

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Vedoucí práce: Ing. Michela Vachtlová

2013

Autor: Petr Budař

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr BUDAŘ**
Osobní číslo: **E10B0008K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Stroje s permanentními magnety**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište druhy strojů s permanentními magnety (PM).
2. Zpracujte historický vývoj strojů s PM.
3. Popište možnosti využití strojů s PM.
4. Možné budoucí uplatnění strojů s PM.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michaela Vachtlová

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá permanentním magnetismem, elektrickými stroji s permanentními magnety a jejich soupisem a popisem a dalším možným praktickým vývojem.

Klíčová slova

Permanentní magnety, speciální stroje, stejnosměrný stroj s PM, stejnosměrný bezkartáčový stroj, synchronní stroj s PM, krokový motor s PM, lineární motor, spínaný reluktanční motor - SRM, diskový motor

Abstract

The present thesis deals with the permanent magnetism, electrical machines with permanent magnets and a list and description of a possible future practical developments.

Key words

Permanent magnets, special machines, DC machine with PM, DC brushless machine, synchronous machine with PM, stepper machine with PM, linear motor, switched reluctance motor – SRM, disk motor

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Použitou literaturu jsem citoval či parafrázoval.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při vypracování této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 15.4.2013

Petr Budař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Michaele Vachtlové za rady a připomínky v průběhu sepisování práce, kolegům v práci za podnětné rozhovory a přítelkyni za trpělivost při sepisování bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	9
1 Magnetické materiály	10
1.1 Vysvětlení pojmu magnetismu.....	10
1.2 Rozdělení látek dle poměrné permeability.....	11
1.2.1 Diamagnetické látky.....	11
1.2.2 Neutrální látky.....	11
1.2.3 Paramagnetické látky.....	11
1.2.4 Feromagnetické látky.....	11
1.2.5 Další vlastnosti magnetických materiálů.....	12
1.3 Materiály permanentních magnetů.....	13
1.3.1 Neodymové magnety.....	14
1.3.2 Samarium-kobaltové magnety.....	14
1.3.3 AlNiCo.....	14
1.3.4 Feritové magnety.....	15
2 Historie strojů s PM.....	15
3 Rešerše elektrických strojů s permanentními magnety	22
3.1 Stejnosemné stroje s PM.....	23
3.1.1 Princip stejnosměrného stroje s PM.....	23
3.1.2 Komutace.....	25
3.1.3 Jiné provedení stejnosměrných strojů s PM.....	27
3.2 Synchronní stroje s PM.....	28
3.2.1 Spínaný reluktanční motor s PM.....	29
3.2.2 Krokový motor s PM.....	30
3.2.3 Lineární motory s PM.....	33
3.2.4 Axiální diskové motory.....	34
4 Popište možnosti využití strojů s PM.....	36
5 Možné budoucí uplatnění strojů s PM.....	38
Závěr.....	39
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	40
Příloha.....	44

Seznam použitých zkratk a symbolů:

B.....	magnetická indukce
B_r	remanentní (zbytková) indukce
H.....	intenzita magnetického pole
H_{max}	maximální intenzita magnetického pole
H_{min}	minimální intenzita magnetického pole
H_c	koercitivní intenzita magnetického pole
μ_r	poměrná permeabilita
NdFeB.....	neodymový permanentní magnet
SmCo.....	samarium - kobaltový permanentní magnet
AlNiCo.....	magnet z prvků hliník-nikl-kobalt
T.....	Tesla - jednotka magnetické indukce
P_h	ztráty hysterezní
P_e	ztráty vířivými proudy
Fe_3O_4	druh železa - magnetovec
SRM.....	spínaný reluktanční motor
LKM.....	lineární krokový motor
Maglev.....	vlaková souprava na magnetickém polštáři

Úvod

Předkládaná práce se zabývá elektrickými točivými stroji s permanentními magnety, jejich historií, využitím a dalšími možnými směry vývoje. Stroje s PM, díky objevům v oblasti permanentního magnetismu, různých chemických prvků a sloučenin, se v posledních několika dekádách mohli relativně rychle rozvíjet.

Příkladem takového stroje je krokový motor (KM-PM). Z hlediska využívání nových materiálů se používají PM ze vzácných zemin (NdFeB, nebo SmCo). Díky těmto materiálům se např. velice rozvinula robotizace v automobilovém průmyslu.

Text je rozdělen do pěti částí. V první se zabývám samotnými magnetickými materiály. V druhé části je sepsaná historie elektrických točivých strojů. V třetí části se zabývám teorií a soupisem druhů strojů s PM. Čtvrtá část pojednává o možnostech využití strojů s PM v praxi. V poslední části se věnuji možnému budoucímu vývoji strojů s PM.

1 Magnetické materiály

1.1 Vysvětlení pojmu magnetismu

Magnetismus je přirozený jev způsobený pohybem elektrických nábojů. A to buď elektrickým proudem, anebo pohybem elektronů v atomech. V této práci se budeme zabývat pouze pohybem elektronů v atomech a jejich vlivem na magnetické vlastnosti látky.

Magnetické vlastnosti látky jsou dány jistou mírou kompenzace výsledných magnetických momentů jednotlivých elektronů na vnitřních (ne-valenčních) slupkách atomu. Výsledný magnetický moment je dán součtem spinového (rotace elektronu kolem své osy) a dráhového (oběh elektronu kolem atomového jádra) magnetického momentu. [1]

1.2 Rozdělení látek dle poměrné permeability

Látky podle poměrné permeability se dělí na tyto základní skupiny:

- Diamagnetické $\mu_r < 1$
- Neutrální $\mu_r = 1$
- Paramagnetické $\mu_r > 1$
- Feromagnetické $\mu_r \gg 1$

1.2.1 Diamagnetické látky

Jsou takové látky, u nichž se spinové a dráhové magnetické momenty plně vykompenzují. To je způsobeno plnou obsazeností elektronových slupek elektrony. Za dokonalé diamagnetikum lze v současnosti považovat supravodič zchlazený pod svoji kritickou teplotu. Diamagnetické materiály lehce odpuzují magnetické siločáry od sebe. Příkladem mezi materiály je měď. [1] [2] [3]

1.2.2 Neutrální látky

Jsou to takové látky nebo prostředí, které nezeslabuje ani nezesiluje magnetismus. Příkladem může být vakuum. [1] [3]

1.2.3 Paramagnetické látky

Jsou takové látky, které nemají vykompenzovány všechny magnetické momenty. Každý atom má vlastní magnetický moment, ale každý je uspořádaný jinými směry. Teprve v magnetickém poli se orientují souhlasně dle přiloženého pole. Paramagnetické materiály lehce vtahují siločáry do sebe a tím zesilují magnetické pole. Příkladem jest hliník. [1] [2] [3]

1.2.4 Feromagnetické látky

Mají stálý magnetický moment a atomy vytvářejí v látce oblasti se stejnou orientací magnetických momentů (domény). Vlivem vnějšího magnetického pole se domény orientují v kýženém směru. Feromagnetismus se vyskytuje pouze u pevných látek a jejich nejznámějším zástupcem je železo. Materiály vtahují do sebe magnetické siločáry a zesilují mnohonásobně magnetický účinek dokud nedojde k nasycení. Nasycení je stav kdy dojde při vysokých hodnotách magnetické indukce ke ztrátě magnetické vodivosti (permeabilitě). Ta se v extrémním případě, může redukovat na permeabilitu vakua. Materiály se dělí na izotropní a anizotropní. U materiálů anizotropních se liší jejich vlastnosti v různých směrech. [1] [2] [3]

1.2.5 Další vlastnosti magnetických materiálů

Hysterezní křivka je uzavřená smyčka magnetování feromagnetického materiálu, která vyjadřuje závislost magnetické indukce B , na intenzitě magnetického pole při plynulé změně intenzity magnetického pole od $+H_{\max}$ do $-H_{\max}$. Intenzita magnetického pole H_{\max} , odpovídá bodu nasycení. Podle velikosti plochy hysterezní smyčky dělíme materiály na magneticky měkké a magneticky tvrdé. Magneticky měkké materiály se snadno magnetují, mají malé ztráty při magnetizaci střídavým proudem. Magneticky tvrdé materiály se naopak těžko magnetují a mají velkou remanentní indukci. (obr. 1.1.)

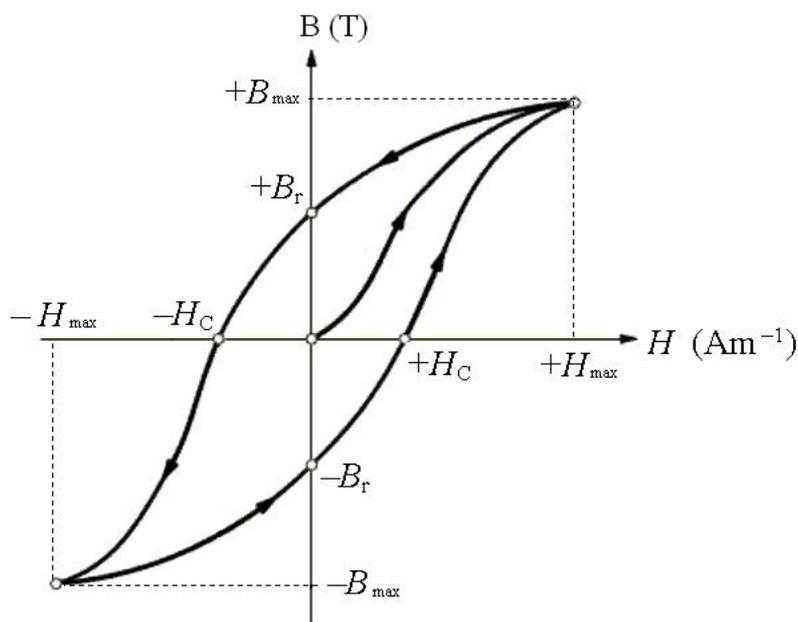
Remanence udává indukci, kterou má materiál při nulové intenzitě magnetického pole.

Koercitivita udává hodnotu intenzity magnetického pole, při které materiál nemá indukci.

Ztráty v magnetickém obvodu se projevují zahříváním materiálu. Rozlišujeme **ztráty hysterezní** (značí se Ph) a **ztráty vířivými proudy** (značí se Pe). Hysterezní ztráty závisí na ploše hysterezní smyčky. Ztráty vířivými proudy vznikají, protože feromagnetický materiál je vodivý a magnetický tok kolem sebe indukuje elektrický proud a tento proud opět vytváří

magnetické pole, které zeslabuje budící magnetické pole. Ztráty vířivými proudy lze omezit použitím navzájem izolovaných plechů (zmenšuje se celková vodivost magnetického materiálu), nebo použitím materiálu s vysokým odporem (např. přidáním malého množství křemíku do základního materiálu).

K hysterezní vlastnosti, spíše omezení, patří tzv. Curieova **teplota** - je to přechodová teplota, nad kterou feromagnetické, nebo ferimagnetické materiály ztrácejí spontánní magnetizaci a stávají se paramagnetickými. [1] [2] [3] [4]



Obr. 1.1. Hysterezní smyčka

1.3 Materiály permanentních magnetů

Nejstarší známým permanentním magnetem je magnetit (Fe_3O_4). Ostatní použitelné permanentní magnety jsou syntetického původu.

- Neodymové magnety NdFeB
- Samarium-kobaltové magnety SmCo
- AlNiCo
- Feritové magnety

1.3.1 Neodymové magnety

NdFeB byly vynalezeny počátkem 80 let. Představují nejsilnější a cenově nejdostupnější typ magnetu ze vzácných zemin. Jsou vyrobeny ze slitiny neodymu, železa a bóru. Neodymové magnety jsou používány v mnoha aplikacích vyžadujících silné kompaktní permanentní magnety, například v elektrických motorech pro akumulátorové nářadí. Mají nižší pracovní teplotu než SmCo a jsou více náchylné k oxidaci než samarium-kobaltové magnety. Proti korozi se může použít pokovení či nanesení epoxidových pryskyřičných povlaků. [1] [5] [6]

1.3.2 Samarium-kobaltové magnety

SmCo patří k magneticky vzácným zeminám stejně jako neodymové magnety NdFeB. Jsou známé cca od 70 let 20 století. Vyrábí se podobně jako neodymové magnety lisováním v magnetickém poli a následným spékáním. Představují skupinu s druhou nejvyšší vnitřní energií hned po magnetech NdFeB. Nabízí nejlepší poměr ve srovnání rozměrů, výkonu a odolnosti vůči vysokým teplotám či nepříznivým podmínkám. Jsou velice odolné vůči korozi a proto nevyžadují povrchovou úpravu. Jejich nevýhodou je vyšší cena oproti jiným druhům magnetů. Dalšími jejich nevýhodami jsou velká křehkost, malá odolnost vůči proučím silám a obzvláště velká náchylnost ke štěpení. Tyto magnety mohou být používány při podstatně vyšších teplotách než magnety neodymové, maximální provozní teplota SmCo magnetů se pohybuje okolo 250 až 300°C. Jejich použití je v elektromotorech a jiných elektrotechnických aplikacích. [1] [5] [6]

1.3.3 AlNiCo

Je to zkratka odkazující na použité materiály slitiny, složené převážně z hliníku Al, niklu Ni a kobaltu Co, z čehož vyplývá Al-Ni-Co. AlNiCo bylo známo a používáno už před vývojem magnetů ze vzácných zemin v roce 1970. Do té doby to byl nejsilnější typ magnetu. Složení slitiny AlNiCo je obvykle 7-10% Al, 13-16% Ni, 20-40% Co, až 6% Cu, a 1% Ti, zbytek je Fe. Vývoj AlNiCo začal v roce 1931 v Japonsku. Některé druhy AlNiCo jsou izotropní (magnetická síla působí v libovolném směru) a jiné anizotropní (magnetická síla působí ve směru). Curieova teplota Alnica je jedna z nejvyšších a to přibližně 800°C. AlNiCo magnety jsou vyráběny odléváním nebo slinováním. Jsou široce používány v průmyslových a spotřebitelských aplikacích, kde jsou zapotřebí silné permanentní magnety, příkladem jsou elektromotory, snímače, reproduktory atd. [1] [5] [6]

1.3.4 Feritové magnety

Jsou to permanentní magnety vyrobené z keramických oxidů – feritů. Jsou chemicky stálé a odolné. Z tvrdých feritů se vyrábějí cenově nejpříznivější a celosvětově nejpoužívanější permanentní magnety. Kvalita i sortiment zaznamenávají rovněž neustálý pokrok. Výhodou feritů je nejlevnější cena za kilogram a velký rozměrový i tvarový rozsah. Vyrábějí se jako izotropní nebo anizotropní. Feritové magnety mají velmi široké možnosti použití. Montují se do elektromotorů a generátorů, jsou součástí magnetických spojek a brzd. Slouží jako senzory polohy a otáčení, jako spínače a nejčastěji jsou využity v reproduktorech. [1] [5] [6]

2 Historie strojů s PM

Historie strojů s permanentními magnety a nejen strojů s PM, se odvíjí společně, s tím jak probíhal vývoj na poli výzkumu magnetismu.

O magnetismu se vědělo už dávno před tím, než se jím začal na vědecké úrovni zabývat královský lékař *William Gilbert* (1544 – 1603) který formuloval některé poznatky o magnetismu, které platí dodnes.

Permanentní magnet je vždy magnetickým dipólem (tj. má vždy dva póly, sever – jih ať ho jakkoliv rozdělujeme).

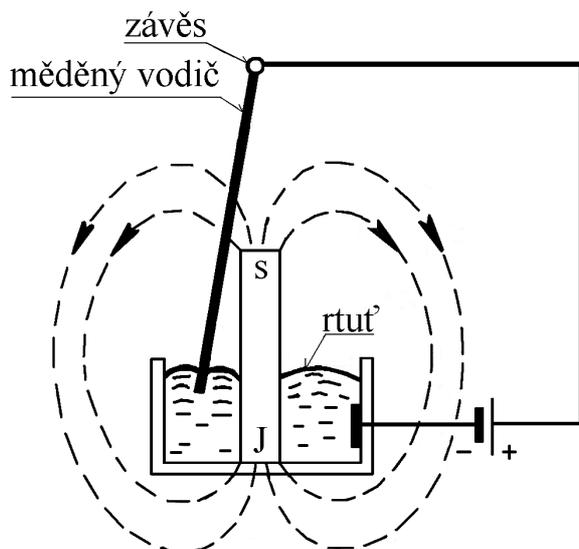
- Stejnomené póly magnetu se odpuzují, opačné se přitahují.
- PM lze zmagnetovat další železná tělesa, (tj. existuje magnetická indukce).
- Železo vložené před PM zeslabuje jeho působení (tj. existence magnetického stínění)
- Ohřevem do červeného žáru mizí permanentní magnetismus (pozdější určení Curieovy teploty)

William Gilbert ale nespojoval magnetismus s elektřinou, kterou se taktéž zabýval. To že elektřina a magnetismus spolu souvisejí, spolehlivě prokázal až *Hans Christian Ørsted* (1777 – 1851) v roce 1820. Prokázal že elektřinu doprovází magnetický jev. Opačný jev, kdy magnetismus může indukovat proud do cívky, předvedl o 11 let později *M. Faraday* v roce 1831.

André Maria Ampère (1775 – 1836) společně se svým spolupracovníkem *Françoisem Aragem* (1786 – 1853) objevili způsob jak vyrábět silné permanentní elektromagnety, které se do té doby se vytvářely jen pomocí magnetitu a byly silné jen jako jeho předloha.

Michael Faraday (1791 – 1867) se začal zajímat o elektrické a magnetické jevy kolem roku 1820, kdy byl motivován Ørstedovými pokusy, jimiž prokázal souvislost elektrického proudu magnetismu. V té době totiž Faraday, již několik let, pracoval u sira *Humphry Davyho*, který dostal do ruky Ørstedův spis „*Pokusy s působením elektrického konfliktu na magnetku.*“ Poté co pokusy společně zopakovali, rozhodl se Faraday zkonstruovat vlastní zařízení. Po roce práce vykonstruoval zařízení, v němž vodič protékán proudem byl umístěn v poli permanentního magnetu; síla na vodič působila tak, že vodič vykonával otáčivý pohyb. S jistou dávkou nadsázky lze toto zařízení považovat za první

elektromotor. [7] (obr.2.1.a obr. 2.2.)



Obr. 2.1. a) princip experimentu b) skutečné provedení [7]

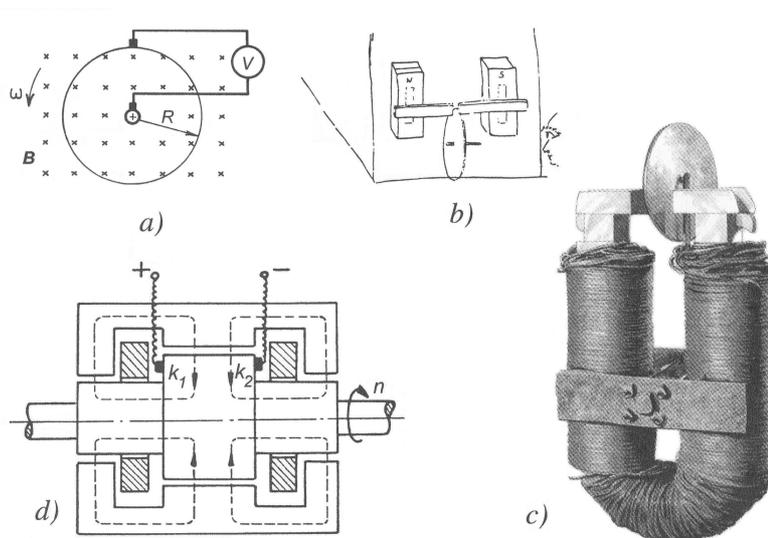


Obr. 2.2. Replika skutečného provedení. K nahlédnutí v národním muzeu Americké historie ve Washingtonu v USA [9]

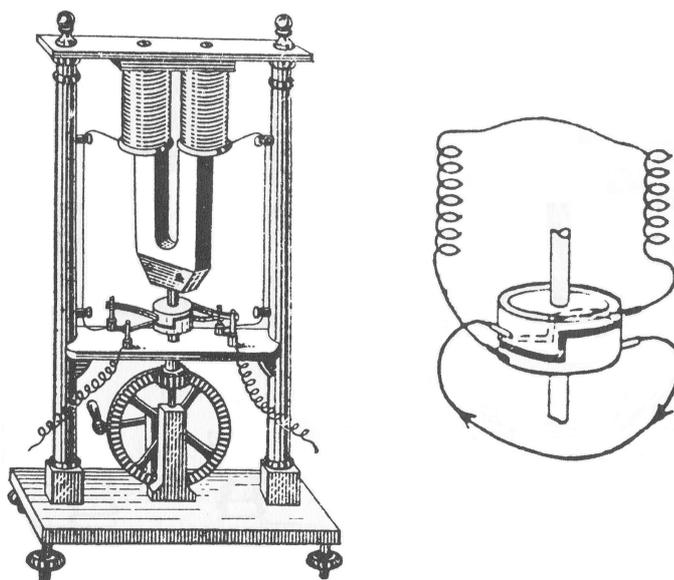
Faraday později vymyslel a vyrobil první stejnosměrný stroj tzv: unipolární, nebo též homopolární (viz. obr. 2.3.). Strojek využívá tzv. Lorenzovu sílu, která je vektorovým

součtem elektrické a magnetické síly působící na vodič. Platí pro něj pravidlo levé ruky: „*Položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly (dohodnutý) směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem.*“ Vztah pro Lorenzovu sílu:

$$\vec{F} = Q \times (\vec{E} \times \vec{v} \times \vec{B}) \quad [\text{N}; \text{c}; \text{V/m}; \text{m/s}^{-1}; \text{T}] \quad (2-1)$$



Obr. 2.3. Faradayův homopolární stroj: a) ...princip, b) ...reprodukce z Faradayova deníku, c) ...Faradayovo experimentální uspořádání, d) ...soudobé konstrukční provedení. [7]

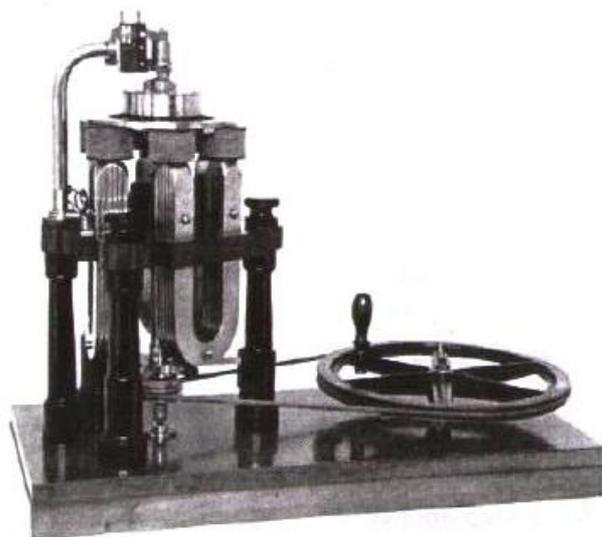


Obr. 2.4. Dynamo Hipolita Pixiiho z roku 1832. Vpravo předchůdce komutátoru [7]

Zakrátko vznikaly další typy elektrických strojů. Stroje, které měly působit jako zdroje elektrické energie, si nedovedli jejich tvůrci představit jinak, než jako zdroje stejnosměrné, protože v té době byl znám jediný stálý zdroj elektrické energie a to Voltův sloup. Proto je opatřovali mechanickým usměrňovačem střídavého indukovaného napětí – komutátorem.

Jedním z prvních strojů tohoto typu byl generátor, který zkonstruoval pařížský mechanik *Hippolyt Pixii*, v roce 1832. Otáčející se permanentní magnet tvaru podkovy indukoval v nepohyblivých cívkách střídavé napětí. To bylo mechanicky usměrňováno přepínačem (obr. 2.4. vpravo), z něhož později vznikl komutátor.

Pixiiho dynamo konstrukčně zdokonalil mechanik *Emil Stöhrer* z Lipska, roku 1843. Místo jednoho otáčivého permanentního magnetu použil tři pevné, navzájem pootočené podkovovité magnety. Nad póly magnetů se otáčelo 6 cívek (obr. 2.5.) Změnou magnetického toku se v cívkách indukovalo střídavé napětí. [7] [10]



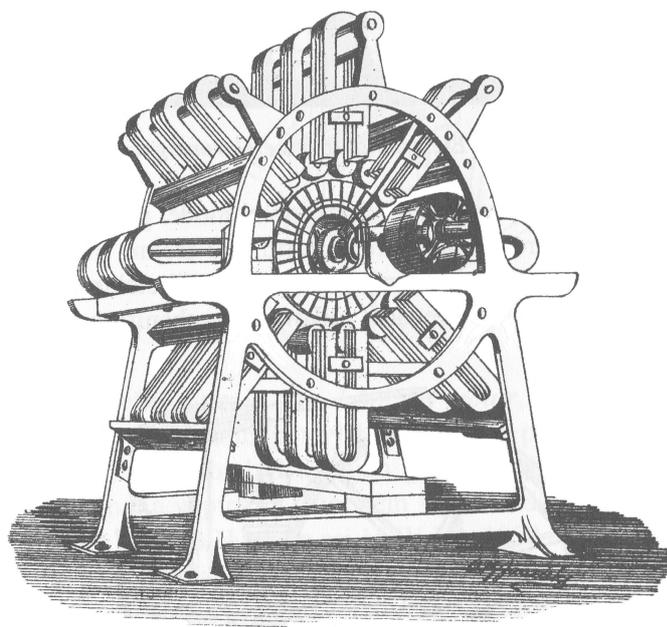
Obr. 2.5. Stöhrerův magnetoelektrický stroj z roku 1843. [8]

Pixiiho stroj byl inspirací pro mnohé následovníky a byl upravován mnohými dalšími techniky (např. Ital Salvatore del Negro, Richie, Saxon, Clark a další. Francouzská firma *Compagnie d'Alliance* postavila kolem roku 1850 první elektromotor „*Alliance*“ (obr.2.6.)

Dle knihy [7], tvořily rotor tři rovnoběžné mosazné desky, na jejichž obvodě bylo uloženo 16 cívek, spojených do série. Každá z desek se pohybovala mezi póly permanentních

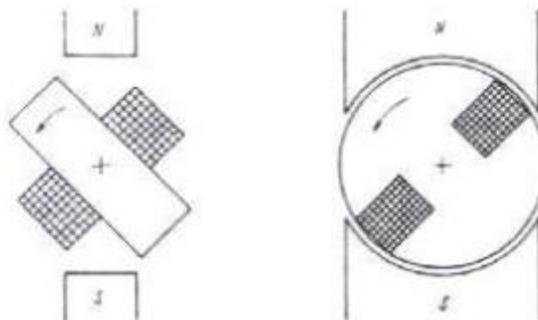
magnetů podkovovitého tvaru, umístěných paprskovitě kolem osy stroje. Některé z těchto strojů neměly komutátor, přívody byly vyvedeny přes kroužky, byly to tedy jedny z prvních synchronních střídavých generátorů. Používaly se především k napájení pouličního osvětlení.

První prakticky použitelný stejnosměrný stroj navrhl *Werner von Siemens* (1816 – 1892). Vylepšil magnetický obvod stroje, kdy cívku, do níž se indukuje napětí, navinul na železné jádro, které se otáčelo mezi póly permanentního magnetu. (obr. 2.7.a). Tím zmenšil rozptylové magnetické pole, docílil podstatně větších změn magnetického toku spřaženého s cívkou a tedy (u dynama) většího indukovaného napětí. Tento účinek ještě podstatně zvýšil vhodným tvarem rotujícího jádra – „kotva tvaru dvojitého T“ („*Doppel-T-Anker*“). (Obr.2.7.b) [7]



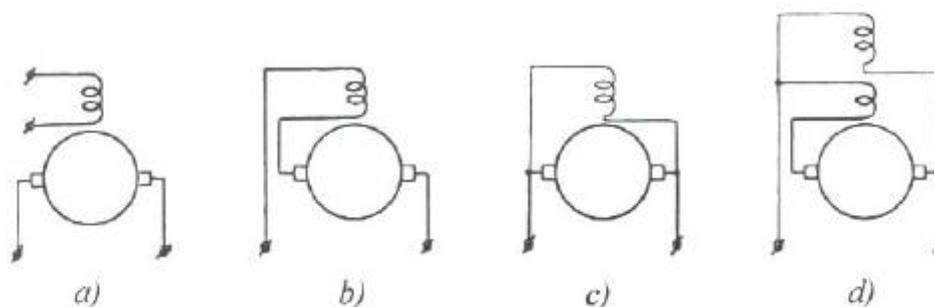
Obr. 2.6. elektromotor „Alliance“ [7]

Později Siemens učinil další významný objev (v roce 1867) – tzv. dynamoelektrický princip. Díky tomuto objevu vznikly stejnosměrné stroje sériové, cize buzené (PM), derivační (paralelní), anebo kompaundní (sérioparalelní). (Obr. 2.8..)



Obr.2.7. Siemensovo řešení magnetického obvodu stejnosměrného stroje z roku 1856:

a) princip, b) kotva tvaru „dvojitého T“ [7]



Obr.2.8. Stejnosměrné stroje a jejich zapojení: a) s cizím buzením, b) sériové, c) derivační, d) kompaundní [8]

Do současnosti byly elektrické točivé stroje vylepšovány v závislosti na tom, jak pokračoval vývoj v mnoha odvětvích, které se dotýkají jejich součástí. V 19. století například nebyla kvalitní izolace, ať už na vinutí či přívodní kabeláž, tak jak ji známe dnes. Používala se především slída, textil, papír a dřevo, ale taktéž porcelán zejména na přichytky. V konstrukčních prvcích a magnetickém obvodu se dalo vylepšovat ledacos. Od lepších a kvalitnějších materiálů na výrobu magnetických obvodů, až po jejich správné tvary. Konstrukční prvky jako ložiska, uchycení motoru, konstrukční uspořádání, nebo tvar celého motoru či generátoru – z vhodných tvarů se časem vytvořily normy pro chlazení IC a konstrukční uspořádání IM. Díky výzkumu izolačních materiálů, se mohli vytvářet menší, ale často stále výkonnější a kvalitnější generátory. Vývojem prošlo uložení vodičů v drážkách a tvar drážek.

Princip krokového motoru byl vymyšlen v 19. století na přelomu třicátých a čtyřicátých let. První krokové motory s PM byly zkonstruovány kolem roku 1960 pro potřeby prvních počítačů a jejich periférií. O další dekádu později se objevili i v NC obráběcích strojích [11].

Princip spínaných reluktančních motorů (SRM) se objevil taktéž na přelomu třicátých a čtyřicátých let 19. století, ale pro nemožnost řízení častého spínání (chyběly polovodičové výkonové spínací prvky) tento princip upadl v zapomnění. S příchodem polovodičové techniky se SRM mohl dovézt k praktické a účinné realizaci [17].

3 Rešerše elektrických strojů s permanentními magnety

Elektrické stroje s PM doplňují řady klasických motorů a vykukují z řady i přes to, že jsou kolikrát ekonomicky dražší. Jsou ale zato kompaktnější díky neexistenci budícího vinutí (u synchronních strojů, krokových strojů), výrobně náročné (lineární motor), a náročné na řízení chodu. Motory s permanentními magnety se používají v mnoha aplikacích od hraček, přes pohony robotických automatů v automobilovém průmyslu, až po motorky vesmírných vozítek.

Stroje s PM jsou v podstatě dvojího druhu – stejnosměrné a synchronní. Speciální stroje jako je krokový motor, či SRM jsou druhy synchronních strojů.

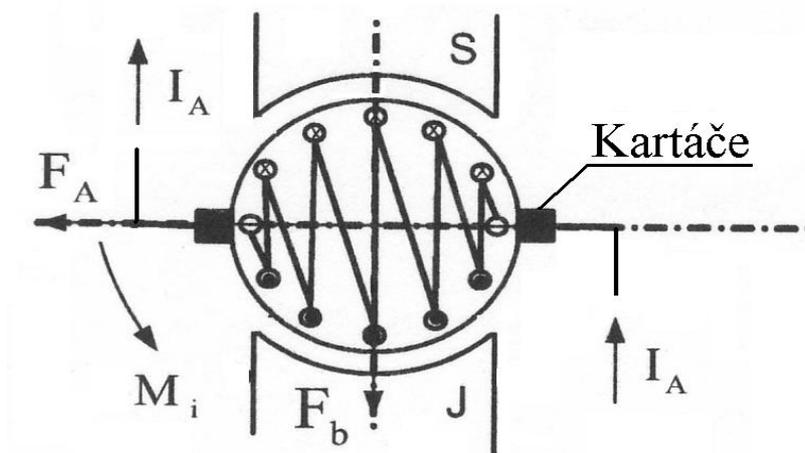
3.1 Stejnosměrné stroje s PM

Stejnosměrné stroje se v dnešní době jako zdroj elektrické energie už téměř nepoužívají. S nástupem rozvoje polovodičové techniky byly vytlačeny řízenými usměrňovači.

Stejnosměrné motory všeobecně se dají velice dobře regulovat a jejich regulační technika je realizovatelná a cenově dostupná. Jejich výkony se mohou pohybovat v rozmezí řádově od miliwatů (10^{-3} W) až do cca 5 MW ($5 \cdot 10^6$ W) [12] [13] [14]. U stejnosměrných strojů se PM používá právě v dolní hranici výkonů od miliwatt do několika desítek kilowatt. Hranice použití PM se nedají stanovit přesně, protože hlavním kritériem v osazování PM v motorech, je cena. Další nevýhodou strojů s PM je nemožnost odbuzování (regulace rychlosti). Naopak nespornou výhodou je např. menší rozměr budící části motoru při zachování výkonu a tím i zmenšení celého motoru.

3.1.1 Princip stejnosměrného stroje s PM

Princip stejnosměrného motoru je založen na silovém působení statického magnetického pole na vodiče protékané proudem a také na indukovaném napětí do pohybujících se vodičů [12] [13] [14]. K dosažení využitelných výkonů je zapotřebí vhodná geometrie stroje.(Obr. 3.1.) a taktéž kvalitní navinutí cívek vinutí na kotvě stejnosměrného stroju. (obr.3.2.)



Obr. 3.1. Orientace polí statoru a rotoru stejnosměrného stroje [12]

Základem stejnosměrného motoru je mechanický střídač – komutátor, který zabezpečuje, že úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru bude $\beta = \pi/2$ čili 90° . Při otáčení kotvy a nastavených kartáčích v magnetické neutrále, která by měla být vždy souhlasná s geometrickou neutrálou, dochází k plynulému přepínání vodičů kartáči a komutátorem tak, že při stejnosměrném napájení je ve vodičích ve stejné prostorové poloze (pod jedním pólem) polarita proudu stále stejná [14]. Taktéž magnetické pole vytvořené proudy v závitech vinutí kotvy má při otáčení rotoru stálou prostorovou polohu kolmou k magnetickému budícímu poli statoru. Vzorec (3-1) určuje jak působí na jednotlivé vodiče kotvy síla, jejíž smysl se určí podle pravidla levé ruky.

$$F_m = B \times i \times l \quad [\text{N}; \text{T}; \text{A}; \text{m}] \quad (3-1)$$

Točivý moment vzniká vektorovou skladbou sil vyjádřenou vztahem (3-2) a je maximální.

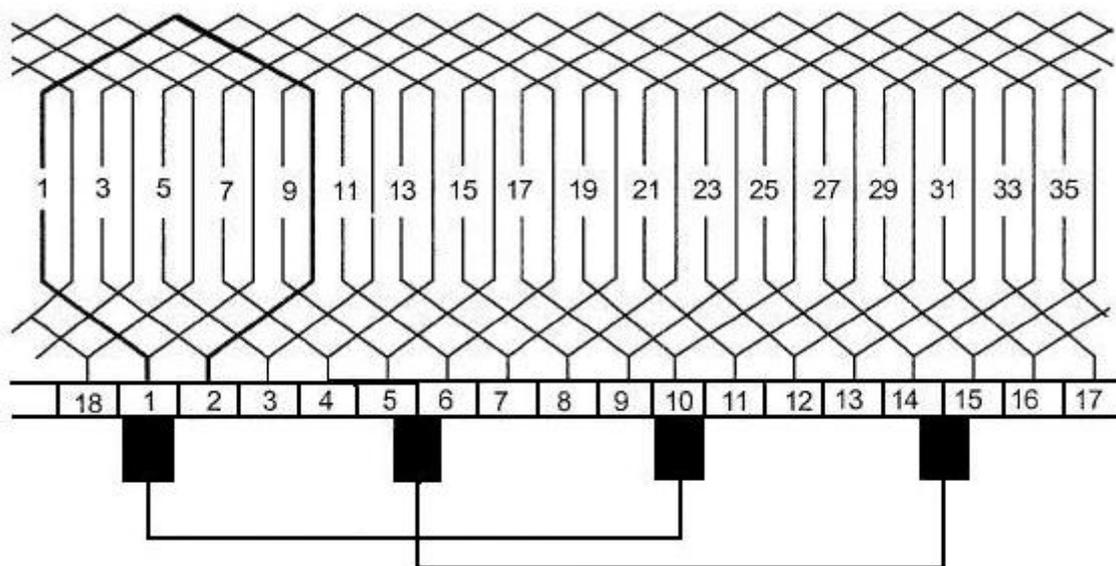
$$M_i = k \times |F_a \times F_b| = k \times F_a \times F_b \times \sin \beta = k \times F_a \times F_b \quad [\text{Nm}; \text{N}; \text{N}] \quad (3-2)$$

Zmíněná kolmost $F_a \perp F_b$ je zabezpečena polohou kartáčů, přes které se přivádí proud do rotoru stroje a které určují osu pole rotoru. [12] (obr. 3.1.)

Princip stejnosměrného dynama je stejný jako u motoru jen s tím rozdílem (obr. 3.1.), že se při otáčení rotoru cizím pohonem indukuje ve vodičích napětí dle rovnice

$$U_i = B \times l \times v \quad [\text{V}; \text{T}; \text{m}; \text{m/s}] \quad (3-2)$$

jehož smysl se určí podle pravidla pravé ruky. Otáčení komutátoru způsobuje, že jsou přes kartáče připojeny závity vinutí stále stejné prostorové polohy, ve kterých je naindukované napětí stále stejné polarity. Na kartáčích je proto stejnosměrné napětí.

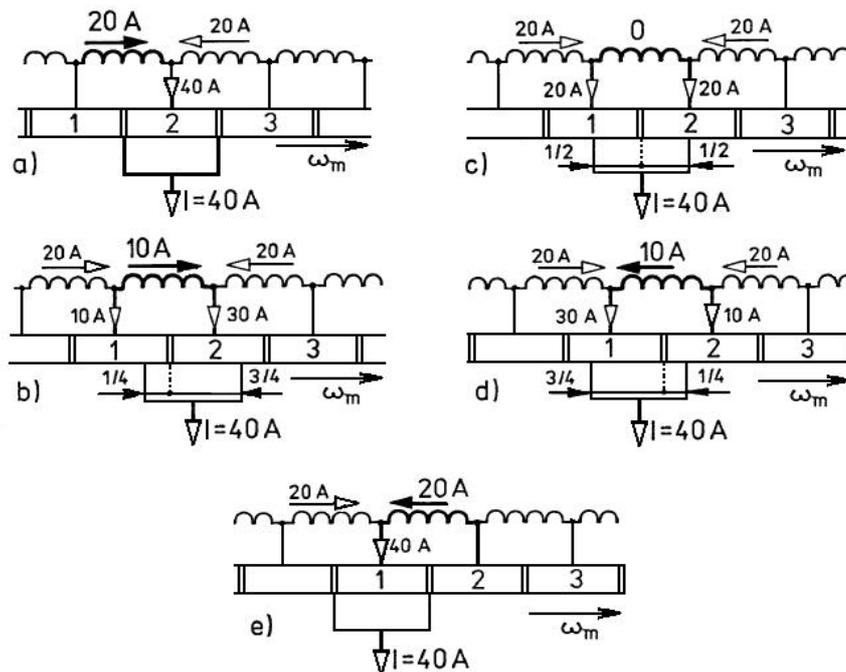


Obr. 3.2. Rozvinuté vinutí kotvy – smyčkové, dvouvrstvé s 18 lamelami na komutátoru. [12]

3.1.2 Komutace

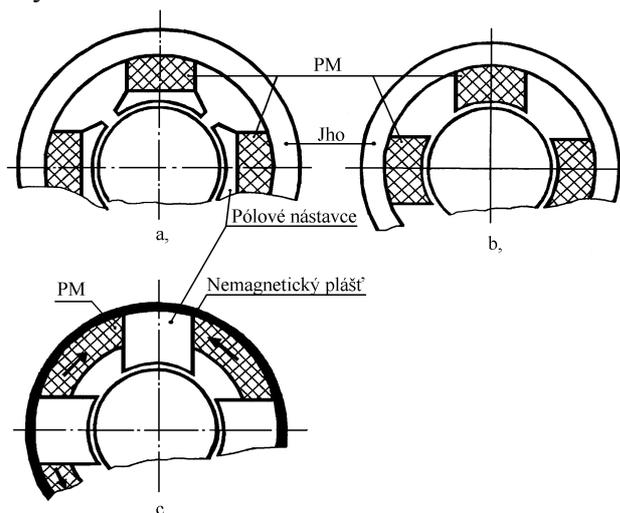
Největší slabinou stejnosměrných strojů je komutace a nejhoudlivější místo je komutátor. Knihy [12] [13] [14] shodně uvádějí že komutace je děj, při kterém dochází ke změně proudu v cívice z jedné polarity na opačnou v době, kdy kartáč spojuje komutující cívku (cívky) nakrátko a je na nich $U_i = 0$. V cívice se v té době mění orientace indukovaného napětí v obvodu kotvy tak, aby dodávala napětí stejné polarity. Na obrázku 3.3. je znázorněn proces komutace v silně vyznačené cívice, v krocích po $\frac{1}{4}$.

Komutace je velice krátký děj při rotaci kotvy a prakticky neexistuje, protože obvyklá šířka kartáče je větší než šířka lamely. [12]

Obr. 3.3. Proces komutace po $1/4$ krocích v čase.[14]

Proces komutace ale není tak ideální, protože při něm vzniká přechodový děj. Může dojít k překomutování, nebo k podkomutování.

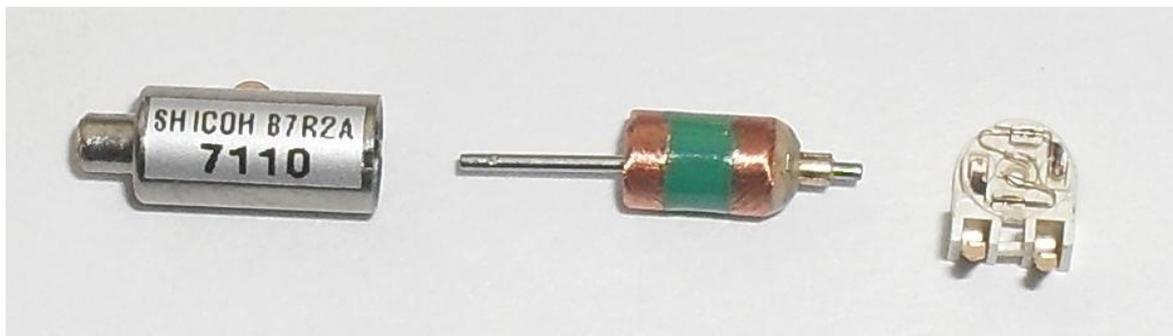
Magnetický obvod kotvy je listěného provedení z navzájem izolovaných plechů, přestože se jedná o stejnosměrný stroj. Ve vinutí vlivem komutací dochází k přechodovým jevům a tím dochází k změnám v magnetickém toku. Tím by se do plného materiálu kotvy indukovaly vířivé proudy.



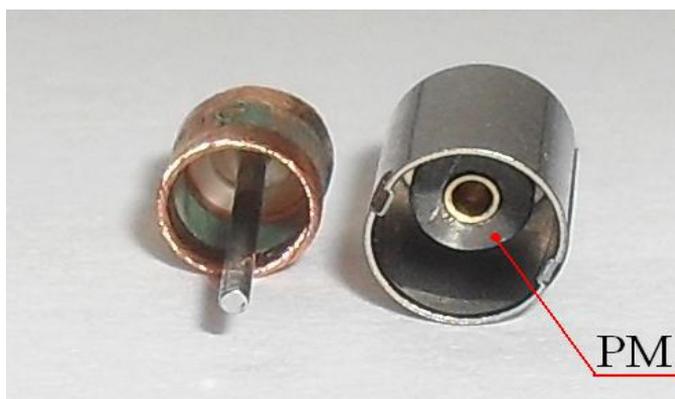
Obr.3.4. Budící PM u stejnosměrného stroje: a) radiálně uspořádané PM s pólovými nástavci, b) radiálně uspořádané PM bez pólových nástavců, c) segmentové PM s naznačenou magnetizací [13]

3.1.3 Jiné provedení stejnosměrných strojů s PM

Na obr. 3.4. je klasické uspořádání stejnosměrných strojů s PM. Existují i netypické provedení stejnosměrného stroje například motor se zvonkovou kotvou. Jeho výhodou je malá setrvačnost, lehkost konstrukce a malé rozměry díky PM. Na obr. 3.5.a obr. 3.6. je názorně vidět vnitřní uspořádání takového motorku.



Obr. 3.5. Rozložený stejnosměrný motorek s PM s kotvou zvonkovou. Použitý jako vibrační vyzvánění v mobilním telefonu. (zdroj: archiv autora)



Obr. 3.6. Rozložený stejnosměrný motorek s PM s kotvou zvonkovou. Pohled na vnitřní uspořádání. (zdroj: archiv autora)

PM u stejnosměrných motorů dovolují i obrácené uspořádání motoru. Budící magnety jsou na rotoru, kotva je na statoru. Bohužel to vyžaduje tzv. elektronickou komutaci kdy je klasický komutátor nahrazen polovodičovými spínacími prvky. Pro některá použití strojů s PM je důležitý taktéž moment setrvačnosti a to např. minimální. Pak se používají speciální kotvy.[13]

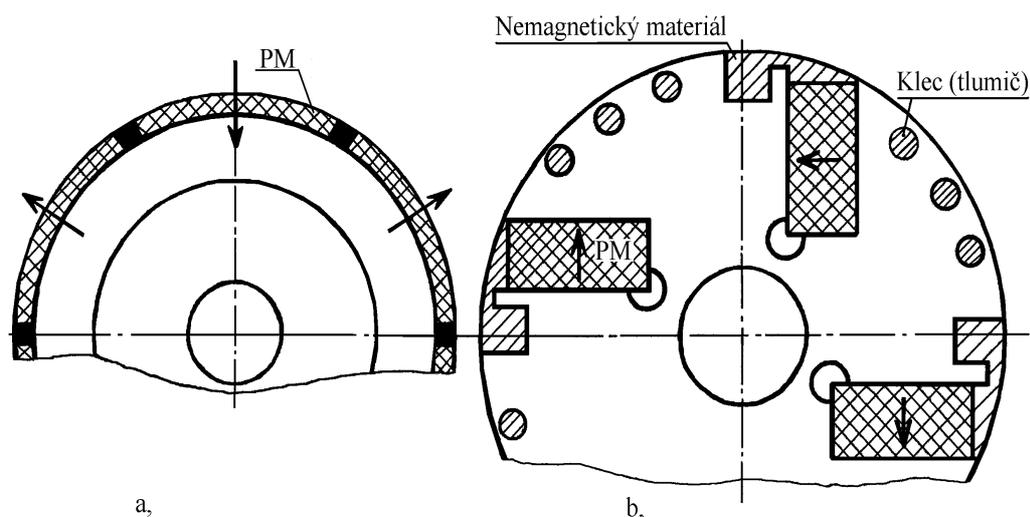
Další typ stejnosměrného motoru je od švýcarské firmy *Maxon Motor AG* [15], která vyrábí stejnosměrné komutátorové motory DC s výkony do 250 W a motory s elektronickou komutací EC s výkony do 400 W. Komutátorové motory jejich konstrukce, používají samonosné vinutí bez železného jádra podle vlastního patentu. Vinutí dává motorům vlastnosti překonávající možnosti motorů s konvenční konstrukcí. Toto jsou některé z nich:

dlouhá doba života, malé jiskření a opotřebení komutátoru a kartáčů i při velké rychlosti otáčení, relativně malé rozměry motoru a účinnost až 92 %.

3.2 Synchronní stroje s PM

Synchronní stroje pracují na principu elektrického točivého pole a svůj název mají odvozen od toho, že jejich rotor se otáčí stejnou (synchronní) rychlostí jako točivé magnetické pole vytvořené statorem. Používají se převážně k výrobě elektrické energie a jejich výkony dosahují hodnot až 1500 MVA. Označují se jako turboalternátory, nebo hydroalternátory. Jsou to jedny z největších elektrických strojů. V současné době se též používají jako zdroje elektrické energie u automobilů, letadel, speciálních ženíjných strojů a v elektrocentrálách. Označují se jako alternátory. Použití synchronního stroje jako motoru je málo běžné. Jejich hlavní nevýhodou je, že se samy z klidu nerozeběhnou.

Synchronní stroje s PM jsou konstrukčně stejné, jako klasické synchronní stroje, až na rotor. Stator má stejné třífázové vinutí prostorově pootočené o 120° . Magnetický obvod je složený z izolovaných plechů. Permanentní magnety u synchronních strojů se používají, stejně jako u stejnosměrných strojů, k vytvoření magnetického pole [13]. Jejich použitím se odstraní jedno slabé místo synchronních strojů a to kluzný kontakt, který u klasického provedení přivádí stejnosměrný proud do budicího vinutí. PM, při stejném budicím výkonu jako má budicí vinutí, obsáhne menší prostor v motoru. (Obr. 3.7.)



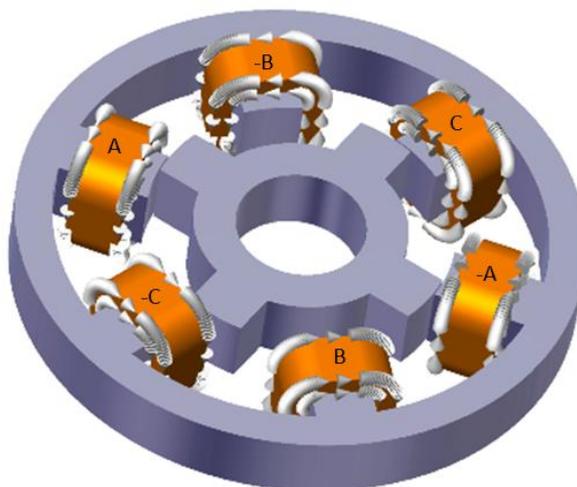
Obr.3.7. Konstrukce synchronních strojů: a) s povrchovými PM, b) vnitřními PM [13]

Kvůli vysoké ceně PM se používají jen u strojů s menšími výkony. Technicky lze dosáhnout výkonů až stovek kW, ale cena je neúměrná vysoká. Cena činí řádově až stovek tisíc korun českých. Konstrukčně jsou synchronní stroje s PM na rotoru dvojího typu – s povrchovými magnety, u nichž je nutná relativní velká vzduchová mezera (Obr. 3.7.a). U tohoto provedení nelze provést konstrukčně tlumící obvod, tudíž má sklon ke kývání, které se dá eliminovat elektronicky [13]. Toto provedení vyniká i malou pulzací momentu, proto nedochází k „trhání“ při nízkých otáčkách.

Další provedení je s vnitřními magnety které jsou schované uvnitř rotoru a jsou chráněny proti případnému poškození. Při tomto provedení lze vytvořit tlumič který omezuje kývání stroje (Obr. 3.7.b). Další výhodou je že u tohoto provedení vzniká i reluktanční moment, který dovoluje zmenšení permanentního magnetu a tím i snížení nákladů.

3.2.1 Spínaný reluktanční motor s PM

Jedná se o variaci synchronního motoru s vyniklými póly. Stejně konstrukce je taktéž krokový motor [11] [12]. Rozdílné je pouze elektronické řízení, kdy u spínaného reluktančního motoru (SRM) vyžadujeme pravidelný chod, což způsobuje pulzaci momentu kvůli včasné demagnetizaci a přepnutí magnetizace na další zuby statoru. SRM ke svému chodu potřebuje polovodičové spínací prvky a bez elektronického řízení chodu by nebyl vůbec funkční.



Obr. 3.8. Spínaný reluktanční motor [16]

Na obr. 3.8. je vyobrazeno uspořádání SRM. Stator má 6 pólů, a rotor 4 póly. Obvyklé uspořádání vícepólových SRM [17 - 20] je založeno na tom, že rotor má o jednu pólovou

dvojici méně než stator. Např. 4/2, 6/4, 8/6, 10/8 atd.

SRM pracuje na principu proměnné reluktance (magnetický odpor), kdy v závislosti na změně vzájemné polohy pólů (zubů) statoru a rotoru se mění reluktance a při daném proudu magnetická energie. Pro chod stroje jsou zapotřebí čidla polohy rotoru, které určují spínání jednotlivých cívek statoru. Spínání jednotlivých cívek statoru je potřebné správně načasovat.

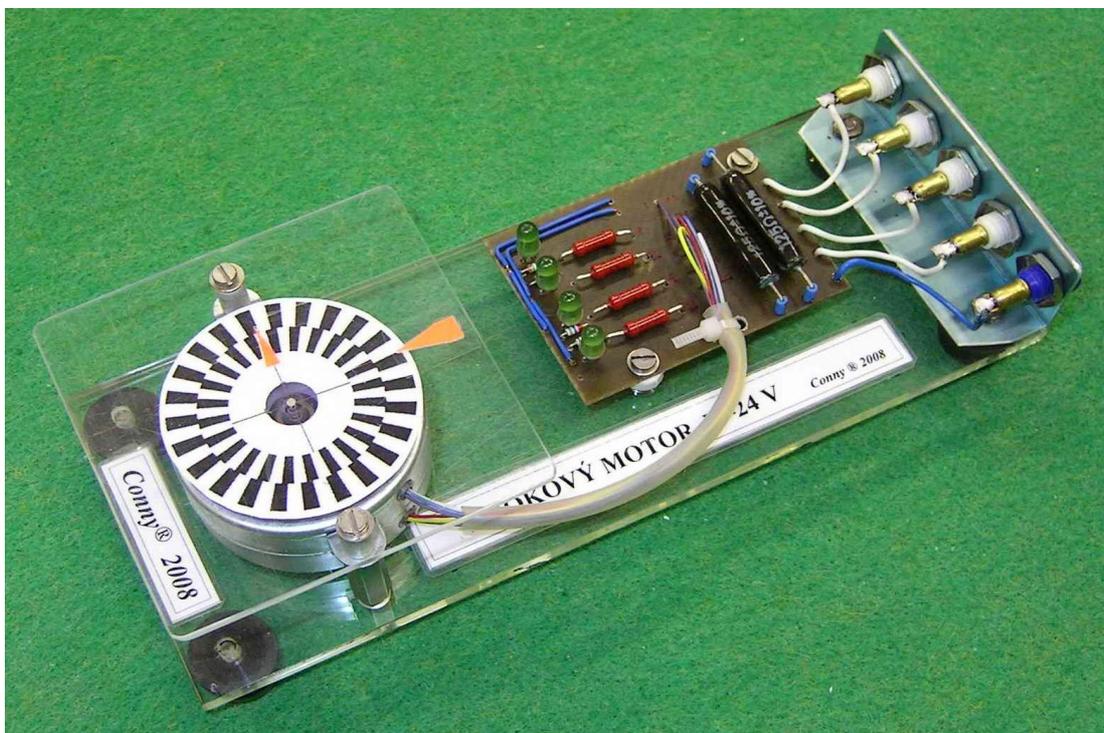
Přitahuje-li se zub rotoru do zákrytu se zubem statoru, působí stroj jako motor. Vyjíždí-li zub rotoru ze zákrytu se zubem statoru, působí stroj jako generátor. Má-li stroj působit jako motor, měl by se proud v budícím vinutí příslušného pól-páru vytvořit v okamžiku vzájemného přiblížení zubů a měl by se vypnout při dosažení zákrytu zubů rotoru a statoru [11] [12] [17]. Realita je trochu odlišná. Kvůli přechodovým jevům musí docházet při sepínání a rozepínání obvodu k rozdílným časovým prodlevám. V okamžiku spínání je malá indukčnost vinutí a tudíž malá časová konstanta. Ale v procesu rozepínání kdy jsou zuby v zákrytu a indukčnost největší musí se obvod rozepnout dříve kvůli přechodovému jevu.

SRM dosahují díky elektronickému řízení velmi vysokých rychlostí, které jsou omezeny konstrukčním materiálem ložisek a rotoru a dimenzováním měniče. Při velmi vysokých rychlostech a také vysoké spínací frekvenci, dochází taktéž k relativně velkým hysterezním a Jouleovým ztrátám. Pohony mohou pracovat jako jednofázové, dvoufázové, třífázové a vícefázové. Dají se provozovat v čtyř-kvadrantovém režimu, to znamená že se dá otočit smysl otáčení i momentu. Provoz SRM při malých rychlostech je problematický pro neklidný chod neboť chybí setrvačná síla která by překonávala zbytkovou remanentní magnetizaci i když je magnetický obvod vyroben z magneticky měkkých materiálů [17 - 20]. Strojek je jinak konstrukčně velice jednoduchý a levný, dražší je pak řídicí obvod.

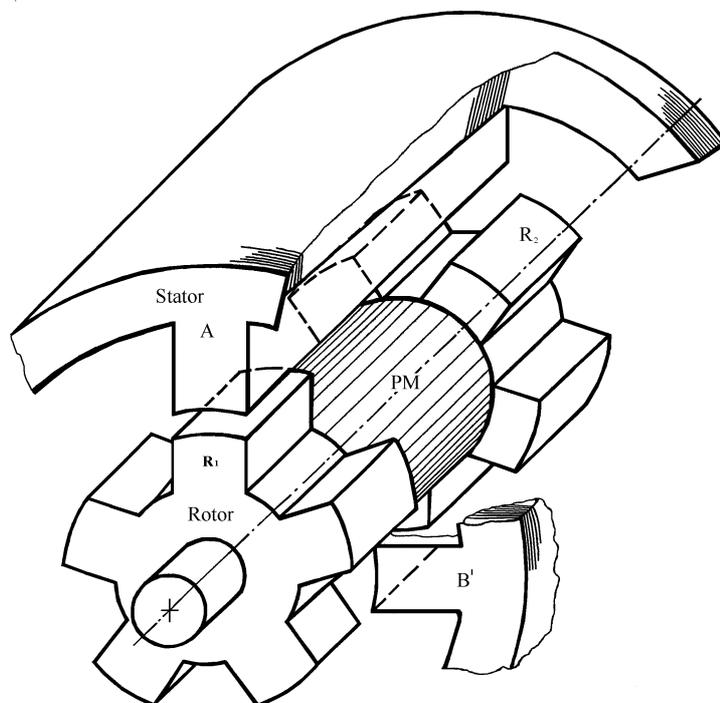
3.2.2 Krokový motor s PM

Krokové motory s PM jsou charakteristické tím že, jejich otáčivý pohyb není plynulý, ale probíhá po krocích, které jsou definovány konstrukčně, jistým úhlem natočení zubů. Natočení vznikne jako důsledek vybuzení některé cívky (nebo skupiny cívek) statoru proudovým impulzem. Napájení probíhá obdélníkovými pulzy jednofázově či vícefázově. Typický krok může mít velikost jednotek až desítek obloukových stupňů. Záleží taktéž na velikosti a počtu zubů rotoru a statoru. Pro správnou funkci musí být zuby v určitých vzájemných poměrech. Např. 5 zubů rotoru a 6 zubů statoru (obr. 3.9. a obr. 3.10.) [11 - 13] [22].

Zuby rotoru i statoru jsou složeny z plechů feromagnetického materiálu. V případě že je použit PM na rotoru, mluvíme o krokovém motoru s aktivním rotorem kdy jsou zuby rotoru vytvořeny PM. Hybridní krokový motor je kombinací obou (Obr. 3.10).



Obr. 3.9. Krokový motorek s naznačenými zuby jako učební pomůcka na střední škole v Chomutově [21]

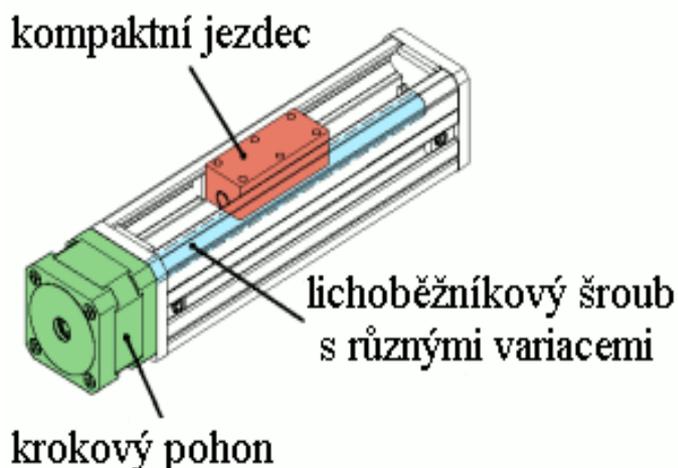


Obr. 3.10. Ukázka konstrukčního řešení krokového motoru s PM s natočenými rotory [13]

Krokový motor se jinak konstrukčně neliší od SRM. Rozdílné je pouze jejich elektronické řízení.

3.2.3 Lineární motory s PM

Krokové motory mohou být i lineární, (obr. 3.11.) kdy je vysouvána hřídel nebo posouván motor po hřídeli. Pak hovoříme o „lineárním krokovém aktuátoru“ [12] [13] [22] [23].

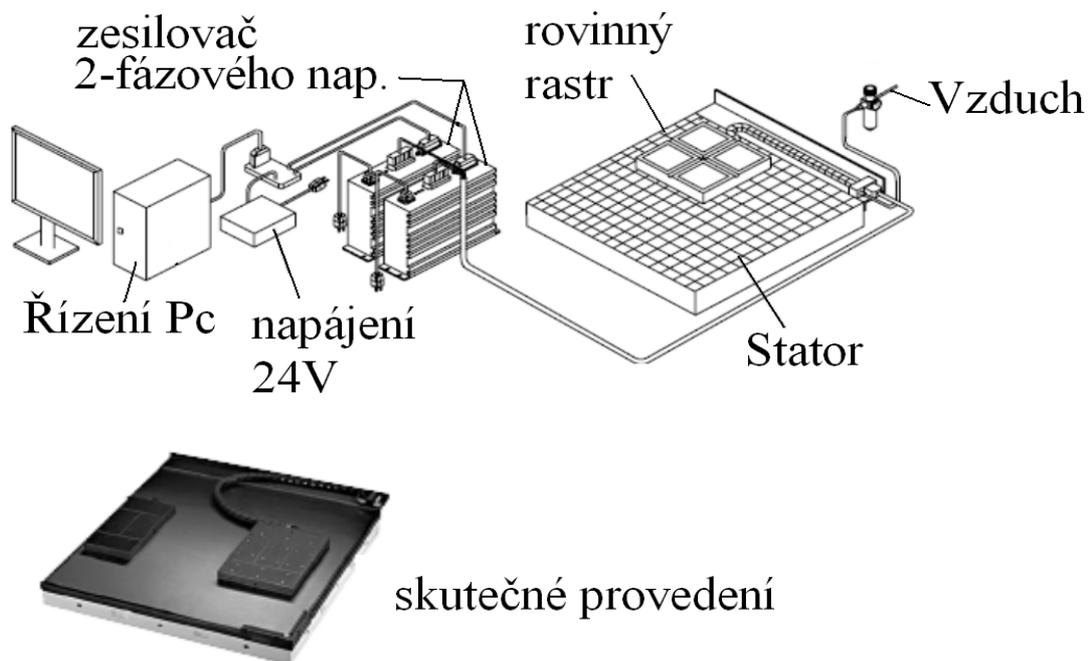


Obr. 3.11. lineární řešení krokového motoru s PM [23]

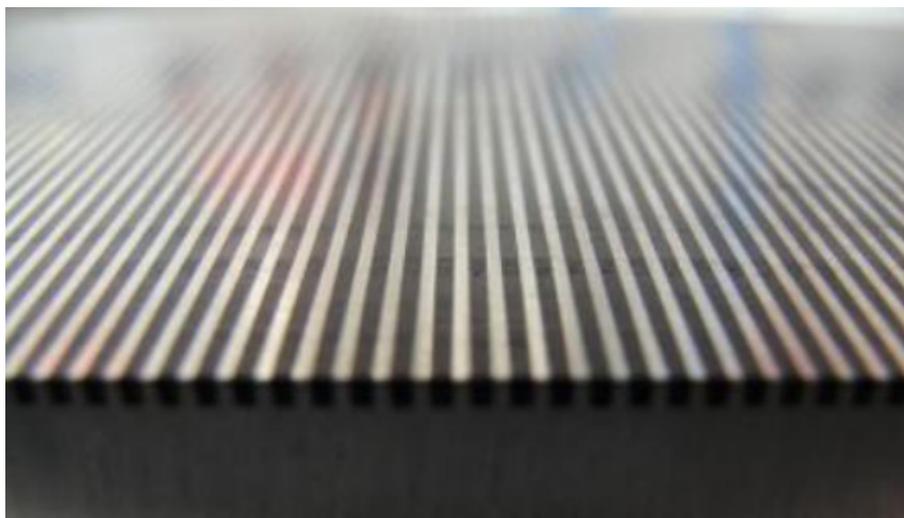
Další variantou lineárního krokového motoru (LKM) je „klasické provedení“ kdy je prováděn pohyb ve směru jedné osy. V současnosti je už k dispozici i provedení s pohybem ve dvou osách (obr. 3.12.).

Výhodou tohoto provedení je posuv do libovolného směru po desce a možnost použití více jezdců (statorů) nezávislých na sobě. Rotor má provedené vroubkování, které může dosahovat šíře až 1mm, a mezery jsou zality a zahlazeny nemagnetickým materiálem na bázi epoxidů, či plastů, čímž je zajištěn mikroposuv po desce rotoru (obr. 3.13.) [24].

Lineární motory složí k vytváření lineárního pohybu. Nemají žádné rotační části, ale můžeme si jeho provedení představit jako rozvinutý rotor se statorem ať už asynchronního, či synchronního motoru [12] [24]. Na obrázku 3.14. je znázorněno provedení klasického lineárního motoru s PM.

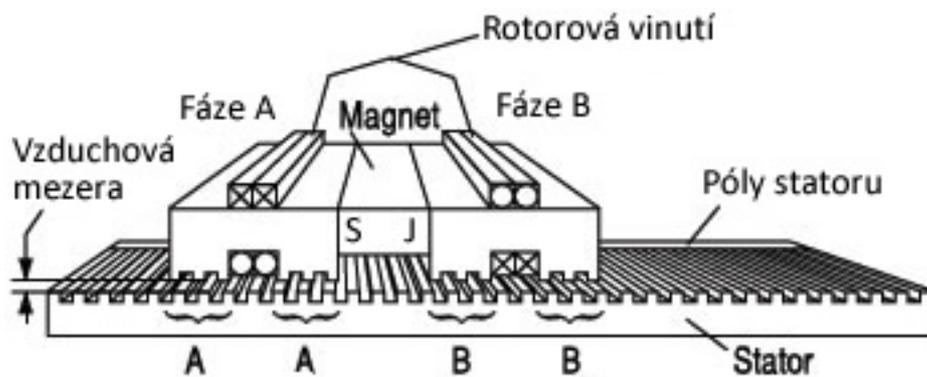


Obr. 3.12. Ukázka lineárního krokového motoru s PM s posuvem do dvou os [24]



Obr. 3.13. lineární krokový motor – provedení rotoru. [24]

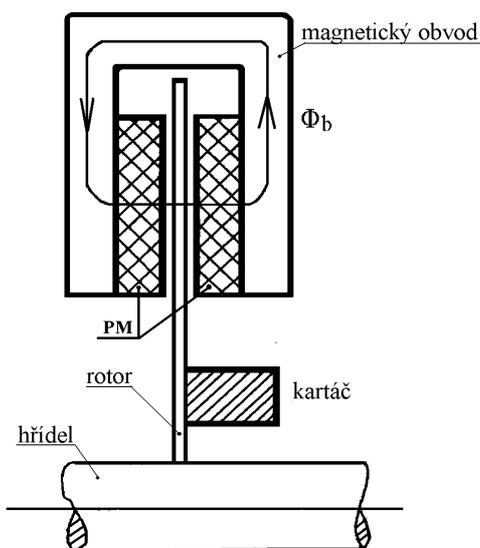
Napájení je jednofázové, nebo vícefázové, přes elektronické řízení s pomocí senzorů (např. Hallových sond), do pohyblivé části. Pro přesné řízení je zapotřebí odměřovací pravitko podle kterého se určuje poloha posuvné části [12] [20] [24].



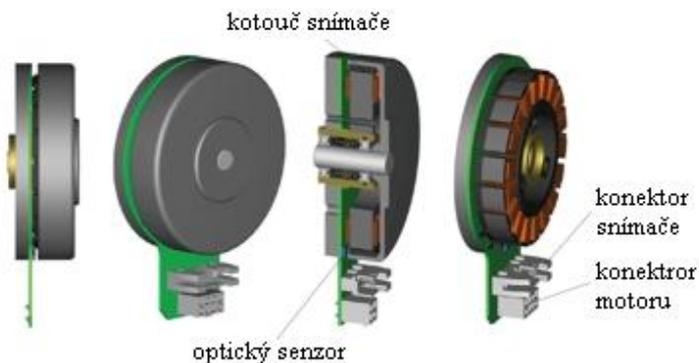
Obr. 3.14. lineární krokový motor – provedení rotoru. [25]

3.2.4 Axiální diskové motory

Pro některé aplikace je zapotřebí malá setrvačnost, to znamená malá hmotnost rotující části – rotoru. Tuto podmínku splňuje diskový motor s axiální kotvou (obr. 3.15. a obr. 3.16.).



Obr. 3.15. Diskový motor s axiální kotvou [13]



Obr. 3.16. Axiální diskový stejnosměrný motor s axiální kotvou od firmy Maxon [15]

Rotor tvoří destička z izolačního materiálu, vinutí včetně komutátoru může být vytvořeno technologií plošných spojů [11] [13]. Komutace může být i elektronická, označovaná jako EC – *electronic commutation*. EC je označení pro elektronické přepínání proudu do příslušných vinutí na základě snímání úhlu natočení rotoru pomocí Hallovy sondy. Komutace EC zajišťuje optimální úhel 90° magnetických polí statoru a rotoru v celém rozsahu rychlostí a zatížení. Motory komutované elektronicky vynikají rozsahem řízení rychlosti a několikanásobným momentem. Jejich nevýhodou je složitost a finanční nákladnost. Mohou být i na ose spřaženy ve více-diskové uspořádání. Jejich napájení je možné jak stejnosměrným tak i střídavým proudem.



Obr. 3.17. Rozložený diskový motor s PM [26]

Magnety se na nosnou plochu statoru připevňují lepením. Toto řešení musí být dostatečně pevné, i při vysokých rychlostech, aby nedocházelo k haváriím [11].

Tvar magnetů je taktéž velmi důležitý vzhledem k výrobním možnostem a také k plánovaným vlastnostem stroje. Nejčastěji se používá lichoběžníkový tvar, úzkou částí směrem k ose otáčení (obr. 3.17).

4 Popište možnosti využití strojů s PM

Elektrické stroje jsou ve společnosti velmi rozšířené. Jsou zdrojem proudu ale i pohybu například v trakci. Z celkového počtu všech elektrických točivých strojů činí cca 70% stroje do několika stovek kilowatt, většinou jako pohony různého druhu. Stroje s PM jsou hojně rozšířené právě v této oblasti výkonu. Jejich rozmach (nasazení) je povětšinou spojen s rozvojem výkonové elektroniky kdy je díky tomu umožněno jejich plné využití výkonu.

Stroje s PM můžeme dělit dle napájecího napětí na střídavé synchronní a stejnosměrné. Ale toto rozdělení by nebylo přesné neboť díky elektronice se jejich rozdíl stírá. Například krokový motor je napájen obdélníkovými pulsy do třífázového vinutí. Napájení je střídavé, ale principem je spínaný stejnosměrný proud ve správném pořadí.

Synchronní stroje s PM se používají především jako bezkartáčové servomotory s PM na rotoru a třífázovým vinutím ve statoru. Optimalizovaná konstrukce motoru s použitím nových magnetických materiálů dovoluje až pětinasobné momentové přetížení, a tyto motory jsou proto vhodné pro dynamicky náročné úlohy s nízkou spotřebou, jako je provoz silničních elektromobilů. Doplněním vhodnou planetovou převodovkou je možno optimalizovat potřebný moment k otáčkám pohonu. Kladou se téměř extrémní požadavky na využití stroje a minimální pulzační momenty i při velmi nízkých rychlostech. Dále se používají v trakčních pohonech kdy nahrazují asynchronní a stejnosměrné stroje v lokomotivách [27].

Lineární motor si našel uplatnění hned v laserových aplikacích pro přesné výpalky (dva stroje používá i Škoda Transportation). Díky rychlosti a přesnosti jezdece bez zákmitu se používá při přesném obrábění materiálu v obráběcích centrech. Nevýhodou lineárního motoru je jeho relativně malá síla a nemožnost použití převodu síly pohonu pomocí převodovky. Jeho nespornou výhodou je že může mít na sobě nezávislé dva a více jezdců (statorů) na jedné libovolně dlouhé rastrové plotně (rotoru). Toho je i využíváno v železniční dopravě, namátkou v Německu (Bavorsko), Japonsku (prefektura Jamanaši) a Číně (Shangai) jezdí vlakové soupravy zvané „*Maglev*“ [12] [28]. (Obr. 4.1)

Použití krokových motorů je velice rozsáhlé. Od kancelářské techniky – tiskárny, plotry, faxy, psací stroje, přes pohony počítačových přenosových systémů – HDD, FDD, páskové média, až po obráběcí stroje, průmyslové roboty, zvedací polohovací zařízení a jiné [20].

Podobné je to i s pohony SRM. Najdeme je v domácích spotřebičích, v průmyslových aplikacích a servech. Díky možnosti rychlého spínání polovodičové řídicí elektroniky tyto

motory dosahují vysokých otáček a proto mohou sloužit i jako pohony odstředivek a vysokorychlostních vířivek, v chemickém průmyslu, bez převodovek [20].

Stejnoseměrné motory s PM se používají většinou jako rychlostní, nebo polohové servomotory používané v průmyslu a robotice. Uplatnění nacházejí taktéž ve spotřební elektronice a kancelářských zařízeních [29].



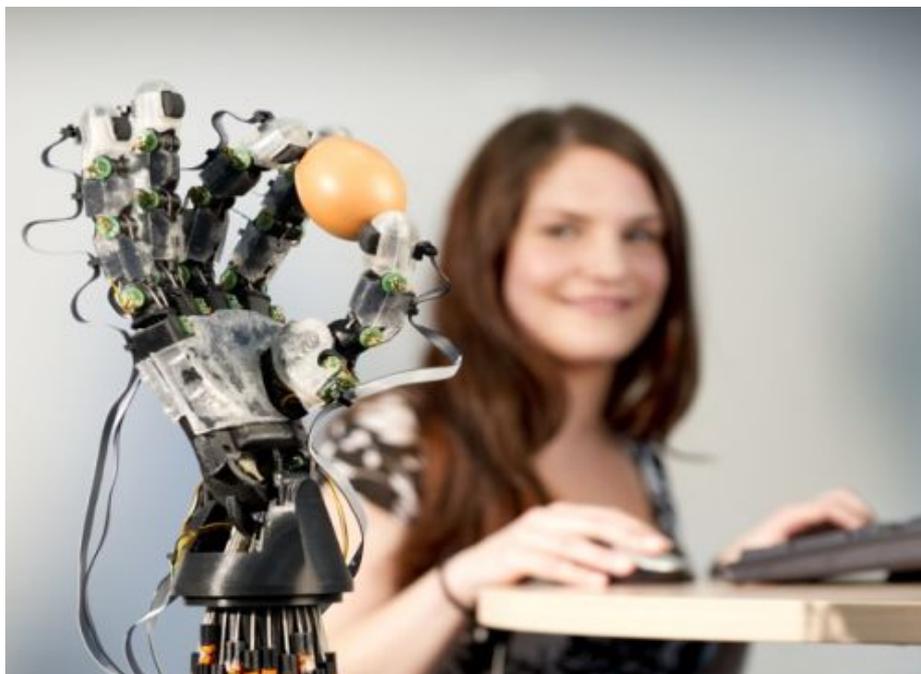
Obr. 4.1 Vlaková souprava „Maglev“ v Číně (Shangai) [28]

5 Možné budoucí uplatnění strojů s PM

Budoucí uplatnění strojů s PM bych viděl v tom že budou postupně, v závislosti na snižování cen PM a jejich zkvalitňování a tam kde to bude vhodnější, nahrazovat klasické stroje. Budoucnost bych viděl i v medicínském odvětví v použití pohonů pro plnohodnotné náhrady končetin. Motorčky malých rozměrů a výkonů, by poháněly jednotlivé prsty, kloubové spojení(obr. 5.1.). Pro vojenské účely by se montovaly výkonnější pohony. Axiální diskové motory by mohly být součástí křesel pro imobilní občany pro svou nízkou setrvačnost a dostatečný výkon.

V automobilové dopravě se dozajista brzy rozšíří elektromobily. V současné době jsou elektromobily poháněné centrální pohonnou jednotkou. Viděl bych uplatnění axiálních diskových motorů přímo jako součást náboje jednotlivých kol, či náprav. Současně by v součinnosti s napájecí jednotkou fungoval v brzděném režimu i jako brzda s rekuperací. S tím by došlo i k relativnímu snížení hmotnosti vozidla a k zvětšení dojezdu vozidla. Na měsíci či jiném vesmírném tělese při kolonizaci by mohly parkovat před komplexy vozidla poháněné solární elektřinou a elektrickými motory s PM v každém kole.

Lineární motory by se mohly montovat, v automatizovaných výrobních linkách, do podlah nejen k posunu výrobku, ale i jako „pojízdný chodník.“



Obr. 5.1. Robotická ruka zatím s pohonem přes táhla [30].

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval permanentními magnety používanými v elektrických strojích, zároveň také nejpoužívanějšími typy strojů s PM, které se používají v průmyslu, v domácnostech, v automobilové výrobě a automobilech, ale i při průzkumu jiných planet. Jejich vývoj ještě není u konce a budoucnost nám ukáže jejich další možné uplatnění. Některé směry budoucího vývoje už tu jsou a myslím si že mají velkou naději uspět.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Feromagnetické materiály* [online]. www.vesi-elt.wz.cz, 2007 [cit. 2013-04-15].
Dostupné z: www.vesi-elt.wz.cz/tp/ete_dok.doc
- [2] PROF. RNDR. TICHÝ, Milan. Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY. *Elektronika* [online]. Univerzita Karlova [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/magn_pole/magn_materialy.html
- [3] TUČEK, Jiří. *Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jvy v nanosvětě* [online]. Centrum výzkumu nanomateriálů PŘF UP Olomouc, 2010, 14.4.2010 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://nanosystemy.upol.cz/upload/10/tucek-uvod.pdf>. Prezentace - workshop. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Jiří Tuček.
- [4] Magnetické materiály. In: *Www.selos.cz* [online]. Brno: Selos Bohemia, 2007 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: http://www.selos.cz/files/docs/magnety_download/dokument_23.pdf
- [5] VIDLIČKA, Marian. Co je to supermagnet: Co je to magnet. [Http://www.supermagnety.cz/](http://www.supermagnety.cz/) [online]. Třinec: www.neomag.cz [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.supermagnety.cz/>
- [6] ZIENTEK, Pawel. Magnety AlNiCo. P.P.H.U. "ENES". *Www.magnety-magnety.com* [online]. Warszawa , Poland, 2005 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: www.magnety-magnety.com/magnesy_alnico.php
- [7] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 427 s. ISBN 80-723-2219-2.
- [8] JUŘICA, Lukáš. *Elektrické točivé stroje*. Zlín, 2008. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/6406/ju%C5%99ica_2008_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Lubomír Macků Ph.D.

- [9] GREENSLADE, JR., Thomas B. KENYON COLLEGE. *Instruments for Natural Philosophy: Rotation of Magnetic Pole* [online]. Gambier, Ohio 43022 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electric_Motors/Rotation_of_Magnetic%20Pole/Smithsonian41a.JPG
- [10] METCALF, James Farol. *Electric History: Battery Discoveries, Volta, Tesla* [online]. <http://www.electric-history.com>, 2009 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.electric-history.com/~zero/004-Battery.htm>
- [11] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [12] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [13] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 221 s. ISBN 80-704-3332-9.
- [14] MĚŘIČKA, Jiří, HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Vyd. 2, dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.
- [15] ING. BROŽ, Václav. *Nové možnosti pohonů Maxon*. *Nové možnosti pohonů Maxon* [online]. 2012, roč. 2012, č. 8 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34023
- [16] Electromagnetic Simulation of a Switched Reluctance Motor. CST EM STUDIO® (CST EMS). *Www.cst.com* [online]. CST — Computer Simulation Technology, 2011 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.cst.com/CMS/images/article608/Reluctance%20motor%20with%20coil%20designations.png>
- [17] FLAJTINGR, Jiří a KULE, Lumír. *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. 2., uprav. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 142 s. ISBN 80-7043-354-X.
- [18] Switched Reluctance Motor Drives. FLEADH ELECTRONICS. *Fleadh Electronics* [online]. Leeds, United Kingdom, 2000 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.fleadh.co.uk/srm.htm>

- [19]TAHOUR, Ahmed, Abdelkader MEROUFEL, Hamza ABID a Abdel Ghani AISSAOUI. Sliding Controller of Switched Reluctance Motor. UNIVERSITY OF BECHAR, 08000, Alžírsko; IRECOM Laboratory, University of Sidi Bel Abbes, Alžírsko; AML Laboratory, University of Sidi Bel Abbes, Alžírsko. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* [online]. Alžírsko [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: http://lejpt.academicdirect.org/A12/151_162.htm
- [20] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce. 2.*, upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 119 s.
- [21] Galerie SPŠ a VOŠ Chomutov. SPŠ A VOŠ CHOMUTOV. *Nové přípravy a učební pomůcky: Aktualizováno* [online]. 2009/2010. Chomutov, 2010 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://galerie.ictn.info/storage/200911231337_Krokov%20motor%20%282%29.jpg
- [22] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [23] Novinky ze světa pohonářské techniky - Výzkum a vývoj nových pohonných technologií: Komplettní řešení - Krokový aktuátor integrovaný do lineární osy přichází s rokem 2008. UHER, Ing. Petr. SERVO-DRIVE S.R.O. *Servo-drive* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://www.servo-drive.com/pictures/news/2008_linear_rail_system_drawing.gif
- [24] *Lineární pohony: Lineární krokový motor, lineární synchronní a asynchronní motor*. Liberec. Dostupné z: www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/...stroje/.../linear_motor.pps. Prezentace. Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola, Liberec.
- [25] Princip - Lineární motor. POHONNATECHNIKA.CZ. *Pohonnatechnika.cz* [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/shared/upload/editor/Linear%201.jpg>
- [26] KOVÁČOVÁ, PHD., Doc. Ing. Irena, Ing. Ján KAŇUCH a Prof. Ing. Dobroslav KOVÁČ, PHD. EMC diskového motoru s permanentními magnety. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY, Technická univerzita v Košiciach. *Elektrorevue* [online]. Košice: Technická univerzita v Košicích, 2005 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05048/index.html>

- [27] ČERMÁK, Lukáš. *Permanentní magnety a jejich aplikace v elektrických strojích*. ZČU Plzeň, 2010. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=34268. Bakalářská práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Skala Bohumil, Doc. Ing. Ph.D.
- [28] Maglev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 50. vyd. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 21. 5. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [29] KÖHLER, Tomáš. *Permanentní magnety v elektrických strojích*. ZČU Plzeň, 2011. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=40546. Bakalářská práce. ZČU Plzeň. Vedoucí práce Kotlanová Anna, Doc. Ing. CSc.
- [30] SLABÁ, Jitka. *21. století: Revue objevů, vědy, techniky a lidí*. Praha: RF HOBBY spol. s r.o., 2012. ISSN 1214-1097. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/blog/2012/04/05/robot-ktery-udrzi-i-vajicko/>

