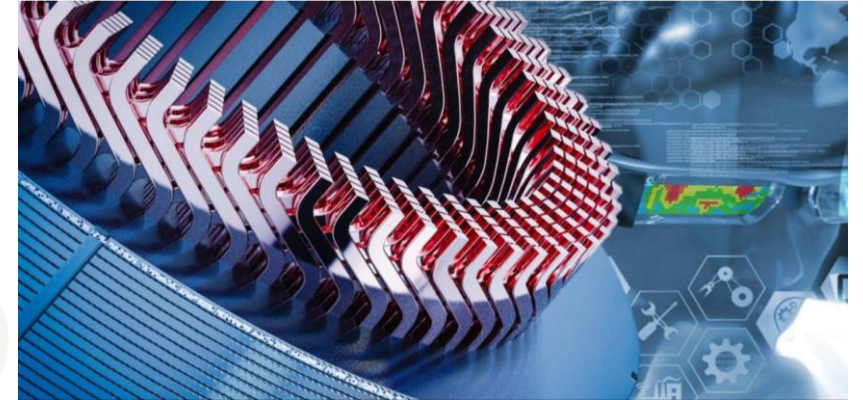


EV / HEV ISHLAB CHIQARISH · ELEKTR YURITMA ISHLAB CHIQARISH

Elektr dvigatellarni ishlab chiqarish

Avtomobil tortish elektr yuritmalari uchun stator (hairpin) va rotor ishlab
chiqarishning asosiy tushunchalari

PEM RWTH Aachen University va VDMA qo'llanmalari asosida moslashtirilgan (2020–2022)



Barqaror transport bakalavriat dasturi

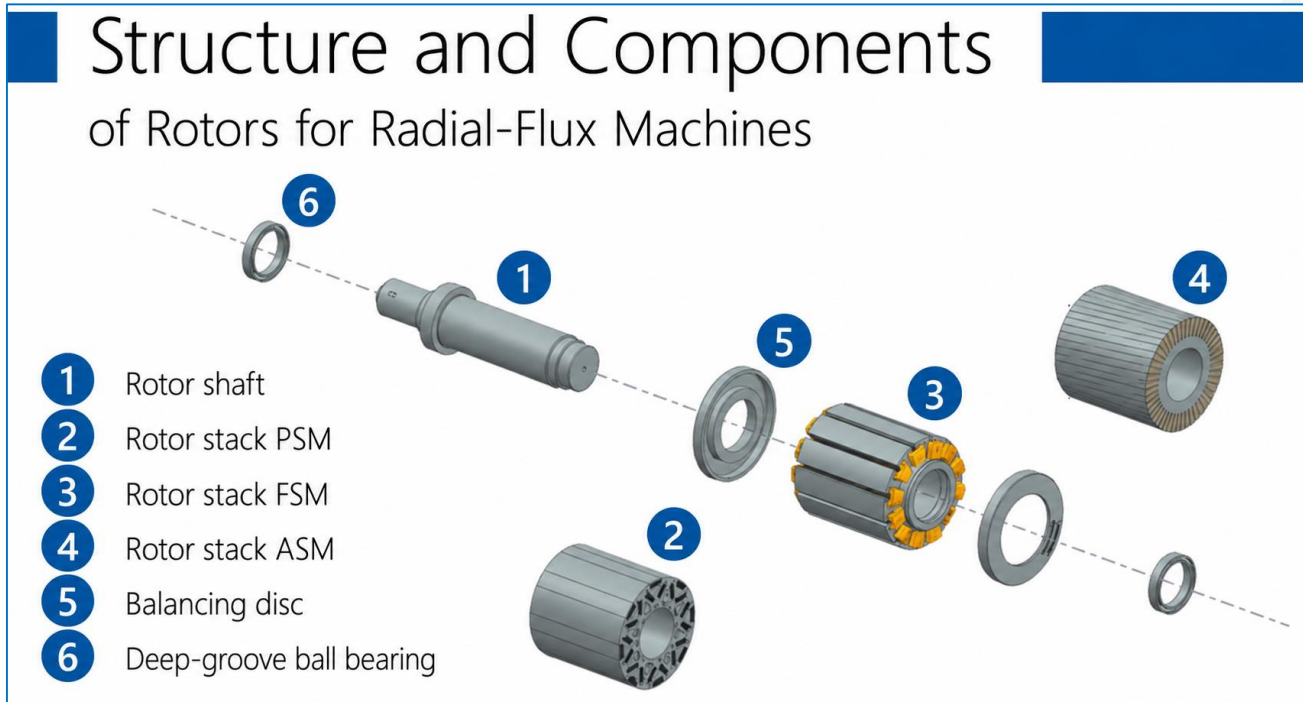
"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

Sustainable Transportation within the Framework of Green Deal - SPHERE

Call: ERASMUS-EDU-2023-CBHE-STRAND-2

Project Number: 101128065

Stator va rotor: elektr dvigatelning ikki asosiy uzeli



Radial oqimli elektr mashinasi rotorining qismlarga ajratilgan ko'rinishi: 1 — val, 2 — PSM rotor o'zagi, 3 — ESM rotor o'zagi, 4 — ASM rotor o'zagi, 5 — muvozanatlash diski, 6 — podshipnik.

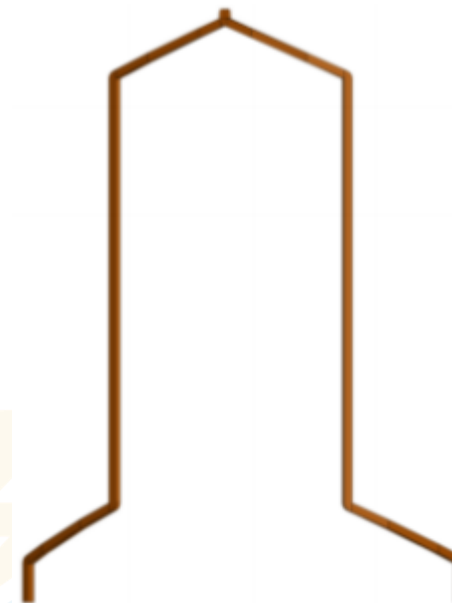
Asosiy tushunchalar

- Elektr dvigatel qo'zg'almas stator va aylanuvchi rotordan tashkil topadi. Statorning uch fazali chulg'amlari aylanuvchi magnit maydon hosil qiladi.
- Sinxron mashinalarda (PSM, ESM) rotor magnit maydon bilan bir xil tezlikda aylanadi. Asinxron mashinada (ASM) esa rotor magnit maydon tezligidan biroz ortda qoladi.
- Avtomobil tortish elektr yuritmalarda stator ishlab chiqarishda hairpin chulg'amlari keng qo'llanadi. Rotor ishlab chiqarish jarayoni esa uning turiga — PSM, ESM yoki ASM — qarab farqlanadi.
- Ushbu taqdimot stator va rotorning to'liq ishlab chiqarish zanjirini — xomashyo holatidagi o'tkazgich va valdan boshlab, sinovdan o'tkazilgan hamda muvozanatlangan tayyor uzalgacha — yoritadi.

Hairpin chulg'am texnologiyasi

Simli chulg'amdan oldindan shakllantirilgan Hairpin o'tkazgichlarga

- **Hairpinlar** — U shaklida oldindan bukilgan, to'g'ri to'rtburchak kesimli yassi mis o'tkazgichlar bo'lib, statorning qatlamli o'zak pazlariga joylashtiriladi. Bu shaklga asoslangan yig'ish jarayonidir.
- Ular an'anaviy ignali, flyer va tortib kiritish usulidagi chulg'amlarni almashtiradi. Qatlamli stator o'zagi qalinligi **0,1–1,0 mm** bo'lgan izolyatsiyalangan elektrotexnik po'lat listlardan yig'iladi.
- Ushbu texnologiya generatorlarda allaqachon qo'llanadi va avtomobil tortish elektr dvigatellarida — sinxron, asinxron hamda taqsimlangan chulg'amli mashinalarda — keng joriy etilmoqda.



Front view of a hairpin

Afzalliklari

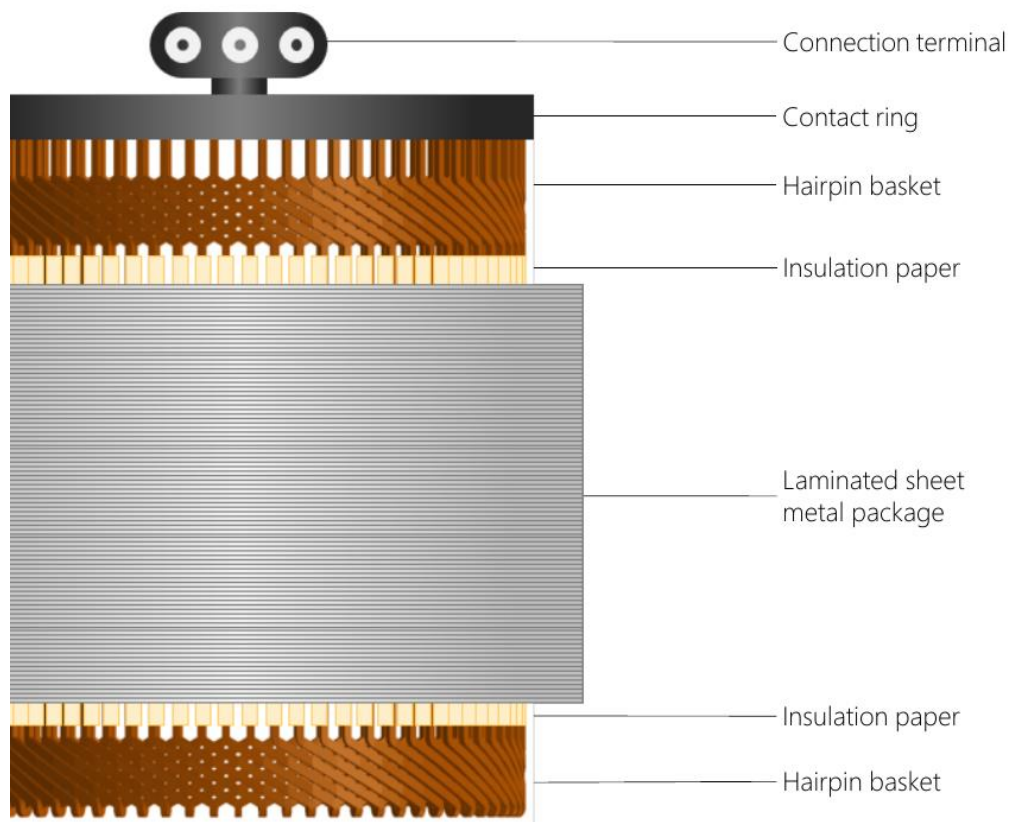
- Pazning mis bilan to'ldirilish koeffitsiyenti juda yuqori: dumaloq simli statorlardagi 45–50% ga nisbatan taxminan 73%.
- O'tkazgichning katta ko'ndalang kesimi yuqori toklarni o'tkazish va katta aylantiruvchi moment hosil qilish imkonini beradi.
- Barqaror va avtomatlashtirishga qulay yig'ish jarayoni seriyali ishlab chiqarish hamda ishlab chiqarish hajmini oshirishni ta'minlaydi.

Cheklovlari

- Yuqori chastotalarda sirt effekti hisobga olinishi kerak; konstruktiv moslashuvchanligi cheklangan.
- Iqtisodiy samaradorlikka, odatda, yiliga taxminan 200 000 dona ishlab chiqarish hajmida erishiladi.
- Har bir statorda taxminan 3–16 xil Hairpin turi qo'llanishi mumkin, bu esa ularni saralash va uzatish jarayonlarini talab qiladi.

Hairpin chulg'amli statorning tuzilishi va komponentlari

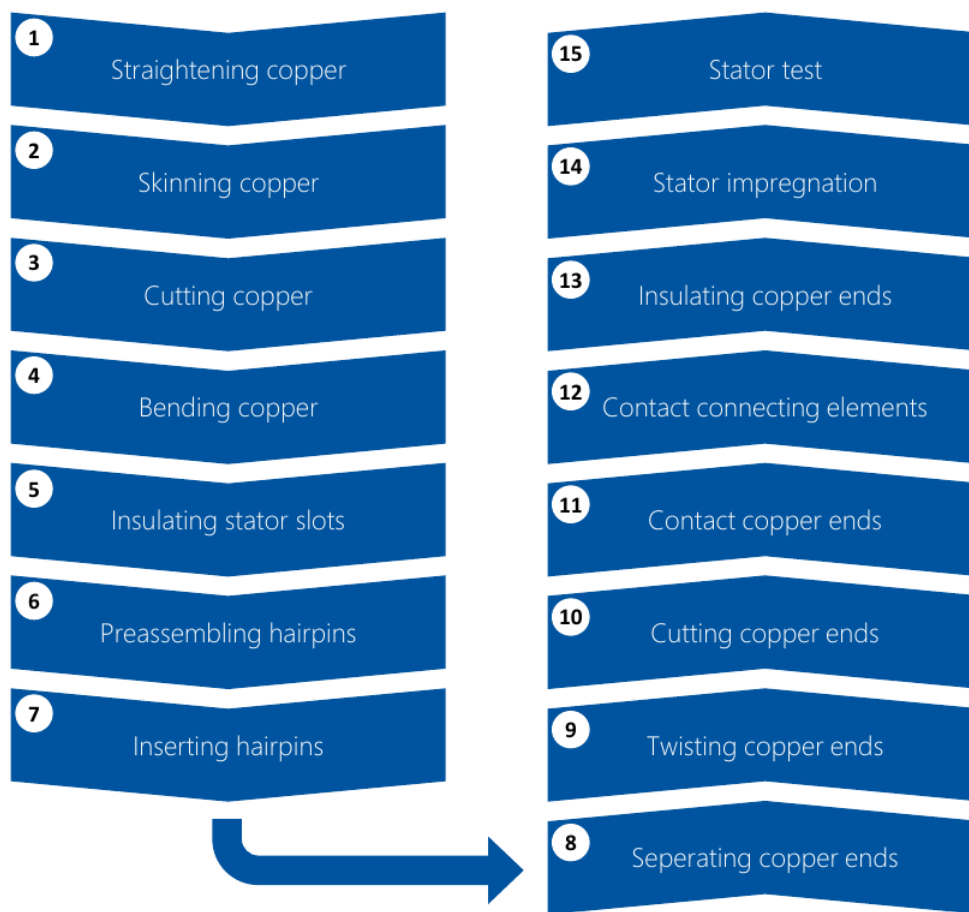
Structure and components of the hairpin stator



Komponentlar

- **Ulanish terminali** — statorni kuch elektronikasiga ulash interfeysi.
- **Ulagichlar yoki yulduz ulanish elementlari o'rnatilgan kontakt halqasi** — chulg'am sxemasiga muvofiq bir-biriga qo'shni bo'lmagan mis o'tkazgich uchlarini o'zaro bog'laydi.
- **Hairpin o'tkazgichlar to'plami** — chulg'amning yon qismini hosil qiluvchi, oldindan yig'ilgan U shaklidagi o'tkazgichlar majmuasi.
- **Izolyatsion qog'oz** — o'tkazgichlarni yerga ulangan qatlamli stator o'zagidan elektr jihatdan ajratadi.
- **Qatlamli elektrotexnik po'lat o'zak paketi** — magnit oqimini o'tkazuvchi, ustma-ust joylashtirilgan izolyatsiyalangan elektrotexnik po'lat listlardan tashkil topadi.

Hairpin statorini ishlab chiqarishning 15 bosqichli texnologik zanjiri

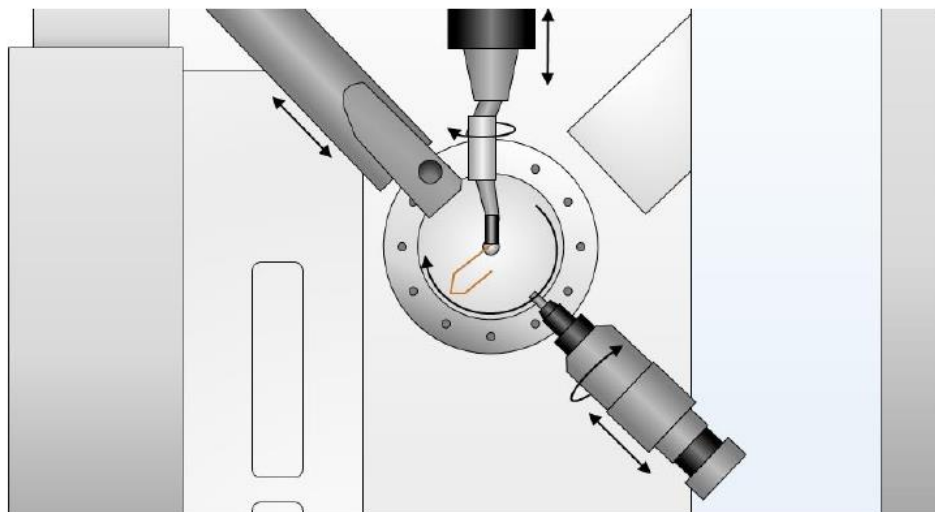


Jarayon zanjirining mazmuni

- **1–4-bosqichlarda** o'tkazgich tayyorlanadi: to'g'rilanadi, izolyatsiyasi yechiladi, kesiladi va kerakli shaklda bukiladi.
- **5–9-bosqichlarda** chulg'am shakllantiriladi: stator pazlari izolyatsiyalanadi, hairpin o'tkazgichlar dastlabki yig'iladi va pazlarga joylashtiriladi, so'ng ularning uchlari ajratilib buriladi.
- **10–12-bosqichlarda** o'tkazgich uchlari ulanadi: kerakli balandlikda kesiladi, lazer yordamida payvandlanadi va ulanish elementlari o'rnatiladi.
- **13–15-bosqichlarda** stator ishlab chiqarish yakunlanadi: payvandlangan uchlari izolyatsiyalanadi, stator impregnatsiyalanadi va sinovdan o'tkaziladi.

O'tkazgichni tayyorlash (1-4-bosqichlar)

2D and 3D bending (CNC bending)



CNC bending of the copper wire (step 4)



To'rtta asosiy bosqich

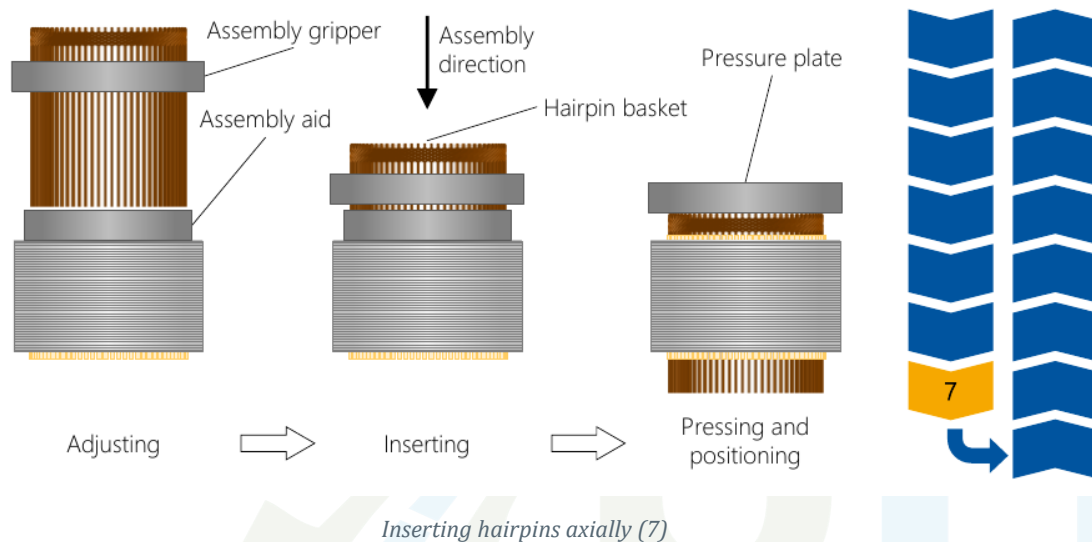
- **To'g'rilash:** ko'p bosqichli roliklar yassi mis o'tkazgichning g'altakdan qolgan egriligini bartaraf etadi.
- **Izolyatsiyani yechish:** lazer yordamida o'tkazgich uchlaridagi izolyatsiya tanlab olib tashlanadi.
- **Kesish:** o'tkazgich belgilangan uzunlikda, qirralarda g'adir-budurlik va ko'ndalang kesim deformatsiyasini hosil qilmasdan kesiladi.
- **Bukish:** Hairpin oyoqchalari statorning turli qatlamlariga yetib borishi uchun o'tkazgich CNC usulida ikki va uch o'lchamli shaklga keltiriladi.

Sifatga qo'yiladigan asosiy talablar

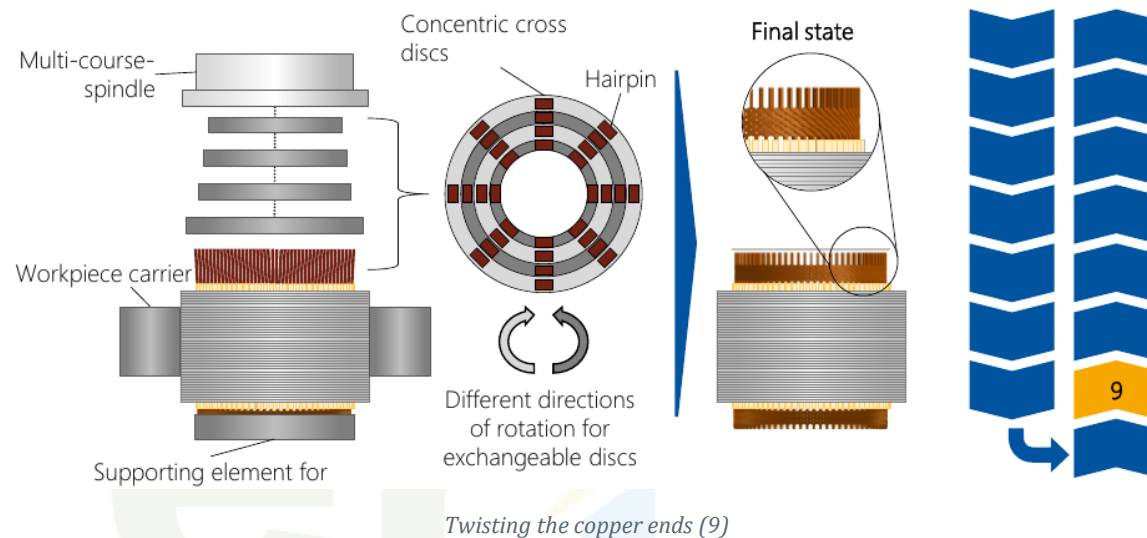
- To'g'rilashdan so'ng qoldiq egrilik, spiral burilish va o'tkazgich shikastlanishi minimal bo'lishi; izolyatsiyasi yechilgan qismlar esa toza va qoldiqsiz bo'lishi kerak.
- Bukish jarayonida shakl, burchak va joylashuv aniqligi saqlanishi, elastik qaytish kompensatsiya qilinishi hamda tashqi bukilish radiusidagi izolyatsiya shikastlanmasligi lozim.

Chulg'amni shakllantirish (5–9-bosqichlar)

Insert hairpins axially in the laminated sheet metal package



Transverse arrangement according to the winding scheme



Kiritish va dastlabki yig'ish

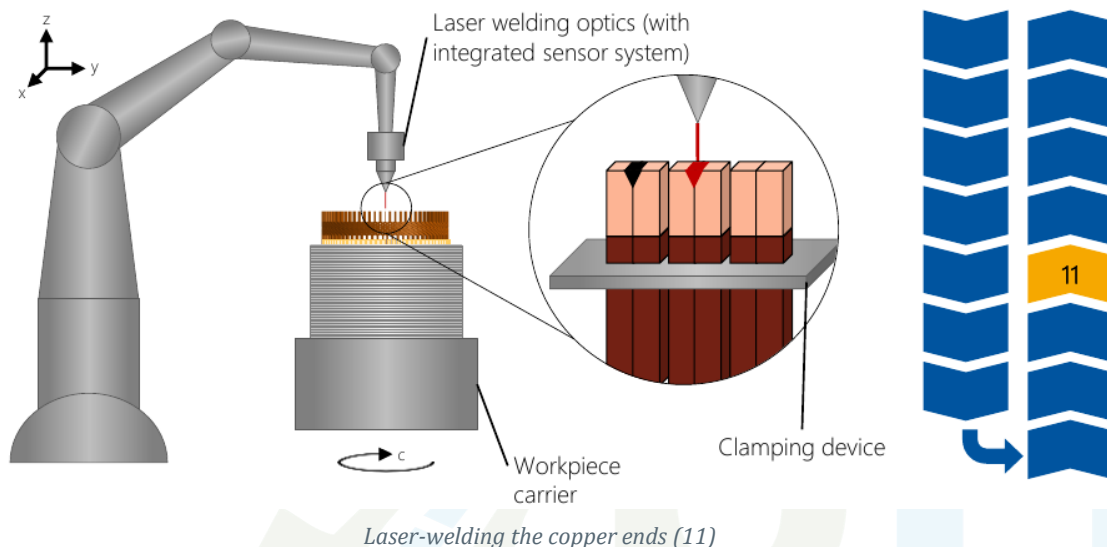
- Stator pazlari buklangan izolyatsion qog'oz bilan qoplanadi. Hairpin o'tkazgichlar dastlab to'plam shaklida yig'ilib, o'zak pazlariga o'q bo'ylab kiritiladi. Biriktirish oralig'i 0,1 mm dan kichik bo'lishi kerak.
- Bosim plastinasi o'tkazgichlarni o'q yo'nalishidagi yakuniy holatiga tekislaydi va joylashtiradi.

Uchlarni ajratish va burash

- Asbobning o'tkazgich uchlari yetib borishi uchun mis uchlari radial yo'nalishda ajratiladi. Keyin ular chulg'am sxemasiga muvofiq parallel joylashishi uchun S shaklida buriladi.
- Erkin o'tkazgich uchlari shikastlanmasligi uchun bukilish radiusi sohasida tayanch bilan ushlab turiladi.

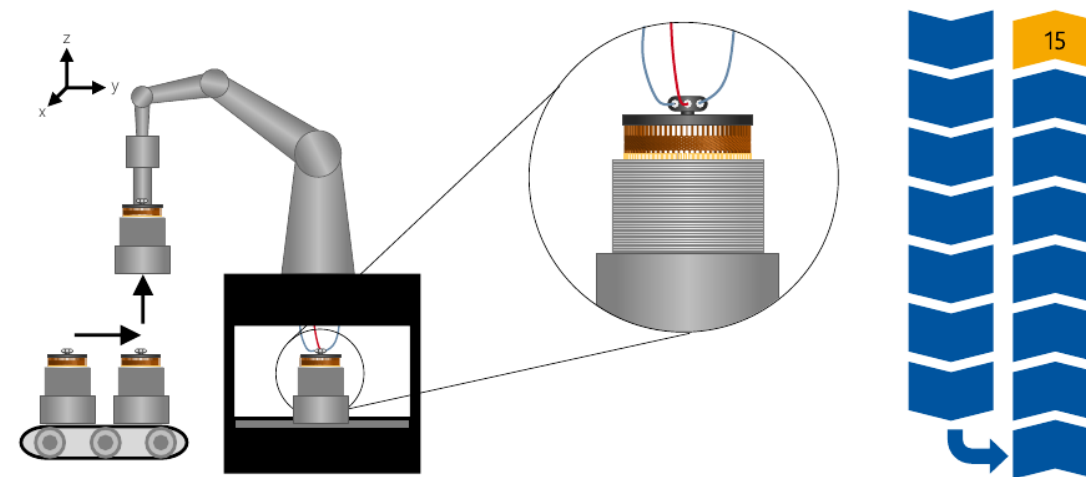
Kontaktlarni ulash va yakuniy ishlov berish (11–15-bosqichlar)

according to the specified winding scheme



Laser-welding the copper ends (11)

Stator test at the end of stator production



End-of-line stator test (15)

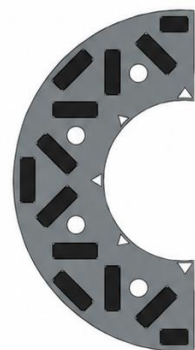
Kontaktlarni ulash va payvandlash

- Chulg'am sxemasiga muvofiq qo'shni mis o'tkazgich uchlari siqib mahkamlanadi va lazer yordamida payvandlanadi. Kamera datchigi o'tkazgich uchlarining aniq holatini belgilaydi.
- Ulanish elementlari — kontakt halqasi, ko'prikchalar va yulduz ulanish elementlari — bir-biriga qo'shni bo'lmagan o'tkazgich uchlarini o'zaro bog'laydi.

Izolyatsiyalash, impregnatsiyalash va sinovdan o'tkazish

- Payvandlangan uchlar qisqa tutashuvdan himoyalash uchun qayta izolyatsiyalanadi, masalan, uyurma qatlamda sinterlash usulida. So'ng stator mexanik mustahkamlik va issiqlik uzatilishini yaxshilash maqsadida smola bilan impregnatsiyalanadi.
- Yakuniy sinovlarda izolyatsiyaning elektr mustahkamligi, qisman razryadlar, elektr qarshiligi va chulg'am ulanish sxemasining to'g'riligi tekshiriladi.

Rotor topologiyalari: PSM, FSM va ASM



Permanent-Magnet Synchronous Motor (PSM)

Excitation principle

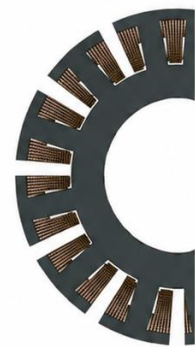
- Permanent magnets are mounted inside or on the rotor and generate a constant magnetic field.

Advantages

- Higher power density
- Higher efficiency

Disadvantages

- Higher material costs
- Greater assembly effort when the magnets are already magnetized



Externally Excited Synchronous Motor (ESM)

Excitation principle

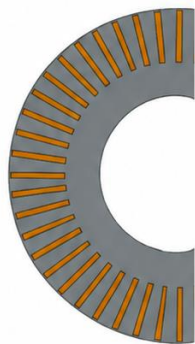
- The teeth of the rotor lamination stack are wound in a manner similar to the stator.
- The rotor winding is supplied with DC voltage through slip contacts or by inductive power transfer, thereby generating a constant electromagnetic field.

Advantages

- Controllable rotor magnetic field
- Established production processes

Disadvantages

- Stochastic winding processes
- Mechanical wear of the slip contacts



Asynchronous Motor (ASM)

Excitation principle

- Copper or aluminium bars are short-circuited to form a rotor cage.
- The rotating magnetic field of the stator induces current in the short-circuited cage, which generates an electromagnetic field.

Advantages

- No drag torque
- Compact process chain

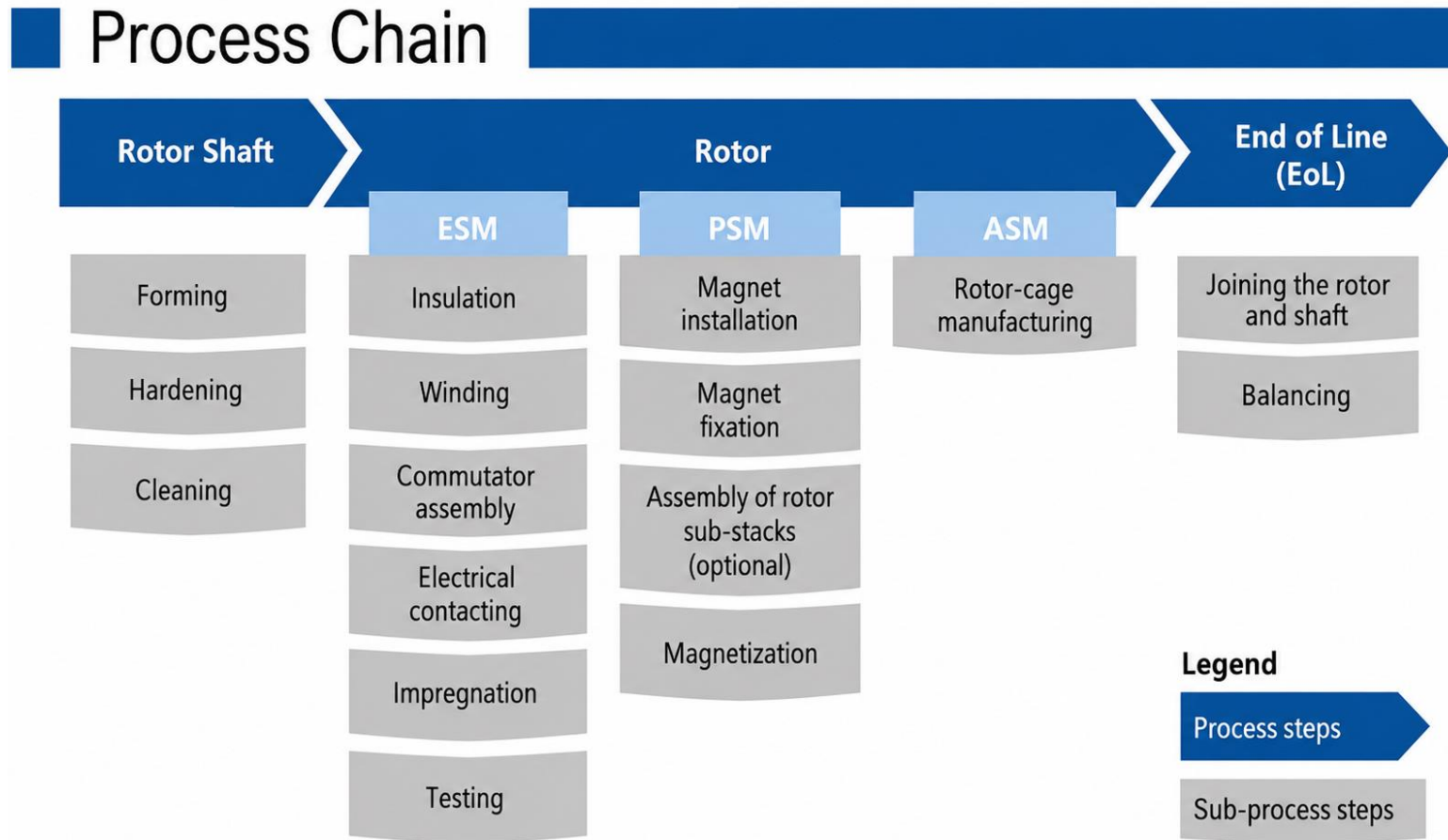
Disadvantages

- Lower efficiency
- High process temperature during die casting

Uchta rotor turining qisqacha taqqoslanishi

- PSM** — rotor ichidagi yoki sirtidagi doimiy magnitlar doimiy magnit maydon hosil qiladi. Quvvat zichligi va samaradorligi yuqori, ammo magnitlar qimmat va yig'ish murakkab.
- ESM** — chulg'amli rotorga sirpanish halqalari orqali o'zgarmas tok uzatiladi. Magnit maydonni boshqarish mumkin, biroq kontaktlarning yeyilishi va chulg'am ishlab chiqarishdagi og'ishlar muammo bo'lishi mumkin.
- ASM** — stator maydoni qisqa tutashtirilgan rotor qafasida tok hosil qiladi. Doimiy magnitlar talab qilinmaydi, konstruktsiya mustahkam va ixcham, ammo samaradorligi pastroq.

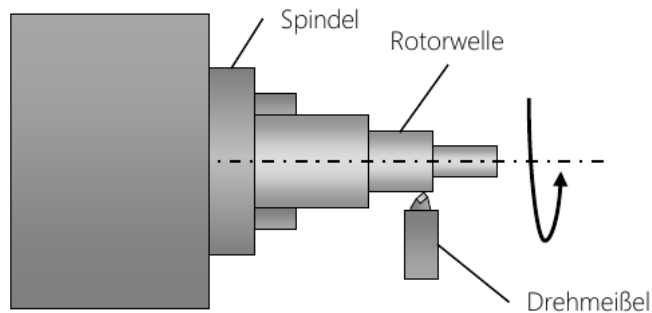
Rotor turiga ko'ra ishlab chiqarish jarayonlari zanjiri



Umumiy va o'ziga xos jarayonlar

- Umumiy boshlang'ich bosqich: rotor valini shakllantirish, termik qotirish va tozalash.
- ESM jarayoni: izolyatsiyalash, chulg'am o'rash, kommutatorni o'rnatish, elektr kontaktlarini ulash, impregnatsiyalash va sinovdan o'tkazish.
- PSM jarayoni: magnitlarni joylashtirish va mahkamlash, zarur bo'lsa rotor o'zak paketlarini yig'ish hamda magnitlash.
- ASM jarayoni: rotor qafasini bosim ostida quyish yoki payvandlash usulida ishlab chiqarish.
- Umumiy yakuniy bosqich: rotorni val bilan biriktirish va yig'ilgan rotorni muvozanatlash.

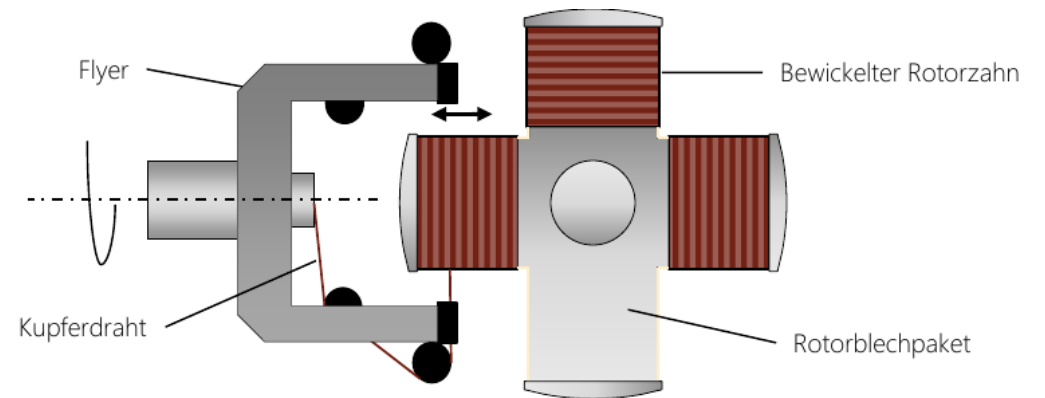
Rotor vali va ESM rotor chulg'amini tayyorlash



Rotor valiga mexanik ishlov berish

Rotor vali

- Yaxlit yoki ichi bo'sh val tokarlik dastgohida kerakli shaklga keltiriladi. Podshipnik o'rindiqlari kabi funksional yuzalarga silliqlash ishlovi berilishi mumkin.
- Podshipnik o'rindiqlari va aylantiruvchi momentni uzatuvchi tishli qismlar, odatda, induksion usulda qotiriladi. Shundan so'ng val tozalanadi.

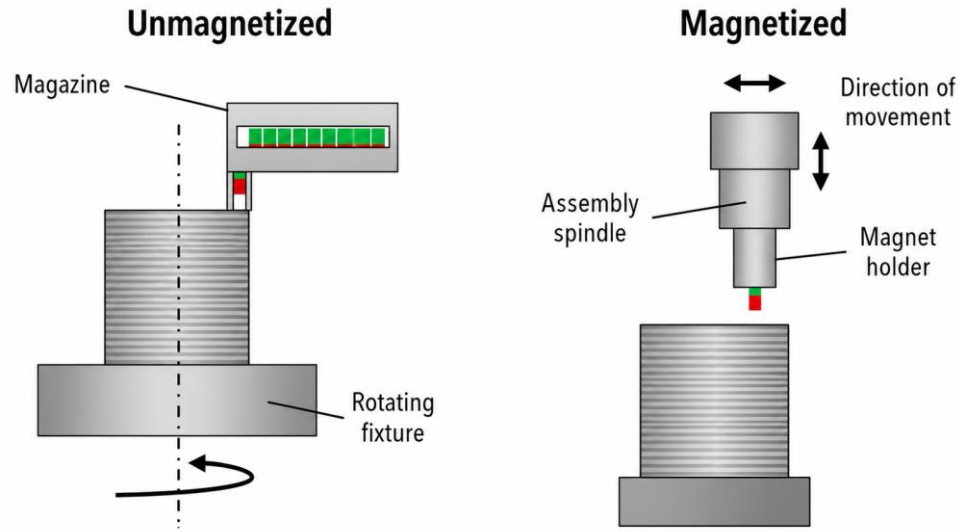


ESM rotor qutblariga chulg'am o'rash

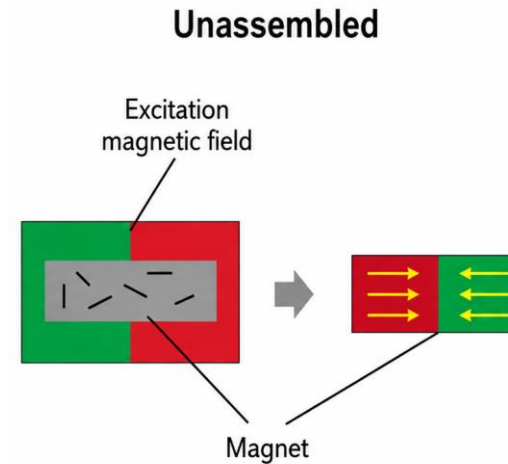
ESM chulg'ami

- Dastlab rotor qutblari izolyatsiyalanadi, so'ng har bir rotor tishiga mis sim o'raladi. Flyer simni kerakli yo'nalishda uzatib turadi.
- Tortish elektr dvigatellari rotorlarida jamlangan chulg'amlar keng qo'llanadi. Chulg'am sifati simning tarangligi va bukilish kuchlarining to'g'ri boshqarilishiga bog'liq.

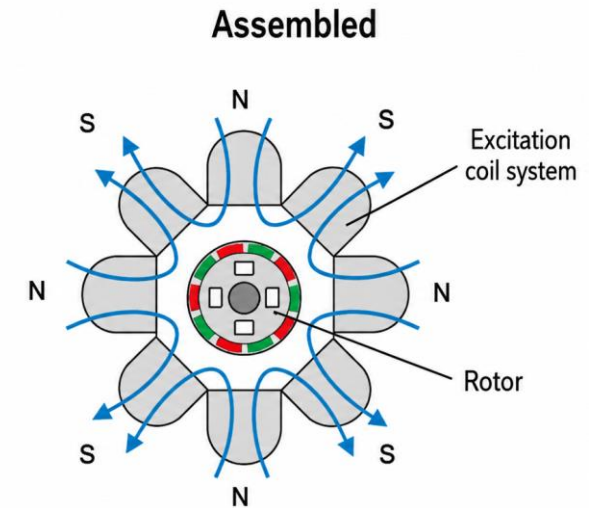
Doimiy magnitlarni joylashtirish va magnitlash



Magnitlarni rotor o'zagiga joylashtirish



Yig'ilgan rotorni magnitlash



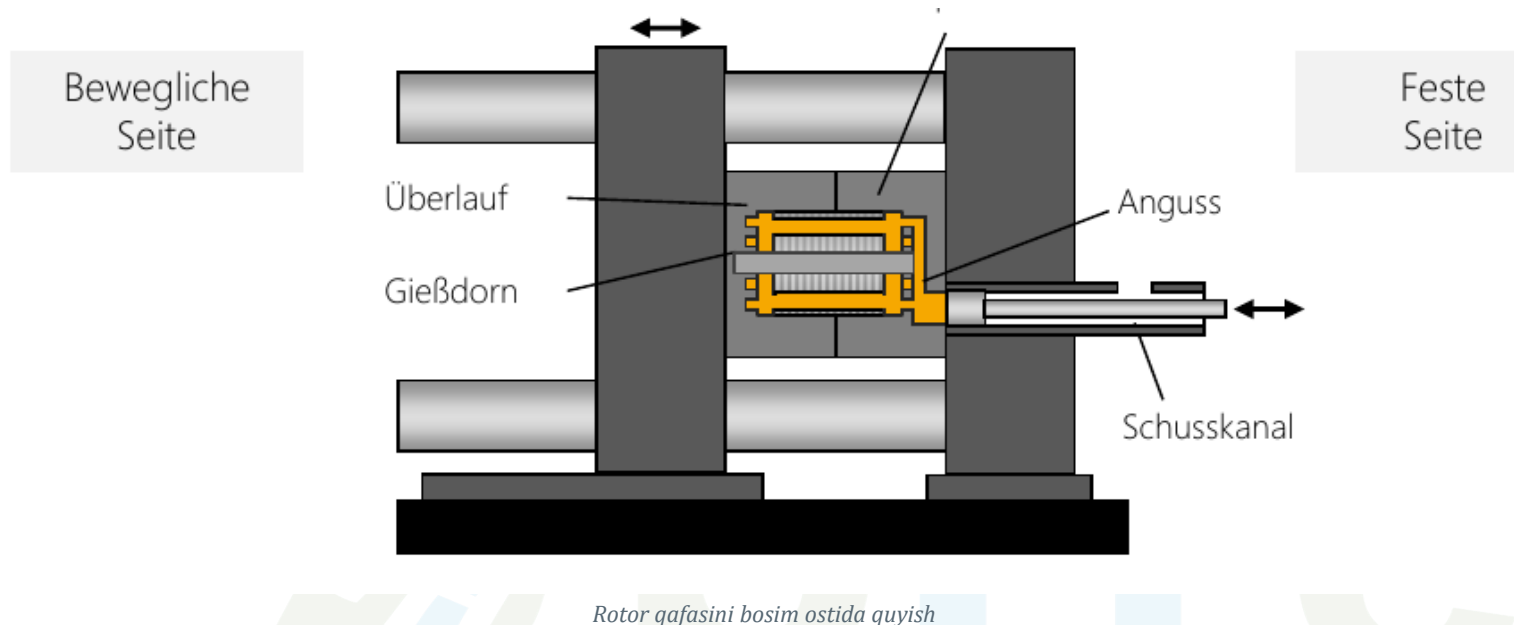
Joylashtirish va mahkamlash

- Magnitlar, odatda NdFeB doimiy magnitlari, rotor o'zagidagi maxsus pazlarga ko'pincha magnitlanmagan holatda joylashtiriladi.
- Ular bir yoki ikki komponentli yopishtiruvchi material (1K/2K) yordamida mahkamlanadi. Qotirish jarayoni zarur bo'lsa qizdirish orqali tezlashtiriladi. Muqobil usullar sifatida bandajlash yoki presslangan zich o'tqazish qo'llanadi.

Magnitlash

- Rotor yig'ilgandan so'ng tashqi qo'zg'atish g'altaklari hosil qilgan kuchli magnit maydon magnitlarni to'yinish magnit oqimi zichligigacha magnitlaydi.
- Tashqi maydon olib tashlangandan keyin magnitlarda qoldiq magnitlanish saqlanib qoladi. Magnitlarni magnitlanmagan holatda joylashtirish ularni tashish va rotorni yig'ish jarayonini osonlashtiradi.

Asinxron dvigatelning rotor qafasi



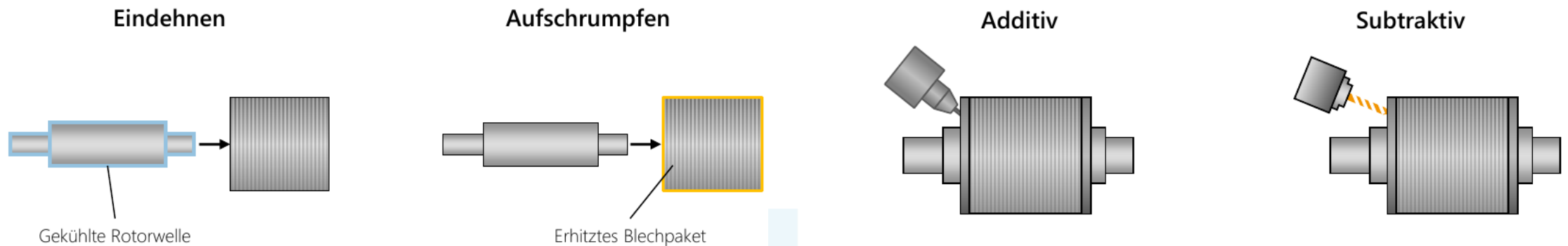
Nima uchun bu muhim?

- Rotor qafasi induksiyalangan rotor tokini o'tkazadi. Uning elektr o'tkazuvchanligi va konstruktiv yaxlitligi dvigatel samaradorligi hamda ruxsat etilgan issiqlik yuklanishini belgilaydi.
- Quyish harorati va eritma sifati — sof mis yoki alyuminiydan foydalanish — g'ovaklik va elektr kontakt qarshiligiga bevosita ta'sir qiladi.

Ikki xil ishlab chiqarish usuli

- **Bosim ostida quyish:** eritilgan mis yoki alyuminiy oldindan qizdirilgan rotorning qatlamli o'zagiga yuqori bosim ostida yuboriladi.
- Rotor o'zagi qolip ichida bir necha soniya ushlab turiladi. Keyin quyish kanallaridagi ortiqcha metall mexanik ishlov bilan olib tashlanadi va markaziy teshik valni o'rnatish uchun tayyorlanadi.
- **Payvandlangan qafas:** o'tkazgich sterjenlari rotor pazlariga joylashtiriladi va qisqa tutashtiruvchi halqalarga payvandlab biriktiriladi.
- Asosiy sifat ko'rsatkichlari: g'ovaklikning pastligi, ishonchli elektr kontakt va rotor pazlarining o'tkazgich materiali bilan yuqori darajada to'ldirilishi.

Valni rotor o'zagiga biriktirish va rotorni muvozanatlash



Valni rotor o'zagiga biriktirish — tarang o'tqazish yoki presslab o'rnatish

Rotorni muvozanatlash: massa qo'shish va materialni olib tashlash usullari

Val va rotor o'zagini biriktirish

- Presslab yoki harorat ta'sirida tarang o'tqazilgan birikma aylantiruvchi momentni uzatadi. Buning uchun val suyuq azot yordamida -196 °C dan past haroratgacha sovitiladi yoki rotor o'zagi taxminan 200 °C gacha qizdiriladi.
- Haroratlar tenglashgach, detallar orasida mustahkam tarang birikma hosil bo'ladi. Muqobil usullar sifatida yopishtirish yoki payvandlash qo'llanadi.

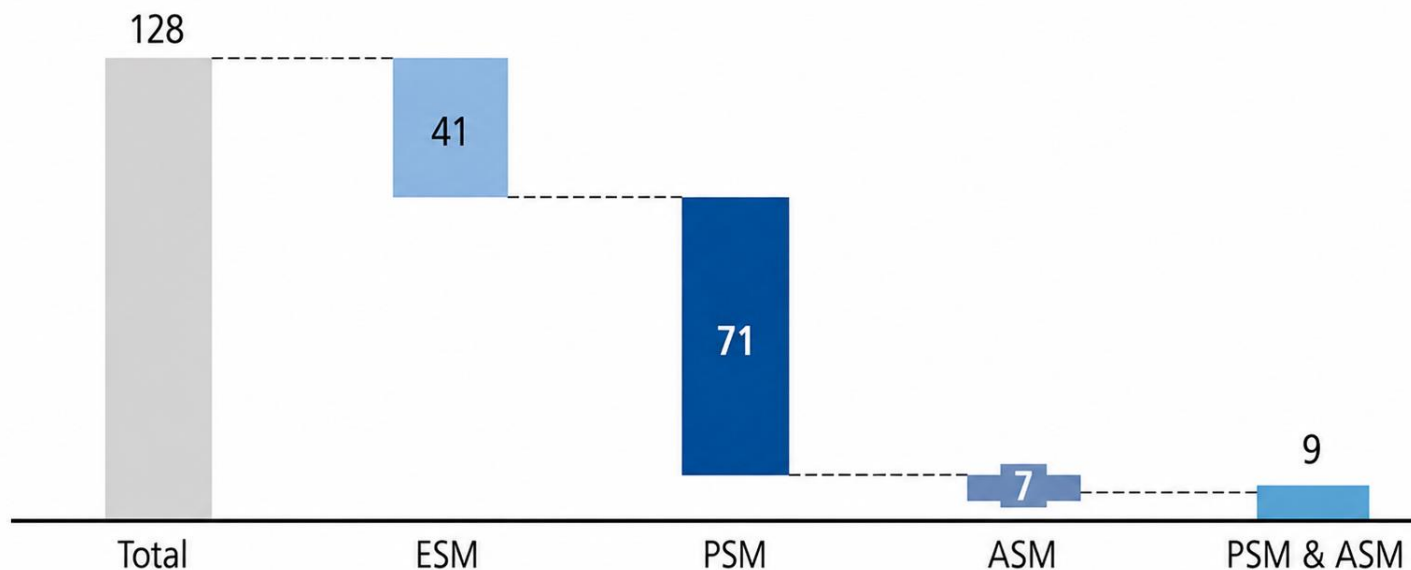
Muvozanatlash jarayoni

- Rotorning qoldiq statik va dinamik nomuvozanatligi o'lchanadi. Keyin u payvandlash orqali qo'shimcha massa qo'shish yoki parmalash orqali ortiqcha materialni olib tashlash bilan tuzatiladi.
- Talab etiladigan muvozanatlash aniqligi DIN ISO 1940-1 standartiga muvofiq, rotorning qo'llanish sohasi va ish tezligiga qarab belgilanadi.

Qaysi elektr dvigatel topologiyalari amalda qo'llanilmoqda?

Motor Topologies in Use

Distribution of motor topologies among vehicle models in Germany*



Germaniyadagi avtomobil modellari orasida dvigatel topologiyalarining taqsimlanishi — PEM tadqiqoti, 2022-yil iyul.

Topologiyalarning ulushi

- PSM — 55%: yuqori quvvat zichligi va samaradorlik ixcham hamda yuqori quvvatli elektr dvigatellar yaratish imkonini beradi.
- ESM — 32%: noyob yer elementlariga asoslangan doimiy magnitlarni talab qilmaydi, biroq samaradorligi PSMga nisbatan biroz pastroq.
- ASM — 5%: noyob yer elementlaridan foydalanmaydi; katta ishlab chiqarish hajmlarida va yuqori aylanish tezliklarida iqtisodiy jihatdan samarali.
- Kombinatsiyalar — PSM va ASM: avtomobilda ikki xil rotor topologiyasining bir-birini to'ldiruvchi afzalliklaridan foydalanish imkonini beradi.

Elektr dvigatellarni ishlab chiqarish: qisqacha mazmun

- 1 Elektr dvigatel stator va rotordan tashkil topadi: stator aylanuvchi magnit maydon hosil qiladi, rotor esa turiga qarab — PSM, ESM yoki ASM — ushbu maydon ta'sirida aylanadi.
- 2 Avtomobil tortish elektr yuritmalari statorlarini ishlab chiqarishda hairpin chulg'am texnologiyasi yetakchi hisoblanadi. Uning 15 bosqichli ishlab chiqarish zanjiri pazlarning taxminan 73% to'ldirilishini, yuqori toklarni o'tkazish imkoniyatini va jarayonlarni avtomatlashtirishni ta'minlaydi.
- 3 Barcha rotor turlarini ishlab chiqarishda valni tayyorlash, rotor o'zagi bilan biriktirish va muvozanatlash umumiy bosqichlardir. Asosiy jarayonlar rotor topologiyasiga qarab farqlanadi: PSMda — magnitlarni o'rnatish, ESMda — rotor qutblariga chulg'am o'rash, ASMda esa — quyma yoki payvandlangan rotor qafasini tayyorlash.
- 4 Mahsulot sifati payvandlash, izolyatsiyalash, magnitlar bilan ishlash va rotorni muvozanatlash jarayonlariga bog'liq. Bozor ulushi bo'yicha PSM — 55% bilan yetakchi, undan keyin ESM — 32% va ASM — 5% turadi.

MANBALAR

PEM RWTH Aachen University & VDMA (Eds.). *Production Process of a Hairpin Stator*. 2nd print, Frankfurt am Main, March 2020. ISBN 978-3-947920-10-5. [link](#)
PEM of RWTH Aachen University (Eds.). *Produktionsprozesse von Rotoren* (Production Processes of Rotors). 1st ed., Aachen, October 2022. ISBN 978-3-947920-22-8. [link](#)

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Hairpin statori bo'yicha qo'llanma

- PEM RWTH Aachen University & VDMA (Eds.): Production Process of a Hairpin Stator. 2nd print, Frankfurt am Main, March 2020. ISBN 978-3-947920-10-5. [link](#)
- Mualliflar: A. Kampker, H. H. Heimes, S. Kawollek, P. Treichel, A. Kraus (PEM); A. Raßmann, T. Hitzel (VDMA). — www.pem.rwth-aachen.de · www.vdma.org
- Foydalanilgan rasmlar: stator tuzilishi, 15 bosqichli texnologik jarayonlar zanjiri, to'g'rilash / izolyatsiyani yechish / kesish / bukish, hairpinlarni joylashtirish, uchlarni burash, lazerli kontaklash, statorni sinovdan o'tkazish va titul slaydidagi rasm (3–8-slaydlar).

[2] Rotor ishlab chiqarish bo'yicha qo'llanma

- PEM of RWTH Aachen University (Eds.): Produktionsprozesse von Rotoren (Production Processes of Rotors). 1st ed., Aachen, October 2022. ISBN 978-3-947920-22-8. [link](#)
- Mualliflar: A. Kampker, H. H. Heimes, B. Dorn, F. Brans, M. Nankemann (PEM). — www.pem.rwth-aachen.de
- Foydalanilgan rasmlar: rotor topologiyalari (PSM/ESM/ASM), rotorning qismlarga ajratilgan ko'rinishi, rotor ishlab chiqarish jarayonlari zanjiri, val, ESM chulg'amini o'rash, PSM magnitlarini joylashtirish va magnitlash, ASM rotor qafasini bosim ostida quyish, valni biriktirish, rotorni muvozanatlash hamda bozor taqsimoti diagrammasi (2 va 9–15-slaydlar).