali električni strojevi (dinamo, alternator),
- neki releji i slično,
- magnetski zapisi (trake),
- mjerni instrumenti.

Zahtjevi na materijal su:

- široka petlja, veliki H_c obavezno,
- veliki energetska produkt obavezno,
- veliki faktor izbočenosti obavezno,
- veliki B_z , B_r poželjno,
- mala temperaturna ovisnost,
- velika toplinska postojanost,
- anizotropija (ponekad),
- tehnološke sposobnosti, obično su tvrdi, lijevanje, prah.

Po svojim svojstvima materijal nije savršen, nego je bliže jednom ili drugom, a granica je veličina koercitivne sile otprilike 1000 A/m (u praksi su one mnogo veće ili mnogo manje) [6].

4.3. Izvedbe jezgri

S obzirom na primjenu, te na frekventno područje upotrebe, magnetske jezgre se izvode u više izvedbi i to kao:

Masivne (kompaktne, pune), koje se izrađuju iz metala ili metalnih smjesa (legure, sinterizirani). Izrađuju se u potrebne oblike: lijevanjem, kovanjem, sinteriranjem

Primjena: mekomagnetske jezgre za istosmjerno magnetiziranje, te tvrdomagnetske jezgre (permanentne magnete).

Lamelirane, limovi i trake debljine 0,02 do 1 mm, mogu biti paketirane ili motane

Primjena: mekomagnetske jezgre za izmjenične frekvencije (od industrijskih 50 Hz do 100 kHz) moraju biti izolirane: papir, lak, oksidi, fosfati i drugi anorganski kemijski spojevi.



Praškaste, prividno masivne jezgre izrađene iz smjese metalni prah + vezivo (nemagnetni materijal) Primjena: mekomagnetske jezgre za visokofrekventnu tehniku, te kao permanentni magnetski materijali [6].

4.4. Materijali za meke magnete

Za meke magnetske materijale upotrebljavaju se:

- Tehnički čisto željezo i meki čelici.
- Grupa ferosilicijskih legura.
- Grupa feronikalnih legura.
- Metalni i feritni materijali za praškaste jezgre.

4.4.1. Tehnički čisto željezo i meki čelici

Željezo treba biti kemijski što čistije (99.9%). Meki čelici (0.05 do 0.1% C). Upotrebljavaju se specijalne vrste kao što su:

- ARMCO (dobiva se električnim taljenjem).
- ELEKTROLITSKO (elektrolizom).
- KARBONILNO, u obliku sitnih kuglica (prah promjera 10μ), koji se dalje može sinterizirati.

Svojstva: $B_z = 2.16$ T, $H_c \cong 100$ A/m, $\mu_m \cong 6000$, $\mu_p \cong 300$

Upotreba samo kod istosmjernog magnetiziranja, zbog malog specifičnog otpora $\rho \cong 0.1$ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, releji, polni nastavci.

Nikal i kobalt ne upotrebljavaju se čisti, nego kao jedna od komponenata u legurama [6] .

4.4.2. Grupa ferosilicijskih legura

Ferosilicijske legure su vrlo raširena grupa mekomagnetskih materijala naročito primjenjivih u području industrijskih frekvencija (50 odnosno 60 Hz).

Sprječavanje gubitaka zbog vrtložnih struja vodi se na dva načina, povećanjem specifičnog otpora i smanjenjem dimenzija (upotreba limova).

Utjecaj silicija (Si) na željezo je višestruk i to:

- povećava specifični otpor ρ (5% Si poveća ρ s 0.1 na 0.65 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$),
- povećava permeabilitet μ ,
- smanjuje koercitivnu silu H_c ,
- smanjuje indukciju zasićenja B_m (s 2.16 na 1.9 T),
- smanjuje gubitke magnetiziranja (gubitke vrtložnih struja zbog povećanog ρ , a gubitke, histereze zbog manje H_c i većeg μ)
- povećava krhkost, čime smanjuje obradivost (to je i uzrok ograničenja gornje granice dodatka Si.).

Vidimo i na ovom primjeru kako pri tehničkim rješenjima činimo kompromise. U cilju poboljšanja nekih bitnih svojstava slabe neka druga svojstva. Ovdje smo smanjili gubitke magnetiziranja, ali smo to platili manjom indukcijom zasićenja i težom obradom, pri čemu je prvi učinak daleko veći. U praksi imamo toplovaljane (do 4.5% Si) i hladnovaljane (do 3.5% Si) limove. Toplovaljani znači da su valjani na povišenoj temperaturi pa je zato i dozvoljen veći postotak silicija. Hladnovaljani limovi mogu biti neorijentirani (izotropni) i orijentirani (anizotropni), a toplovaljani su izotropni. Izotropni lim ima ista magnetska svojstva bez obzira na smjer valjanja, a anizotropni lim ima različita svojstva u odnosu na smjer valjanja. Naime hladnim valjanjem može se postići usmjerenost kristala u smjeru valjanja, pa će takav lim biti magnetski najmekši u tom smjeru, a magnetski će biti najtvrdi pod kutom od 45° stupnjeva na smjer valjanja. Takovi limovi će se upotrijebiti samo tamo gdje smo sigurni da magnetski tok uvijek ide u smjeru valjanja. Inače izotropni hladnovaljani limovi imaju pred toplovaljanim slijedeće prednosti: površina im je glatka pa ih je lakše izolirati, a tanji sloj izolacije znači bolji faktor ispune, što opet znači manja dimenzija za istu snagu [6].

Izolacija limova je različito izvedena. Najstarije izolacije su papirne, a novije izvedbe su lak, te oksidi i sulfidi. Debljine limova su: 0.3, 0.35, 0.5, 0.65 i 1 mm.

Gubici magnetskih limova daju se u W/kg pri indukciji 1 Tesla i 1.5 Tesla (tablica 2).

Tablica 2. Usporedba hladno i toplo valjanih FeSi limova [6]

lim	gubici 1 T (W/kg)	gubici 1.5 T (W/kg)	H _c (A/m)	B _m (T)	μ _p	μ _m
toplovaljani	≈ 0.8 - 0.9	≈ 2	≈ 80	≈ 1.9	≈ 400 - 600	≈ 15000 - 20000
hladnovaljani	≈ 0.5	≈ 1	≈ 50	≈ 1.9	≈ 1500	≈ 40000 - 60000

Slično područje upotrebe imaju i legure Fe/Si/Al (jako su krhke), Fe/Al (tanki limovi, legura otporna na habanje, mala B_m), Fe/Co (valjanje do nekoliko μ tek uz dodatak vanadija).

4.4.3. Grupa feronikalnih legura

Feronikalne legure spadaju među najpoznatije mekomagnetske legure. Kako se željezo i nikal mogu miješati u svim omjerima tako na raspolaganju imamo veliki izbor tih legura vrlo različitih svojstava. Ipak sve one spadaju među magnetski najmekše materijale. Naime nikal se i dodaje željezu prvenstveno zbog magnetskog omekšanja. Te legure osim toga imaju odlična tehnološka svojstva, te se iz njih daju valjati vrlo tanki limovi debljine do 0.02 mm. Kako se mogu dobiti tako male debljine, te legure imaju šire frekventno područje upotrebe, pa se mogu upotrijebiti sve do 100 kHz. Pri višim frekvencijama i u njima su preveliki gubici pa se za više frekvencije upotrebljavaju druga rješenja (prašaste jezgre). Izvanredna svojstva tih legura postižu se tek određenom toplinskom obradom, čime se zadržava određena struktura materijala. Zato su te legure osjetljivije na povišene temperature nego ferosilicijske. Ta ovisnost svojstava o toplinskoj obradi naziva se permaloj efekt i izraženiji kod legura koje imaju više nikla. Te legure su također osjetljive i na mehanička naprezanja, o čemu treba voditi računa. Jezgre iz tih legura su često motane izvedbe. One se tek nakon konačnog oblikovanja toplinski obrađuju i to u magnetskom polju. Zato ako ih pokušamo preraditi gotovo sigurno ćemo im uništiti strukturu i na taj način im pokvariti svojstva [6].

Iako se željezo i nikal daju miješati u svim omjerima u praksi se upotrebljavaju tri grupe legura 36% Ni, 50% Ni i 78% Ni. Legure s manje od 30% Ni su jako nestabilne pa se ne upotrebljavaju.

U grupi legura 78% Ni imamo i višestruku leguru uz dodatke (Mo, Cr, Co, Cu) koja se naziva supermaloj i ona je jedna od uopće magnetskih najmekših legura. Okvirni pregled svojstava dan je u tablici 3 [6].

Tablica 3. Okvirni pregled svojstava FeNi legura [6]

sastav (% Ni)	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	H_c (A/m)	B_m (T)	μ_p	μ_m
36	$\cong 0.8$	$\cong 30$	$\cong 1.2$	$\cong 2000$	$\cong 10000$
50	$\cong 0.45$	$\cong 20$	$\cong 1.6$	$\cong 3000$	$\cong 35000$
78	$\cong 0.16$	$\cong 4$	$\cong 1$	$\cong 10000$	$\cong 100000$
supermaloj	$\cong 0.5$	$\cong 0.3$	$\cong 0.8$	$\cong 100000$	$\cong 1000000$

Uspoređujući međusobno ferosilicijske i feronikalne legure dobijemo sljedeće odnose dane u tabeli, pri čemu (+) za nas znači poželjnije (bolje), a (-) nepoželjnije (lošije) svojstvo.

Tablica 4. Međusobna usporedba ferosilicijskih i feronikalnih legura [6]

legura	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	H_c (A/m)	B_m (T)	μ_p	μ_p	gubici	obradivost	cijena
Fe/Si	manji	veća	viša	manji	manji	veći	lošija	niža
	-	-	+	-	-	-	-	+
Fe/Ni	veći	manja	niža	veći	veći	manji	bolja	viša
	+	+	-	+	+	+	+	-

Opet vidimo da biramo kompromisna rješenja. Kod velikih objekata, kao što su energetske transformatori i strojevi, a koji rade na niskim frekvencijama, prvenstveno su nam važni magnetska indukcija (zbog količine materijala) i cijena, te za to područje prednost dajemo ferosilicijskim materijalima, a kod viših frekvencija najveći problem su gubici zbog vrtložnih struja i tu prednost imaju feronikalne legure [6].

4.4.4. Praškaste mekomagnetske jezgre

Iznad 100 kHz, znači na najvišim frekvencijama daleko najveći problem predstavljaju gubici vrtložnih struja, te za to područje isključivo upotrebljavamo praškaste jezgre. pri tome imamo dvije grupe praškastih jezgri [6]:

- metalne praškaste jezgre,
- feritne (magnetno keramičke) jezgre.

4.4.4.1. Metalne praškaste jezgre

One su načinjene od mješavine metalnog feromagnetskog praha i veziva kao nemagnetskog materijala. Feromagnetski materijal se samelje u sitan prah, kuglice dimenzije nekoliko mikrona. Vezivo je termostabilna smola, koja je po svojim električkim svojstvima izolacijski materijal. Metalni prah miješamo s vezivom i tu smjesu oblikujemo u potrebne oblike, te nakon toga pečemo da smola polimerizira. Na taj način smo postigli to, da se vrtložne struje zatvaraju kroz vrlo male površine, ali smo istovremeno drastično smanjili permeabilitete i indukcije zasićenja. Permeabilitet se istovremeno linearizira i u slučaju metalnih praškastih jezgri govorimo o efektivnom permeabilitetu, koji ovisi jednom o izabranom materijalu te drugi puta o sastavu smjese, to jest odnosu količine veziva i metala [6].

pojednostavljena formula za efektivni permeabilitet dana je kao:

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{\alpha}{3}}$$

α = postotak veziva,

μ = permeabilitet feromagnetskog materijala,

uz minimalnu količinu veziva od 2% (a u praksi ga uvijek mora biti više), te beskonačni permeabilitet, što također nije, nego je manji, efektivni permeabilitet bi iznosio 150. U praksi su efektivni permeabiliteti od 1.5 do 50.

4.4.4.2. Feritne (magnetno keramičke) jezgre

Napravljene su od feritnih materijala, a to su razni oksidi. Ti materijali su u novije vrijeme gotovo potpuno potisnuli metalne praškaste jezgre. Pošto se radi o nemetalima ti materijali sami po sebi imaju velike specifične otpore reda 10^{12} veće od metala, pa su im i gubici vrtložnih struja daleko manji, tako da se mogu upotrebljavati i pri najvišim frekvencijama. Njihova opća formula je $MO * Fe_2O_3$, to jest smjesa željeznog oksida i oksida nekog dvovalentnog metala (MnO, CuO, MgO, CoO).

To su takozvani jednostruki ili jednostavni feriti i njihovi permeabiliteti su oko 250 a B_m oko 0.7 T. Višestruki ili složeni feriti imaju permeabilitete oko 6000 a B_m oko 0.4 T [6].

Izrađuju se tako da se razni oksidi samelju, smiješaju i sinteriziraju. Nakon toga se ponovo melju i oblikuju uz termičku obradu. svojstva osim o materijalima u velikoj mjeri ovise i o tehnološkom procesu proizvodnje (pritisci, temperature). Prednost pred metalnim praškastim jezgrama im je u: većem permeabilitetu, većem otporu i boljoj kompaktnosti.

Vidljivo je da čim imamo više frekvencije, veći je problem vrtložnih struja i sve veću važnost pri izboru materijala ima njegov otpor, i tom svojstvu podređujemo sva ostala svojstva [6].

4.5. Materijali za tvrde magnete (Permanentni magneti)

Za tvrde magnetske materijale upotrebljavaju se:

- Ugljični i legirani čelici.
- Disperzivno kaljene legure željeza.
- Duktilne legure.
- Specijalne legure (rijetke zemlje).
- Oksidni keramički materijali.

Tvrđi magnetski materijali za svoj rad koriste akumuliranu energiju, koju je u njima preostala nakon magnetiziranja. Zbog toga želimo da je njihova petlja histereze čim šira, to znači da im je koercitivna sila čim veća. Akumulirana energija magneta korisna je u zračnom rasporu pa nam je za tvrde magnetske materijale interesantan drugi kvadrant krivulje magnetiziranja [6].

$$Hl + H_0 l_0 = 0 \quad H_0 = -\frac{Hl}{l_0}$$

H = polje u materijalu, l = dužina materijala, H₀ = polje u zračnom zazoru, a l₀ = duljina zračnog zazora.

Veličine koje su interesantne kod permanentnih magnetskih materijala su B_r, H_c, (BH)_m i f_i (faktor izbočenosti).

Tablica 5. Interesantne veličine kod permanentnih magnetskih materijala [6]

vrsta	H _c (kA/m)	B _r (T)	(BH) _m (kWs/m ³)	f _i	H magnetiziranje (kA/m)
ugljični čelici	4 - 20	≅ 1	1 - 8	0.4	64
disperzno kaljeni	10 - 50	0.5 - 1.2	10 - 50	0.9	240
duktilni	40 - 60	0.3 - 0.5	3 - 7	0.4	300
Co - rijetke	700	0.9	160	0.4	5000
zemlje					
oksidni	150	0.2 - 0.4	7 - 8	0.2	400

U tablici 5 su dane najvažnije grupe legura za permanentne magnete s orijentacijskim interesantnim vrijednostima.

4.5.1. Ugljični i legirani čelici

To su najstariji permanentni magneti, relativno jeftini, ali male koercitivne sile pa su nestabilni i osjetljivi na vanjske utjecaje. Upotrebljavaju se kao zakaljeni materijali. Prije kaljenja se dobro obrađuju. Zbog male H_c moraju biti dugački, a zbog malog energetskeg produkta su za određenu akumuliranu energiju veliki. Osjetljivi su na povišene temperature, kada trajno gube svojstva.



4.5.2. Disperzno kaljeni

To su višestruke legure bez ugljika poznate pod trgovačkim nazivima ALNI (Al, Ni i Fe), ALNIKO (Al, Ni, Co i Fe), ALNIKOKU (Al, Ni, Co, Cu i Fe).

Predstavljaju suvremene legure veoma dobrih svojstava i trenutno su najraširenije u upotrebi.

Tražena struktura i svojstva dobivaju se određenim termičkim postupcima, ali je ta struktura stabilna, pa su postojani na povišene temperature. Zbog dodatka aluminija su lakše, i otporne su na koroziju.

Tvrde su i krhke, obrađuju se lijevanjem, sinteriranjem i lijepljenjem njihovog praha. U tom slučaju gube nešto na svojim svojstvima [6].

4.5.3. Duktilni materijali

To su mehanički najmekši permanentni magneti. Glavna prednost su im dobre tehnološke sposobnosti, pa se iz njih izrađuju proizvodi valjanjem, rezanjem štancanjem i to tanki limovi i žice. Poznati su pod nazivima KUNIKO, KUNIFE što pokazuje i njihov sastav (Cu, Ni, Co odnosno Cu, Ni, Fe) [6].

4.5.4. Kobalt - rijetke zemlje

To su najsuvremeniji materijali čija je primjena u velikoj ekspanziji. Već sada su to najkvalitetniji materijali, što se tiče magnetskih svojstava, a još se na tom području vrše mnoga ispitivanja i poboljšanja. Očita rezerva krije se u malom faktoru izbočenosti, koji se nastoji povećati. Po svojim tehnološkim svojstvima slične su disperzno kaljenim legurama ali su još krtije i osjetljivije na udarce. Orađuju se lijevanjem, sinteriranjem i lijepljenjem, pri čemu je najaktualnije sinteriranje. U tom području dolazi se svakodnevno do novih rješenja. Ovi magneti se upotrebljavaju za male magnete, mjerne instrumente, u svemirskoj tehnici, kao magnetski ležajevi i sl. [6].



4.5.5. Oksidni magneti (Feriti, Keramički magneti)

To su mješavine raznih oksida sa željeznim oksidom. Prednost im je veliki otpor i mala težina, a nedostatak toplinska osjetljivost. Upotrebljavaju se za magnetske zapise nanese na neki nosač.

Osim ovih grupa postoji još čitav niz permanentnih magnetskih materijala, kao što su: Co Pt za minijature magnetite zatim Hessler-ove legure (Mn, Al) ili (Mn, Bi, Cu) koje kako vidimo nemaju ni jedan feromagnetski element, te mnoge druge. Važno je voditi računa o tome da prilikom magnetiziranja trajnih magneta moramo ići duboko u zasićenje što znači da nam H_m (maksimalno polje magnetiziranja) mora biti $\cong 5 H_c$ [6].

5. OSNOVNI DIJELOVI (POZICIJE) PAKETA STATORA

5.1 Statorski segmentni lim

Za izradu statorskog segmentnog lima koristi se hladno valjani neorijentirani dinamo limovi debljine 0,35 ili 0,5 mm. Kompletan oblik lima se izbija alatom ili laserski reže (do cca.40000 kom. lima). Prije samog pakiranja s lima se skida srh, a neposredno nakon skidanja srha lim se izolira lakiranjem (slika 6) [5].



Slika 6. Statorski segmentni lim [9]

5.1.1. Sustavi tlačenja paketa statora

Izgled samih limova ovisi o sustavu tlačenja paketa.

Sustavi tlačenja paketa mogu biti sljedeći:

a) **Sustav trapezna letva – svornjak** (trapezna letva služi za prijenos momenta na kućište i dobivanje geometrije statorskog paketa, a svornjak za stezanje).

Sustav je konstrukcijski kompliciraniji od ostalih i zahtjeva više vremena za izradu.



Svornjak za stezanje može biti izvan paketa, na vanjskom obodu paketa (polu utor) i u samom jarmu paketa. U prva dva slučaja svornjak je neizoliran, a kada je u jarmu obavezno mora biti izoliran [5].

Prednost ovog sustava je jednostavno mjerenje sile pritezanja kontrolom istegnutosti svornjaka (svornjak slobodan, nije povezan sa kućištem).

b) **Sustav trapezna letva s navojem** (trapezna letva služi za prijenos momenta na kućište, dobivanje geometrije i stezanje). Sustav je konstrukcijski jednostavniji i zahtjeva manje vremena za izradu. Za primjenu ovog sustava stezanja potrebni su povoljni omjeri krakova sila, jer trapezna letva mora biti pozicionirana na vanjskom rubu jarma. U pravilu ovi generatori nisu limitirani s vanjskim promjerom generatora, pa nije teško postići dobre omjere krakova sila.

c) **Sustav svornjak** za stezanje i prijenos momenta na kućište preko obuhvatnih latica.

Sustav se primjenjuje kod generatora manjeg promjera i snage. Svornjak služi za stezanje paketa, a obuhvatna latica zavarena za kućište prenosi moment. Prednost ovog sustava je mogućnost mjerenja produljenja svornjaka i preko toga sile pritezanja. Zavarivanje obuhvatnih latica potrebno je izvesti nakon završetka paketiranja, pa je shodno tomu na plaštu kućišta statora potrebno izrezati dodatne otvore za prilaz istima što se manifestira kao nedostatak opisanog sustava tlačenja [5].

5.2. Lim s odstoynim ulošcima

Limovi s odstoynim ulošcima odvajaju dione paketa i služe za hlađenje paketa i namota statora. Materijal koji se koristi za izradu je dinamo lim debljine 0,5 mm, tj. neizoliran segmentni statorski lim na koji se točkasto zavaruju I-profil 8x6 od nemagnetnog materijala (slika 7). Nakon zavarivanja slijedi priprema površine brušenjem i AKZ (1x temeljni premaz u debljini 40 μ m, 1x pokrivni premaz u debljini 40 μ m). Svi utori na unutarnjem promjeru statorskog segmentnog lima su prošireni za 1 mm [5].



Slika 7. Lim s odstoynim ulošcima [9]

5.3. Segment tlačne ploče s tlačnim prstima

Kao što samo ime govori segment tlačne ploče služi za tlačenje statorskog paketa. Ovisno o konstruktivnim zahtjevima i veličini kućišta statora donja tlačna ploča (PS) može biti dio zavarenog kućišta što je češći slučaj ili iz segmenata kao gornje (SS) tlačne ploče [5].

Veća kućišta kod kojih nije moguća strojna obrada izvode se sa segmentima tlačnih ploča na donjoj PS strani [5].



Slika 8. Segmentne tlačne ploče [9]

Izvedbe tlačnih ploča:

- a) tlačna ploča i tlačni prsti od **nemagnetnog** materijala
- b) tlačna ploča od **magnetnog** – tlačni prst **nemagnetni**
- c) tlačna ploča od **magnetnog** materijala sa **bakrenom ekranizacijom** unutarnjeg promjera – tlačni prst **nemagnetni**

5.4. Trapezna letva

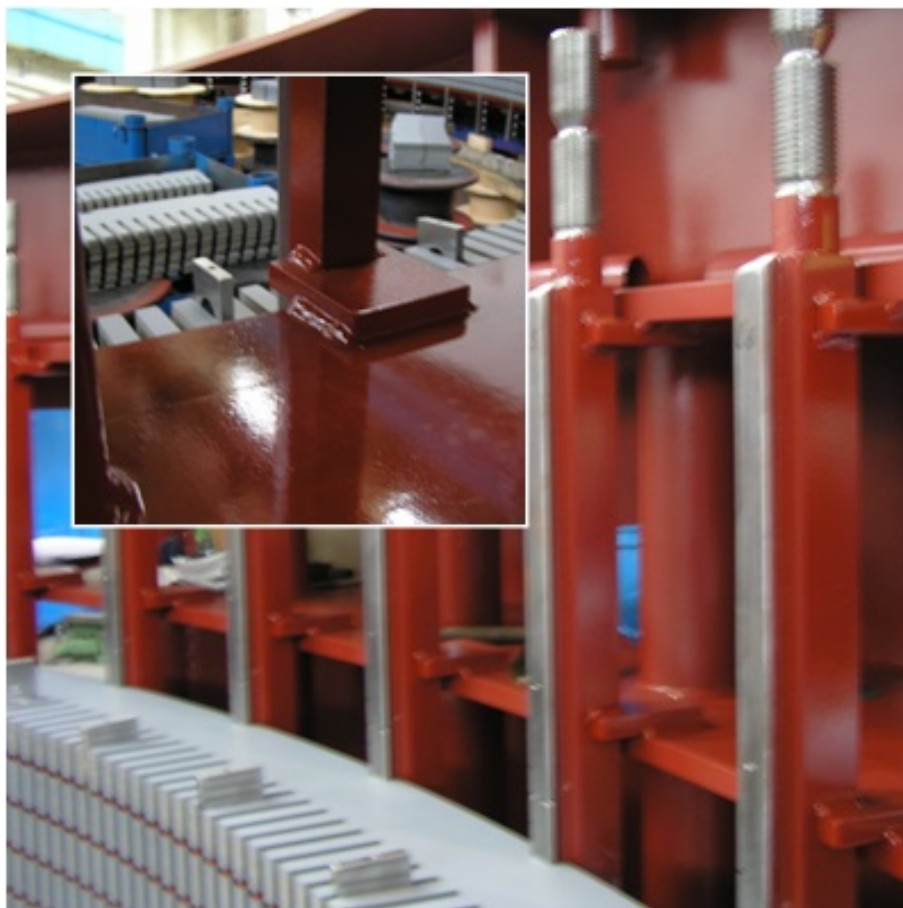
Trapezna letva služi za prijenos sile momenta na kućište, dobivanje geometrije i stezanje. Oblik trapezne letve definiran je konstrukcijski. Trapezne letve izrađuju se iz termički obrađenog konstrukcijskog čelika postojanog na temperaturi do -20°C .

Trapezne letve imaju dvostruki navojnik na gornjoj „PS“ strani koji služi za tlačenje paketa, tj. za pričvršćenje tenziometarskog istezača. Nakon tlačenja paketa gornji navoj se reže.

Utori u lastinom repu trapezne letve služe za paketiranje (ubacivanje) statorskih segmentnih limova. Broj utora ovisi o dužini paketa i postavlja se svakih 500-700mm [5].

5.5. Latica

Latice služe kao držači trapezних letvi, a izrađuje se iz iste kvalitete materijala kao i trapezne letve. Latice se zavaruju na prirubnice kućišta, a u utore latica zavaruje se trapezna letva (slika 9). Širina utora na latici jednaka je izmjerenoj širini trapezne letve + 0,6 – 1mm [5].



Slika 9. Trapezne letve i latice zavarene na prirubnicu kućišta statora [9]

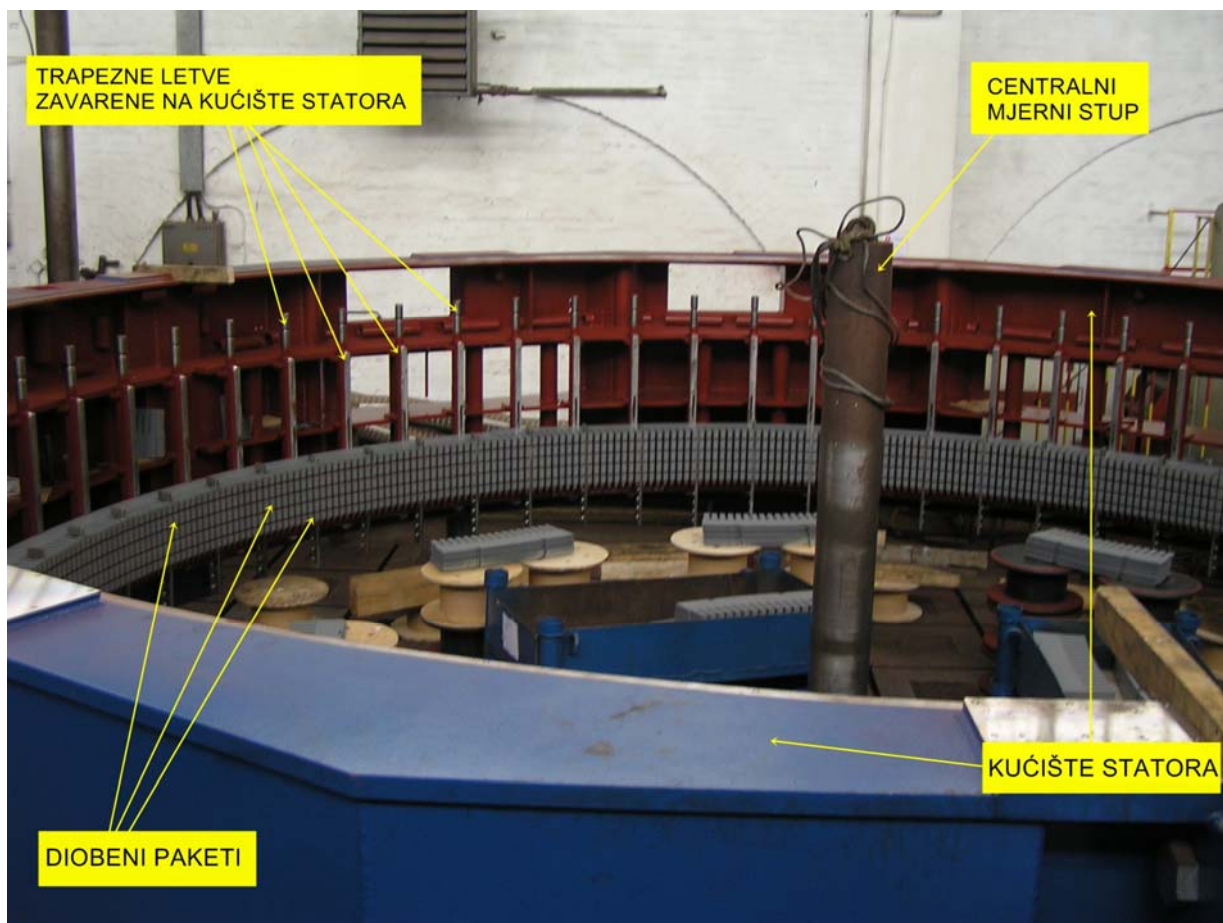
6. TEHNOLOŠKI POSTUPAK IZRADE PAKETA STATORA

6.1. Centriranje kućišta statora i mjernog stupa

Prije procesa izrade paketa statora potrebno je centrirati kućište statora i ugraditi središnji mjerni stup. Kućište statora postavlja se na upornje i naprave za niveliranje.

Kod višedijelnih kućišta (1/4, 1/3, 1/2, 1) upornje i naprave za niveliranje postavljamo na svaki sastav kućišta i jednu do dvije (ovisno o veličini kućišta) između njih.

Pomoću naprava za niveliranje i vodo vage horizontalno se nivelira kućište statora s točnošću $\pm 0,2$ mm/m na gornjoj obrađenoj prirubnici kućišta statora (slika 10).



Slika 10. Kućište statora s osnovnim dijelovima [9]

Kućište statora se nakon niveliranja učvršćuje za podlogu i podupire se vijčanim dizalicama (ovisno o veličini). Nakon niveliranja kućišta ugrađuje se središnji mjerni stup ili šestar [5].

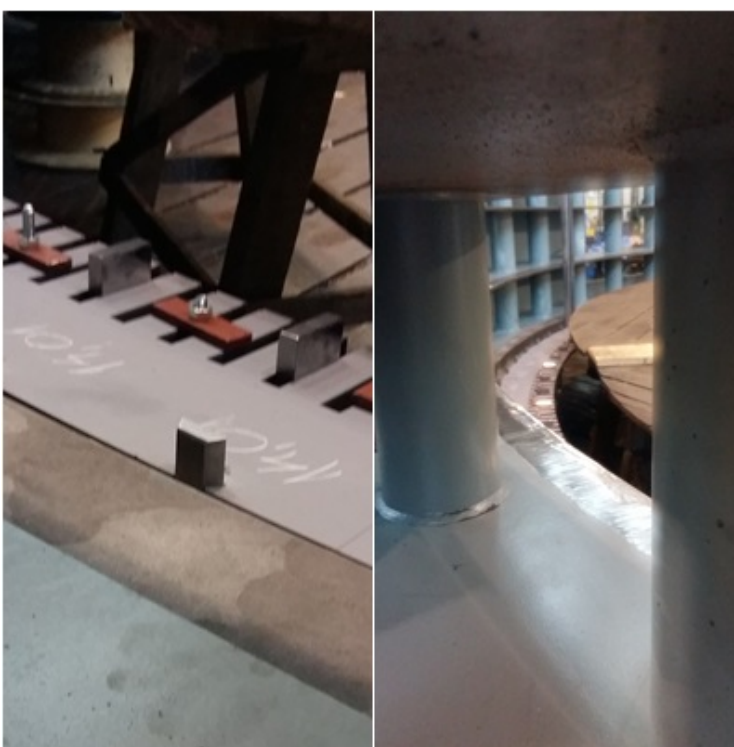
Mjerni stup (šestar) se središti prema kućištu statora mikrometrom na donjoj i gornjoj prirubnici s točnošću $R \pm 0,3\text{mm}$ i vertikalno nivelira stup vodo vagom s točnošću $0,0-0,05\text{mm/m}$.

6.2. Slaganje probnih paketa (donjeg i gornjeg)

Slaganje probnih paketa (donjeg i gornjeg) izvodi se u svrhu pozicioniranja trapezних letvi u kućištu statora. Proces započinje slaganjem donjeg probnog paketa – šablone (kompletan krug) na donju prirubnicu kućišta statora (sa tlačnim prstima). Visina složenog paketa iznosi cca 20-25mm (slika 11).

Za slaganje probnih paketa koristite se pomoćni utorski i trapezni klinovi. Trapezne klinove postavljamo u svaki utor, a utorske u svaki četvrti utor po segmentu lima (u većini slučajeva u utore koji su u simetrali sa trapeznim utorom).

Kod slaganja probnih paketa vrlo je bitno paziti na poklapanje sastava kućišta statora i probnog paketa (kod višedijelnih kućišta). Nakon slaganja probni paket se centrira pomoću



Slika 11. Donji probni paket [9]

trnova koji se postavljaju u trapezni utor lima i rupu na prirubnici

(broj trnova i mjesta određuju se tehnološkim postupkom). Nakon centriranja pomoću trnova, probni paket je potrebno usredištiti i horizontalno nivelirati prema radijusu R sa crteža s točnošću $R \pm 0,2\text{mm}$. Završna kontrola vrši se mikrometrom pritom pazeći na pravi kut unutarnjeg promjera paketa. Nakon podešavanja probnog paketa isti se steže za tlačne prste napravom za stezanje. Naprave se postavljaju u sredinu svakog segmentnog lima [5].

Slijedi postavljanje baznih letvi (broj letvi i mjesta postavljanja određuju se tehnološkim postupkom) u prethodno složeni donji probni paket. Bazna letva br.1 je prva zdesna od „smjera vode“ i tako u smjeru kazaljke na satu gledano sa „SS“ strane.

Gornji dio trapezne letve postavljamo na radijus (isti kao na donjem probnom paketu) i učvršćujemo ga za gornju prirubnicu držačem trapezne letve. Nakon centriranja držač se prihvatno zavaruje za prirubnicu.

Nakon postavljanja donjeg probnog paketa s baznim trapeznim letvama slaže se gornji probni paket identičnim postupkom slaganja kao i donji počevši od gornje prirubnice kućišta statora (slika 12).



Slika 12. Gornji probni paket [9]

Naposljetku se kontrolira vertikalnost, odnosno poklapanje utora gornjeg i donjeg paketa na četiri mjesta (pod 90°) s točnošću $\pm 0,2\text{mm}$.

6.3. Postavljanje latica

Prije samog postavljanja latica postavljaju se trapezne letve u probne pakete, tj. šablone. Pomoću nosača trapeznih letvi iste se osiguravaju od propadanja.

Trapezne letve se postavljaju na visinu pomoću lineala i vodovage ili pomoću šestara, te odzivnog vijka na nosaču (vrijedi samo za izvedbe generatora kod kojih je donja tlačna ploča na „PS“ strani izvedena iz segmenata).

U probnim paketima trapezne letve pozicioniramo na smanjeni promjer, te ih čeno naslanjamo na dno trapeznog utora probnih paketa i bočno sa svake strane (dijeli se zračnost na bočnim stranama letve i lima pomoću instrument lima). Bočnu ravnost trapezne letve kontroliramo linealom.

U sljedećem koraku postavljaju se latice. Nakon podjele zračnosti između trapeznih letvi i samih latica iste se zaklinjavaju, prihvatno i konačno zavaruju za prirubnice kućišta statora prema crtežu i WPS listi (upute, redoslijedi i parametri zavarivanja).

Latice se ne zavaruju za trapezne letve [5].

6.4. Postavljanje trapeznih letvi

Trapezne letve koje su vrlo bitne za dobivanje geometrije paketa postavljaju se i prihvatno zavaruju za laticu pomoću mikrometra (šestara) na radijus R prema crtežu umanjenom za 0,3mm (predviđena deformacija nakon konačnog zavarivanja) (slika 13).



Slika 13. Postavljanje trapeznih letvi [9]



Prije postavljanja trapeznih letvi određuje se jedna trapezna letva koja se prihvatno i konačno zavaruje u svrhu utvrđivanja deformiranja uslijed zavarivanja (prihvatnog i konačnog).

Do visine trapezne letve cca 2000mm ista se postavlja na promjer pojedinačno, komplet od donje latice prema gornjoj, a iznad 2000mm na svim trapeznim letvama radijalno od donje latice prema gore [5].

Letve se postavljaju u smjeru kazaljke na satu počevši od letve br.1. Smanjenje promjera vrši se zaklinjavanjem konusne kajle između trapezne letve i latice, a povećanje promjera vrši se stezanjem trapezne letve bravarskom stegom. Dobiveni promjer se kontrolira, a po potrebi vrši se korekcija po visini letve.

Nakon izmjera promjera prihvatno zavarenih trapeznih letvi izvode se zavari cijelom dužinom trapezne letve sa svih dostupnih strana prema WPS listi.

Nakon zavarivanja rastavljaju se naprave i probni paketi. Kontrola ugradnje trapeznih letvi izvodi se pripadajućom laserski rezanom šablonom. Konačno zavarivanje trapeznih letvi na ugrađene latice također se vrši prema tehnološkoj WPS listi.

Naposljetku se kontrolira tetivni razmaka trapeznih letvi pomoću šablone za kontrolu tetivnog razmaka povlačenjem šablone vertikalno po trapeznoj letvi. Kontrola se vrši po punoj visini trapezne letve [5].

6.5. Postavljanje segmenata donjih (PS) tlačnih ploča

Donje segmentne tlačne ploče postavljaju se na kućište statora na određenu visinu prema crtežu. Donji red tlačnih ploča postavlja se tako da su vrhovi tlačnih prstiju podignuti za 0-3 mm u odnosu na horizontalu. Prednapon se izvodi odzivnim vijcima, a nivelacija tlačnih ploča linealom i vodovagom ili šestarom. Raspored tlačnih prstiju, odnosno tlačnih ploča kontrolira se statorskim segmentnim limom. Tlačna ploča može biti izvedena sa odzivnim vijcima (neobrađeno kućište) i zavarenim odzivnim sklopom (obrađeno kućište) [5] .

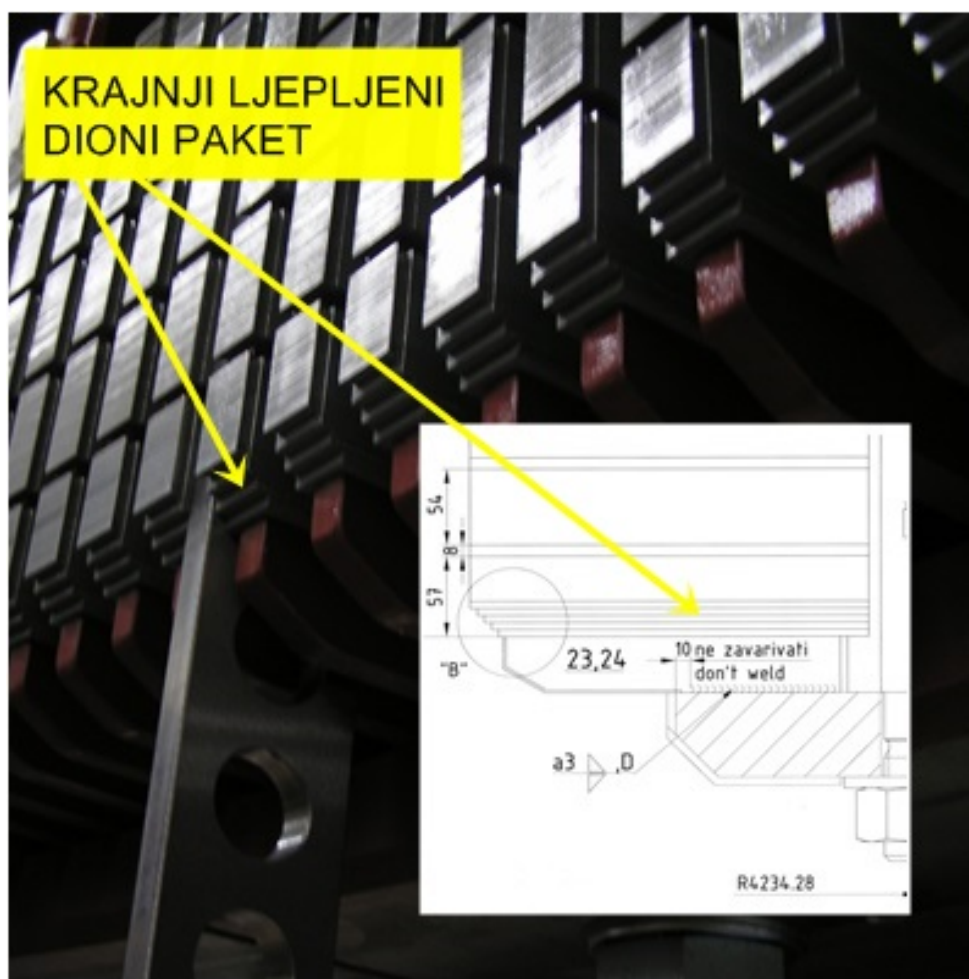
6.6. Postupak paketiranja

Paketiranje je jednostavni proces slaganja statorskog segmentnog lima na postavljene trapezne letve i donje tlačne ploče.

Slaganje izoliranih limova izvodi se prema detaljima i opaskama na crtežu, paketira se po 1 lim sa 1/2 ili 1/3 preklopa. Krajnji lijepljeni dioni paketi izrađuju se iz „palačinki“ debljine 2,5mm (u iznimnim slučajevima od 5mm) (slika 14).

U procesu paketiranja posebna pažnja posvećuje se simetrali sastava paketa i kućišta statora (kod višedijelnih statora). Limovi koji se slažu u paket statora moraju biti čisti i bez oštećenja. „Štanc markice“ koje se nalaze na svakom segmentnom limu moraju se uvijek poklapati na istim mjestima [5].

Nakon slaganja prvog dionog paketa u svaki segment postavljaju se po dva ili tri klina za paketiranje. Klinovi se izrađuju od čelika za poboljšavanje, a debljine klinova određuju se prema širini utora u tolerantnom području od -0.01 do -0.02.



Slika 14. Krajnji lijepljeni dioni paket izrađen od „palačinki“ [9]

U većini slučajeva klinovi se postavljaju u utor koji je u simetrali sa trapeznim utorom na vanjskom promjeru paketa.



Razmak između klinova mora biti isti (da uvijek isti utor na segmentnom limu bude na klinu za pakiranje). U specijalnim slučajevima utore određuje tehnolog.

Centriranje i pozicioniranje prvog dionog paketa vrši se prema trapeznim letvama. Između trapeznih letvi i utora lastinog repa umeću se trake debljine od 0,10 - 0,60 mm radi održavanja geometrije paketa. Na trapeznim letvama dijeli se zračnost na bočnim stranama između letve i lima [5].

Tokom pakiranja trake povlačiti prema gore. Prema potrebi korekcije se vrše i sa trakama drugih debljina (ovisno o izmjerama promjera radijusa paketa i trapeznih letvi).

Nakon centriranja radijusa paketa R u točnosti $\pm 0,1$ mm vade se bočni limovi. Slijedi kontrola bočnih zazora oko letvi, te kontrola razmaka na sastavima paketa (0,6mm kod višedijelnih paketa). Slobodne utori kalibriraju se kalibar klinom. Nakon ispaketiranog prvog dionog paketa (kod višedijelnih paketa) na sastave se dodaju izolacioni umetci (HGW 0,30 ili 0,50mm). Vrlo je bitno da u prvom dionom paketu izrađenom od paketa „palačinki“ i osnovnog paketa nema prijelaza (stepenica) u dnu utora.

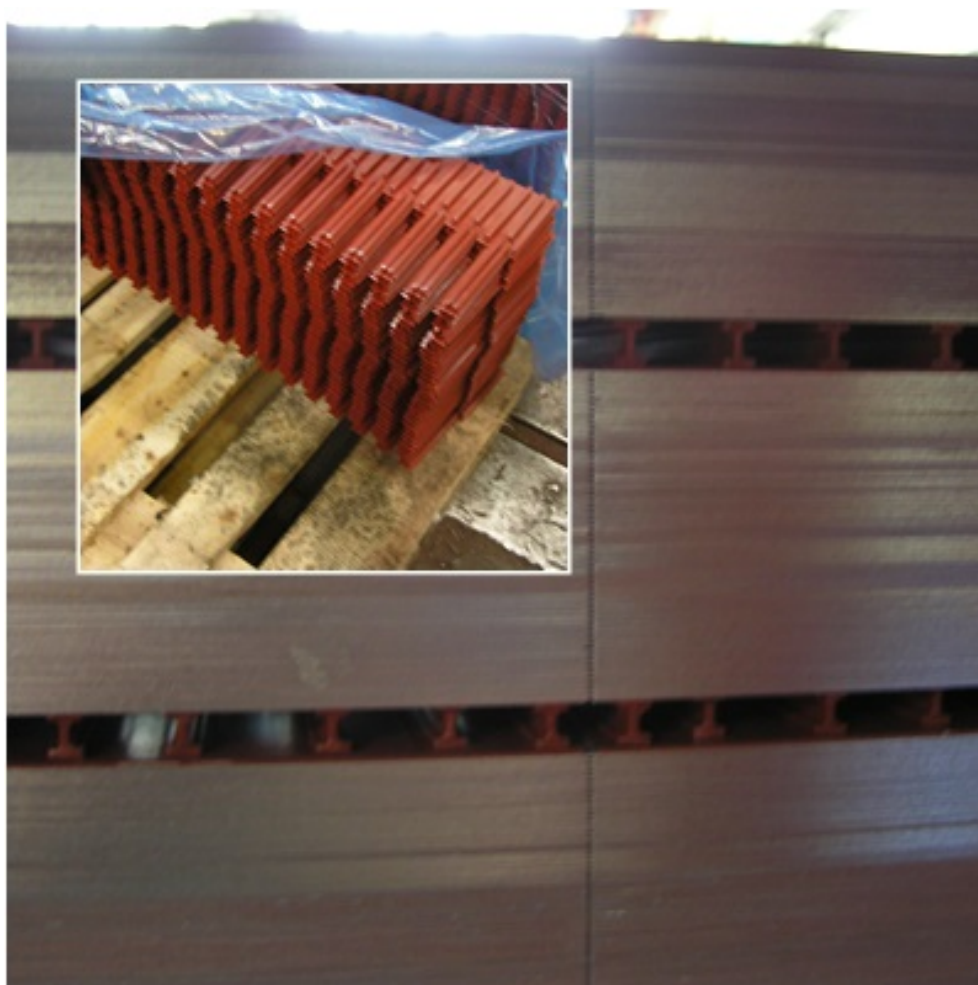
Točan broj limova za jedan diobeni paket određuje se probnim stezanjem i mjerenjem. Mjerenjem se kontrolira promjer svakog dionog paketa na svakom segmentu.

Visina dionog paketa mjeri se pomoću naprave za prešanje dionih paketa na svakom segmentu i obavezno na svakom sastavu lijevo i desno. Od početka pakiranja kontrolira se i mogućnost povlačenja klinova u vis. Klinove se isključivo podižu samo aksijalno (ne radijalno) svakih 100mm ili nakon ispaketirana dva diona paketa [5].

Prije prvog podizanja klinova i limova između paketa i trapezne letve, vrši se kontrola u lijepljenom dijelu paketa, a taj dio paketa osigurava se od pomicanja izolacionim konusnim klinovima. Nakon svakog sljedećeg podizanja klinova obavezno se vrši podešavanje svakog dionog paketa, a izvodi se pomoću kalibar klina u utoru. Kalibriranje se izvodi sve dok klin bez upotrebe sile ne prođe kroz utor. Kalibriranje se izvodi od sredine (polovica, trećina, četvrtina) paketa lijevo i desno prema sastavima. Oslobođeni dioni paketi iz kojih su izvučeni klinovi za pakiranje ne kalibriraju se niti podešavaju naknadno. Kontrolni klin nakon kalibriranja slobodno mora proći kroz svaki utor [5].

Prema crtežu i detaljima na određenom broju limova ucrtavaju se i izrezuju utori za ugradnju otpornih termometra. Nakon izrezivanja utora na limovima se skida srh, te se naposljetku lakiraju. Tako izrađeni limovi ugrađuju se u paketa prema crtežu.

Na kraju svakog dionog paketa postavljaju se limovi s odstoynim ulošcima. Limovi s odstoynim ulošcima pozicioniraju se prilikom ugradnje u svaki dioni paket. Kod paketiranja vrlo je bitno poklapanje (paralelnost) dionih paketa na sastavima (slika 15).



Slika 15. Dioni paketi razdvojeni limovima s odstoynim ulošcima [9]

Tokom paketiranja izvodi se jedno do četiri prešanja (ovisi o visini paketa) prema crtežu tehnologa. Obavezno se kalibriraju utori prije i nakon prešanja samo u visini klinova za paketiranje.

6.6.1. Korekcija razlika visine paketa

Na osnovu izmjera visina paketa nakon međuprešanja vrši se korekcija visine. Korekciju izvršiti ako je razlika visine na vanjskom i unutarnjem promjeru veća od 0,5mm.



a) Ravnanje valovitosti vrši se dodavanjem ili oduzimanjem cijelog segmenta u zoni gdje je paket niži ili viši. Između dva cijela segmenta može se staviti samo jedan sloj segmenta za korekciju visine.

b) Ravnanje visine paketa na vanjskom promjeru izvodi se postavljanjem segmenta sa lastinim repom do potrebne širine prema unutarnjem promjeru.

Segment je odrezan na škarama od segmenta statorskog lima. Nakon rezanja segment lima se obavezno brusi i lakira. Između dva cijela segmenta može se staviti samo jedan sloj segmenta za korekciju visine.

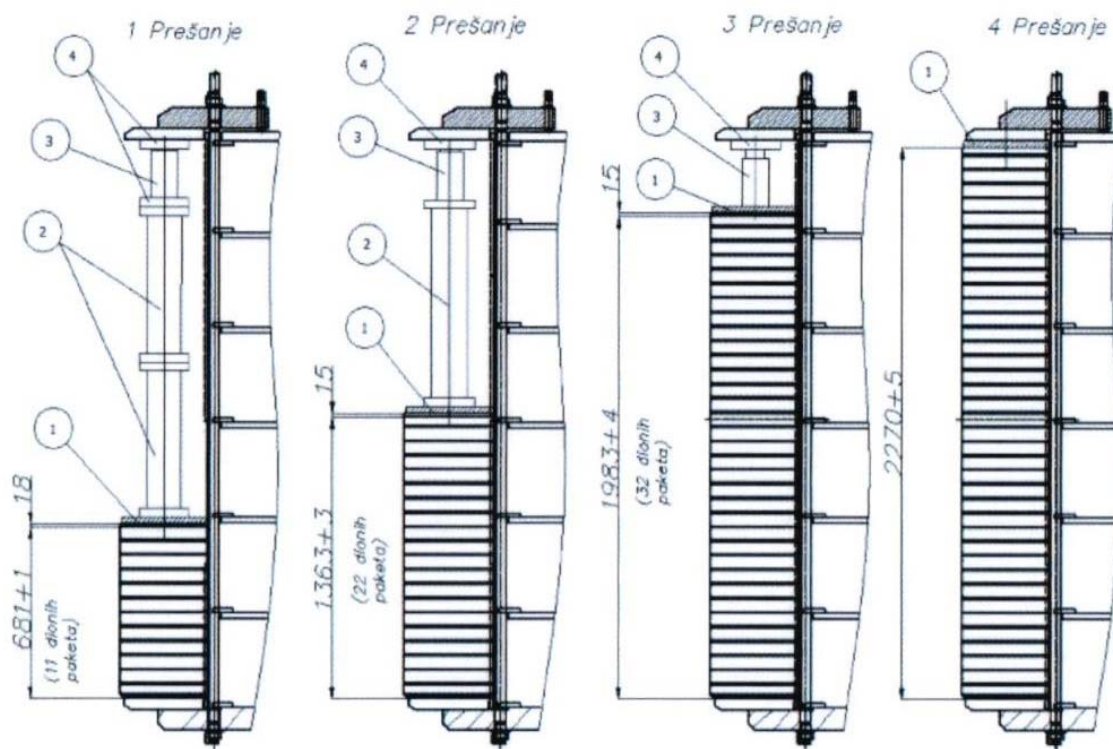
c) Ravnanje visine paketa na unutarnjem promjeru (u zoni zuba i utora) izvodi se postavljanjem i lijepljenjem izolacionih segmenta, ali nikad uže od dva zuba. Izolacioni segment se izrezuje iz HGW-a debljine 0,3 ili 0,5 mm. Uložak se obostrano lijepi „Izolacijskom smolom“ prema proizvodnom propisu Končar GiM-a. Između dva cijela segmenta može se staviti samo jedan sloj segmenta za korekciju visine. Slijedeći sloj izolacionih kompenzacionih komada stavlja se tek nakon uloženi cca.10mm. osnovnih segmenata. Najčešće po jedan red kompenzacionih segmenta u sredinu dionog paketa. U nekim slučajevima isti uložak može biti i od dinamo lima.

Prva korekcija se po potrebi izvršava nakon prvog prešanja. Na osnovu prvog prešanja može se odrediti koliko će biti potrebno izravnavanje na slijedećim prešanjima. Kod zadnjeg prešanja na hladno potrebno je da paket bude dulji 2-4 mm (ovisi o dužini paketa) na ukupnu dužinu paketa. Prirast se predviđa i ugrađuje prilikom paketiranja.

Naposlijetku procesa paketiranja slaže se gornji lijepljeni dio paketa, postavlja se gornji red tlačnih ploča, a paket se steže propisanim momentom, pritom pazeći da se u utore gornjih i donjih krajnjih lijepljenih limova (dionih paketa) postave izolacioni konusni klinovi radi sprječavanja pomicanja segmenta [8].

6.7. Prešanje statorskog paketa

Prešanje statorskog paketa se izvodi radi stabilizacije, kontrole visine i valovitosti. Sva međuprešanja izvode se sa tlakovima prešanja 0,6 - 1,5 MPa (daje mehanički proračun). Po visini paketa međuprešanja se vrše na svakoj četvrtini ukupne visine paketa.



Slika 16. Prešanje paketa statora po fazama tijekom procesa izrade [8]

Prije prvog prešanja na paketima sa donjom tlačnom pločom u sklopu kućišta sve donje matice na trapeznim letvama zatežu se sa 60% propisanog momenta. Kao što je već spomenuto broj prešanja ovisi o visini paketa.

Shematski prikaz svih prešanja, redosljedom stezanja i pozicijama daje tehnolog. Svako prešanje izvodi se u tri stezanja sa 1/3, 2/3 i punim tlakom ili momentom. Nakon svakog prešanja na osnovu izmjera kontrole vrši se korekcija visine i valovitosti (slika 16).

6.7.1. Međuprešanje I-IV

Međuprešanja I-IV izvode se hidrauličkim prešama. Hidraulične preše se najčešće postavljaju između svake druge trapezne letve. Ispod preša se obavezno postaviti zaštitni najlon koji štiti paket statora uslijed curenja preše.

6.7.2. Završna prešanja preko matica V i VI

Prešanja V i VI izvode se tenziometarskim istezačima UTN4864M48. Prije stezanja pastom se mažu sve gornje navoje trapezne letve, te tarne površine matice i podloške. Najčešće se prešaju po dvije tlačne ploče dijametralno suprotne. Ako nije drugačije propisano, prva dva stezanja (50% i 75% momenta) izvode se moment polugom, a treće završno tenziometarskim istezačima [8].



Slika 17. Završno prešanje paketa statora preko matica [9]

Stezanje tlačnih ploča izvodi se obavezno od sredine (polovica, trećina, četvrtina) paketa naizmjenično lijevo i desno prema sastavima u tri stezanja (slika 17).



Prilikom prešanja potrebno je paziti na pravi kut između tlačne ploče i unutarnjeg promjera paketa, kao i na poklapanje zračnih kanala na sastavima paketa.

Kod zadnjeg prešanja na hladno potrebno je da paket bude dulji 2-4 mm (ovisi o dužini paketa) na ukupnu dužinu paketa.

6.8. Kontrola geometrije statorskog paketa

Ako nije posebno definirano u ugovoru kupca mjerenje geometrije statorskog paketa u svrhu kontrole vrši se mjerenjem unutarnjeg polumjera paketa od centralnog stupa. Za statorske pakete visine do 1000mm mjerenje se vrši u dva nivoa na drugom i predzadnjem dionom paketu, a za statorske pakete visine preko 1000mm mjerenje se vrši u tri nivoa na drugom, predzadnjem i središnjem dionom paketu.

Na svakom nivou mjere se unutarnji polumjeri paketa i to od prve trapezne letve najbliže označenog smjera vode u smjeru kazaljke na satu gledano sa SS strane. Mjerenja polumjera izvode se dalje na svakoj drugoj trapeznoj letvi u smjeru kazaljke na satu.

Mjerenja unutarnjeg polumjera paketa prikazuju se na mjernom listu, a definiran je položajem po trapeznoj letvi i visini paketa. Kriterije prihvatljivosti prepisati s crteža za statorski paket komplet [8].

Ako ugovorom nije drugačije definirano vrijede slijedeći kriteriji prihvatljivosti:

- srednja vrijednost polumjera $\geq 5\%$
- maksimalno odstupanje polumjera od zračnog raspora +10%
- minimalno odstupanje polumjera od zračnog raspora -5%
- eliptičnost paketa +2,5%
- trokutnost paketa +1,5%
- 4-kutnost paketa +1,25%

Do referentne visine 1000 mm srednja izmjerena vrijednost visine paketa ne smije odstupati više od -1 do +3 mm od referentne visine, a odstupanje minimalne i maksimalne izmjerene visine ne smije biti veće od 2 mm.

Za visine paketa veće od 1000 mm srednja izmjerena vrijednost visine paketa ne smije odstupati više od -2 do +4 mm od referentne visine, a odstupanje minimalne i maksimalne izmjerene visine ne smije biti veće od 3 mm.

6.9. Zagrijavanje i vibriranje statorskog paketa (paket sa „palačinkama“)

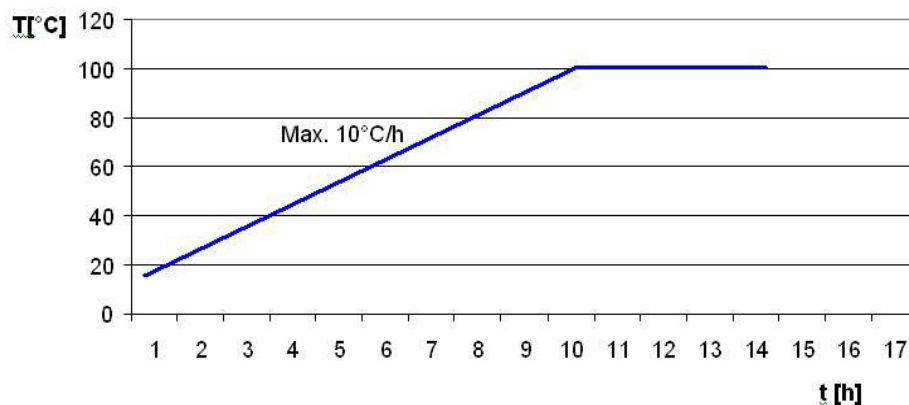
Zagrijavanje i vibriranje gotovog paketa vrši se u svrhu širenja samog paketa, tj. uklanjanja dodatnih zračnosti i eliminacije svih eventualnih nepravilnosti nastalih tokom samog procesa paketiranja. Zagrijavanjem se snima i ponašanje paketa u stvarnim uvjetima rada agregata.

Proces počinje otpuštanjem kućišta statora od podloge i temeljnim čišćenjem prostora unutar i oko statora (vađenje svih pomoćnih dijelova, klinova za paketiranje, podesta i dr.) Za vrijeme zagrijavanja paket je stegnut silom propisanom na crtežu, a prija zagrijavanja u gotovi paket se ugrađuju indikatori temperature (termometri) kojim se postepeno vrši kontrola prirasta temperature u paketu.

Termometri se ugrađuju u dno utora, ne smiju ni u kom slučaju ležati direktno na željezu paketa. Sonde se polažu između ljepljivih izolacionih traka, a osiguravaju se drvenim klinovima od ispadanja iz utora.

Zagrijavanje se vrši toplim zrakom (grijači + kaloriferi) i indukcijom. Ispred izlaza cijevi toplog zraka postavljaju se željezni blokovi radi raspršivanja toplog zraka. Topli zrak prilikom izlaska iz cijevi nesmije puhati direktno po paketu. Ulazna cijev se postavlja unutar paketa tako da uzima topli zrak radi uštede energije. Kompletno kućište statora prekriva se termo ceradama. Sve ostale kontrolne i mjerne uređaje postavljamo izvan statora na pogodno mjesto i osiguravamo stalnu kontrolu parametara zagrijavanja. Paket statora se grije na način da maksimalni prirast temperature bude 5 °C na sat. Paket se zagrijava na 100 °C i na toj temperaturi se držati 4 sata (slika 18).

Dijagram zagrijavanja paketa



Slika 18. Dijagram zagrijavanja paketa statora [5]



Nakon ohlađivanja paketa (cca. 24 sata) skida se višak ljepila sa utora u lijepljenim dionim paketima. Utori se potom kontroliraju kontrolnim klinom. Ukoliko klin zapinje u utorima brusi se višak ljepila u dionim paketima brusnim platnom povlačeći samo radijalno iz utora prema provrtu. Naposljetku se skidaju oštri bridove sa paketa.

Nakon preuzimanja paketa od strane kupca pilom se odrezuju tehnološki nastavci na trapeznim letvama. Nakon otklanjanja tehnoloških nastavaka trapeznih letvi postavljaju se i zavaruju osigurači na vijcima i maticama [8].



7. TEHNOLOGIJA IZRADE STATORSKOG SEGMENTNOG LIMA HIDROGENERATORA

Proces izrade statorskog segmentnog lima hidrogeneratora započinje naručivanjem feromagnetskog materijala (lima) prema projektnoj dokumentaciji u kojoj je točno definirana kvaliteta materijala (očekivana magnetska svojstva). Nakon ulaska materijala u tvornicu na istom se ispituju magnetska svojstva, te po potrebi i mehanička svojstva. Nakon preuzimanja materijala od strane ulazne kontrole kreće se u proces štancanja segmenata. Zbog provjere alata na prvih par uzoraka odštancanog lima provodi se mjerenje dimenzija. Po odobrenom mjernom izvješću dimenzionalne kontrole počinje izrada kompletne količine segmenata potrebnih za izradu statorskog paketa. Prije lakiranja izolacionim lakom svaki segmentni lim se brusi zbog skidanja srha nastalog štancanjem. U samom procesu izrade provodi se niz međufaznih kontrolnih operacija, kao što su ultrazvučno mjerenje debljine laka, provjera faktora punjenja i provjera otpora izolacije. U daljnjem tekstu detaljno su objašnjene sve navedene faze izrade statorskog segmentnog lima sa svim ulaznim i međufaznim ispitivanjima i dobivenim rezultatima provedenim na primjeru iz proizvodnje.

7.1. Nabava feromagnetskog dinamo lima i provjera karakteristika istog

Feromagnetski dinamo lim u određenoj kvaliteti naručuje se prema prethodno zadanim uvjetima iz projektne dokumentacije i prema zahtjevu kupca, te prema Tehničkom uvjetu Končar GiM-a koji sadrži opće zahtjeve na magnetska svojstva, geometrijska svojstva, dopuštena odstupanja, tehnološka svojstva, te uvjete ispitivanja i preuzimanja, a uvelike ovisi o konačnim karakteristikama agregata. Dinamo lim od kojeg se izrađuje lamelirana jezgra, tj. magnetski krug hidrogeneratora u tvornici Končara kupljen je u kvaliteti M230-50A u skladu s europskom normom EN10106 (Hladno valjani neorijentirani završno žareni elektrolimovi i trake). Kratka oznaka materijala M230-50A (prema EN 1027-1) se sastoji iz slijedećih slovno-brojčanih oznaka po datom redoslijedu (slika 19) [10]:

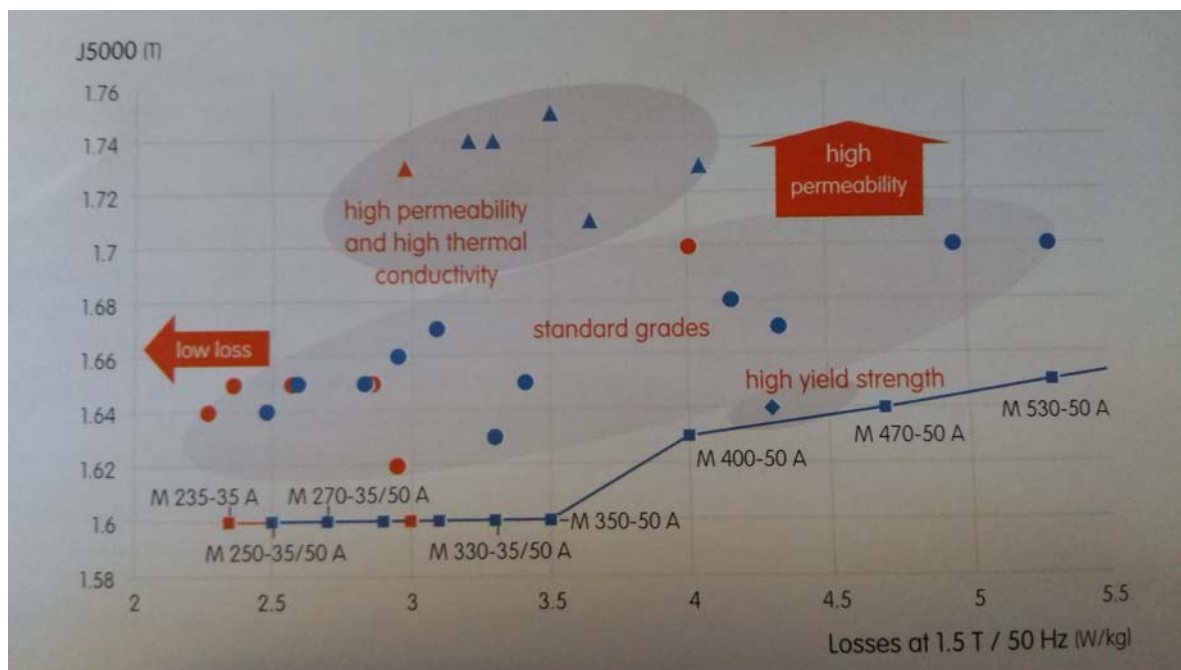
a) Slovna oznaka: M - elektrolim i traka.

b) Stostruki najveći utvrđeni gubici magnetiziranja pri 1,5T i 50Hz po kilogramu za odgovarajuću nazivnu debljinu proizvoda (stostruka vrijednost specifičnih gubitaka magnetiziranja $p_{1,5}$).

- c) Stotruka nazivna debljina materijala u milimetrima.
- d) Slovena oznaka: A - hladnovaljani neorijentirani završno žareni elektrolim i traka.

Prema gore navedenom kratka oznaka materijala značila bi sljedeće:

M230-50A – neorijentirani elektrolim (traka) s maksimalnim specifičnim gubicima magnetiziranja $p_{1,5} = 2,3$ W/kg i nazivnom debljinom 0,5mm, završno žaren.



Slika 19. Odnos permeabiliteta i gubitaka pojedinih kvaliteta feromagnetskog lima za vrijednost 1.5T [12].

Dinamo limovi u kvaliteti M230 koriste se za izgradnju magnetskih krugova industrijskih strojeva visoke iskoristivosti upravo zbog toga što pružaju optimalan odnos između mehaničkih svojstava (mehaničke čvrstoće) i niskih gubitaka nastalih magnetiziranjem (gubici histereze i gubici nastali uslijed vrtložnih struja) [10].

Svaki proizvođač dinamo lima certifikatom (atestom) garantira njegova mehanička i kemijska svojstva kao i magnetske karakteristike (prilog 1). U atestu se u pravilu nalaze samo osnovne magnetske karakteristike isporučenog materijala (kemijski sastav, debljina lima, širina trake u smjeru valjanja, specifični gubici (W/kg) pri 1.0T/50Hz i 1.5T/50Hz, magnetska polarizacija za jakosti magnetskog polja 2500A/m, 5000A/m i 10000A/m itd.) [10].

Elektrolimovi, odnosno trake mogu biti isporučeni neizolirani ili jednostrano, odnosno obostrano izolirani prema EN 10342. Kupljeni lim u kvaliteti M230 obostrano je izoliran tipom izolacije (laka) C3, a jednostrana debljina premaza iznosi 3 μ m [10].



Površina dinamo lima mora biti glatka i čista bez masnoće i korozije. Pojedinačne greške kao što su brazde, mjehurići, pukotine i sl. su dopuštene ako su unutar dopuštenih odstupanja za debljinu i ako ne umanjuju pravilnu uporabu isporučenih proizvoda.

Izolacijski sloj, kod izoliranih elektrolimova, odnosno traka, mora čvrsto prijanjati tako da se ne odvaja pri rezanju. Pri izmjeničnom previjanju, izolacijski sloj se ne smije odvojiti nakon savijanja za 90°. Ako pri ovom ispitivanju dođe do odvajanja, na komadu, iz kojeg je uzet uzorak, vrši se test rezanja. Pri ovom testu nisu dopuštene velike površine s odvojenim izolacijskim slojem, a lagano odvajanje na rezanim rubovima se tolerira.

Dinamo lim mora biti prikladan za rezanje ili štancanje bez pojave preuranjenog trošenja alata [10].

7.1.1. Tehnički zahtjevi za nabavku dinamo lima u kvaliteti M230-50A

Tehnički zahtjevi prilikom naručivanja feromagnetskog dinamo lima su:

Magnetska svojstva prema EN 10106:

- Magnetska polarizacija za jakosti magnetskog polja 2500, 5000 i 10000 A/m pri frekvenciji 50Hz.
- Specifični gubici magnetiziranja pri frekvenciji 50Hz i magnetskoj polarizaciji 1,5T; $p_{1,5}$ (W/kg). (Specifični gubici magnetiziranja su ukupni gubici magnetiziranja po jedinici mase pri izmjeničnom magnetskom polju frekvencije 50Hz i magnetske polarizacije 1,5T - $p_{1,5}$ (W/kg).).
- Anizotropija gubitaka magnetiziranja (anizotropija gubitaka magnetiziranja je postotno odstupanje specifičnih gubitaka magnetiziranja $p_{1,5}$ (W/kg) s obzirom na smjer valjanja.

Tablica 6. Geometrijska svojstva i dopuštena odstupanja (debljina, širina, dužina, zakrivljenost bridova, valovitost te, zaostala zakrivljenost) [10]

Debljina			
Nazivna debljina (mm)	Dopuštena odstupanja unutar mjernog uzorka	Dopuštena odstupanja unutar jednog lima ili trake u smjeru valjanja mjernog uzorka	Dopuštena odstupanja unutar jednog lima u poprečnom smjeru od smjera valjanja mjernog uzorka
0,35	±8%	±8%	0,020
0,50			
0,65	±6%	±6%	0,030
1,00			
Širina			
Nazivna širina (mm)	Dopuštena odstupanja (mm)		
$L \leq 150$	+0,2/0		
$150 < l \leq 300$	+0,3/0		
$300 < l \leq 600$	+0,5/0		
$600 < l \leq 1000$	+1,0/0		
$1000 < l \leq 1250$	+1,5/0		
Dužina			
Naručena dužina	Dopuštena odstupanja		
2465	+0,5/0 %, max +6mm		

- Zakrivljenost bridova dolazi u obzir samo kod rezanih bridova širine iznad 30 mm. Maksimalne vrijednosti zakrivljenosti bridova na uzorku dužine 1m (mjereno prema EN 10251): (0,5 mm za nazivne širine $l > 150$ mm, a 1,0 mm za nazivne širine $30 \text{ mm} < l \leq 150$ mm.).
- Valovitost se definira koeficijentom valovitosti: omjer visine vala i dužine vala i ispituje se za proizvode nazivne širine > 100 mm. Maksimalna vrijednost koeficijenta valovitosti je 2%.
- Zaostala zakrivljenost je trajna zakrivljenost u smjeru valjanja nenamotane trake. Zaostala zakrivljenost se ispituje za proizvode širine > 100 mm. Zahtjev na zaostalu zakrivljenost definira se narudžbom. Za kvalitetu M230-50A između najdonjeg ruba ispitnog uzorka i mjerne ploče ne smije prelaziti 0,5 mm.



Tehnološka svojstva su: gustoća- ρ (kg/dm^3), koeficijent punjenja- f_{pw} , broj previjanja, unutarnja naprezanja [10]

- Gustoća nije propisana, ali ju dobavljač navodi na certifikatu kao bazu za računanje magnetskih svojstava i koeficijenta punjenja.
- Koeficijent punjenja je omjer stvarne mase i teoretske mase. Teoretska masa je umnožak gustoće materijala i volumena mjernog uzorka pri prešanju pritiskom od $1\text{N}/\text{mm}^2$. Najmanje vrijednosti koeficijenta punjenja za kupljenu kvalitetu (M230-50A) iznosi minimalno 0,97%.
- Minimalni broj previjanja za kvalitetu M230-50A iznosi 2 (slovima: dva previjanja).
- Proizvodi moraju, u najvećoj mogućoj mjeri, biti oslobođeni unutarnjih naprezanja. Unutarnja naprezanja karakterizirana su odstupanjem u odnosu na liniju rezanja. Unutarnja naprezanja se ispituju za proizvode širine $> 150\text{mm}$, a dopuštena odstupanja smiju biti $\leq 2\text{mm}$.



Izolacija

Pri narudžbi izoliranog dinamo lima potrebno je obavezno specificirati površinsku izolaciju (tablica 7). Hladnovaljani neorijentirani dinamo lim može se isporučiti neizoliran, jednostrano izoliran ili obostrano izoliran. Kupljeni dinamo lim u kvaliteti M230 obostrano je izoliran tipom izolacije (laka) C3 (EC-3, prema EN 10342), a jednostrana debljina premaza iznosi 3 μ m [10].

Tablica 7. Karakteristike površinske izolacije[10]

1.	Oznaka izolacije	prema EN 10342 ili ASTM ili interna oznaka proizvođača
2.	Baza izolacije	organska /anorganska
3.	Primjena	
4.	Debljina jednostranog sloja	2-4 μ m
5.	Način nanošenja	obostrano / jednostrano
6.	Boja	
7.	Površinski otpor pri sobnoj temperaturi	>20 Ω cm
8.	Toplinska otpornost u zraku (trajno)	°C
9.	Toplinska otpornost u zaštitnom plinu (intermitirano)	°C
10.	Kemijska postojanost	organska otapala / maziva pri štancanju / freon
11.	Sposobnost za aluminijsko lijevanje	
12.	Pogodnost na varenja	

Klasifikacija površinske izolacije prema EN 10342 daje osnovnu kemijsku bazu (organski ili anorganski) i primjenu, a navedene su slijedeće vrste izolacije: EC-0, EC-1, EC-2, EC-3, EC-4, EC-4-AS, EC-5, EC-5-G, EC-5-N, EC-5-P, EC-5-AS, i EC-6. U tablici 8 dane su karakteristike za tri vrste izolacije [11].

Tablica 8. Klasifikacija površinske izolacije za dinamo limove (dio iz EN 10342) [11]

Oznaka izolacije	Opis izolacije-karakteristike- tipična primjena-ograničenje korištenja
EC-3	Organski – lak/emajl – premaz pogodan za štancanje. Premaz može štetno djelovati na zavarljivost i ne podnosi normalne temperature starenja. Premaz je normalno pogodan za radne temperature do 180 °C. Korisnik treba voditi računa o oslobađanju plinova tijekom varenja ili izlaganju čelika s ovim izolacijskim slojem povećanim temperaturama. Može se specificirati površinski izolacijski otpor.
EC-5-N	Organski (najčešće) premaz s dodatkom za povećanje kvalitete izolacijske površine. Premaz podržava normalna temperaturna opterećenja pri starenju, ali je moguće smanjenje površinskog otpora. Premaz će izdržati paljenje pri temperaturama 300-550 °C koje se koriste pri popravku statorskog paketa, ali ne i temperature pri starenju. Korisnik treba voditi računa o oslobađanju plinova tijekom varenja ili izlaganju čelika s ovim izolacijskim slojem povećanim temperaturama. Može se specificirati površinski izolacijski otpor.
EC-6	Organska baza + anorganski dodatak u svrhu povećanja površinskog izolacijskog otpora. Tipična primjena je za velike rotacijske strojeve - generatori za električne centrale. Premaz općenito poboljšava štancanje i pogodan je za izradu. Premaz će izdržati paljenje pri temperaturama 300-550 °C koje se koriste pri popravku statorskog paketa, ali ne i temperature pri starenju. Korisnik treba voditi računa o oslobađanju plinova tijekom varenja ili izlaganju čelika s ovim izolacijskim slojem povećanim temperaturama. Može se specificirati površinski izolacijski otpor.

7.1.2. Ispitivanje magnetskih karakteristika dinamo lima M230-50A

Svaka ispitna jedinica iznosi 20t ili ostatak iz proizvoda (statorskog segmentnog lima) iste vrste i nazivne debljine. Kod koluta mase preko 20t, svaki kolut je ispitna jedinica.

Ako nije posebno ugovoreno, ista pravila vrijede i za ispitivanje unutarnjih naprezanja, jamstva za površinske izolacije, te odstupanja oblika i mjera [10].

Uzorci se uzimaju od svake ispitne jedinice. Prvi unutarnji i zadnji vanjski zavoj koluta smatraju se kao ambalaža i ne predstavljaju kvalitetu ostalog dijela koluta. Uzimanje uzoraka se provodi iz prvog vanjskog zavoja isključujući ambalažni sloj i izvan zone zavarivanja. Uzorak dinamno lima se uzima iz gornjeg dijela sloga.

Uz pravilan izbor redoslijeda ispitivanja, isti ispitni uzorak služi za ispitivanje različitih svojstava.

Za mjerenje magnetske polarizacije i specifičnih gubitaka magnetiziranja u 25cm-Epstein-aparatu, ispitni uzorak mora sadržavati najmanje 16 traka slijedećih dimenzija:

-duljina: 280 do 310mm; dopušteno odstupanje duljina je $\pm 0,5$ mm

-širina: 30mm $\pm 0,2$ mm

Polovina traka je izrezana paralelno sa smjerom valjanja, a druga polovina okomito na smjer valjanja. Dopušteno odstupanje pravca rezanja od propisanog smjera je $\pm 5^\circ$. Ispitne trake moraju se rezati pažljivo bez deformacija. Štancanje se smije izvoditi samo s oštrim alatima.

Kada je širina proizvoda nedovoljna za uzimanje traka okomito na smjer valjanja, sve se trake uzimaju u smjeru valjanja [10].

7.1.2.1. Mjerenje gubitaka vatmetričkom metodom Epstein aparatom

Gubici se u željeznim dinamno limovima određuju s pomoću vatmetričke metode normirane međunarodnim standardom IEC 60404-2:1996. Metoda mjeri gubitke u magnetskim limovima normiranih dimenzija, koji su složeni u svežnjeve kvadratične jezgre tzv. Epsteinova aparata.

Epstein aparat EP 300 kao što je i prethodno navedeno namijenjen je za kontrolu magnetskih karakteristika dinamno limova u laboratorijskim uvjetima. Sastoji se od kontrolne jedinice i jezgre u koju se stavljaju uzorci.

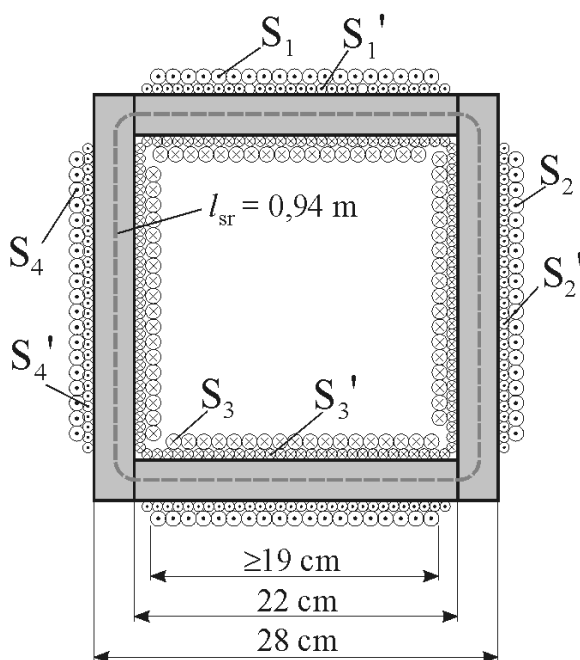
Kontrolna jedinica spaja s osobnim računalom koje joj šalje parametre koje treba podesiti. Izmjerene vrijednosti kontrolna jedinica vraća računalu, koje pomoću odgovarajućeg programa obavlja izračun nama potrebnih veličina [13].

Mjerenje i izračun bazirani su na standardu ASTM 4-343. S obzirom da male netočnosti u izradi dovode do velikih grešaka u izračunu, potrebno je posebnu pažnju posvetiti izradi uzoraka. Uzorak se sastoji od limova čiji ukupni broj mora biti djeljiv s 4, a dimenzije limova trebaju biti:

- širina: 30 mm +0.00 -0.10 mm

- duljina: 280 - 310 mm, standardno 305 mm

Svi limovi prije mjerenja precizno su izvagati s točnošću od ± 10 miligrama. Srh treba svesti na najmanju moguću mjeru ($\leq 3\mu\text{m}$). Maksimalna težina uzorka može biti 500 grama, a izmjerena težina naših uzoraka (UZ1, UZ2 i UZ3) izrađenih iz različitih šarža isporučenog lima iznosila je 355 grama.

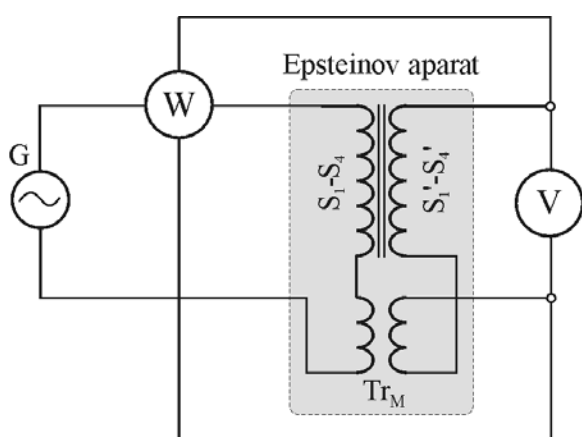


Slika 20. Prikaz Epsteinova aparata s kvadratično formiranom jezgrom [13]



Slika 21. Jezgra i kontrolna jedinica Epstein aparata [14]

U Epsteinov aparat EP 300 koji smo koristili za mjerenje složili smo četiri svežnja



Slika 22. Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u magnetskim limovima [13]

međusobno izoliranih limova, te smo ih uložili u četiri duguljasta svitka primarnog namota (S1 – S4) (slike 20, 21). Limovi su na kutovima isprepleteni i pritegnuti radi bolje magnetske vodljivosti. Sekundarni namot se sastoji također od četiri svitka (S1' – S4') tijesno omotana oko ispitivanih svežnjeva. Primarni i sekundarni namot imaju ukupno jednak broj zavoja (700) i s jezgrom od umetnutih limova tvore transformator prijenosnog omjera 1:1. Snagu gubitaka u jezgri Epsteinova aparata mjeri vatmetar spojen u krug (slika 22) [13].

Postupak mjerenja

Kada smo spojili kontrolnu jedinicu s jezgrom prema uputi proizvođača i s osobnim računalom umećemo kontrolne uzorke dinamo lima u jezgru i na uglovima postavljamo isporučene utege. Potom palimo kontrolnu jedinicu i podešavamo frekvenciju mjerenja (50Hz). Pokrećemo program „Gopal Communications“ i u za to predviđena polja unosimo ulazne podatke (izvaganu težinu uzorka u gramima (355 g), gustoću materijala u g/cm^3 (7.60 g/cm^3), duljinu uzorka u milimetrima (280.0 mm) i frekvenciju mjerenja u Hz (50 Hz)) (tablica 9).

Tablica.9 Ulazni podaci uzorkovanog lima prije mjerenja magnetskih svojstava

ULAZNI PODACI O UZORKU (UZ1) M230-50A									
Težina (g)	Gustoća (g/cm^3)	Duljina (mm)	Širina (mm)	Debljina (mm)	Frekvencija (Hz)	Ispitni uređaj	Broj zavoja (zav)	Procijenjeni udio vrtložnih struja (%)	t ($^{\circ}\text{C}$)
355.00	7.60	280.0	30.0	0.5	50	Epstein Tester EP300	700	30	20

U koloni „ Induction“ dani su predefimirani iznosi indukcije u Teslama (1.0, 1.1, 1.2, 1.3....1.8). U drugom redu kontrolne jedinice pojavljuju se iznosi napona koje treba podesiti tako da se slažu s iznosima u drugom redu do druge ili treće decimalne.

Nakon pritiska na tipku „Hold“ podaci su prebačeni s kontrolne jedinice u računalu i ispisani u redu za odgovarajuću vrijednost indukcije. Postupak ponavljamo sve dok se ne izvrši mjerenje za sve predviđene iznose indukcije. Kada su izmjerene sve vrijednosti program automatski prebacuje podatke u tablicu na računalu i traži nas da u istu unesemo debljinu lima u milimetrima, pretpostavljeni iznos vrtložnih struja u % (najčešće je to 30%) i temperaturu uzorka. Naposljetku mjerenja ispisujemo dobivene rezultate (prilog 2, tablica 10) [15].

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti uzorkovanog lima za vrijednost indukcije 1.5T

IZMJERENE VRIJEDNOSTI EPSTEIN UREĐAJEM ZA VRIJEDNOST INDUKCIJE 1.5T							
B_{zak} (T)	U_{pod} (V)	U_{mj} (V)	I_{sf} (A)	I_{pk} (A)	P (W)	U_{st} (V)	f (Hz)
1.5	9.72794	9.86891	0.71273	1.84636	0.70860	9.72579	50.340

Izračunate vrijednosti (za vrijednost indukcije 1.5T pri 50Hz):

Pomoću izmjerenih vrijednosti jednostavnim izračunom dolazimo do potrebnih vrijednosti specifičnih gubitaka i magnetske permeabilnosti za sve iznose indukcije kako slijedi [15]:

1. Stvarna masa uzorka:

$$m_{st} = \frac{I_{sr} * m_{tZ}}{4l} = \frac{940 * 0.355}{4 * 280} = 0,2979 \text{ kg}$$

m_{tZ} - izvagana težina uzorka, (kg)

I_{sr} =940 – srednja duljina magnetskih silnica, (mm)

l - duljina uzorka, (mm)

2. Specifični gubici:

$$p = \frac{\left(P - \frac{U_{mj}^2}{R}\right) * 100}{m_{st} \left\{ I_v \left[\left(\frac{U_{mj}}{U_{pod}} \right)^2 - 1 \right] + 100 \right\}} = \frac{\left(0,70860 - \frac{(9,86891)^2}{2 * 10^6}\right) * 100}{0,2979 \left\{ 30 \left(\frac{9,86891}{9,72794} \right)^2 - 1 \right\} + 100} = 2,3575 \frac{W}{kg}$$

P - izmjerena radna snaga, (W)

U_{mj} - izmjereni napon, (V)

U_{pod} - podešeni napon na kontrolnoj jedinici, (V)

$R=2 * 10^6$ - unutarnji otpor mjenog kruga kontrolne jedinice, (Ω)

I_v - pretpostavljeni udio vrtložnih struja, (%)

3. Prividna snaga po jedinici mase:

$$s = \frac{U_{mj} * I_{ef}}{m_{st}} = \frac{9,86891 * 0,71273}{0,2979} = 23,6077 \frac{VA}{kg}$$

I_{ef} - efektivna vrijednost struje, (A)



4. Ostvarena vrijednost indukcije:

$$B_{ost} = \frac{U_{st} * 10^4}{4.4428829 * f * N * A} = \frac{9.72579 * 10^4}{4.4428829 * 50.340 * 700 * 0.41705} = 1.4895 \text{ T}$$

$$A = \frac{m_{tz}}{\rho * l * 4 * 0.1} = \frac{355}{7.60 * 280 * 4 * 0.1} = \frac{355}{851.2} = 0.41705 \text{ cm}^2$$

U_{st} - stvarna efektivna vrijednost napona, (V)

f - izmjerena vrijednost frekvencije, (Hz)

$N=700$ – broj zavoja jezgre, (zav)

A - površina presjeka uzorka, (cm²)

ρ - specifična gustoća materijala, (g/cm³)

5. Jakost magnetskog polja:

$$H_{ef} = \frac{\sqrt{2} * I_{ef} * N}{l_{sr}} = \frac{\sqrt{2} * 0.71273 * 700}{0.94} = 750.6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_{pk} = \frac{I_{pk} * N}{l_{sr}} = \frac{1.84636 * 700}{0.94} = 1374.9 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

I_{pk} - vršna vrijednost struje, (A)

6. Magnetska permeabilnost:

$$\mu_{ef} = \frac{B_{ost}}{4 * \pi * 10^{-6} * H_{ef}} = \frac{1.4895}{4 * 3.14 * 10^{-6} * 750.6} = 1579.2 \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\mu_{pk} = \frac{B_{ost}}{4 * \pi * 10^{-6} * H_{pk}} = \frac{1.4895}{4 * 3.14 * 10^{-6} * 1374.9} = 862.1 \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

7. Faktor valnog oblika napona:

$$F_0 = \frac{U_{ef} * F_{stm}}{U_{pod}} = \frac{9.89217 * 1.107207345}{9.72794} = 1.2682$$

$$F_{stm} = 1.107207345$$

U_{ef} - efektivna vrijednost napona, (V)

U_{pod} - podešena vrijednost napona

F_{stm} - faktor oblika za sinusoidalni napon

Tablica 11. Izračunate vrijednosti uzorkovanog lima za vrijednost indukcije 1.5T

IZRAČUNATE VRIJEDNOSTI ZA VRIJEDNOST INDUKCIJE 1.5T							
B_{ost} (T)	p ($\frac{W}{kg}$)	s ($\frac{VA}{kg}$)	H_{ef} ($\frac{A}{m}$)	H_{pk} ($\frac{A}{m}$)	μ_{ef} ($\frac{H}{m}$)	μ_{pk} ($\frac{H}{m}$)	f_0
1.4895	2.3575	23.6077	750.6	1374.9	1579.2	862.1	1.12682

Na dostavljenom magnetskom limu osim mjerenih magnetskih karakteristika mjeri se još i zakrivljenost bridova, koeficijent valovitosti i zaostala zakrivljenost, a sve prema EN 10251. Koeficijent valovitosti se mjeri na način da se ispitni uzorak postavi na ravnu podlogu, a jedan se rub podigne do približno vertikalnog položaja, pusti se da slobodno padne natrag, te se izmjeri visina najvećeg vala h i pripadna dužina L . Koeficijent valovitosti (%) je: $100 h/L$, a maksimalna vrijednost je 2%.

Zaostala zakrivljenost u uzdužnom smjeru koluta se određuje tako da se ispitni uzorak učvrsti na dužini 30mm na okomitu mjernu ploču s izbočenom površinom okrenutoj prema ploči. Zaostala zakrivljenost je udaljenost najdonjeg ruba ispitnog uzorka od mjerne ploče mjereno u osi ispitnog uzorka [10].

7.2. Izrada statorskog segmentnog lima tehnikom štancanja (obrada bez odvajanja čestica postupkom rezanja)

Nakon svih provedenih ulaznih mjerenja i ispitivanja na uzorcima dostavljenog materijala započinje proces strojne obrade bez odvajanja čestica postupkom rezanja, tj. štancanja statorskog segmentnog lima. Štancanje lima izvodi se na preši tvrtke Metalna DRS – V125 sa silom prešanja do 1250 kN i radnom površinom stola širine 1000mm, a dubine 650mm (slika 23).



Slika 23. Prikaz štance na preši Metalna DRS – V125 [9]

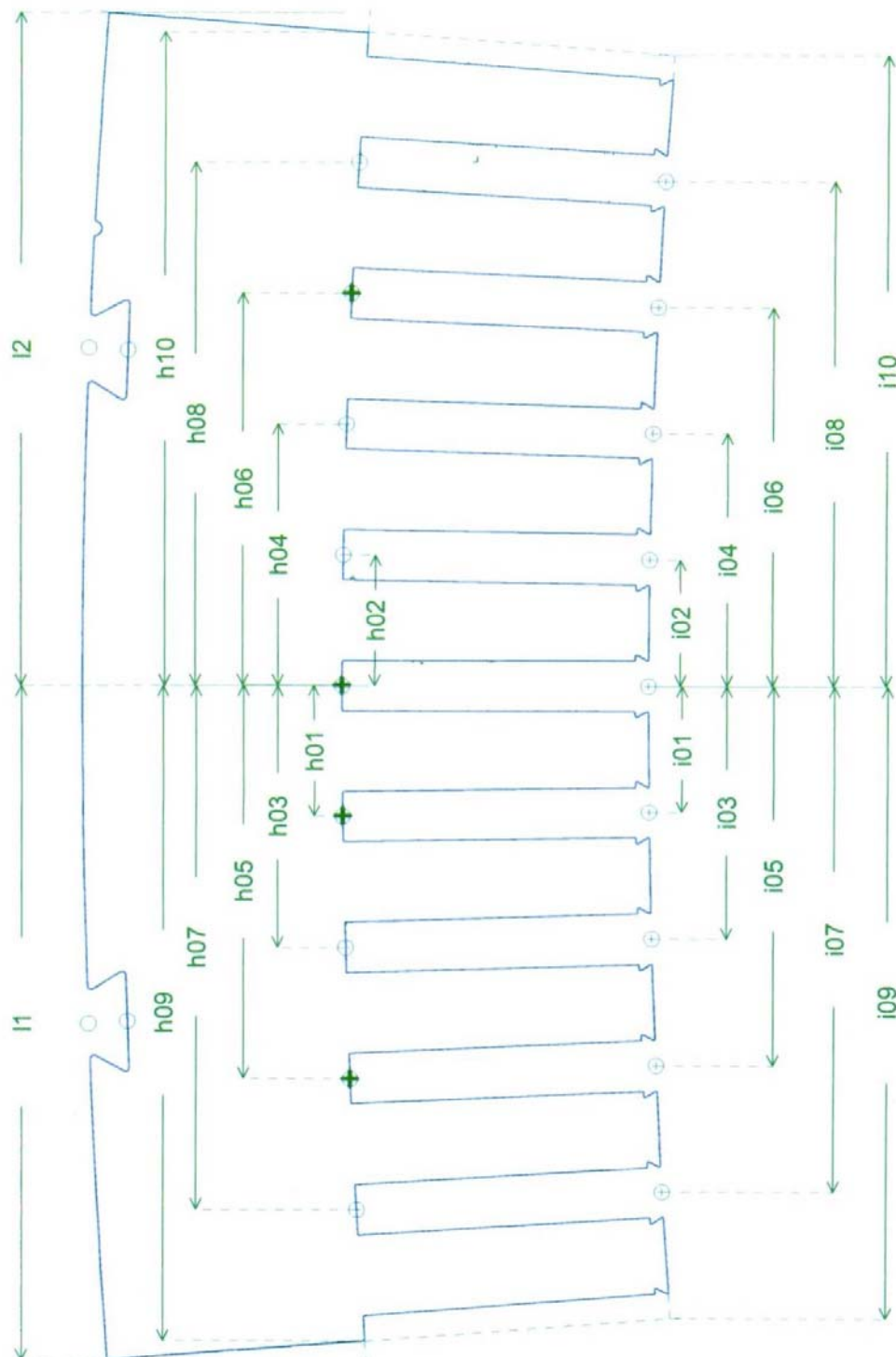
Štancanje je postupak izrezivanja (izbijanja) statorskog segmentnog lima pomoću gotovog alata (štance) na već spomenutoj preši. Alat za štancanje (štanca) izrađuje se u vanjskoj usluzi prema crtežu statorskog segmentnog lima (prilog 3). Jedan od osnovnih uvjeta prilikom naručivanja alata je sam vijek trajanja alata koji iznosi minimalno 300000 limova uz redovno oštrenje koje vrši dobavljač [16].

Naručena štanca je jednorezna i nalazi se u standardnom kućištu s kugličnim vođenjem. Štanca se sastoji od gornjeg dijela alata (žig) i donjeg djela alata (matica) s elementima za ostrugavanje, oprugama za nošenje tj. dizanje gornjeg dijela alata i odstoynim letvama za odmicanje otpadnog lima.

Preciznost alata provjerava se dimenzionalnim mjerenjem prvog odštancanog segmentnog lima. 3D mjerenje dimenzija izvodi se na mjernom stolu u usluzi kod našeg poddoblavljača. Nakon primitka mjernog izvješća Tehnički ured Končar GiM-a pregledava izvješće i daje suglasnost na nastavak štancanja. Nakon pregleda dobivenog mjerenog izvještaja ustanovljeno je da su sve mjerene veličine unutar toleriranih granica ($\pm 0,05\text{mm}$). Osim mjerenja dimenzija na prvim komadima kontrolira se i veličina srha (vizualno, dodirom i mjerenjem). Primjer mjernog izvješće nalazi se u prilogu 4.

Tablica 12. Izmjerene vrijednosti kota po X – osi statorskog segmentnog lima

Oznaka kote	Nominalna veličina	Tolerancija	Izmjerena veličina	Odstupanje	Status
i1	280,24	+/-0,05	280,25	0,01	P
i2	280,24	+/-0,05	280,23	-0,01	P
h01	54,48	+/-0,05	54,43	-0,05	P
h02	54,48	+/-0,05	54,46	-0,02	P
h03	108,95	+/-0,05	108,97	0,02	P
h04	108,95	+/-0,05	108,96	0,01	P
h05	163,39	+/-0,05	163,43	0,04	P
h06	163,39	+/-0,05	163,34	-0,05	P
h07	217,79	+/-0,05	217,81	0,02	P
h08	217,79	+/-0,05	217,77	-0,02	P
h09	272,15	+/-0,05	272,18	0,03	P
h10	272,15	+/-0,05	272,13	-0,02	P
i01	52,57	+/-0,05	52,6	0,03	P
i02	52,57	+/-0,05	52,55	-0,02	P
i03	105,14	+/-0,05	105,18	0,04	P
i04	105,14	+/-0,05	105,12	-0,02	P
i05	157,68	+/-0,05	157,65	-0,03	P
i06	157,68	+/-0,05	157,67	-0,01	P
i07	210,18	+/-0,05	210,15	-0,03	P
i08	210,18	+/-0,05	210,19	0,01	P
i09	262,64	+/-0,05	262,67	0,03	P
i10	262,64	+/-0,05	262,63	-0,01	P



Slika 24. Prikaz mjerenih kота po X – osi statorskog segmentnog lima [9]

7.2.1. Mjerenje veličine srha statorskog segmentnog lima nakon štancanja

Mjerenje veličine srha nastalog na rubnoj konturi statorskog segmentnog lima mjereno je u Laboratoriju Končar GiM-a. Mjerenje srha na nasumično odabranim limovima u toku proizvodnje izvode se periodički (minimalno 2 puta tokom smjene). Kod novog alata maksimalna dozvoljena veličina srha na debljini lima od 0.5mm smije iznositi $30\mu\text{m}$. Prema kontrolno ispitnom propisu Končar GiM-a maksimalna dozvoljena veličina srha neposredno prije brušenja alata iznosi do $60\mu\text{m}$. Mjerenje srha proveli smo na ravnoj i čistoj podlozi optičkim srhomjerom sa mjernom skalom čija podjela iznosi $1\mu\text{m}$ (slika 25). Izmjerena temperatura prostorije neposredno prije mjerenja iznosila je 23°C .

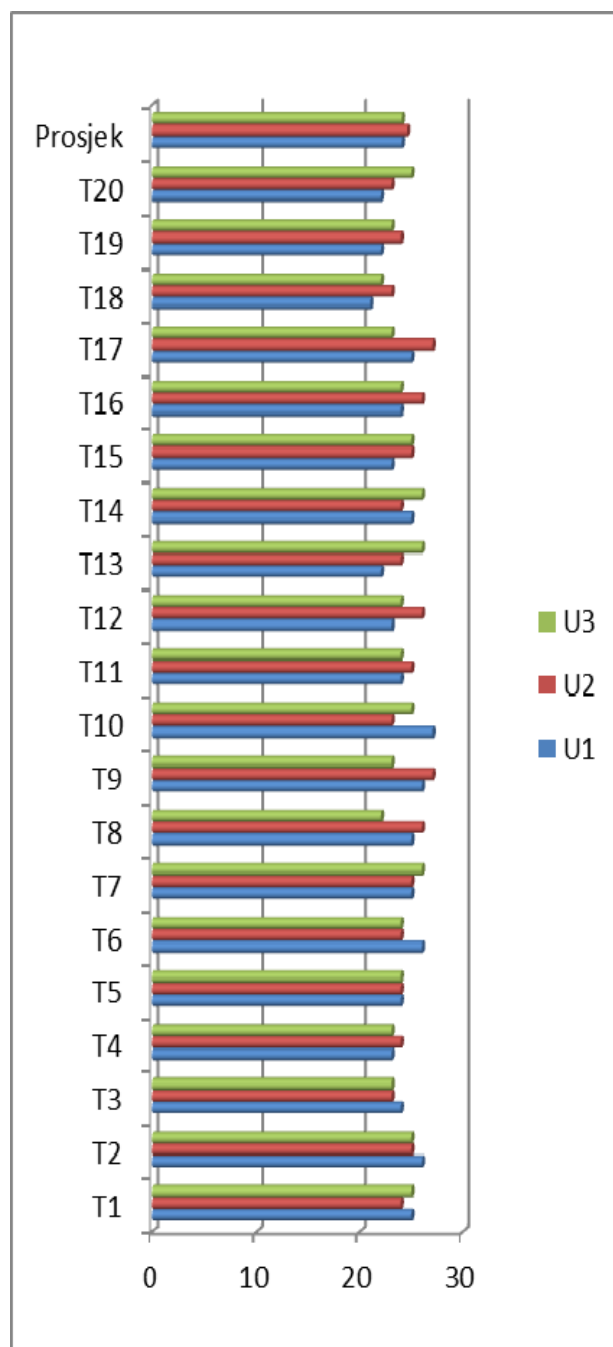


Slika 25. Mjerenje veličine srha optičkim srhomjerom s prikazom veličine srha [9]

Mjerenje je izvršeno na tri uzorka lima (U1, U2 i U3) u 20 proizvoljno odabranih točaka (T1-T20) po cijeloj vanjskoj konturi. Rezultati mjerenja veličine srha na tri uzorkovana lima dani su u tablici 13.

Tablica 13. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja srha na uzorkovanom limu nakon štancanja

Rezultati mjerenja srha statorskog segmentnog lima nakon štancanja (μm)			
	U1	U2	U3
T1	25	24	25
T2	26	25	25
T3	24	23	23
T4	23	24	23
T5	24	24	24
T6	26	24	24
T7	25	25	26
T8	25	26	22
T9	26	27	23
T10	27	23	25
T11	24	25	24
T12	23	26	24
T13	22	24	26
T14	25	24	26
T15	23	25	25
T16	24	26	24
T17	25	27	23
T18	21	23	22
T19	22	24	23
T20	22	23	25
Prosjek	24,1	24,6	24,1



7.3. Skidanje srha na statorskim segmentnim limovima brušenjem

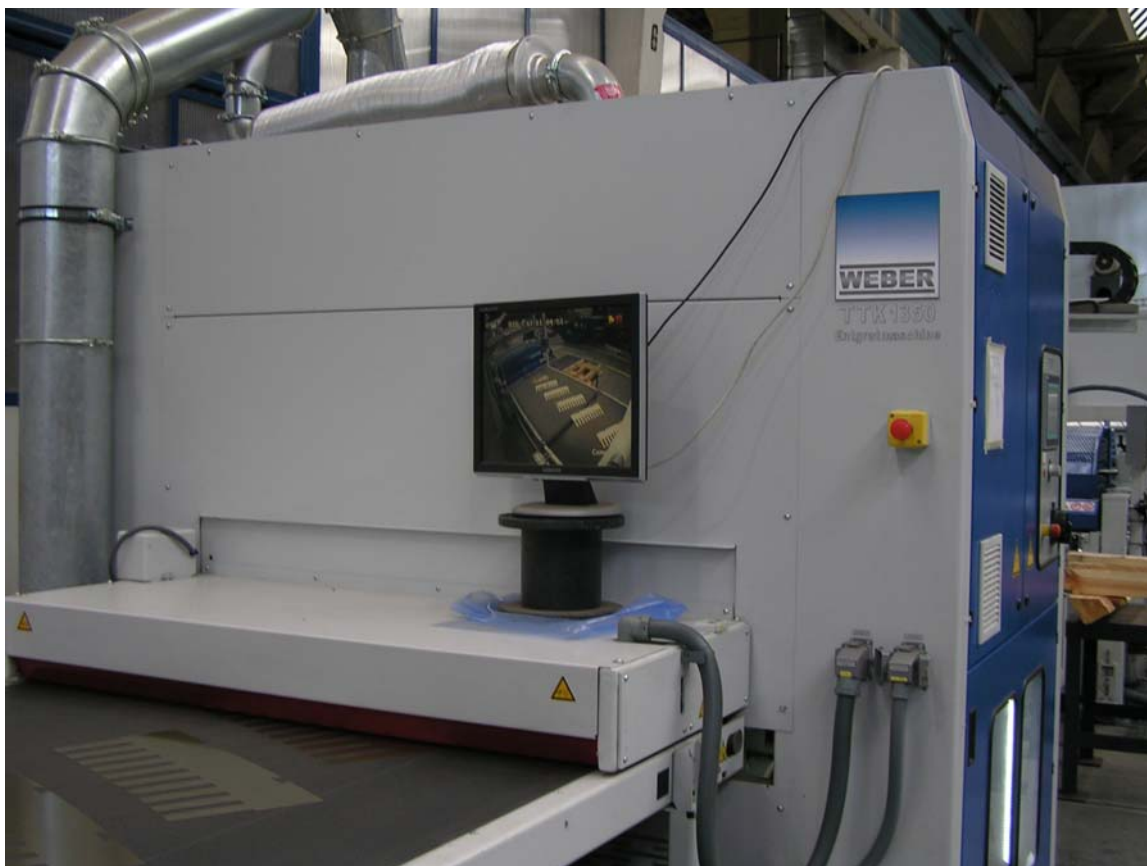
Skidanje srha na statorskim segmentnim limovima u Končar GiM-u izvodi se na brusilici MO/D-1300 (slika 26). Operacija skidanja srha znači skidanje srha nastalog izbijanjem, ali bez oštećenja osnovnog materijala segmenata. Segmenti koji dolaze na skidanje srha ne smiju biti deformirani, jer na takvom limu nije moguće postići zahtjeve u pogledu kvalitete izrađevine. Segmenti se propuštaju kroz brusilicu tako da je srh od izbivanja sa donje strane.



Slika 26. Proces skidanja srha s limova na brusilici MO/D-1300 [9]

Prije brušenja potrebno je na stroju podesiti parametre brušenja kao što su brzina transportne trake i debljina lima (0.5mm). Zbog kalkulacije debljine ulaska brusne trake (cca 0.15mm) u obradak potrebno je mikrometrom izmjeriti i debljinu brusne trake. U procesu brušenja obradak se prenosi preko vakuumske trake, a podešena snaga vakuuma u našem slučaju iznosila je 50% ukupne snage (slika 27). Debljina brusne trake mjeri se prije svake smjene zbog konstantnog održavanja debljine ulaska trake u obradak tijekom cijelog procesa. Nakon brušenja segmenti se lakiraju izolacionim lakom.

Ako se istovremeno brusi srh i izolira segmentni lim prostore odvajamo paravanima da ne bi bilo prisutnosti produkata brušenja u izolacionom sloju.



Slika 27. Proces ulaska limova na u brusilicu MO/D-1300 [9]

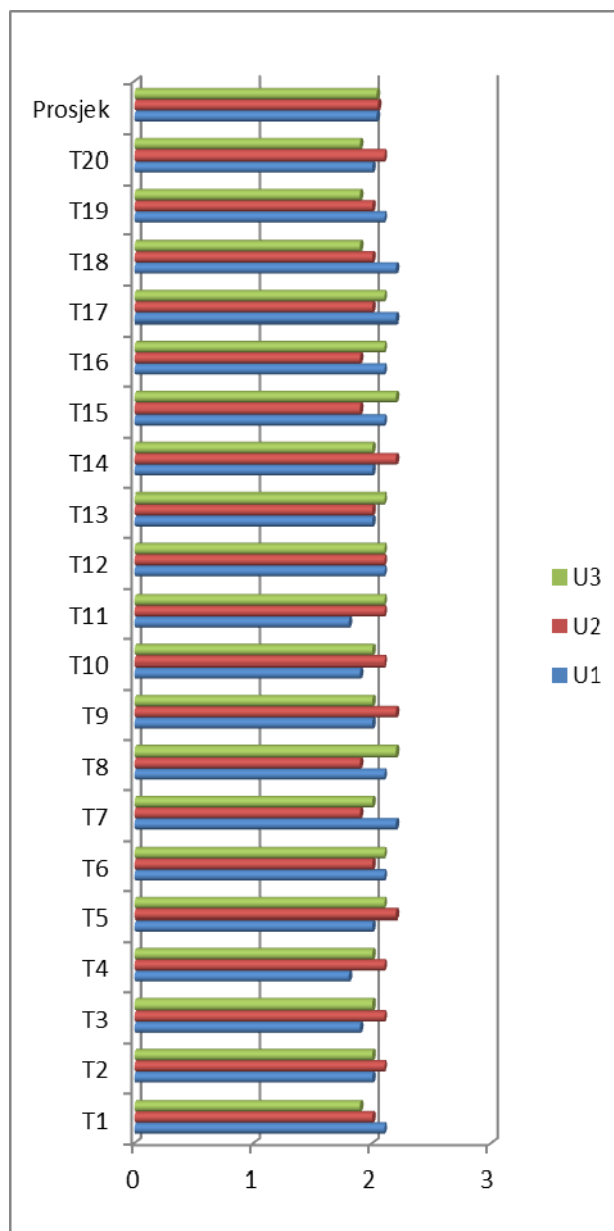
Neke od osnovnih karakteristika stroja su [18]:

Duljina / visina / širina stroja	5148×2200×2280 [mm]
Radna visina stroja	975 (+15) mm
Min. Dimenzije lima	350×350 mm
Max. Širina lima	1250 mm
Min. Debljina lima	0,3 mm
Max. Debljina lima	4 mm
Min. Brzina rada	3,5 m/s
Max. Brzina rada	35 m/s
Visina srha nakon brušenja	<0,003 mm
Potrebno napajanje stroja	3×400V, 50Hz

Mjerenje veličine srha nakon brušenja na označenim (flomasterom s gornje strane) uzorkovanim segmentima (U1, U2 i U3) izvršeno je također optičkim srhomjerom. Mjerenje je izvršeno u približno istim točkama (T1-T20), a rezultate koje smo dobili dani su u tablici 14.

Tablica 14. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja srha na uzorkovanom limu nakon brušenja

Rezultati mjerenja srha statorskog segmentnog lima nakon brušenja (μm)			
	U1	U2	U3
T1	2,1	2	1,9
T2	2	2,1	2
T3	1,9	2,1	2
T4	1,8	2,1	2
T5	2	2,2	2,1
T6	2,1	2	2,1
T7	2,2	1,9	2
T8	2,1	1,9	2,2
T9	2	2,2	2
T10	1,9	2,1	2
T11	1,8	2,1	2,1
T12	2,1	2,1	2,1
T13	2	2	2,1
T14	2	2,2	2
T15	2,1	1,9	2,2
T16	2,1	1,9	2,1
T17	2,2	2	2,1
T18	2,2	2	1,9
T19	2,1	2	1,9
T20	2	2,1	1,9
Prosjeck	2,035	2,045	2,035



7.4. Izolacija statorskog segmentnog lima na stroju „GENERAL“

Kao što smo već i u prethodnom tekstu spomenuli gubici uslijed vrtložnih struja u željeznoj magnetskoj jezgri smanjuju se lamiliranjem jezgre iz međusobno izoliranih statorskih segmentnih feromagnetskih limova. Dakle, smanjenjem debljine lima i kvalitetnom izolacijom svakog segmenta znatno se smanjuju stvaranje većih vrtložnih struja koje posljedično mogu stvoriti znatne gubitke energije nepotrebno zagrijavajući jezgru statora.

Nakon štancanja i brušenja sve limove je potrebno lakirati specijalnim izolacionim lakom da prilikom slaganja magnetske jezgre (paketa statora) ne dolaze u međusobni kontakt.

U praksi su izolacije limova različito izvedene. Starije izolacije su bile na bazi svilastog papira debljine do 30 μm . Izoliranje lakovima debljine do 10 μm je veoma dobre kvalitete. Suvremene izolacijske metode su kemijski postupci stvaranja izolacije u obliku raznih oksida ili fosfata debljine 2 – 6 μm . Izolacijska svojstva su im siromašnija nego kod lakova, ali su znatno tanji i toplinski postojaniji.

Postupak lakiranja lima izolacionim lakom u Končar GiM-u izvodi se na stroju „GENERAL“ (slika 28). Stroj (linija za lakiranje) se sastoji od uređaja za nanošenje laka (Tomanin), 2 transportna uređaja i sustava za toplinsku obradu (Knödel).



Slika 28. Linija za lakiranje „GENERAL“ u tvornici Končar GiM-a [9]



Glavne karakteristike kompletne linije za lakiranje su [19]:

Duljina kompletne linije	22 m
Min. dimenzije lima	350×350 mm
Max. širina lima	1250 mm
Min. debljina lima	0,3 mm
Max. debljina lima	2 mm
Optimalna brzina rada linije	13 m/s
Max. brzina efikasnog rada linije	20 m/s
Min. nanos laka jednostrano	4 μm
Mogućnost nanošenja laka jednostrano / dvostrano	DA / DA
Napon kompletne linije	3×400V, 50Hz
Potrošnja kompletne linije u radu	290 kW/h

Za lakiranje segmenata lima koristili smo vodotopivi lak VOLTATEX E 1151 A. Izolacioni lak je sive pigmentacije, vodotopiv na bazi alkidno-melaminskih smola i punila koje je mješavina barijevog sulfata i titan dioksida. Lak odlikuje kratko vrijeme stvrdnjavanja i vrlo glatka površina. Pogodan je za korištenje na osnovnom izolacionom premazu C-3. Suhi film je otporan na visoke tlakove prešanja prilikom slaganja limova u paket. Ekološki je prihvatljiv [20].

Sam proces lakiranja započinje podešavanjem parametara stroja prema osnovnim parametrima koji određuju uvjete nanošenja izolacije (oblik i veličina segmenta, otpor izolacije, debljina sloja izolacije, temperatura konvejske peći i brzina prolaza lima kroz liniju.)

Izoliraju se samo ispravni segmenti. Deformirani limovi koji imaju prevelik srh ili savinute bridove ne izoliraju se jer na njima nije moguće postići jednoličnu debljinu izolacije po cijeloj površini lima, a moguća su i oštećenje gumenog valjka uređaja za nanošenje laka. Izolacija se ne nanosi na limove koji nisu očišćeni od korozije i masnoće.

Pripremu izolacionog laka propisuje tehnologija, a vizualna kontrola čistoće izolacionog laka provjerava se prilikom ulijevanja laka u spremnik stroja [20].

Minimalna debljina izolacije koju je moguće postići u jednom prolazu iznosi 5-8 μm , a u našem slučaju očekivana debljina izolacije iznosila je cca 7 μm (otpor izolacije diktiran zahtjevima konstrukcije zahtjeva obostrano nanošenje izolacije u 2 prolaza kroz liniju radi postizanja potrebne debljine izolacije u skladu s tehničkim mogućnostima stroja). Očekivana debljina izolacije ovisi o usklađenosti viskoziteta izolacionog laka, pH vrijednosti, te razmaka i brzine okretanja valjaka stroja.



Slika 29. Uređaja za nanošenje laka (Tomanin) [9]

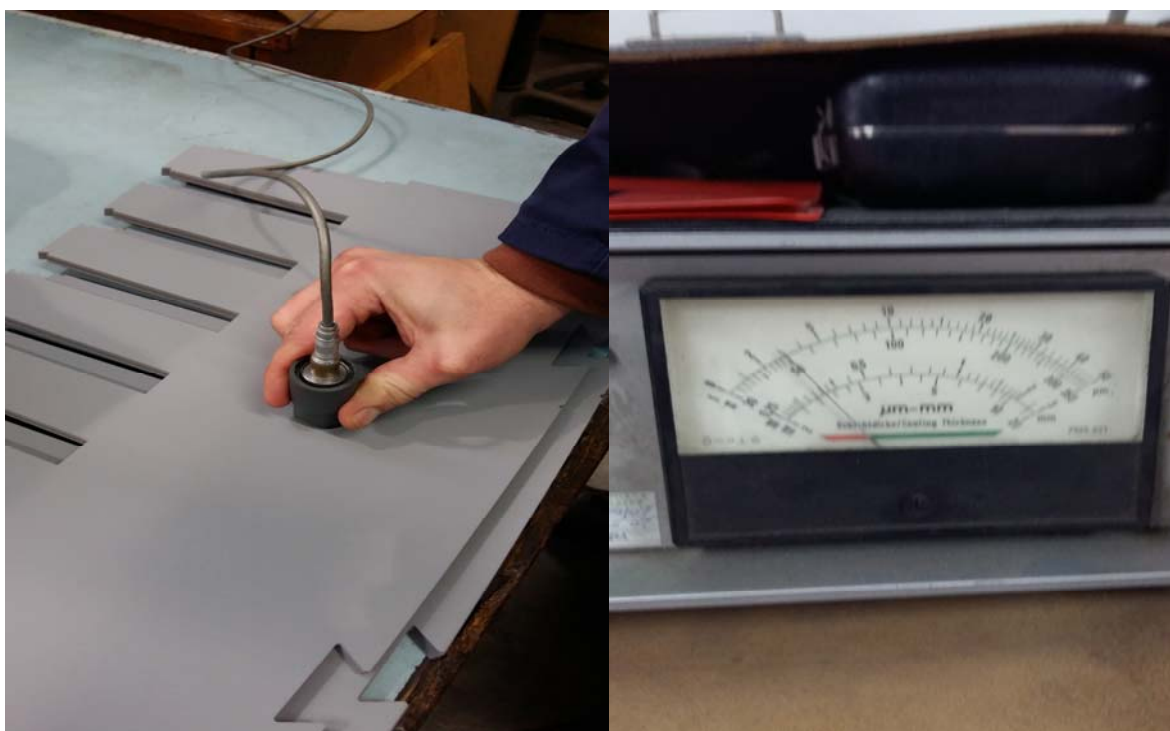
Viskozitet izolacionog laka mjeri se prema ISO 2431. Mjeri se na početku izvođenja operacije nanošenja izolacionog lake, te svaki sat tijekom procesa, a po potrebi i češće. Početni izmjereni viskozitet iznosio je 85-90 s, pri temperaturi od 20 °C. Mjerena vrijednost pH-faktora mjeri se jedanput tokom smjene mjernim uređajem za mjerenje pH vrijednosti. Izmjeren pH-faktor laka iznosio je pH=8 (u pravilu se kreće između 7.5 – 9.5). Brzina konvejera regulirana je tako da prolaz segmenta kroz peć traje 100-120 s, a temperatura peći iznosila je 270 – 290 °C (kontrolira se učestalo tokom izvođenja operacije lakiranja).

7.4.1. Ispitivanje tehnoloških svojstava lakiranih (izoliranih) limova

Nakon lakiranja na limovima se provode mjerenja debljine izolacijskog sloja (nakon prvog i drugog (konačnog) lakiranja), izračun koeficijenta punjenja i mjerenje proboja izolacionog laka (električno ispitivanje).

7.4.1.1. Mjerenje debljine izolacijskog sloja statorskog segmentnog lima

Sukladno normi DIN EN ISO 2178 provedeno je mjerenje debljine izolacije na prethodno korištenim ispitnim uzorcima (U1, U2 i U3). Mjerenje je provedeno u dvadeset točaka za svaki uzorak uređajem LEPTOSKOP koji se koristi za mjerenje nemagnetskih premaza na magnetskom limu (slika 30). Uređaj je prije mjerenja umjeren korištenjem priloženog etalona. Sam uređaj obavlja mjerenje debljine izolacionog laka metodom vrtložnih struja. Nakon izvršenog mjerenja rezultati se očitavaju na mjernoj skali uređaja.

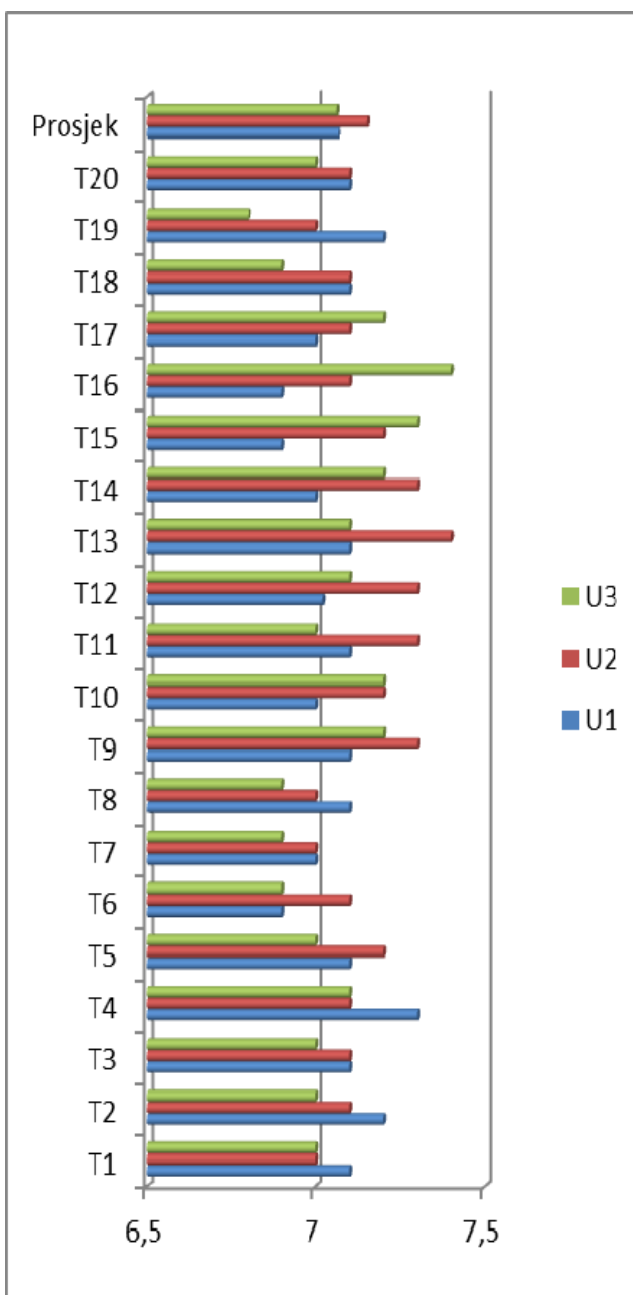


Slika 30. Mjerenje debljine izolacionog laka na statorskom segmentnom limu LEPTOSKOPOM [9]

Dobiveni rezultati mjerenja debljine izolacionog nakon prvog i drugog prolaza kroz liniju prikazani su grafički i tablično (tablice 15, 16).

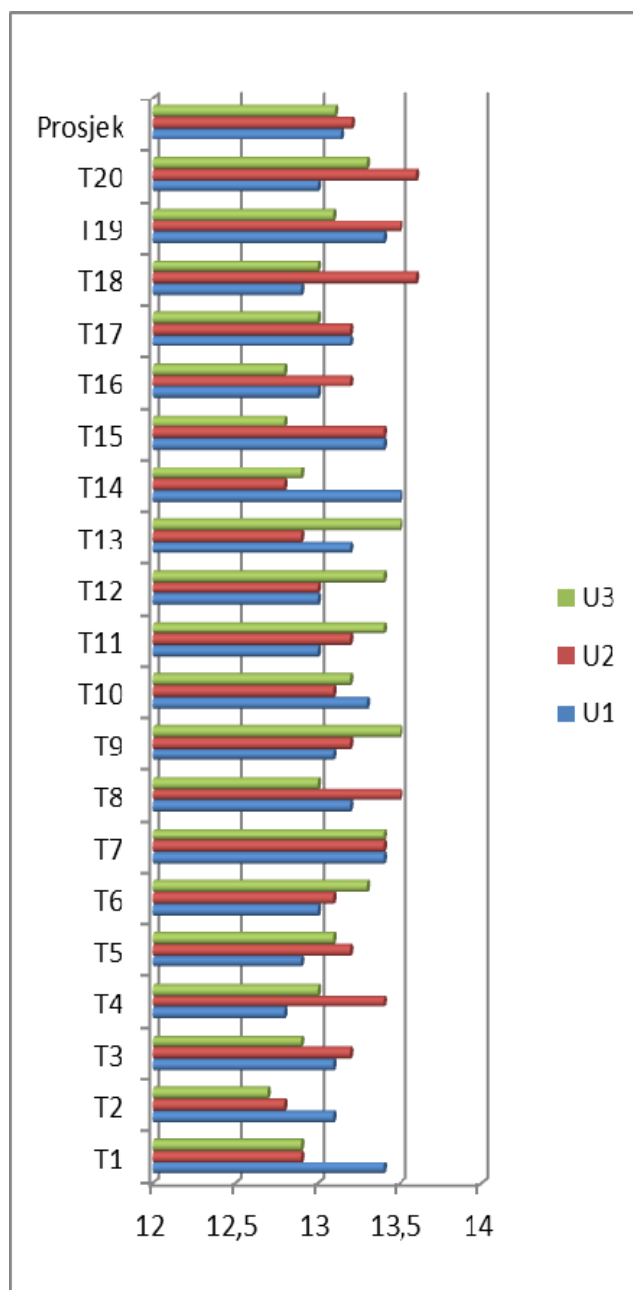
Tablica 15. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja debljine premaza izolacije nakon prvog lakiranja

Rezultati mjerenja debljine premaza izolacije nakon prvog lakiranja (μm)			
	U1	U2	U3
T1	7,1	7	7
T2	7,2	7,1	7
T3	7,1	7,1	7
T4	7,3	7,1	7,1
T5	7,1	7,2	7
T6	6,9	7,1	6,9
T7	7	7	6,9
T8	7,1	7	6,9
T9	7,1	7,3	7,2
T10	7	7,2	7,2
T11	7,1	7,3	7
T12	7,02	7,3	7,1
T13	7,1	7,4	7,1
T14	7	7,3	7,2
T15	6,9	7,2	7,3
T16	6,9	7,1	7,4
T17	7	7,1	7,2
T18	7,1	7,1	6,9
T19	7,2	7	6,8
T20	7,1	7,1	7
Prosjek	7,066	7,15	7,06



Tablica 16. Tablični i grafički prikaz rezultata mjerenja debljine premaza izolacije nakon prvog lakiranja

Rezultati mjerenja debljine premaza izolacije nakon drugog lakiranja (μm)			
	U1	U2	U3
T1	13,4	12,9	12,9
T2	13,1	12,8	12,7
T3	13,1	13,2	12,9
T4	12,8	13,4	13
T5	12,9	13,2	13,1
T6	13	13,1	13,3
T7	13,4	13,4	13,4
T8	13,2	13,5	13
T9	13,1	13,2	13,5
T10	13,3	13,1	13,2
T11	13	13,2	13,4
T12	13	13	13,4
T13	13,2	12,9	13,5
T14	13,5	12,8	12,9
T15	13,4	13,4	12,8
T16	13	13,2	12,8
T17	13,2	13,2	13
T18	12,9	13,6	13
T19	13,4	13,5	13,1
T20	13	13,6	13,3
Prosjeck	13,145	13,21	13,11





7.4.1.2. Mjerenje faktora punjenja i mjerenje proboja izolacionog laka

Nakon izoliranja lima proveli smo mjerenja za određivanje faktora punjenja, te električno mjerenje proboja izolacionog laka.

7.4.1.2.1. Određivanje faktora punjenja

Mjerenje faktora punjenja provodi se nakon izoliranja segmenata. Izvedena izolacija na limovima uključujući nejednoliku debljinu lima, te hrapavost površine lima (koja ne može biti apsolutno glatka) uzrokuju smanjenje aktivnog presjeka jezgre, što se izražava faktorom punjenja koji je veoma bitan faktor u elektromagnetskom proračunu jezgre. Faktor punjenja izražava omjer volumena čvrstog dijela cjeline limova (masa podijeljena sa gustoćom) i volumena koji se dobiva mjerenjem dimenzija jezgre. Minimalni faktor punjenja izoliranih limova debljine 0.5mm u kvaliteti M230-50A iznosi $f_{min} = 0.94$ [21].

Metoda ispitivanja:

Za ispitne uzorke koristili smo izolirane limove složene u slog. Svaki slog sastojao se od 100 komada izoliranih limova. Mjerenja su izvršena u laboratoriju Končar GiM-a. Ispitivanja smo proveli nakon 10000 izoliranih limova tijekom tehnološkog procesa izrade (prilog 5).

Faktor punjenja dobiva se iz formule [21]:

$$f = \frac{m}{r} = \frac{m}{A \cdot \rho \cdot h_{avr}}$$

m – stvarna masa; dobiva se vaganjem svih 100 segmenata (kg)

r – računska masa (kg)

A – površina segmenta (dm²)

ρ – specifična masa lima (kg/dm³)

h_{avr} - srednja visina paketa, dobiva se kao aritmetička sredina rastojanja ploča preše mjereno minimalno na 4 mjesta.

Prema gore navedenoj relaciji za izračun faktora punjenja nedostaje nam stvarna masa svih 100 segmenata i srednja visina paketa. Površina segmenta dana je crtežom (1294 cm²), a specifična masa lima (7.6 kg/dm³) certifikatom dobavljača.

Vaganjem svih 100 segmenata dobili smo sljedeće rezultate koji su dani u tablici 17 (slika 31).



Slika 31. Vaganje limova [9]

Masa izoliranih limova	
Broj komada	Masa (kg)
10	4,6
20	9,4
30	14
40	18,7
50	23,4
60	28,1
70	32,9
80	37,5
90	42,3
100	47

Tablica 17. Mase vaganih limova

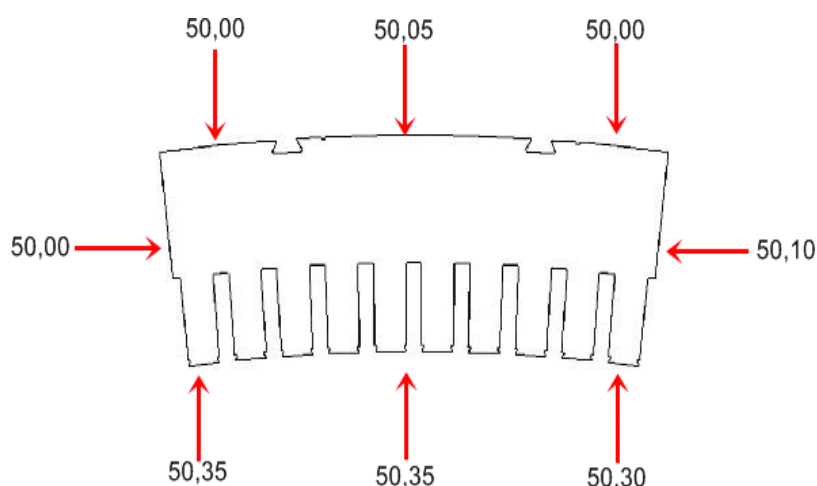
Masa svih 100 limova iznosi $m=47\text{kg}$.

Nakon što smo izvagali i dobili stvarnu masu svih 100 segmenata potrebno je izračunat srednju visinu paketa. Srednja visina paketa računa se kao aritmetička sredina rastojanja ploča preše mjereno u krug na 8 mjesta.

Slog limova (100 komada) precizno složimo na donju ploču preše, te ih tlačimo tlakom od 1 MPa (100 bara). Mikrometrom mjerimo debljinu sloga (rastojanje ploča preše) (slika 32).



Slika 32. Slaganje limova u prešu, tlačenje limova, i mjerenje rastojanja ploča preše [9]



Slika 33. Izmjerene vrijednosti rastojanja ploča preše, tj. debljine sloga limova [9]

$$h_{sr} = \frac{\sum x}{8} = \frac{\sum(50,35 + 50,35 + 50,30 + 50,10 + 50,00 + 50,05 + 50,00 + 50,00)}{8} = \frac{401,15}{8}$$

$$h_{sr} = 50,14375\text{mm}$$

Faktor punjenja dakle iznosi:

$$f = \frac{t_{IL}}{r} = \frac{t_{IL}}{A + \rho \cdot h_{gr}} = \frac{47}{12.94 \cdot 7.6 \cdot 0.5014375} = \frac{47}{49.42769} = 0.95088$$

7.4.1.2.2. Mjerenje proboja izolacionog laka

Površinsko mjerenje proboja laka izolacije mjeri se U-I metodom u laboratoriju Končar GiM-a. Na preši na kojoj je mjerena debljina sloga izoliranih limova za izračun faktora punjenja mjeri se i proboj izolacije statorskih segmentnih limova. Na gornjoj i donjoj ploči preše nalaze se šiljci koji su spojeni na električni razvodni ormar.

Ispitni uzorci se sastoje od slogova izoliranih limova. Deset uzoraka od po 2 segmenta i jedan uzorak od 40 segmenata složenih jedan na drugi u normalnom smjeru pakiranja, izolirani od ploča preše i podvrgnuti tlaku od 1MPa (100 bara) (slike 34, 35).



Slika 34. Slog od 2 lima u preši [9]



Slika 35. Slog od 40 limova u preši [9]

Napon se priključi posredstvom dva šiljka kojima probijamo izolacijski lak do lima, tako da se dobiveni otpor izolacije odnosi na samo dva sloja laka. Otpor R dobiven ovim ispitivanjem je srednja vrijednost otpora među susjednim segmentima (okomito na površinu segmenta) svedenog na 1cm^2 površine segmenata. Ispitni napon za uzorke od 2 segmenta iznosio je 1V , a za uzorak od 40 segmenata 4V (slika 36).



Slika 36. Razvodni ormar za postupak mjerenja limova, te gornji i donji „šiljak“ na pločama preše [9]

Mjerenje proboja laka izolacije proveli smo nakon 10000 izoliranih limova tijekom tehnološkog procesa izrade. Rezultati mjerenja dani su u prilogu. Nakon provedenih ispitivanja na svim uzorcima možemo zaključiti da nema proboja izolacije, tj. otpor izolacije teži u beskonačnost (prilog 6) [21].



Otpor izolacije statorskih segmentnih limova mjeri se u iznimnom slučaju kada to zahtjeva projektna dokumentacija kreirana od strane kupca, a računa se prema formuli [21]:

$$R = \frac{U * A}{I} = \frac{U * A}{C_A * \alpha} \quad (\Omega \text{ cm}^2)$$

U – ispitni napon (V)

A – površina segmenta (cm²)

I – ukupna struja kroz segment (A)

C_A – konstanta ampermetra

α – otklon ampermetra očitani u dijelovima skale

Tablica 18. Dozvoljene vrijednosti otpora izolacije za ispitne uzorke [21]

Dozvoljene vrijednosti otpora izolacije za ispitni uzorak (2 lima - 10 slogova)	
90% od uzorka (9 slogova)	10% od uzorka (1 slog)
≥ 10000Ωcm ²	≥ 1000Ωcm ²
Dozvoljene vrijednosti otpora izolacije za ispitni uzorak (40 limova - 1 slog)	
100% od uzorka (1 slog)	/
≥ 1MΩcm ²	



8. ZAKLJUČAK

Izrada hidrogeneratora je vrlo složen i dugotrajan proces. Da bi se izradio jedan takav agregat koji će proizvoditi električnu energiju desecima godina potrebno je puno znanja, vještine i odgovornosti. Sinkroni hidrogenerator tipični je predstavnik električnog stroja velike snage i maloserijske proizvodnje. Tvornica Končar – Generatori i motori u Zagrebu bavi se već niz godina proizvodnjom velikih hidrogeneratora koji su temelj u proizvodnji električne energije.

U pogledu kvalitete izrade velikih generatora (hidrogeneratori) ispred proizvođača su postavljeni vrlo visoki kriteriji kupca. Da bi se zadovoljili visoki standardi kvalitete potrebno je povećati kvalitetu izrade svakog pojedinog dijela koji naposljetku daju funkcionalni proizvod. Upravo zbog toga tehnološki procesi izrade bilo kojeg dijela agregata su vrlo složeni i zahtjevni .

U Završnom radu prikazan je upravo jedan takav tehnološki proces izrade statorskog segmentnog lima hidrogeneratora, od kojeg se s maksimalnom preciznošću slaže magnetska jezgra vrlo velikog promjera.

Svi dobiveni i prikazani rezultati ulaznih i međufaznih ispitivanja i mjerenja tijekom procesa izrade segmentnog statorskog lima pokazuju da su unutar propisanih veličina određenih kontrolno ispitnim propisima Končar GiM-a, te u skladu s projektnom i konstrukcijskom dokumentacijom. Tijekom izrade segmentnih limova otklonjene su sve buduće eventualne nepravilnosti magnetskog kruga, kao što su pojave vrtložnih struja koje uzrokuju gubitak energije nepotrebno zagrijavajući jezgru, te eventualna oštećenje izolacije prilikom ulaganja namota zbog nesavršenosti uslijed lameliranja.

Kao što smo prethodno naveli otkazi paketa statora u pravilu se javljaju vrlo rijetko, a da bi smo izbjegli neželjena oštećenja, koja mogu dovesti do vrlo skupih popravaka, potrebno se držati mnogih mjera opreza prilikom njihove montaže.



9. LITERATURA

- [1] *Dostupno na:* <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17578> [26.11.2015.]
- [2] Vražić Mario, Elektromehaničke i električne pretvorbe: Sinkroni stroj, FER, Zagreb, 2012.
- [3] Mandić I., Tomljenović V., Pužar M., Sinkroni i asinkroni električni strojevi, TVZ Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2012.
- [4] *Dostupno na:* <http://www.penncoil.com/>, [28.11.2015.]
- [5] Gašparac Marko, Paketiranje statora velikih generatora, Seminarski rad, Končar GiM, Zagreb, 2012.
- [6] *Dostupno na:* https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EMIT_M1.pdf, [09.12.2010.]
- [7] *Dostupno na:* https://www.google.hr/?gws_rd=ssl#q=magnetski+materijali&start=0, [06.12.2015.]
- [8] Šufraj M., Petranović S., Tlačenje i kontrola dimenzija statorskog paketa hidrogeneratora, Končar GiM, Zagreb, 2012.
- [9] Vlastita arhiva fotografija.
- [10] Furčić J., Hladnovaljani neorijentirani limovi i trake, Tehnički uvjet, Končar GiM, Zagreb, 2008.
- [11] *Dostupno na:* <http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf> [05.01.2016.]
- [12] *Dostupno na:* http://automotive.arcelormittal.com/repository2/fce/Unassigned/ElecSteels_brochure_EN.pdf [06.01.2016.]
- [13] Leniček I., Elektrotehnička mjerenja I. dio, FER, Zagreb, 2014.
- [14] *Dostupno na:* https://www.google.hr/search?q=slika+epstein+aparat&rlz=1C2FNWS_enHR659HR659&biw=1161&bih=893&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwirhdjd9cvKAhXFfxoKHS4nDKEQ_AUIBigB#tbm=isch&q=epstein+tester&imgcr=IdRxcDoPFYt-IM%3A [10.01.2016.]
- [15] Upute za rad s Epstein aparatom EP 300
- [16] *Dostupno na:* <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0tancanje> [10.01.2016.]



-
- [17] Gašparac M., Stroj za brušenje statorskog segmentnog lima, Tehnološka kartica stroja, Končar GiM, Zagreb, 2014.
- [18] Gašparac M., Stroj za brušenje statorskog segmentnog lima, Tehnološka kartica stroja, Končar GiM, Zagreb, 2014.
- [19] Gašparac M., Linija za lakiranje statorskog segmentnog lima AN 1307 159, Tehnološka kartica stroja, Končar GiM, Zagreb, 2014.
- [20] Dostupno na: http://www.axaltacs.com/gb/en_GB/Voltatex/core-sheet-varnishes.html
[11.01.2016.]
- [21] Gašparac M., Kontrola izoliranja magnetskog lima statorskih paketa električkih strojeva, Kontrolno ispitni propis, Končar GiM, Zagreb, 2013.

PRILOG 1

PRILOG 2

PRILOG 3

PRILOG 4

PRILOG 5

PRILOG 6