

Jak se dělá elektromotor

Ing. Josef Šimon,
ATAS elektromotory Náchod, a. s.

Elektromotor je elektrický stroj, který za posledních sto let doznal velkého rozmachu. S nástupem elektrizace zasáhl do všech činností člověka, všude tam, kde je třeba pohyb. Výkon elektrických strojů se pohybuje v rozmezí od zlomků wattů po stovky megawattů. Odpověď na otázku „jak se elektromotor dělá“ do značné míry závisí na tom, o jak velký stroj jde. Popsat výrobu elektromotorů všech druhů a velikostí by přesáhlo rozsah a účel tohoto článku.

Tématem nebudou stroje piezoelektrické nebo elektrostatické, které pracují na jiném než elektromagnetickém principu. Budou zcela vynechány starší stroje typu Schrage, Winter-Eichberg, rotační zesilovače, Leonardova skupina apod. Tyto velmi zajímavé stroje jsou v podstatě vytlačeny použitím klasických strojů ve spojení s vyspělou výkonovou elektronikou. Lineární stroje budou rovněž vypuštěny. Nebude zde řeč o velkých elektrických strojích s výkony od desítek kilowattů po největší rotační elektrické stroje. Jejich technologie výroby je zcela specifická. Kromě elektromotorů a generátorů jsou ještě další točivé elektrické stroje, které se využitím nedají zařadit ani mezi motory, ani mezi generátory, ale daly by se označit společným názvem indikační přístroje. Jde např. o tachodynamy, tachogenerátory, selsyny, polohové transformátory, fázové měniče, rezolvery, rotační halové snímače atd.

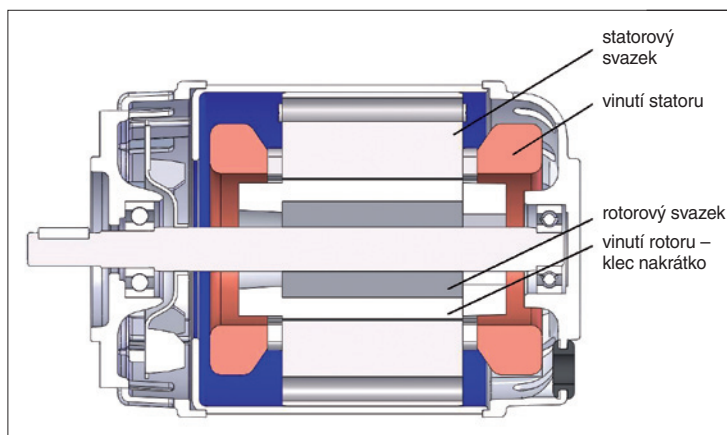
Pro přehlednost se zaměříme pouze na menší točivé stroje o výkonech od jednotek wattů do přibližně jednoho kilowattu. Elektromotory lze rozdělit různě. Podle druhu napájecího napětí na stroje stejnosměrné nebo střídavé, podle použití, nebo nepoužití mechanického komutátoru na komutátorové, střídavé s točivým nebo eliptickým polem a motory s elektronickou komutací. Podle způsobu buzení rozlišujeme stroje s elektromagnetickým buzením a buzením permanentními magnety. Za zmíněných zjednodušujících podmínek lze nejrozšířenější elektromotory rozdělit do tří nejdůležitějších skupin, a to na asynchronní motory s kotvou nakrátko, komutátorové motory a bezkomutátorové motory.

A. Nejrozšířenější elektromotory a jejich základní vlastnosti

1. Asynchronní motory

Asynchronní motory (obr. 1), především s kotvou nakrátko, patří k nejrozšířenějším motorům vůbec. Vyrábějí se ve velikostech od jednotek wattů do desítek kilowattů hromadně ve velkých sériích všude na světě. Z principu činnosti se používají všude tam, kde je k dispozici střídavé napájecí napětí. Asynchronními motory, často s převodovkami, je osazena většina technologií v průmyslu a stavebnictví – s výjimkou pohonů v automobilech a v ručním nářadí.

Asynchronní motor je obvykle napájen třífázovým napětím, které je v průmyslu většinou dostupné. Při jednofázovém napájení je nutné použít rozběhový nebo běhový kondenzátor. Je to sice komplikace, ale v motorech



Obr. 1. Řez asynchronním (indukčním) motorem

o výkonu do asi 1 000 W je zapojení s kondenzátorem široce rozšířeno. Pro jednofázové napájení se dosud používá asynchronní motor se stíněným polem. Jeho výhodou je nízká výrobní cena, ale významnou nevýhodou je velmi malá účinnost (15 až 20 %). Jeho využití je na ústupu.

Asynchronní motor nevyžaduje zvláštní údržbu. Jeho technický život je omezen pouze životností ložisek. Otáčky rotoru asynchronního motoru jsou určeny synchronní otáčkou rychlostí magnetického pole statoru sníženou o tzv. skluz.

Synchronní otáčky pro některé frekvence a různé počty pólů

Frekvence*) (Hz)	Počet pólů			
	2	4	6	8
50	3 000	1 500	1 000	750
60	3 600	1 800	1 200	900
400	24 000	12 000	8 000	6 000

*) Frekvence napájení 50 Hz se používá v Evropě a Asii, 60 Hz na americkém kontinentu a 400 Hz v letectví.

Skluz rotoru závisí na momentovém zatížení motoru. S rostoucím zatížením stoupá skluz a klesají otáčky rotoru. Synchronní otáčky magnetického pole statoru závisí na frekvenci a na počtu pólů podle vztahu:

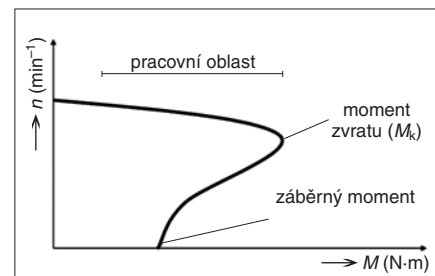
$$n_s = 60f/2p$$

kde

f je frekvence sítě (Hz),

p počet pólů statoru (–).

Několik příkladů je uvedeno v tabulce. Pro frekvenci 50 Hz (obvyklá v Evropě), jsou synchronní otáčky dvoupólového stroje 3 000 min⁻¹. Při skluzu 5 % jsou otáčky rotoru 2 850 min⁻¹.



Obr. 2. Momentová charakteristika asynchronního motoru

Závislost zatěžovacího momentu na otáčkách ukazuje momentová charakteristika (obr. 2). Při zvyšování zatěžovacího momentu klesají otáčky až do tzv. momentu zvratu (M_k), což je maximální moment, který je asynchronní motor schopen vyvinout. Při překročení momentu zvratu se asynchronní motor zastaví. Obvykle se nerozběhne ani po snížení zatížení pod hodnotu momentu zvratu, protože záběrný moment bývá významně menší než moment zvratu.

V oblasti záběru je moment motoru malý a proud velký. Je to nestabilní oblast, ve které nesmí běžný asynchronní motor setrvávat, neboť by se mohl tepelně poškodit. Je-li třeba zvětšit záběr a zmenšit proud, používají se tzv. odporové klece. Odporová klec nakrátko je vyrobena materiálu s poměrně

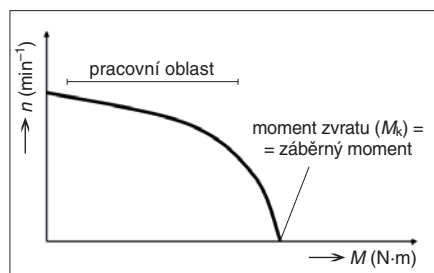
velkou rezistivitou. Zvětší záběrný moment a zmenší záběrný proud na úkor účinnosti v režimu jmenovitých hodnot. V extrémním případě je moment zvratu roven momentu záběru (obr. 3).

Asynchronní motory se v minulosti využívaly především v zařízeních, kde nebylo nutné regulovat otáčky, protože jednoduchá regulace změnou napětí nepřináší dobré výsledky. V poslední době s poklesem ceny elektroniky a rozvojem techniky měničů frek-

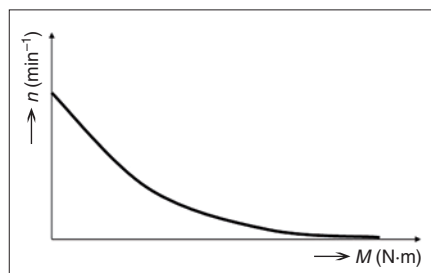
Asynchronní motory jsou nejběžnější pohonné jednotky vůbec. Jsou výrobně jednoduché, materiál je běžně dostupný, napájení nenáročné. **Stator** asynchronního motoru je tvořen statorovým svazkem (tzv. paketem) vzájemně izolovaných plechů z křemíkové oceli, ve kterém je v drážkách několikafázové vinutí.

Rotor s kotvou nakrátko je opět svazek izolovaných plechů s rotorovými drážkami, ve kterých je tlakovým litím vytvořena tzv. klec nakrátko. Materiál klece nakrátko je

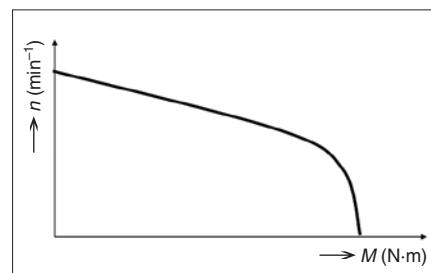
vými sběrači) kluzný kontakt určený k přivodu elektrického proudu do rotoru. Kluzný kontakt má omezenou životnost. Pro činnost rotačních pohonů v automobilech a v domácnostech bývá i takto omezená životnost dostačující. Problémy obvykle nastávají v průmyslových aplikacích, zejména při použití v nepřetržitém provozu. Nepříjemnou vlastností kluzného kontaktu mezi komutátorem a kartáči je jiskření, jehož rušivý účinek může velmi negativně



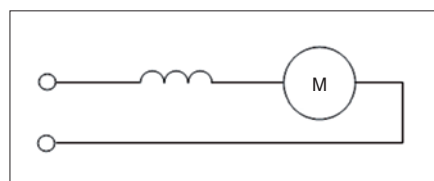
Obr. 3. Momentová charakteristika asynchronního motoru s odporovou klecí



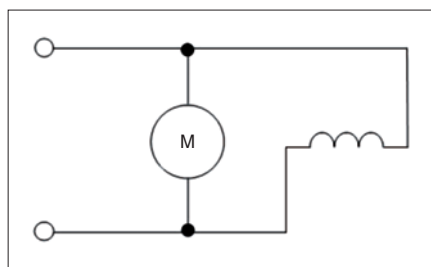
Obr. 5. Momentová charakteristika sériového motoru



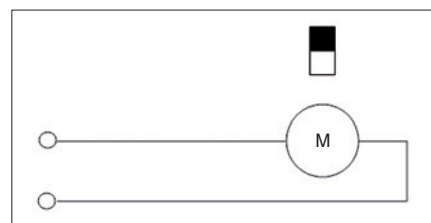
Obr. 7. Momentová charakteristika derivačního motoru



Obr. 4. Schéma buzení sériového motoru



Obr. 6. Schéma buzení derivačního motoru



Obr. 8. Schéma komutátorového motoru buzeného permanentním magnetem

vence se otevírají zcela nové oblasti. Měníče frekvence nabízejí pohodlné a energeticky úsporné řízení otáček na různých úrovních – od uživatelsky příjemného prostředí manuálního řízení po měniče frekvence integrované přímo v elektromotorech. Měníč frekvence řeší nejen samotné řízení otáček, ale i rozběhy. Vzhledem k tomu, že otáčky závisejí na frekvenci napájecího napětí, lze změnou frekvence často až do 400 Hz měnit otáčky v rozsahu od nuly k asi 20 000 min⁻¹.

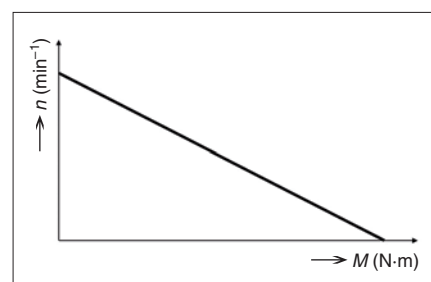
Oblast asynchronních motorů je bezprostředně ovlivněna rostoucí cenou energie s důrazem na význam ekonomiky a ekologie výrobku v provozu. Asi od roku 2005 jsou všude ve světě zaváděny normy, které dovolu-
jí vyrábět a uvádět na trh pouze elektromotory, jež splňují dané limity účinnosti (IEC 60034-30, odpovídá ČSN EN 60034-30 *Točivé elektrické stroje – Část 30: Třídy účinnosti jednootáčkových třífázových asynchronních motorů nakrátko /IE kód/*). Výrobci elektromotorů jsou nuceni upravovat konstrukci motorů tak, aby byla splněna podmínka zvýšení účinnosti na danou mez. Jedním z možných řešení je nové použití klecí nakrátko z mědi namísto dosavadních klecí z hliníku a jeho slitin. Úprava umožňuje významně zvýšit účinnost za cenu vyšších nákladů na náročnou technologii a na nákup mědi.

buď elektrovedný hliník s čistotou 99,5 %, nebo slitina silumin s definovanou vodivostí.

Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je klíčovou částí asynchronního stroje. S ohledem na účinnost motoru by měla být co nejmenší, ovšem je třeba učinit určité technologické ústupky s ohledem na výrobitelnost stroje. S růstem vzduchové mezery se vlastnosti asynchronního motoru zhoršují a naopak. S trochou nadsázky se říká, že vzduchová mezera je nejdražší část asynchronního stroje.

2. Komutátorové motory

Komutátorové motory mají nezastupitelné místo v oblasti malých pohonů v automobilech, kde je palubní stejnosměrné napětí, a v ručním nářadí a kuchyňských přístrojích při napájení střídavým napětím z elektrorozvodné sítě. Komutátorové motory obsahují **komutátor**, tj. kontaktní část spojenou s rotorem. **Mechanický komutátor** je tvořen rotačně uloženými měděnými lamelami, navzájem oddělenými izolací, které vytvářejí spolu s tzv. kartáči (uhlíko-



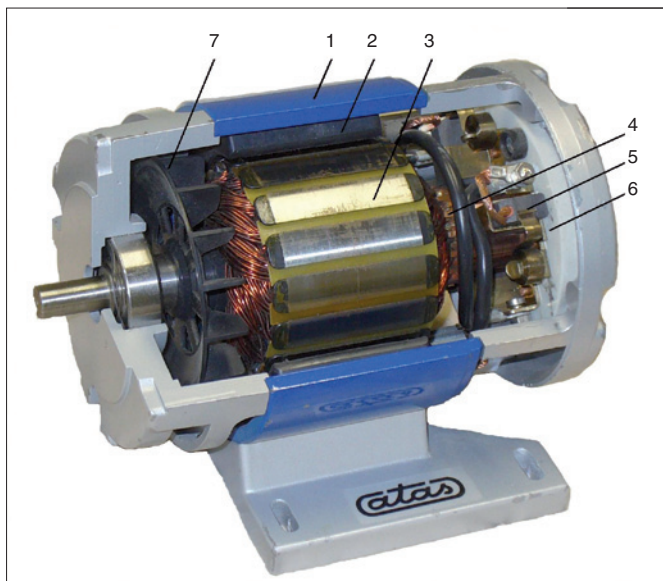
Obr. 9. Momentová charakteristika komutátorového motoru buzeného permanentním magnetem

ovlivňovat elektromagnetickou kompatibilitu (EMC – Electro Magnetic Compatibility) motoru a celého zařízení. S rozvojem elektroniky stále narůstají požadavky na EMC a vyřešení bývá někdy vážným problémem.

2.1 Komutátorový motor sériový

Vinutí statoru (budiče) a rotoru (kotvy^{*)}) jsou zapojena v sérii (obr. 4). U malých dvou-pólových motorů je kotva často zapojena mezi dvě cívky statoru, mj. za účelem snížení nežádoucího rušení.

^{*)} Kotva je část elektrického stroje, ve které se indukuje elektromotorické napětí, tj. sekundární strana, a může ji tvořit jak rotor (převážná většina případů), tak stator svým magnetickým obvodem a vinutím.



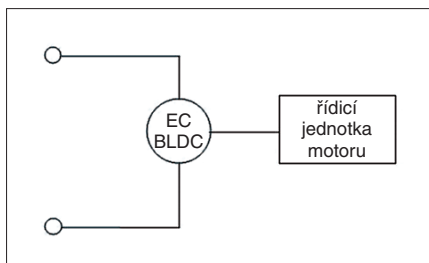
Obr. 10. Komutátorový motor s permanentními magnety
1 - kostra statoru
2 - magnety
3 - rotorový svazek
4 - komutátor
5 - kartáč (uhlík)
6 - držák kartáčů
7 - chladič ventilátoru elektromotoru

2.2 Komutátorový motor derivační

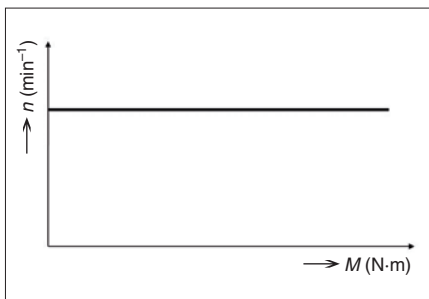
Vinutí statoru a rotoru derivačního motoru jsou zapojena paralelně (obr. 6).

Derivační motor může pracovat pouze při napájení stejnosměrným napětím. Střídavé napětí by způsobilo fázový posun mezi magnetickými poli rotoru a statoru s negativními důsledky na provoz. Otáčky naprázdno derivačního motoru jsou dány budičím magnetickým tokem, není tedy problém provozovat motor při nulovém zatížení. Momentová charakteristika v pracovní oblasti je výrazně „tvrdá“, tzn. změna momentu má jen nepatrný vliv na otáčky. Při nadměrném zvětšení zatěžovacího momentu způsobí reakce kotvy demagnetizaci budiče a charakteristika strmě klesá (obr. 7).

Reakce kotvy je účinek magnetického toku vytvořeného proudem rotoru – kotvy na magnetický tok statoru – budiče vytvořeného budičím proudem. Obě dvě dílčí pole (budičí a kotvy) se skládají ve výsled-



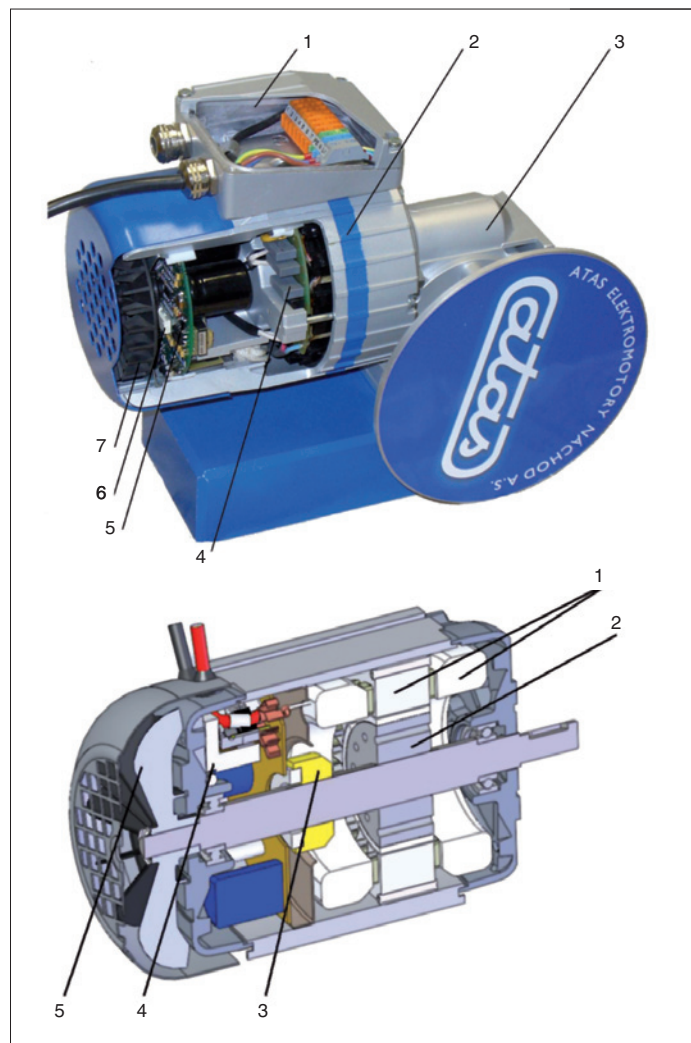
Obr. 11. Schéma zapojení motoru EC/BLDC



Obr. 12. Momentová charakteristika motoru EC/BLDC

Sériové komutátorové motory mohou pracovat při napájení proudem jak střídavým, tak stejnosměrným. Bývají označovány názvem *univerzální komutátorové motory*. Lepší vlastnosti mají při stejnosměrném napájení. Sériový komutátorový motor má velký záběrný moment i proud a se snižujícím se momentovým zatížením výrazně rostou otáčky a proud klesá. Momentová charakteristika se podobá hyperbole (obr. 5). Jakákoliv změna zatěžovacího momentu výrazně ovlivní otáčky. O takové charakteristice se říká, že je „měkká“.

U větších sériových motorů (výkony nad 200 W) je nepřipustné snížit zatížení k nule, protože by otáčky naprázdno mohly vzrůst natolik, že by odstředivou silou mohlo dojít až k poškození stroje. Sériový motor tedy musí být stále zatížen. Bývá vhodný např.



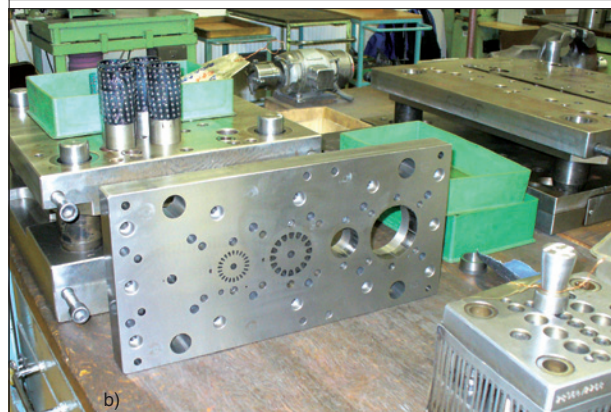
Obr. 13. Konstrukční uspořádání bezkomutátorového motoru
a) motor EC
1 svorkovnice
2 statorový svazek
3 převodovka
4 výkonový modul
5 řídicí modul
6 čidlo polohy
7 ventilátor

b) motor BLDC
1 statorový svazek s magnety
2 rotorový svazek
3 čidlo polohy
4 modul elektroniky
5 ventilátor

pro pohon ventilátoru, který přirozeně nedovolí běh naprázdno. Otáčky sériového motoru lze řídit změnou velikosti napájecího napětí. Komutátorové sériové motory se ve velké míře využívají pro pohon ručního nářadí a kuchyňských strojů.

né pole, které je vlivem reakce kotvy deformováno, zeslabeno a má posunutou magnetickou neutralu vůči geometrické, a to u generátoru ve směru otáčení a u motoru proti směru otáčení. Magnetický tok reakce kotvy se však může vyvinout pouze pod pólovými

nástavci, neboť mezera mezi póly představuje velký magnetický odpor. Pole kotvy je v prostoru nehybné, a proto jej lze kompenzovat tzv. kompenzačním vinutím.



Obr. 14. Stříhací rychlolis
a) vlastní stroj, b) demontovaný stříhací nástroj

Toto vinutí se umísťuje do drážek pólových nástavců a zapojuje se do série s kotvou. Je navrženo tak, aby jím protékající proud kotvy vytvořil stejně velké pole, jako je reakční, ale opačného směru. Kompenzační vinutí je však výrobně drahé, a proto se používá pouze u velkých strojů. Vliv reakce kotvy potlačují také tzv. komutační póly, které slouží pro zlepšení komutace.

Řízení otáček derivačního motoru změnou napájecího napětí je problematická, protože změny napětí na kotvě a budiči působí proti sobě a může dojít i k odbuzení, což má nepříznivý vliv na otáčky. Derivační motory se využívají velmi zřídka.

2.3 Komutátorový motor s cizím buzením

Komutátorový motor s cizím buzením je ve své podstatě varianta motoru derivačního s tím rozdílem, že napájení kotvy a budiče je odděleno. Napájení je možné opět pouze stejnosměrným napětím. Otáčky lze řídit jak změnou napájecího napětí na kotvě, tak změnou napájecího napětí na budiči. Při řízení prostřednictvím budičích vinutí je nutná velká opatrnost, aby nedošlo k nežádoucímu odbuzení, nebo dokonce k přerušení buzení. Komutátorové motory s cizím buzením se využívají zřídka. Momentová charakteristika motoru s cizím buzením je obdobná jako charakteristika derivačního motoru.

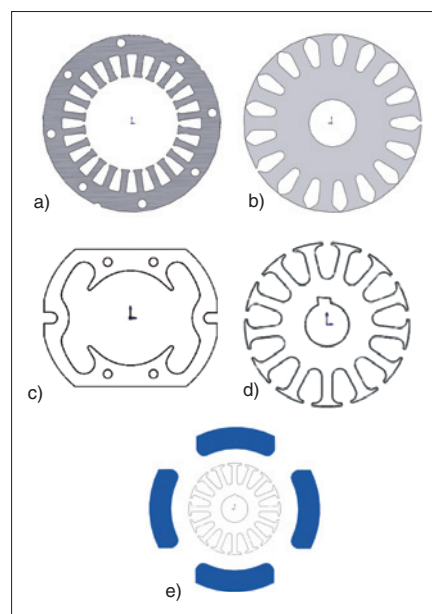
2.4 Komutátorový motor buzený permanentními magnety

Komutátorový motor s buzením permanentními magnety (PM) je z fyzikálního hlediska varianta motoru derivačního nebo derivačního s cizím buzením, kde je však budič magnetický tok vytvářen permanentními magnety (obr. 8). K rozvoji motorů s PM došlo až s vyvinutím permanentních magnetů s velkou měrnou energií, zpočátku ze slitin AlNiCo, dále feritových, a především magnetů na bázi kovů vzácných zemin (SmCo a NdFeB). Magnetický tok PM je stejnosměrný, tudíž i motory jsou vhodné pro napájení stejnosměrným proudem. Momentová charakteristika motoru s PM (obr. 9) je podobná motoru derivačnímu. Její tvrdost a náchylnost na přebuzení reakcí kotvy je podobná jako u derivačního motoru a závisí na energii a magnetické vodivosti použitých magnetů. Magnety AlNiCo se používají jen zřídka; jsou citlivé na podbuzení magnetického obvodu reakcí kotvy, ale velmi stálé při výkyvech teploty. Feritové magnety jsou levné, velmi rozšířené, ale remanentní (zbytková) indukce není příliš velká. Velmi rozšířené jsou magnety na bázi vzácných zemin. Tyto materiály mají velmi velké hodnoty měrné energie (tzv. energetického součinu) a jsou značně drahé. S rozšířením výroby sice cena klesá, ale světové zásoby surovin pro tyto materiály jsou omezené. Otáčky motorů s PM lze řídit změnou napájecího napětí, čehož se

také často využívá. Motory s permanentními magnety jsou nejpoužívanějšími motory v automobilové technice. V provedeních s malými výkony se používají i v domácích spotřebičích, ve spojení s malými usměrňovači.

2.5 Konstrukce komutátorových motorů

Konstrukci statoru komutátorového motoru (obr. 10) lze volit podle druhu napájení. Pro stejnosměrné napájecí napětí se volí materiál statoru z masivního magneticky měkkého materiálu, pro střídavé napájení je nutné použít svazek – paket ocelových izolovaných plechů, podobně jako u asynchronních strojů. Ve statoru je umístěno budič vinutí nebo permanentní magnety, které vytvářejí budič magnetický tok. Rotor komutátorového motoru musí být vždy tvořen svazkem izolovaných plechů z křemíkové elektrooceli s drážkami, ve kterých je vinutí kotvy.



Obr. 15. Typické tvary plechových výlisků pro magnetické obvody malých točivých strojů
a) plech statoru asynchronního motoru,
b) plech rotoru asynchronního motoru,
c) plech statoru komutátorového motoru,
d) plech rotoru komutátorového motoru,
e) plech rotoru komutátorového motoru s permanentními magnety – 4 póly

Cívky vinutí rotoru jsou zapojeny do lamel měděného komutátoru. Přívod elektrické energie na komutátor zajišťují kartáče (uhlíky) prostřednictvím kluzného kontaktu kartáč-komutátor. Před prvním uvedením komutátorového motoru do provozu je obvykle nutné motor tzv. zaběhnout. Zaběhnutí komutátorového motoru upraví plochu styku mezi kartáči a komutátorem a vytvoří na povrchu komutátoru vrstvu patiny, která je důležitá pro dobrý chod komutátorového stroje. Patina je hladká vrstva ze sloučenin mědi, výrazně tvrdší než samotná měď a s malým součinitelem tření. Má výrazně lepší mechanické

a elektrické vlastnosti pro provoz motoru než čistě obrobený povrch mědi.

Základem materiálu kartáčů je uhlík v kombinaci s různými přísadami – podle pracovních podmínek stroje. Kartáč je umístěn v držáku, který musí v provozu zajistit stabilní (nekmitající) přitlak kartáče na komutátor. Volba materiálu kartáče má výrazný vliv na kvalitu provozu komutátorového motoru, na jeho životnost a na elektromagnetické rušení vlivem komutace. Kluzný kontakt kartáč–komutátor je zásadní část komutátorového stroje. Je-li tato část v pořádku, je většina problémů spojených s provozem preventivně odstraněna.

3. Bezkomutátorové motory

Pro bezkomutátorové motory se někdy používá název motory EC (*Electronically Commutated*, elektronicky komutované), popř. motory BLDC (*Brushless Direct Current*, stejnosměrný bezkartáčový). Jsou to elektromotory, které nemají mechanický rotační komutátor, ale jejich vlastnosti do jisté míry odpovídají motorům s komutátorem. Klasickou mechanickou komutací pomocí komutátoru a kartáčů zde zajišťují elektronické obvody. Nejde o motory asynchronní ani synchronní. Starší obdobou bezkomutátorového motoru je ve své podstatě i krokový motor se zpětnou vazbou. Jejich problematiku ponecháme rovněž stranou. Podobně jako motory střídavé mají i motory EC několikafázové vinutí napájené z výkonového elektronického modulu. Výkonový elektronický modul je ovládán řídicími elektronickými obvody v závislosti na požadované činnosti motoru. Jednou z nutných podmínek řízení motoru je informace o poloze hřídele, což zpravidla zajišťuje optické, indukční nebo magnetické čidlo.

Rozvoj bezkomutátorových motorů v posledních desetiletích byl umožněn rozmachem elektroniky a techniky mikropočítačů, snižováním cen komponent a miniaturizací. Napájení těchto motorů nezávisí na druhu sítě, protože vstupní obvody lze navrhnout podle potřeby pro síť stejnosměrnou i střídavou. Rozdělení a názvosloví bezkomutátorových motorů zatím není ustáleno, pracovní předpokládáme rozdělení na dvě základní skupiny: jednak servomotory EC pro náročné aplikace a jednak levnější a jednodušší motory BLDC, které mohou nahrazovat dosavadní asynchronní a komutátorové motory.

3.1 Motory EC

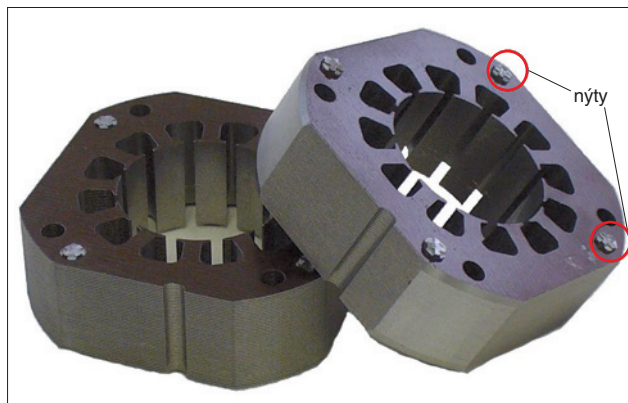
Motory EC jsou v zásadě synchronní motory. Na rotoru mají permanentní magnety (obr. 11) s velkou měrnou energií, poloha rotoru je velmi přesně indikována čidlem, jednotlivé fáze statoru jsou napájeny z výkonového elektronického modulu ovládaného řídicím elektronickým modulem, obvykle obsahujícím mikroprocesor. Motor EC je schopen pracovat buď zcela autonomně, nebo ve spolupráci s programovatelným automatem, popř. přímo s počítačem.

Nejmodernější motory EC mají elektronický modul integrovaný přímo ve své konstrukci. Tím je zjednodušena instalace stroje a omezeny negativní vlivy z hlediska elektromagnetické kompatibility. Základní charakteristika motoru EC je lineární, protože je tu značný účinek zpětné vazby, a na-

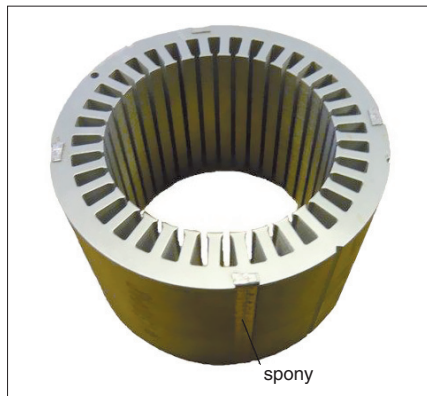
aplikovat nejrůznější ochrany již v programovém vybavení tak, aby možnost poškození motoru byla minimalizována. Kvalita programového vybavení má na vlastnosti pohonu rozhodující vliv. Motory EC jsou nasazovány ve špičkových mechanizovaných zařízeních všech stupňů automatizace a robotizace.

3.2 Standardní motory BLDC

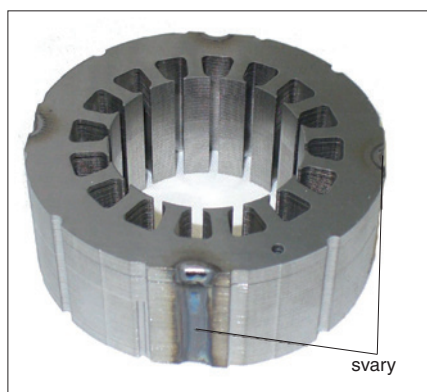
Motor BLDC je po motorické stránce velmi podobný motoru EC. Má vinutý stator, rotor s permanentními magnety, čidlo polohy rotoru (někdy bývá k indikaci polohy rotoru využita volná fáze statoru), jednotlivé fáze statoru jsou napájeny z elektronického modulu (obr. 12). Cílem konstrukce je motor s vlastnostmi komutáto-



Obr. 16. Statorový svazek indukčního motoru spojený čtyřmi nýty

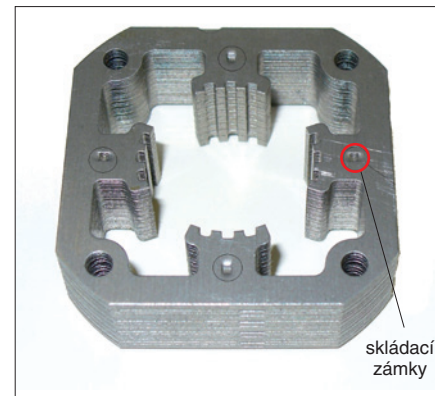


Obr. 17. Statorový svazek indukčního stroje spojený čtyřmi sponami



Obr. 18. Svařovaný statorový svazek indukčního motoru (4 sváry)

víc je tento motor řiditelný. S těmito motory lze v autonomních provezech řešit naprostou většinu pohonných činností od jednoduchého řízení otáček, přes řízení rozběhových i brzdových režimů až po polohování úhlu hřídele, řízení krouticího momentu apod. Proti nežádoucím vlivům a případným chybám lze



Obr. 19. Stator krokového motoru pakovaný v nástroji

rového stroje, kde nevýhoda omezené životnosti komponent kluzného kontaktu je odstraněna elektronickou komutací. Otáčky motoru BLDC je možné řídit změnou napájecího napětí, ovšem není možné komplexní řízení pohonu, jak je zmíněno v předcházejícím odstavci. Z hlediska uživatele se motor BLDC chová jako stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety, jehož technický život je omezen pouze životností ložisek (podobně jako u asynchronních strojů).

Při napájení střídavým proudem má motor BLDC životnost srovnatelnou s asynchronním motorem, ovšem při podstatně větší účinnosti. Motory BLDC spojují odstranění nevýhod krátkodobé životnosti komutátorových strojů a malé účinnosti asynchronních strojů, avšak za cenu větších pořizovacích nákladů. Někteří výrobci již nabízejí vedle komutátorových a asynchronních motorů dražší varianty motorů BLDC s lepšími užitnými vlastnostmi.

Motory EC a BLDC jsou dosud poměrně drahé jak materiálově, tak výrobně. Svými kvalitativními parametry, velkou účinností a životností si ale dobývají stále pevnější

pozici na trhu. Cena údržby elektrických zařízení s malou životností je vysoká, cena energií roste rovněž, zatímco cena dražších motorů EC a BLDC klesá se zvyšujícím se počtem vyrobených kusů. Současný trend vývoje v oboru elektromotorů ve velikostech přibližně do 1 kW směřuje ke koncepci jednoznačné náhrady tradičních elektromotorů asynchronních a komutátorových motory bezkomutátorovými.



Obr. 20. Lití hliníku pod tlakem

B. Nejdůležitější části motorů a jejich výroba

K nejdůležitějším částem motoru patří magnetický obvod, vinutí, kryt, hřídel a jeho uložení a samozřejmě kontakty pro přívod elektrického proudu. Motor zpravidla bývá součástí tzv. pohonu. Moderní pohon kromě vlastního motoru obsahuje elektronické obvody pro řízení a napájení. Soustředíme se však na přehled typických postupů při výrobě samotného motoru.

V elektromotoru jako výrobku se různou měrou prolínají strojírenské a elektrotechnické technologie. Na počátku materiálového toku je zpracování hutního materiálu – lisování, ohýbání, stříhání a odlévání. Následuje obrábění, což je technologie velmi rozšířená ve strojírenství, ale pro výrobu elektromotorů není typická. Pro výrobu elektrických strojů je naprosto stěžejní zhotovení magnetického obvodu a elektrického vinutí. Závěrečnou fází výrobního procesu je montáž s konečnou kontrolou.

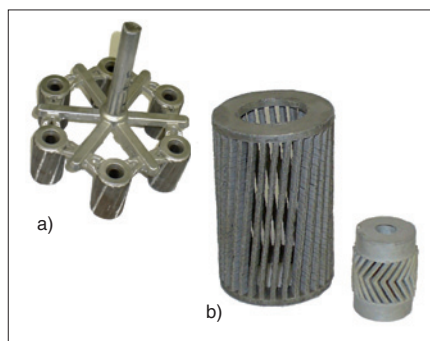
4. Magnetické obvody

Nezbytnou částí každého elektromotoru je magnetický obvod. Magnetický obvod je zprostředkovatelem přeměny elektrické energie na energii mechanickou. Vhodným návrhem ekonomicky vyrobitelného magnetického

obvodu se dosahuje požadovaných mechanických vlastností motorů a minimalizují se ztráty. Materiál magnetických obvodů se volí podle toho, zda procházející magnetický tok je stejnosměrný nebo střídavý. Vhodným materiálem pro stejnosměrný magnetický tok je magneticky měkká ocel, jejíž mechanické vlastnosti splňují nároky pro předpokládaná mechanická namáhání. Z této oceli se vyrábějí především satorová jha a části koster stejnosměrných komutátorových strojů a rotory s permanentními magnety. Pro vedení střídavého magnetického toku je nutné používat výhradně svazky vzájemně izolovaných plechů s co největším elektrickým odporem ke snížení ztrát vířivými proudy a s co nejlepší magnetickou vodivostí. Takovou podmínku obvykle nejlépe splňují izotropní plechy s přísadou křemíku (dřívější název je dynamové plechy). Z tohoto plechu se na stříhacích rychlolisech (obr. 14) vystřihují speciálními stříhacími nástroji tvary podle druhu motoru (obr. 15).

Satorové a rotorové plechy jsou spojovány do tzv. satorových a rotorových svazků – paketů, které jsou vodiči magnetického toku a někdy současně mechanicky nesou vinutí a další konstrukční části motoru. Sestavování svazků z vystřihovaných plechů se nazývá paketování. Pro paketování je osvědčeno několik postupů v závislosti na dostupné technologii výrobce, technických požadavcích motoru a velikosti výrobních sérií.

K nejrozšířenějším technikám tvorby paketu patří nýtování. Z vylišovaných plechů potřebného tvaru se nýtováním vytvoří kompaktní plechový svazek – paket (obr. 16). V ploše každého plechu jsou s ohledem na magnetický tok umístěny otvory, do kterých



Obr. 21. Výsledek tlakového lití klecového rotoru

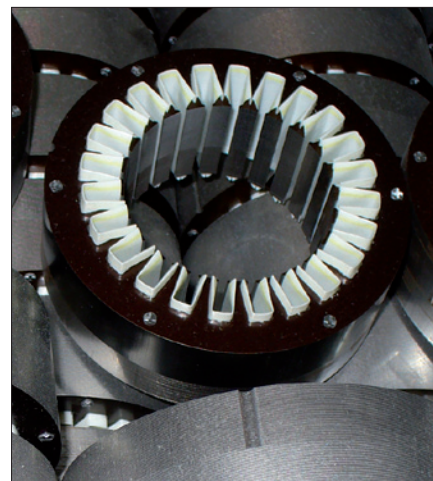
a) vícenásobný výlisek šesti rotorů,
b) klec rotoru nakrátko po odstranění plechů rotorového paketu

jsou při nýtování zapuštěny plné nebo duté nýty. Průměr nýtu je nutné volit s ohledem na minimalizaci narušení cesty magnetického toku.

Podobná technologie jako nýtování je tzv. sponkování. Spojovacím materiálem není kulatý nýt, ale plochá plechová spona. Umísťuje se obvykle na vnější část paketu (obr. 17), aby nenarušovala magnetické vlastnosti stroje.

Historicky pozdější technologií spojování plechů je svařování (obr. 18). Obvykle jde o svařování v ochranné atmosféře. Výsledky jsou závislé především na druhu plechu a na druhu izolace plechů. Ne každá kombinace materiálů plechů a izolací dává kvalitní výsledky.

Velmi progresivní technologie výroby paketů pro velké série je tzv. *paketování v nástroji*. Nástroj v jednom kroku vystřihne příslušný tvar plechu a v závěru zdvihu zalisuje vystřihovaný plech speciálním zámekem do předchozího vystřihového plechu, který byl po vylišování přidržován na místě. Požadovaný počet



Obr. 22. Překládání plechů pro odstranění klínovitosti

Na obrázku je vidět skládací znaménko, což je vlastně mělký zaoblený výsek na okraji plechu, který po složení do svazku spolu s ostatními plechy tvoří drážku. Na obrázku je patrné překládání poloviny svazku o 180°.

vylišovaných a navzájem mechanicky spojených plechů vytvoří paket (obr. 19), který je vysunut z nástroje do zásobníku, a lis pokračuje ve vystřihování a sestavování dalšího paketu. Pro paketování v nástroji se používá speciální, velmi nákladný lisovací nástroj.

V některých případech je třeba vyrábět pakety plechů bez narušení cesty magnetického toku. V takových situacích se používá spojování plechů lepením. Lepidlo současně tvoří izolaci mezi plechy.

Výroba plechových paketů umístěných na hřídeli bývá jednodušší. Svazek plechů tvoří kompaktní celek již nalisováním na hřídel při dodržení vhodných tolerancí mezi plechem a hřídelí. Pro náročnější podmínky a větší krouticí momenty se povrch hřídele upravuje záseky pod plechy, které zvyšují pevnost uložení paketů na hřídeli.

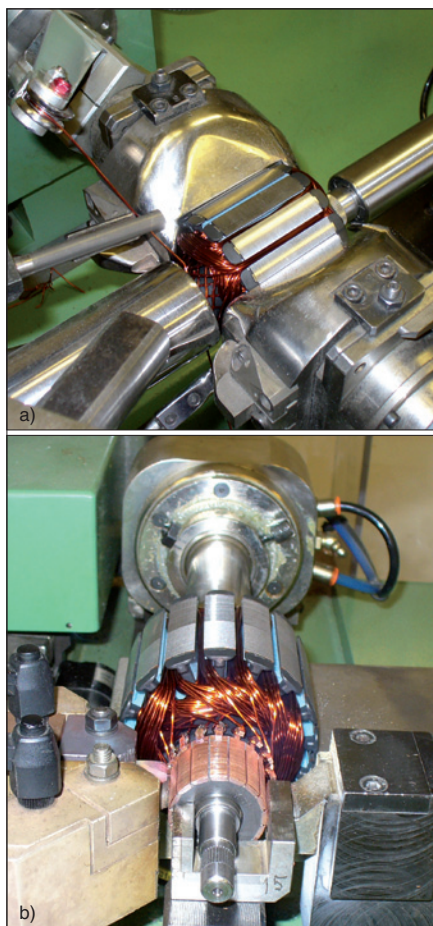
Pro výrobu paketů indukčních motorů s klecí nakrátko jsou nejdříve plechy nalisovány na pomocné trny. S nimi pokračují do stříkací formy lisu tlakového lití (obr. 20), kde je za vysoké teploty a pod vysokým tlakem odlita roztaveným kovem klec nakrátko. Materiál klece je elektrovedný hliník s čistotou 99,5 % nebo slitina silumin stanovené

vodivosti. V poslední době se namísto hliníku nebo jeho slitin zavádí technologicky velmi náročné lití mědi pod tlakem. Cílem je dosáhnout výrazně vyšší účinnosti a menších rozměrů.

Pro tlakové lití malých klecí nakrátko se obvykle používají vícenásobné formy (obr. 21). Z odlitých rotorů v lisu se odstraní pomocné trny a místo nich se nalisují finální hřídele, se kterými se rotory obrábějí společně.

Při výrobě paketů pro elektrické stroje je třeba překonávat obtíže vyplývající z vlastností použitých materiálů. I při pečlivé výrobě plechů není nikdy tloušťka plechů stejnoměrná. Téměř vždy má jedna strana plechového pásu odlišnou tloušťku než druhá strana – plech je takzvaně klínovitý. Při skládání vystřižených plechů jednostranné odchylky narůstají a rozdíl rozměrů může být podstatnou

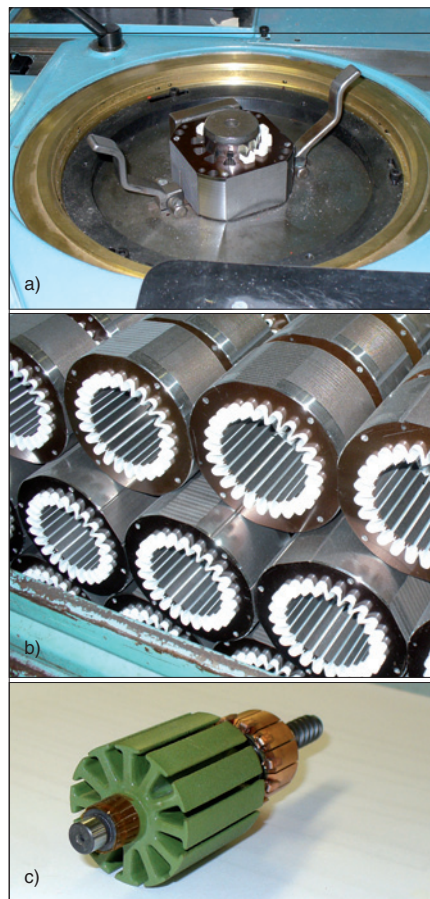
trických strojů je vliv směru válcování zanedbatelný. Anizotropie se negativně projevuje především u přesných a indikačních zařízení, jako jsou např. selsyny a rezolvery. V takových případech se na tvaru plechu na neutrální pozici umístí skládací znaménko a při skládání paketů se plechy překládají o příslušný úhel (minimálně o jednu celou drážku).



Obr. 23. Moderní navíjení stroj
a) navíjení komutátorového rotoru,
b) svařování vývodu do komutátoru

vadou. Většina výrobců účinně kompenzuje vliv klínovitosti tzv. překládáním poloviny svazku o 180° (obr. 22).

Další vadou plechů bývá magnetická anizotropie. Ta je však skrytá. Je to závislost magnetických a elektrických vlastností plechu na směru válcování. Např. v podélném směru bývá lepší magnetická vodivost než ve směru příčném. U naprosté většiny elek-



Obr. 24. Drážková izolace
a) přípravek pro nastřelování drážkové izolace,
b) stator s drážkovou izolací,
c) paket na rotoru s fluidně nanášeným izolantem

5. Vinutí

Vinutí přenáší motorem elektrický proud, který se spolu s magnetickým polem podílí na elektromechanické přeměně energie.

5.1 Vinutí rotoru

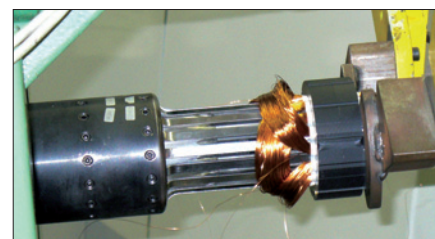
Klec nakrátko, používaná jako rotor v asynchronních strojích, má mezi vinutími zvláštní postavení. Pro navíjení komutátorových rotorů se používají produktivní navíjecí stroje. Moderní navíječka navine cívku do příslušných drážek (obr. 23), připojí její konce k příslušným lamelám komutátoru (obvykle bodovým svařováním) a tento postup opakuje na celém rotoru.

S výjimkou klece nakrátko je nutné všechna ostatní vinutí vkládat do drážek, jejichž tvar je určen už vystřihováním jednotlivých

plechů a posléze pakotováním statorů a rotorů. Drážky jsou předem opatřeny drážkovou izolací (obr. 24), a to buď z plátovaných izolačních materiálů, které se vkládají do drážek, nebo fluidním nanášením izolačního práškového povlaku, který je zpevněn při zvýšené teplotě.

5.2 Vinutí statoru

Do izolovaných drážek statoru se vkládá vinutí. Nejjednodušší je ruční vkládání a navíjení. Tato metoda však není produktivní a používá se jen zřídka pro experimentální a speciální postupy, které není možné nebo hospodárné mechanizovat.



Obr. 25. Vtahování cívky do statoru



Obr. 26. Tvarování čel vinutí

Pro velké série vinutých statorů se vyplácí použít mnohem rychlejší metodu vtažování, i když vyžaduje nákladné vtažovací zařízení a speciální nástroje (obr. 25). Vinutí se nejprve vytvoří v navíjecím stroji a navinuté cívky se pak najednou vtáhnou do statorů opatřených drážkovou izolací.

Po vtažení cívek statoru je nutné provést několikanásobné tvarování čel vinutí (obr. 26). Po vytvarování čel vinutí následuje elektrické propojení cívek mezi sebou, popř. připojení vývodů motoru. Následuje operace *obšívání čel* vinutí tkanicí nebo nití (obr. 27) za účelem mechanického zpevnění vinutí před konečným dotvarováním. Konečné tvarování čel vinutí zajistí dosažení předepsaných rozměrů tak, aby byly dodrženy povrchové a vzdušné vzdálenosti vinutí od kovových částí.

Po závěrečném tvarování čel následuje kontrola vinutí, kdy se ověří kvalita provedených operací, a vadné výrobky se vyloučí z dalších kroků technologického procesu.

5.3 Impregnace vinutí

Jedním z předpokladů kvalitního provozu elektrického motoru je ochrana vinutí proti negativním vnějším vlivům elektrickým a mechanickým, proti působení vlhkosti, chemickým a biologickým látkám, škůdcům apod. Ochrana vinutí spočívá ve vpravení impreg-

žirénské. Proto nedílnou součástí výroby elektrických motorů je i mnoho strojírenských činností od třískového obrábění, lisování, tepelného zpracování až po montážní práce. Zaměříme se jen na ty činnosti strojírenského charakteru, které jsou typické pro výrobu elektromotorů.



Obr. 27. Obšívání čel vinutí – a) obšívací stroj, b) obšité hlavy vinutí



Obr. 28. Navinuté pakety namočené v impregnantu

načního laku nebo pryskyřice do mezer mezi závitů uvnitř cívek vinutí. Vinutí se impregnuje zakapáním vhodné látky (syntetické pryskyřice) nebo namočením do impregnačního laku (obr. 28). Pro náročná prostředí se namáčení dělá ve vakuu. Impregnace ve vakuu vyžaduje speciální zařízení, ale má výrazně lepší výsledky. Většinu impregnantů je třeba po aplikaci vysušit a vytvrdit za vyšších teplot v suchých pecích (obr. 29).

6. Obrábění a montáž

Elektrický motor je svou podstatou zařízením částečně elektrické a částečně stro-



Obr. 29. Impregnované statory připravené k sušení v peci

U komutátorového stroje je důležitý kluzný kontakt kartáč–komutátor. Po kompletním navinutí a impregnaci musí být komutátor pečlivě obroben, aby mechanické vlastnosti, jako např. drsnost povrchu a házivost, byly v předepsaných tolerancích. V žádném případě se nesmí na okrajích lamel vyskytovat otěpy po obrábění. Rotor s kvalitně obrobeným komutátorem je připraven k montáži a následnému záběhu před uvedením do běžného provozu. Záběhnutí smontovaného komutátorového stroje po dobu několika hodin zajistí vznik patiny na povrchu komutátoru (viz odst. 2.5).

Elektrické motory bývají součástí pohonu v zařízeních, která často pracují v nepřetrži-

tém provozu. Na ně jsou kladeny mj. i velké nároky co do životnosti a ochrany životního prostředí. Před montáží se rotační díly vyvažují na stanovenou mez, která závisí na náročnosti finálního zařízení. Dobrým vyvážením lze předcházet vzniku nežádoucího chvění, vibrací, hluku, zkrácení životnosti, popř. havárii. K vyvažování se používají vyvažovací stroje (obr. 30). Podstatou vyvažování je měření tzv. *nevývahy* a přidávání plastického materiálu nebo odebrání materiálu z rotujících částí.

Vyvážené rotory, navinuté a naimpregnované pakety spolu s ostatními mechanickými součástmi se scházejí na pracovišti



Obr. 30. Vyvažování rotorů

konečné montáže. Zde jsou s maximální pečlivostí smontovány finální výrobky. Před expedicí je nutné vykonat kontrolu parametrů elektromotorů. Elektromotor musí jednak splňovat elektromechanické parametry podle zadání zákazníka, jednak musí být bezpečný z hlediska přísných bezpečnostních norem.

C. Závěr

Elektromotory jsou již druhé století nedílnou součástí života moderní společnosti. Vývoj, výroba a prodej elektromotorů jsou základní podnikatelskou aktivitou společnosti ATAS elektromotory Náchod, a. s., od počátků činnosti v roce 1928 bez přerušení kontinuity až do současné doby. Firma staví na velkém objemu zkušeností v oboru a na týmu odborníků, kteří ve spolupráci s technickými univerzitami a některými lidry v oboru řeší úlohy současnosti i budoucnosti elektromotorů.

☒