

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj asynchronních strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Zdeněk PETRÁŇ
Osobní číslo: E10B0063K
Studijní program: B2644 Aplikovaná elektrotechnika
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Název tématu: Vývoj asynchronních strojů
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 historický vývoj asynchronních strojů.
2. Popište současné dělení asynchronních strojů běžně používaných v praxi (průmyslové, trakční ...).
3. Diskutujte předpokládaný vývoj asynchronních strojů (materiály, vlastnosti, účinnost ...).

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 Hammebašer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vývoj asynchronních strojů. Popisuje jejich historický vývoj od vynálezu Nikolou Teslou po moderní dobu. Stručně popisuje asynchronní stroje, jejich klasifikaci a dále diskutuje jejich možný budoucí vývoj.

Klíčová slova

Historie elektrických strojů, točivé magnetické pole, vynález asynchronního stroje, vývoj elektrických strojů, jednofázový asynchronní motor, trojfázový asynchronní motor.

Abstract

The hereby presented bachelor thesis is focused on the development of asynchronous machines. It describes the historical development from the invention of Nikola Tesla until modern times. It briefly describes asynchronous machines, their classification and further discuss possible future developments.

Key words

History of electric machines, rotating magnetic field, the invention of an asynchronous machine, the development of electric machines, single-phase asynchronous motor, three-phase asynchronous 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.

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

.....
Podpis

V Plzni dne 12.7.2013

Zdeněk Petráň

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Michaele Vachtlové, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 HISTORIE ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	11
1.1 VYNÁLEZ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	11
1.1.1 <i>Nikola Tesla</i>	12
1.2 VÝVOJ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	15
1.2.1 <i>První vyráběné motory</i>	15
1.2.2 <i>Hliníková klecová kotva</i>	17
1.2.3 <i>Magnetický obvod</i>	17
1.2.4 <i>Izolace</i>	18
1.2.5 <i>Konstrukční prvky</i>	18
1.2.6 <i>Zvýšený výkon</i>	19
1.3 HISTORICKÉ VYUŽITÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ V TRAKCI	20
2 ASYNCHRONNÍ STROJE.....	22
2.1 OBECNÝ PRINCIP ČINNOSTI, SKLUZ	22
2.2 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	23
2.3 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO STROJE	24
2.3.1 <i>Stator</i>	24
2.3.2 <i>Rotor</i>	25
3 ROZDĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	27
3.1 ASYNCHRONNÍ MOTORY POUŽÍVANÉ V DOMÁCNOSTI	27
3.2 ASYNCHRONNÍ MOTORY POUŽÍVANÉ V PRŮMYSLU.....	29
3.3 ASYNCHRONNÍ MOTORY POUŽÍVANÉ V TRAKCI	30
4 UKÁZKY POUŽITÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ V PRAXI.....	31
4.1 DOMÁCNOST	31
4.2 TRAKCE	32
4.3 PRŮMYSL	33
5 PŘEDPOKLÁDANÝ VÝVOJ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	34
ZÁVĚR.....	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	38
SEZNAM TABULEK	38

Seznam symbolů a zkratk

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
$1f, 2f, 3f$	Počet fází
AC	Střídavý proud (Alternating Current)
DC	Stejnoseměrný proud (Direct Current)
M_{max}	Maximální moment
$M_{záb}$	Záběrný moment
M_n	Jmenovitý moment

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na historický vývoj asynchronních strojů. Ve zkratce s nimi také seznamuje, nastiňuje jejich současné dělení, využití v praxi a na závěr diskutuje předpokládaný možný vývoj.

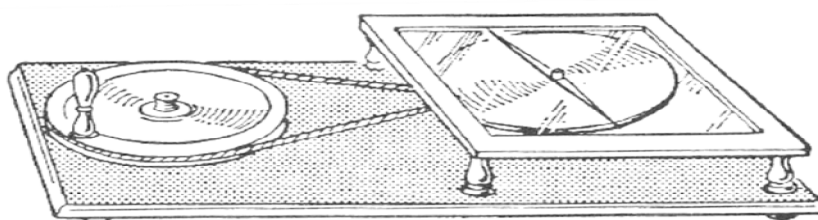
Text je rozdělen do pěti částí. První se zabývá poznatkem točivého magnetického pole, vynálezem asynchronního motoru a jeho postupným vývojem. Není opomenut ani vývoj asynchronních strojů v trakci. Druhá část pojednává ve zkratce o principu asynchronního stroje, ukazuje jeho pracovní stavy a seznamuje s jeho konstrukčním řešením. Třetí část nastiňuje rozdělení asynchronních strojů a poukazuje na použití strojů v domácnosti, průmyslu a trakci. Ve čtvrté části jsou vybrány názorné příklady využití asynchronních strojů v praxi. Jedním z nich je motorek z retro magnetofonu Tesla B400. Poslední, pátá část diskutuje předpokládaný vývoj asynchronních strojů. Zaobírá se například možnostmi využití supravodivých materiálů pro vinutí stroje.

1 Historie asynchronních strojů

Od historického vynálezu asynchronního motoru Nikolou Teslou roku 1883, letos uplynulo již 130 let. Motor prošel různými fázemi vývoje a je názorným příkladem všeobecného technického pokroku. Asynchronní stroj, používaný především jako motor proto dnes nalezneme v široké škále aplikací.

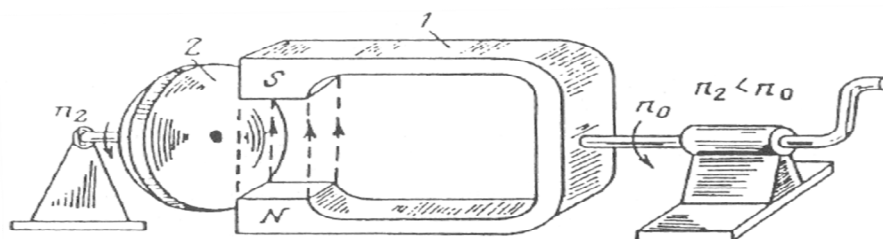
1.1 Vynález asynchronního motoru

Klíčem k vynálezu asynchronního motoru byl poznatek točivého magnetického pole. Pokusy o jeho vytvoření se datují již od roku 1824, to francouzský fyzik Francois Arago sestrojil tzv. „Aragův disk“ (Obr. 1.1). Tento disk měl na pravé straně umístěn rotující měděný kotouč, nad nímž byla zavěšena magnetka. Ta byla vlivem rotujícího kotouče vychylována ve směru jeho otáčení. Tento fyzikální jev zůstal zpočátku tajemstvím, až Faraday o několik let později podal jeho vysvětlení. [3]



Obr. 1.1 Aragův disk
Zdroj: [3]

Dalším kdo realizoval točivé magnetické pole, byl Walter Baily (Obr. 1.2). Dosáhl toho tak, že otáčel permanentním magnetem kolem jeho osy. Následným vložením měděného kotoučku do vzniklého pole se kotouček začal otáčet. [3]



Obr. 1.2 Bailyho pokus z roku 1879
Zdroj: [3]

Jak je z *Obr. 1.1* a *1.2* zřejmé, vytvoření točivého magnetického pole probíhalo mechanicky. K realizaci elektromotoru však bylo zapotřebí vytvořit točivé magnetické pole ne mechanicky, ale elektromagneticky. Jedním z prvních, komu se povedlo točivé pole takto realizovat, byl italský fyzik a elektrotechnik Galileo Ferraris. Dva páry cívek, vzájemně na sebe kolmé, byly napájeny střídavými proudy fázově posunutými o čtvrtinu periody. Měděný váleček, umístěný mezi páry cívek, se poté průchodem proudů otáčel. Fázového posuvu proudů ve dvojici protilehlých cívek Ferraris docílil tak, že do série s jednou dvojicí zapojil odpor a s druhou dvojicí indukčnost. [3] Na *Obr. 1.3* je pro ukázkou znázorněn jeden z prvních motorků Galilea Ferrarise. Jedná se o dvoufázový indukční motorek nejspíše z roku 1886, který je vystaven v muzeu fyziky v Sardinii.



Obr. 1.3 Ferrarisův 2f indukční motorek

Zdroj: http://www.museodifisica.it/ENG/htm/exhibit_magnetico_rotante.htm

Nezávisle na Ferrarisovy realizoval též točivé magnetické pole elektromagneticky Nikola Tesla. Dle Teslovy autobiografie k této myšlence dospěl roku 1882 a již roku 1883 sestrojil první funkční asynchronní motor. [3]

1.1.1 Nikola Tesla

Nikola Tesla (1856-1943) byl rodák z dnešního Chorvatska. Tento fyzik, elektrotechnik, vědec je považován za vynálezce střídavého asynchronního motoru. Jeho odkaz dále nalezneme v mnohém. Od rozvodu elektrické energie střídavými vícefázovými soustavami, přes návrh systému bezdrátové komunikace až po neonové osvětlení, rentgenové snímky, řízené střely a program hvězdných válek. Přestože se řada lidí dodnes ptá, zda li byl Tesla spíše génius nebo šílenec, je nesporné, že světovou vědu posunul dopředu jako málokdo.

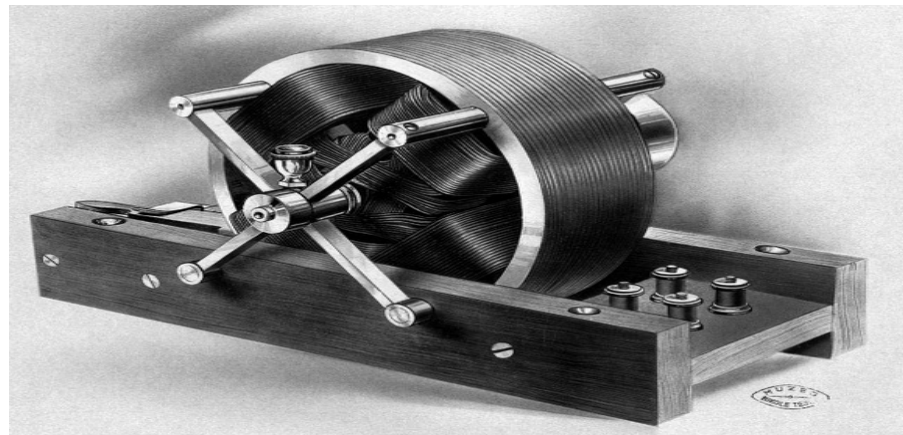
Tesla jako jednadvacetiletý studoval na univerzitě ve Štýrském Hradci. Zde rychle propadl nauce o elektřině a seznámil se zde s elektromotory, jež byly napájeny stejnosměrným proudem. Tyto elektromotory vyžadovaly systém kartáčů a lamel napájejících rotorové cívky, přičemž na kartáčích vznikalo nežádoucí silné jiskření. Tesla ihned pojal myšlenku, že by motory lépe pracovaly, kdyby využívaly proud střídavý a nemusel by být použit komutátor. O této myšlence se na jedné přednášce zmínil profesoru Poeschlovi, který zrovna demonstroval stejnosměrný elektromotor. Profesor Poeschl však na to reagoval velmi nelibě a řekl: „*Pane Tesla co nám to tady vykládáte? Chcete snad sestrojít perpetuum mobile?*“ V tu chvíli ovšem nevěděl, jak velmi se plete. [2]

Tesla nakonec svého studia ve Štýrském Hradci zanechal a nějakou dobu pracoval jako pomocný technik v Mariboru. Přesto se ke studiu vrátil, přes Prahu se dostal do Budapešti a zde své studium ukončil. Myšlenka motoru na střídavý proud ho však stále pronásledovala. Při jedné procházce v městském parku v Budapešti konečně dostal nápad nad kterým tak dlouho přemýšlel. Poklekl a do písku namaloval diagram. Najednou byl na světě návod k sestrojení asynchronního motoru, který brzy roztočil kola strojů po celém světě. Tesla ihned začal s realizací. Točivé magnetické pole realizoval pomocí cívek napájených proudem o různých fázích. Vzniklý proud následně vyvolal sílu otáčející rotorem. První asynchronní motor takto sestrojil roku 1883 ve Francii. V Evropě však pro něj nenašel pochopení. Proto se vydal do Ameriky. V New Yorku začal pracovat ve firmě Edison Machine Works s přesvědčením, že u Edisona vyvolá zájem o svůj střídavý stroj. Edison byl ovšem zastáncem stejnosměrného proudu a nechtěl na tom nic měnit. Tesla si tedy po dalším nezdaru založil za pomoci několika investorů vlastní firmu. Zde stavěl prototypy svých střídavých strojů, které si nechal průběžně patentovat. Při práci narazil na problém s určením vhodného kmitočtu. V té době se pro napájení osvětlování používaly kmitočty 125 Hz a 133Hz. Tyto kmitočty však u motorů způsobovaly velké přídavné ztráty v železe a mědi. Tesla tedy přešel na kmitočet 25Hz. Ten pro změnu způsoboval blikání elektrického osvětlení. Proto byl nakonec zaveden jednotný kmitočet 60Hz v Americe a 50Hz v Evropě. To již byly kmitočty vhodné jak pro osvětlení, tak pro motory. [2] [3]

Zlomovým byl pro Teslu květen roku 1888. Tehdy byl vyzván americkým institutem elektrotechniků dnešní (IEEE) aby prezentoval svou dosavadní práci. Tesla tedy konečně veřejnosti představil zcela nový typ elektromotoru, na kterém zároveň demonstroval všestranné možnosti využití střídavého proudu. Tato prezentace vzbudila velký ohlas. Během

několika dalších let si Tesla nechává patentovat motory, generátory, transformátory a systém přenosu elektrické energie střídavým proudem. Všechny tyto vynálezy vzbudily zájem u průmyslníka Georga Westinghouse. Ten neváhal a nabídl Teslovi, že od něj všechny jeho patenty odkoupí za jeden milión dolarů. Navíc mu slíbil vyplatit dva dolary padesát centů za každou 1HP (koňskou sílu) získanou díky jeho vynálezům. Tesla přijal, stal se bohatým a závist lidí na sebe nenechala dlouho čekat. Nastala tzv. Válka proudů. [2]

Na ukázkou Teslovy práce uvádím *Obr. 1.4* a *1.5*. *Obr. 1.4* znázorňuje Teslův 2f, asynchronní motor, o výkonu 0,5 HP (0,38kW), vyrobený roku 1887. *Obr. 1.5* pro změnu znázorňuje jedno z prvních praktických využití Teslovo motorů, konkrétně v domácnostech.



Obr. 1.4 Teslův 2f asynchronní motor

Zdroj: <http://www.teslauniverse.com/nikola-tesla-article-my-inventions-iii-my-later-endavors>



Obr. 1.5 Praktické využití Teslovo motorů v domácnostech

Zdroj: <http://www.teslasociety.com/niagarafalls.htm>

1.2 Vývoj asynchronních motorů

Od doby co začal být všeobecně přijímán Teslův vícefázový systém pro výrobu a přenos elektrické energie, začal i asynchronní motor dominovat ve všech průmyslových odvětvích. Především tedy v těch, které vyžadovaly konstantní rychlost hřídele. Do této doby dominantní stejnosměrné stroje začaly být vytlačovány. Velcí výrobci střídavých strojů, mezi něž patřili Westinghouse a General Electric v USA a Oerlikon s AEG v Evropě počali s konstrukcí prvních střídavých asynchronních motorů.

Asynchronní motor hned od své realizace Nikolou Teslou začal procházet různými fázemi vývoje. Od vynálezu hliníkové klecové kotvy (soustava tyčí spojená na koncích kruhy nakrátko) přes vývoj magnetické oceli, izolace atd. Tyto elektromotory se tak stávaly krok po kroku výkonnějšími při progresivním snižování rozměrů. Celý tento vývoj byl podložen teoretickými poznatky, jež popisovaly chování elektromotoru a zároveň poskytovaly instrukce pro jejich konstrukci. [1]

Výkony strojů se v této době uváděly v jednotce koňské síly (HP). Dnes již výkon asynchronních strojů vyjadřujeme pomocí jednotky watt (W). Proto pro snazší představu odpovídající velikosti uváděných motorů v této práci, vkládám *Tab. 1.1*.

Tab. 1.1 *Tabulka převodu velikostí výkonů asynchronních motorů mezi HP a kW*

HP	0,5	1	2	3	5	7,5	10	25	50	100	150	200	300	400	500
kW	0,38	0,75	1,5	2,2	3,7	5,5	7,5	19	37	75	110	150	220	300	370

Zdroj dat:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1360014&queryText%3DAdvances+in+Construction+Techniques+of+AC+Induction+Motors%3A+Preparation+for+Super-Premium+Efficiency+Levels>

1.2.1 První vyráběné motory

První prakticky využitelné indukční motory od firmy Westinghouse se datují k roku 1892. Spolupracovali na nich Tesla se svým pomocníkem C.F.Scottem a šéfinženýrem firmy Westinghouse, B.G.Lammem. Zpočátku se vyráběly 2f motory se satorovým vinutím navinutým ve satorových drážkách, malou vzduchovou mezerou a vinutým rotorem. [1]

Problémem tehdy bylo, že k dispozici byla jen $1f$ elektrická soustava o vysoké frekvenci. Westinghouse tedy s cílem prosadit praktický vícefázový systém, představil na veletrhu v Chicagu roku 1893 $2f$ indukční motor o výkonu 300HP. Tento motor byl napájen párem $1f$ alternátorů (60Hz, 500HP), které byly vzájemně pootočené o 90° , čímž poskytovaly potřebnou $2f$ soustavu. Na návrh pana B.G.Lamea začal Westinghouse následně vyvíjet vícefázové alternátory (60Hz). Cílem bylo, aby napájely novou řadu $2f$ indukčních motorů představených v roce 1893. Tyto nové motory měly primární vinutí na rotoru tak, aby se předešlo problémům s velkými sekundárními proudy proudícími sběrnými kroužky. [1]

Mezitím se roku 1891 ve firmě General Electric započalo na práci $3f$ asynchronních motorů pod vedením H.G.Reista a W.J.Fostera. Tyto motory měly sekundární vinutí spojené s železnými mřížkami uvnitř rotoru a odstředivý spínač pro zkratování mřížek při dosažení určité rychlosti. Eliminací sběracích kroužků získal General Electric nespornou výhodu před konkurencí. Reakce konkurence však na sebe nenechala dlouho čekat. B.G.Lamme z Westinghouse navrhl klecové (tyčové) vinutí a umístil ho na rotor. Tuto konstrukci dnes známe pod názvem klecový rotor nakrátko. Obě společnosti jak General Electric tak Westinghouse mezi sebou v roce 1896 podepsaly vzájemnou licenční dohodu. Ta umožňovala oběma společnostem používat tuto nejlepší konstrukci asynchronního motoru, aniž by vznikly jakékoliv patentové spory. Vraťme se ještě k přechodu $2f$ elektromotorů na $3f$. Bylo to dáno jednak tím, že se ukázal $3f$ systém jako ekonomičtější a zároveň již v této době byla známa výhodnost zapojení hvězda – trojúhelník. [1]

Nejenom v USA, ale i v Evropě probíhal vývoj asynchronních strojů. Dokonce zde byl sestrojen $3f$ asynchronní motor s klecovou kotvou již roku 1888 a o rok později na něj jeho strůjce Michael Osipovič Dolivo-Dobrovolskij získává patent. Dolivo-Dobrovolskij krátce pracoval u švýcarské firmy Oerlikon a následně se stal šéfkonstruktérem ve společnosti AEG. [3]

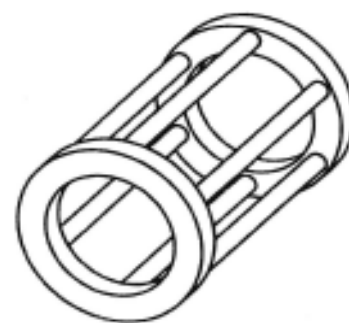
Kromě již zmíněných $2f$ a $3f$ indukčních elektromotorů existovaly také $1f$. Jak bylo Teslovi známo, aby se mohl motor otáčet, musí se vytvořit točivé magnetické pole. Proto vynalezl vinutí s rozdělenými fázemi. To zajišťovalo vznik točivého magnetického pole i za použití $1f$ zdroje napájení. Jedno vinutí mělo vždy vyšší odpor, než druhé což způsobovalo potřebné fázové posunutí proudu. Motor měl dobrý spouštěcí točivý moment, ale vysoké odporové vinutí muselo být odpojeno hned, jak motor dosáhl plné rychlosti. Takto se

zabraňovalo nežádoucím ztrátám. 1f motory byly široce používány pro pohon praček. Nedostatky tohoto motoru byly v tom, že rotor byl zpočátku vinutý a byly potřebné sběrné kroužky, kartáče a odstředivý spínač. Tento motor se přestal používat, když se na trh dostal 1f motor kondenzátorový roku 1925. To již byly spolehlivé levné kondenzátory k dispozici. Zapojovaly se do série s jedním (pomocným) vinutím. Výsledkem bylo potřebné fázové posunutí. Proud v tomto vinutí předbíhal proud v hlavním vinutí o 90°. S rostoucí rychlostí motoru se fázový úhel mezi dvěma proudy snížil a poté otočil. Proto se pomocné vinutí při vyšší rychlosti odpínalo. Pro větráky a podobné menší zátěže kondenzátorový motor používal menší kondenzátor, který zaručoval nižší rozběhový moment. [1]

1.2.2 Hliníková klecová kotva

I klecová kotva asynchronního motoru procházela vývojem. Prvotním problémem se ukázalo být spojení rotorových tyčí s kruhy na jejich koncích. Nedokonalé spoje se prováděly pomocí šroubů. Ty se však uvolňovaly, rezly a přehřívaly. Pružné podložky nebyly účinné, kov použitý na pájení se roztékal a pájení pomocí stříbra již sice bylo uspokojivé, ale za to velmi drahé.

V roce 1916 si H.G.Reist a H.Maxwell z General Electric patentovali odlitý rotor, vyrobený nalitím roztaveného kovu do formy, obklopující jádro indukčního motoru. To se točilo tak dlouho, dokud odlévaný kov nezduhl. Roku 1920 H.Maxwell a W.B.Hill vyvinuli způsob odstředivého odlévání hliníkových klecí a tak tyče s koncovými kruhy vytvořily jeden celek. Aby toho bylo dosaženo, musel hliník obsahovat malé množství křemíku. Teplota laminátu byla upravena tak, aby při ochlazení po odlití nedošlo k popraskání tyčí. [1]



Obr. 1.6 Klecová kotva
Zdroj: [4]

1.2.3 Magnetický obvod

Dělat magnetické obvody asynchronních elektromotorů z tenkých ocelových plechů nebo z masívu? To je otázka na kterou si konstruktéři dokázali odpovědět již na začátku vývoje těchto motorů. Věděli, že je potřeba eliminovat vířivé proudy v magnetické oceli. Toho dosáhli právě za pomoci tenkých plechů. Tyto plechy jsou řezány do požadovaného tvaru

pomocí ocelových razníků a matric. V počátcích byly běžně používané tenké plechy o tloušťce 0,63 – 0,75mm. Pro velké motory to byly plechy o tloušťce 0,35mm. Také bylo zjištěno, že přidáním 1 – 3% křemíku do oceli se zvýší odpor a sníží ztráty. [1]

1.2.4 Izolace

Vývoj v oblasti izolačních materiálů, od organických vláken a šelaku až po syntetické vysokoteplotní pryskyřice a skelná vlákna, hrál důležitou roli ve vývoji indukčních motorů. Prvním krokem vývoje bylo nahrazení smaltové izolace vinutí bavlněnou či papírovou. To ušetřilo prostor a snížilo teplotní rozdíl mezi vinutím a stěnou drážky. Druhým krokem byl vývoj nových, lepších anorganických izolačních materiálů s mnohem vyšší teplotní odolností. Třetím krokem bylo ustanovení zkušebních postupů dle IEEE. To zajišťovalo funkční hodnocení a klasifikaci izolačních systémů v souladu s jejich teplotními limity až do 180°C nikoli dle chemického složení materiálů.

Všechny motorové komponenty s izolací takto byly zlepšeny v oblasti dielektrické pevnosti, absorpce vlhkosti, teplotní odolnosti a pevnosti lepeného spoje. Výsledkem toho pak bylo, že původní formované vinuté cívky v otevřených drážkách se nahradily nahodilými vinutími v polouzavřených drážkách. To snížilo magnetizační proud, zlepšilo účinník a snížilo náklady. [1]

1.2.5 Konstrukční prvky

Počáteční, dalo by se říci, až prapůvodní motory měly kluzná ložiska ukotvená v ložiskových domcích mimo samotný motor. Byl to ještě pozůstatek po parních strojích s dlouhými hřídelemi a řemeny. Takovéto motory mohly být použity pouze v interiéru, suchém prostředí a vodorovném uložení. Zároveň byly nebezpečné díky exponovaným elektrickým částem. Brzy na to však byly přijaty boční podpěry s kluznými ložisky a ventilací. To přispělo k bezpečnosti a širšímu spektru uplatnění motoru. Zcela uzavřené motory s chlazením pomocí ventilátorů umožnily venkovní použití.

Jako rám motorů začala být používána šedá litina konkrétně pro středně velké rámy motorů. Její výhodou je snadné odlévání tvarů, odvod tepla, nízké náklady a rozměrové stálosti. Oproti tomu se pro malé motory začaly používat lisované ocelové rámy s hliníkovými bočními kryty. Pro velké motory to zase byly rámy z obrobené oceli. [1]

1.2.6 Zvýšený výkon

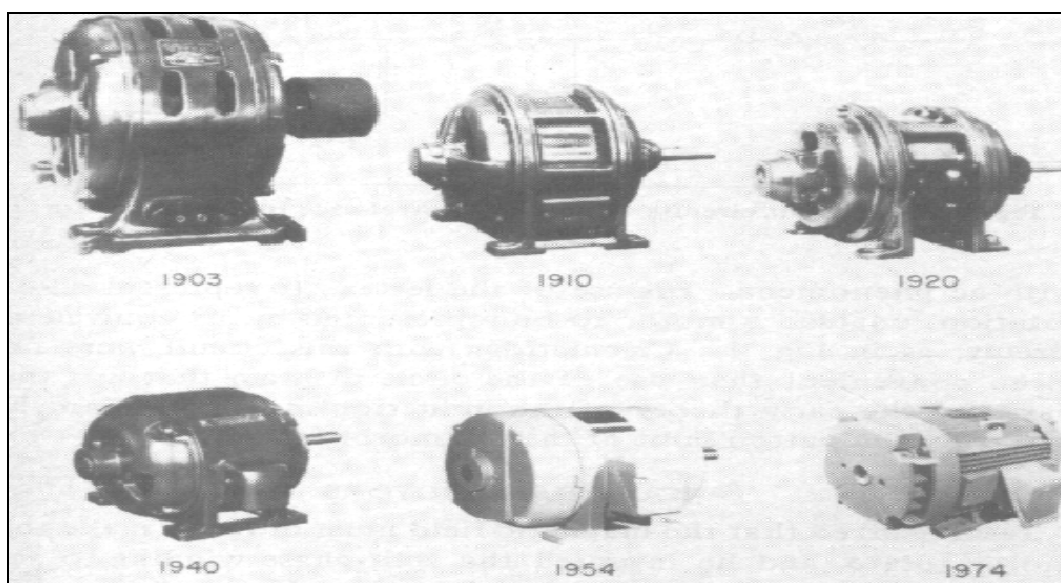
V důsledku výše zmíněného zlepšení izolace, magnetického obvodu a konstrukčních dovedností dokázali konstruktéři vložit větší množství mědi do určené drážky. Teplotní rozdíl mezi mědí a stěnou drážky byl značně snížen. Tak bylo umožněno zvýšit výkon motoru pro daný typ rámu. Dále se optimalizovala konstrukce. Drážky byly vyráběny užší, zuby širší což umožňovalo zvýšení magnetického toku. K zabránění horkých míst v centru dlouhých jader byly vytvořeny radiální kanály s distančními lopatkami fungující jako ventilátor. Ten nasává vzduch skrze axiální otvory v rotoru. Takto se tedy bok po boku docílovalo značného zvýšení výkonů při stále se zdokonalující důmyslné konstrukci. [1]

Jako příklad uvedu vývoj 3f asynchronního motoru s klecovou kotvou o určité velikosti. Jak je vidět z *Tab. 1.2* výkon tohoto motoru byl postupně zvyšován ze 7,5 HP roku 1897, přes 30 HP v roce 1930 až po 100 HP dosaženého roku 1976. *Obr. 1.7* znázorňuje, jakou vizuální přeměnou tento motor prošel. [1]

Tab. 1.2 Růst výkonu 3f indukčního motoru v období 1897-1976.

Období	1897-1903	1903-1905	1905-1914	1914-1924	1924-1929	1929-1940	1940-1956	1956-1961	1961-1966	1966-1976
HP	7,5	10	15	20	25	30	40	50	60	100

Zdroj dat:[1]



Obr. 1.7 Postupná vizuální přeměna indukčního motoru
Zdroj: [1]

1.3 Historické využití asynchronních motorů v trakci

Asynchronní motor byl od svého vynálezu na konci 19. století chápán především jako motor s konstantní rychlostí tj. pevný a neřiditelný. Lidé v této době nepočítali s jeho využitím v regulačních pohonech. Problém spočíval v tom, že vhodně regulovat pohon je možné jen změnou napájecí frekvence se současnou změnou napětí. Tento problém byl odstraněn až rozvojem polovodičových součástek a na to navazujícím vývojem polovodičových měničů v druhé polovině 20. století. Proto do této doby byly v trakci dominantní stroje stejnosměrné, které měly dobré regulační vlastnosti.

Nedá se však říci, že by se asynchronní motory v trakci až do doby vývoje polovodičových měničů přehlížely. Asynchronní motory s vinutou kotvou se v trakci nepoužívají. Za to objev motoru s klecovou kotvou vyvolal ihned snahy o využití tohoto jednoduchého, robustního motoru.

Před nástupem elektronického věku tedy asynchronní motory pracovaly s rychlostí danou frekvencí sítě nebo změnou pól párů. Ano to nebylo dostatečné k jejich všeobecnému využití na železnici, avšak mělo to i některé výhody. I konstantní pracovní rychlost byla v určitých ohledech potřeba. Např. nákladním vlakům jezdících v horských oblastech pomáhal střídavý motor udržet konstantní rychlost při sjíždění z kopce. Majoritní to bylo u těžké nákladní dopravy, vlaků přepravujících nerostné suroviny. Zastáncem $3f$ železnice s $3f$ trakčními motory byl i navzdory potřebě dvoustopého trakčního vedení Brown. Různé studie mu ukázaly další výhody asynchronního motoru před stejnosměrným. Odpadl komutátor a jeho potřebná údržba, bylo umožněno rekuperační brzdění (zajištěné jízdou z kopce) s následným využitím vzniklé elektrické energie a také hmotnost byla nižší. Nicméně je třeba poznamenat, že se jednalo o systém vyvinutý v horských oblastech a byl aplikován na železnicích vyskytujících se v obtížném terénu. [5]

První železnice používající $3f$ napájení a asynchronní motory byla na tramvajové lince v Lugarno roku 1896. Zde Brown aplikoval systém napájení s 40 Hz. V roce 1897 byla elektrifikována úzko rozchodná železnice vedoucí do pohoří Gornergrat. Ovšem první $3f$ železnice s normálním rozchodem kolejí byla elektrifikována v roce 1899 v Burgdorf – Thun. Tato železnice byla ideální pro $3f$ systém. Byla dlouhá 45km s určitým profilem stoupání. Jezdily po ní vlaky těžké 100 t, rychlostí 32 km/h. Elektrifikace měla parametry 750V, 40 Hz.

Původní lokomotivy měly dva motory o stejném výkonu 112 kW, které řídily čtyři kola pomocí ozubených kol propojených s hřídelí. V roce 1910 – 1918 k nim byly připojeny další výkonové jednotky vybaveny dvěma asynchronními motory o výkonu 194 kW, které poháněly 220 tunové nákladní vlaky rychlostí 14-42 km/h a 120 tunové osobní vlaky. [5]

Brown také nabídl elektrifikaci (3000V AC, 16 Hz) 23 km dlouhého tunelu v Simplonu (Švýcarsko - Alpy) otevřeného roku 1906. Lokomotivy vybavené asynchronními motory měly jen dvě rychlosti (dosaženo změnou pól párů) i přesto však byly úspěšné. Roku 1908 již měly lokomotivy čtyři provozní rychlosti. Tento $3f$ systém zde vydržel, až do roku 1930 kdy byl přeměněn na $1f$. [5]

Vývoj a pokusy využití asynchronních motorů v traci takto probíhaly po celé Evropě a USA. Nástupem $1f$ střídavé soustavy se ustoupilo od systému kde, byly potřeba dvě troleje a objevil se systém, který pomocí převodníku rozdělil tento $1f$ přenos tak aby mohl být napájen $3f$ asynchronní motor. Také přes pokračující mnohdy důmyslné snahy jak ovlivnit rychlost těchto motorů (různé kaskády, propojování atd.) se jejich využití nedaří všeobecněji prosadit. Důvodem je jejich stále nedostatečná možnost řízení. Zlom tedy nastává skutečně až nástupem polovodičových měničů a jejich postupným vývojem. V 80. letech 20. století již bylo možno asynchronní motory efektivně řídit a tak dochází k převratu na poli trakce. Stejnoseměrné motory se stahují do pozadí a nahrazují je konstrukčně jednodušší asynchronní pohony. Ty se začínají objevovat v tramvajích, trolejbusích na železnici a je naplno využíváno jejich předností. [5]

2 Asynchronní stroje

Jak je zřejmé z předchozí kapitoly, asynchronní (indukční) stroje si postupem času vydobily výsadní postavení mezi elektrickými stroji. V největší míře se vyskytují jako motory. Asynchronní generátory se používají minimálně. Rozsah výkonů je od jednotek W až po cca 10 MW (vysokonapěťové) respektive 50MW (speciální vysokonapěťové motory). Nalezneme je v celé řadě odvětví. Převážně v průmyslu zde jsou nejvíce zastoupeny, pak také v trakci a např. v domácnostech.

2.1 Obecný princip činnosti, skluz

Obecný princip činnosti asynchronního stroje se od jeho vynálezu Nikolou Teslou nikterak nezměnil. K vzniku točivého magnetického pole statoru využíváme stojící $3f$ statorové vinutí vůči sobě prostorově posunuté o 120° . To je napájeno $3f$ elektrickým proudem vzájemně časově posunutým o 120° . Rotorové vinutí je spojeno nakrátko a je ovlivňováno vzniklým točivým polem statoru. V rotoru se indukují napětí a potečou proudy. Následným vzájemným silovým působením točivého pole a rotorovými proudy je vyvozen moment. Vyvolaný vnitřní elektromagnetický moment otáčí rotorem ve směru točení pole statoru. *Stroj pracuje jako motor*, přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. Pokud tato mechanická energie na hřídeli není odebírána, rychlost rotoru se velmi přiblíží synchronní rychlosti pole. Vlivem ztrát se však nemůže samovolně stát, aby se tyto rychlosti vyrovnaly a zapříčinily tím vznik nulového momentu. Odtud vzešel i název pro popisovaný stroj tj. asynchronní. Dosažení synchronní rychlosti rotoru může nastat, jen přivedením vnějšího mechanického momentu. Nadsynchronní rychlosti rotoru dosáhneme zvyšováním přiváděného vnějšího momentu. Z rotoru se v té chvíli začnou indukovat napětí do statoru a do sítě je dodáván činný výkon. *Stroj pracuje jako generátor*, mění mechanickou energii na elektrickou. [6]

Veličina popisující asynchronní stroj je *skluz*. Lze ho také nazvat jako mírou asynchronizmu. Udává rozdíl mezi úhlovými rychlostmi obou polí a je vyjádřen následujícím vztahem:

$$s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1 = (n_s - n) / n_s [-] \quad (2.1)$$

kde s – skluz [-],
 ω_1 – synchronní úhlová rychlost statoru [rad/s],
 ω – úhlová rychlost rotoru [rad/s],
 n_s – synchronní otáčky točivého magnetického pole [ot/min],
 n – otáčky rotoru [ot/min].

Podívejme se na oblasti skluzu. Po připojení stroje na síť je hodnota skluzu 1. Pokud se stroj dostane do synchronních otáček, bude skluz 0. Jmenovitému zatížení odpovídá hodnota skluzu 0,03 - 0,1. Jako motor stroj pracuje v oblasti mezi 0 - 1. Pro stroj v nadsynchronních otáčkách rotoru (generátor) je skluz menší než 0 a při reverzaci je pro změnu hodnota skluzu 1 - 2. Díky skluzu je také možné vyjádřit frekvenci napětí indukovaného v rotoru:

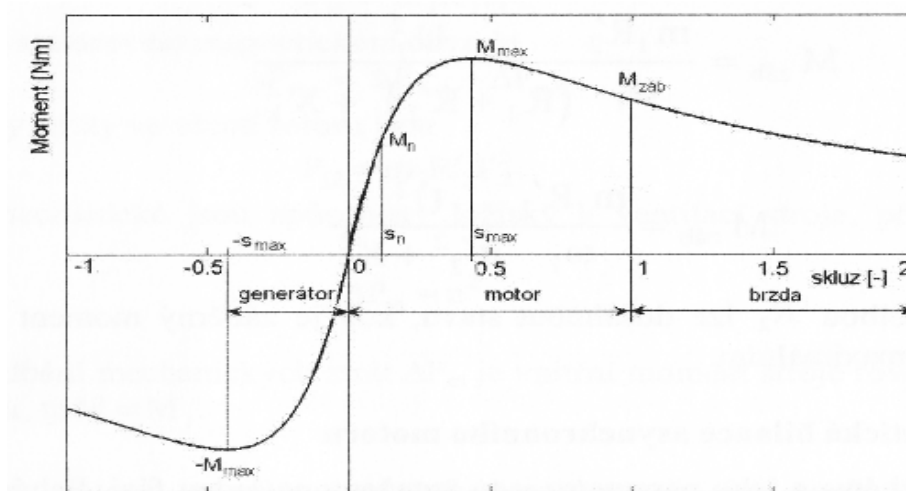
$$f_2 = f_1 \cdot s \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

kde f_2 – kmitočet napětí v rotoru [Hz],
 f_1 – napájecí kmitočet [Hz].

Z toho je zřejmé, že při malé hodnotě skluzu bude nízký i kmitočet napětí v rotoru. [4] [6] [7]

2.2 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika je závislostí momentu motoru na skluzu případně mechanických otáčkách rotoru. Její pomocí lze znázornit provozní stavy asynchronního stroje. Obecný průběh momentové charakteristiky je zobrazen na *Obr. 2.1*.



Obr. 2.1 Obecný průběh momentové charakteristiky
 Zdroj: [4]

Oblasti skluzu byly již definovány v kapitole 2.1, proto je nyní nebudu opakovat. Zmíním se, ale o dalších důležitých bodech z charakteristiky $M_{max.}$, $M_{záb.}$ a M_n . $M_{max.}$ neboli maximální moment nazýván také jako moment zvratu, je limitován rozptylovou reaktancí. Z konstrukčních důvodů ji nelze libovolně měnit (omezuje záběrný proud). Záběrný moment $M_{záb.}$ je při skluzu rovno 1. Motor se v tomto momentu nachází ve stavu nakrátko, to znamená, že mechanické otáčky rotoru jsou nulové a motor vytváří moment. Jmenovitý moment M_n odpovídá skluzu s_n . Tato hodnota následně definuje krátkodobou momentovou přetížitelnost motoru. Pracovní bod asynchronního motoru se v ustálených pracovních režimech musí pohybovat ve stabilní oblasti. Ta odpovídá skluzu v rozmezích $+s_{max.}$ až $-s_{max.}$ Mimo tuto oblast se může vyskytovat jen během krátkodobých přechodných jevů např. při rozběhu. U běžných asynchronních motorů se obvykle hodnota momentové přetížitelnosti pohybuje okolo hodnoty 2. [4] [6]

2.3 Konstrukce asynchronního stroje

Při konstrukci stroje je nutné vždy vědět, pro jakou aplikaci je vyráběn a jakému vnějšímu prostředí bude vystaven. S ohledem na tyto poznatky je pak pro stroj nutné volit správné stupně ochrany, správné tvary, chlazení apod. Na štítku stroje kromě základních parametrů jako je jmenovitý výkon (pro asynchronní stroje W), napětí, proud, otáčky, výrobce atd. nalezneme ještě kódy IP, IM a IC. Kód IP vyjadřuje stupeň krytí stroje před vniknutím cizích předmětů a zároveň ochranu proti vodě. Kód IM znamená konstrukční uspořádání stroje z hlediska jeho upevnění, uložení rotoru a polohy. Poslední kód IC označuje chlazení strojů. Při svém studiu jsem se také setkal s otázkou správného určení přední strany stroje. Přední strana stroje je tedy ta kde se nachází komutátor nebo kroužky. Zadní strana je ta opačná. Pokud se, ale jedná o asynchronní stroj s kotvou nakrátko, který nemá ani komutátor, ani kroužky je zadní strana ta část, kde je vyveden hřídel.

2.3.1 Stator

Jedná se o nepohyblivou část stroje. Konstrukčně je shodný pro oba typy asynchronního motoru tj. motor s klecovou kotvou i s vinutou kotvou. Vinutí statoru bývá obvykle $3f$ ($1f$, $2f$). Jeho začátky a konce jsou vyvedeny na svorkovnici. Statorový svazek dále tvoří magnetický obvod. Ten je složený z navzájem izolovaných listěných plechů tl. 0,3 – 0,5mm (důvod omezení vířivých proudů). Již zmíněné statorové vinutí je uloženo v drážkách magnetického obvodu statoru většinou jako dvouvrstvé spojené v čelech. Statorový svazek je

zalisován v litinové kostře, která dává motoru vnější tvar a umožňuje jeho připevnění k základu. [6] [7]

2.3.2 Rotor

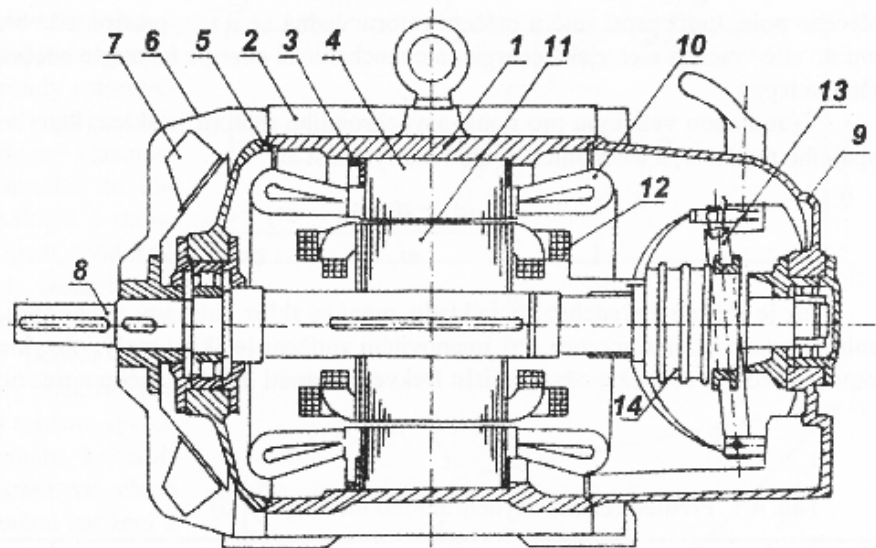
Rotor je uložen v dutině statoru. Odděleny jsou od sebe vzduchovou mezerou, která závisí na výkonu stroje a bývá od 0,2 mm do 2 mm. Snahou je, aby vzduchová mezeza byla co nejmenší. Důvodem je snížení magnetického odporu mezi rotorem a státorem, čímž se zlepší účinek. Magnetický obvod nemá vyniklé póly je stejně jako stator složen z listěných plechů s drážkami. Drážky jsou rozloženy po vnějším obvodu rotoru. Středem rotoru prochází hřídel. U menších strojů je rotor na hřídel přímo nalisován. Dle provedení rotorového vinutí dělíme asynchronní motory na dva základní typy. [6] [7]

Kotva vinutá – již dle popsané historie je zřejmé, že tato varianta není tak úspěšná jako klecová kotva. $3f$ rotorové vinutí je uspořádané v drážkách podobně jako je tomu u statoru. Vinutí je na jednom konci nejčastěji zapojeno do hvězdy a na druhé straně připojeno ke sběrným kroužkům, na které přiléhají uhlíkové kartáče. Takovéto vinutí umožňuje připojit spouštěcí odpor, kterým se omezuje záběrný proud a dosahuje se lepších spouštěcích charakteristik motoru. Po rozběhu je spouštěcí odpor odpojen, případně se mohou spojit kroužky nakrátko a odklopit kartáče. To z důvodu opotřebení. [6] [8]

Klecová kotva nakrátko – jednoznačně nejpoužívanější typ asynchronního motoru. Především pro svou jednoduchost atd. $3f$ vinutí nahrazeno vinutím, které tvoří tyče, uložené v drážkách na koncích spojených dvěma vodivými kruhy nakrátko. Takovéto vinutí bývá odstříknuto z hliníku případně i z mědi a bronzu. [8]

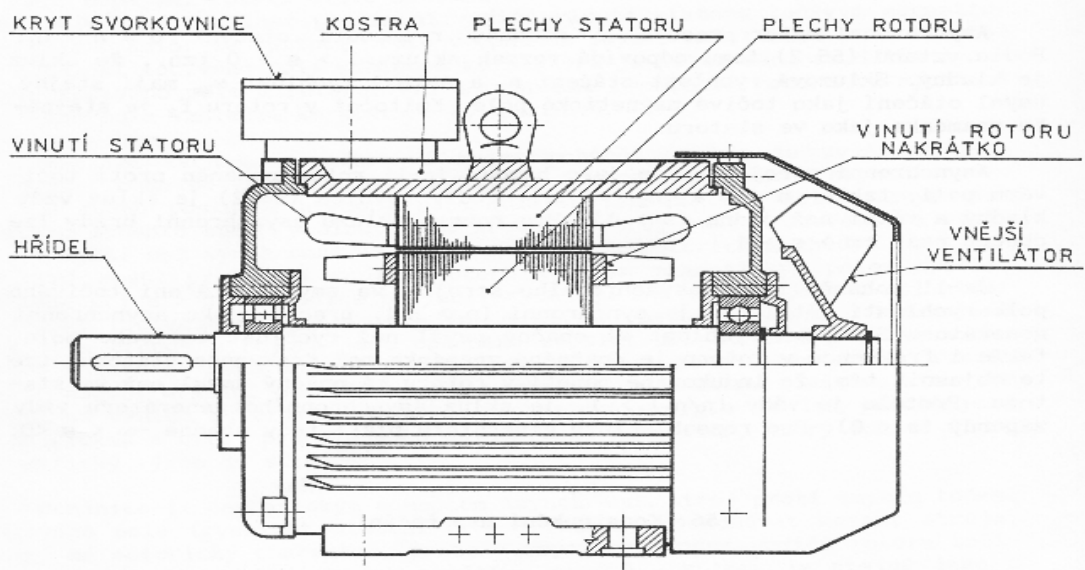
Konstrukční řešení motoru s kotvou vinutou

- 1- kostra
- 2- žebra
- 3- zajišťovací péra
- 4- statorový mag. obvod
- 5- ložiskový štít
- 6- kryt větráku
- 7- větrák
- 8- hřídel
- 9- ložiskový štít
- 10- statorové vinutí
- 11- rotorový mag. obvod,
- 12- rotorové vinutí
- 13- zkratovač kroužků
- 14- kroužky



Obr. 2.2 Konstrukční řešení motoru s kotvou vinutou

Zdroj: [6]



Obr. 2.3 Konstrukční řešení motoru s kotvou nakrátko

Zdroj: [8]

3 Rozdělení asynchronních strojů

V současné době se vyrábí nepřehledné množství asynchronních strojů. Setkat se s nimi proto můžeme v celé řadě aplikací. Od pohonů čerpadel, ventilátorů, důlních strojů, pásových dopravníků, jeřábů, výtahů atd. Nástupem polovodičových měničů se oblast použití ještě rozšířila o pohony s regulací otáček. Na trhu je dostupná celá škála asynchronních motorů, různých provedení a výkonů. Na objednávku jsou také výrobci schopni vyrobit motor přesně na míru.

Základní dělení asynchronních strojů lze provést dle několika hledisek:

1) Dle způsobu práce:

- *Motor* – nejčastější použití
- *Generátor* – výjimečně – malé vodní či větrné elektrárny

2) Dle uspořádání statorového vinutí:

- *1f (také v provedení se stíněným pólem – na statoru vyniklé póly)*
- *2f*
- *3f*

3) Dle provedení rotorového vinutí:

- *Vinutá kotva*
- *Klecová kotva - typy - 1) jednoduchá (klecové vinutí odstříknuté z hliníku)*
 - 2) odporová (jednoduchá se zvýšeným odporem)*
 - 3) dvojitá (dvě klece nad sebou, horní má větší odpor)*
 - 4) vírová (úzké vysoké tyče klece)*

3.1 Asynchronní motory používané v domácnosti

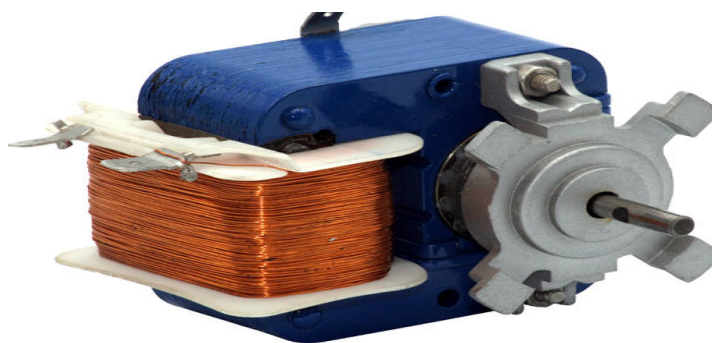
Pro motory v domácnostech se využívají především 1f asynchronní motory s kotvou nakrátko. Přibližně do výkonu 500W. Použití hledejme např. u praček, chladniček a ventilátorů. 1f asynchronní motory mají ten problém, že se nemohou samy rozběhnout. Na statoru je obvykle 1f vinutí, jenž vyplňuje 2/3 statorových drážek. Po přivedení napětí na 1f vinutí vzniknou ve statorovém a rotorovém vinutí magnetické toky opačného smyslu. Ty

vytvoří střídavé pulzující pole. Tzv. Leblancův teorém – nevzniká moment. Rozběh tedy zajistíme buď vytvořením točivého magnetického pole statoru, nebo mechanicky. Použijeme rozběhovou pomocnou fázi. Její vinutí bude uloženo ve zbývající volné 1/3 statorových drážek. Nutný fázový posuv získáme buď připojením kondenzátoru do série s vinutím pomocné fáze, nebo zvětšením odporu pomocné fáze. [8]

If motory s kondenzátorem v pomocné fázi. Kondenzátor zapojený jen při rozběhu-Tzv. těžší rozběh. Používá se elektrolytického kondenzátoru řádově 60-100 μF pro motory 500W. Tento kondenzátor však nesnese trvalé připojení na AC. Důvodem je jeho tenké dielektrikum a dielektrické ztráty jsou přibližně 10x větší než u kondenzátorů s papírovou izolací. Tento rozběh se uplatňuje u zařízení s těžkým rozběhem např. kompresorové lednice, čerpadla. *Motor s trvale zapojeným kondenzátorem*-Tzv. lehčí rozběh. Používá se kondenzátor s papírovou izolací. Motor má menší záběrný moment. Využití u rozběhů s nižší zátěží. Výhodou klidnější chod a lepší účinnost. [8]

If motory s odporovou pomocnou fází. K vinutí pomocné fáze zapojíme do série odpor. Další možností je vinutí pomocné fáze navinout z mosazi nebo odporového drátu. Po rozběhu se pomocná fáze odpojí. Nevýhodou horší účinnost motoru. Používá se u zařízení s lehkým rozběhem tj. ventilátory, odstředivá čerpadla apod. [8]

If motor se stíněným pólem. Tento motor má na statoru vyniklé póly a pro rozběh využívá pomocné závity nakrátko obepínající části pólů. Záběrný moment a účinnost tohoto motoru je malá. Používá se např. pro pohon vysoušeče vlasů, gramofonů, malých ventilátorů a pohonů s výkonem nejvýše několika desítek W. Výhodou jednoduchost, nízká cena a tichý chod. [8] Na ukázkou na Obr.3.1 motor se stíněným pólem. Výkon 14-38W. 230V/50Hz.



Obr. 3.1 If motor se stíněným pólem A24N
Zdroj: [12]

3.2 Asynchronní motory používané v průmyslu

Asynchronní motory jsou nejvíce využívány právě v průmyslu. Patří sem především 3f asynchronní motor s klecovou kotvou a nachází zde uplatnění i 3f asynchronní motor s vinutou kotvou (vysokonapěťové). Motory pro průmysl můžeme rozdělit následovně. Jako první zde najdeme skupinu *nízkonapěťových motorů pro všeobecné použití*. Tu tvoří motory s klecovou kotvou a výkony se mohou lišit dle provedení kostry. Např. s hliníkovou kastrou výkony 0,75 (0,18) – 22 (13,5) kW a litinovou kastrou 0,75 – 200kW. Určeny jsou k pohonu čerpadel, ventilátorů, obráběcích strojů apod. Další skupinu tvoří *motory pro těžké provozy*. Tyto motory mají odolnou skříň odlitou ze šedé litiny a jmenovité výkony se pohybují kolem 375 kW. Následující skupinu můžeme označit jako *motory nadstandardní nebo jednorúčelové*. Sem řadíme pohony s výkony až do 1250 kW. Jejich použití je např. v papírenském a polygrafickém průmyslu, při těžbě surovin, jeřábových pohonů, ventilátorů při větrání tunelů apod. Dále se můžeme setkat i s *vysokonapěťovými motory*. Sem kromě motoru s klecovou kotvou můžeme zařadit i motor s vinutou kotvou. Výkony se zde pohybují až do 10 MW a používají se např. pro pohon dopravníkových pásů a ve speciálních aplikacích. Pro ukázkou na *Obr. 3.2* uvádím 3f asynchronní, vysokonapěťový motor, s kroužkovou kotvou. Jeho výkon 5 MW.



Obr. 3.2 3f vysokonapěťový asynchronní motor s kroužkovou kotvou
Zdroj: [13]

3.3 Asynchronní motory používané v trakci

V trakci se výhradně používají 3f asynchronní motory s klecovou kotvou, napájené z měničů proměnným napětím a kmitočtem. Je to díky jednoduché stavbě tohoto typu motoru, kde kromě ložisek není žádné mechanické propojení statoru s rotorem. Promazávání ložisek, se navíc provádí v dlouhých intervalech (500000 – 1000000km). Díky tomu má motor dlouhou životnost a má přednost i v praktické bezúdržbovosti. Asynchronní motor nástupem elektronického věku v druhé polovině 20. století, vytlačil z trakce do té doby dominantní stejnosměrné stroje. Dnes proto již nalezneme asynchronní trakční motory v lokomotivách, tramvajích, trolejbusích, metru atd. Samozřejmě již také je, využívání rekuperace, neboli generátorického brzdění. To výrazně snižuje energetickou náročnost. [9] Následně uvádím pár příkladů s parametry.

Tramvaj Elektra 13 T speciálně určená pro Brno. Výkon asynchronních trakčních motorů 540 kW. Trolejové napětí 600 V DC. Maximální rychlost 70 km/h. Možnost rekuperace. [10]



Obr. 3.3 Tramvaj Elektra 13 T
Zdroj: [10]

Lokomotiva Škoda 109 E určená pro vozbu vlaků nejvyšší priority. Výkon čtyř asynchronních trakčních motorů s vinutím do dvojité hvězdy 6400 kW. Trolej 3kV DC. Maximální rychlost 200 km/h. [11]



Obr. 3.4 Lokomotiva 109 E ČD
Zdroj: [11]

4 Ukázky použití asynchronních strojů v praxi

4.1 Domácnost

Když jsem přemýšlel nad tím jakou zvolit ukázkou použití asynchronního motoru v domácnosti, napadl mě bláznivý nápad. Jaký asi bude motorek v tačkově retro cívkovém magnetofonu Tesla B400? Netrvalo dlouho a již jsem odmontovával kryt. Nemýlil jsem se, řekl bych trefa do černého. Výsledek? Viz. Obr. 4. 1 a 4.2 - 1f asynchronní motorek, z pohledu patrné, že má vnější rotor s hřídelkou ve svislé poloze. Výkon 3W.



Obr. 4.1 Magnetofon Tesla B400
Zdroj: [archiv autora]



Obr. 4.2 Motorek v magnetofonu Tesla B400
Zdroj: [archiv autora]

4.2 Trakce

Jako ukázkou současného využití asynchronního motoru v trakci jsem si vybral Vídeňský elektrobus. Jedná se o první, plně elektrický autobus zavedený v Evropě. Na rozdíl od ostatních elektrobusů, tyto elektřinou i topí. Jsou zcela bezemisní. Charakterizovat ho lze jako trolejbus, který nepotřebuje troleje. Na co tedy jezdí? Tak říkájíc „na tramvaj“. Závislost dobíjení akumulátorů při jejich krátké výdrži, proměnili konstruktéři na výhodu v tom smyslu, že využili jejich pravidelných zastávek na konečné stanici. Zde je autobus před opětovným vyjetím, krátkodobě intenzivně dobíjen. Dobíjení probíhá energií z DC napájecí soustavy 650 V z nedaleké tramvajové tratě (získanou převážně rekuperací tramvajů). Kabelem uloženým v zemi je tato energie přiváděna do přibližně 20 m dlouhých, „trolejbusových“ trolejí. Dobíjení zde probíhá kolem 10 minut po 8 až 15 km jízdy. K dotankování během jízdy se také využívá pohon Siemens Elfa. Při brzdění funguje jako generátor. Energie získaná zpomalením vozidla se tak zpětně využívá. Úspory jsou tak až o čtvrtinu nižší než u vozidel se spalovacím motorem. I přes vyšší pořizovací náklady se investice časem vrátí. [14]

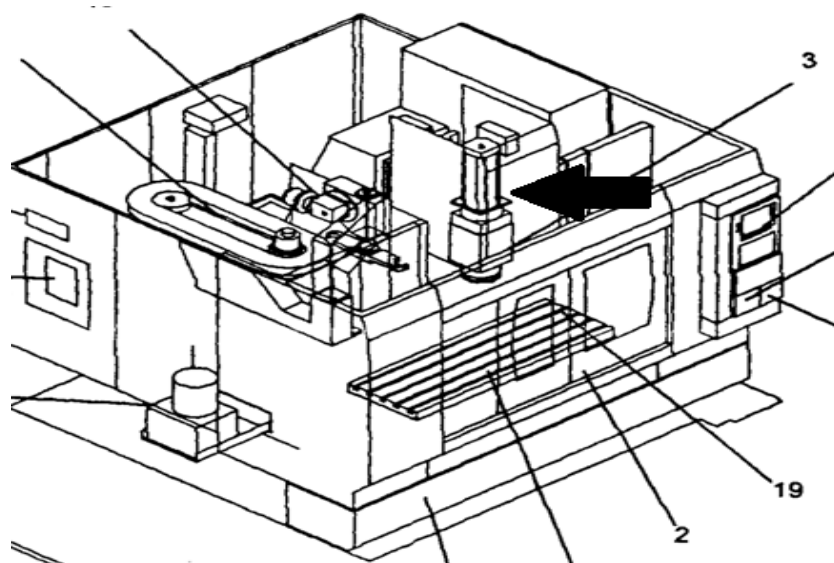
Technické údaje: motor 3f asynchronní s kotvou nakrátko, vodou chlazený, Siemens Elfa 85/150 kW. Max. rychlost 62 km/h, umístění baterií – 3x na střeše, 1x nádrž a 5x místo spalovacího motoru. Elektrovýzbroj dvoupólový sběrač. Obsaditelnost 40 cestujících. [14]



Obr. 4.3 Vídeňský elektrobus
Zdroj: [14]

4.3 Průmysl

Pro ukázkou asynchronních strojů v oblasti průmyslu jsem získal obrázky od kamaráda, který byl servisním technikem CNC strojů. Na *Obr. 4.4* je znázorněno obráběcí centrum. Šipka v tomto *Obr. 4.4* ukazuje na umístění motoru, který samotný je vidět na *Obr. 4.5*. Tento motor je 3f, asynchronní s kotvou nakrátko. Jeho max. rychlost je 12000 ot./min. při výkonu 7,5 kW. Hmotnost motoru 75 kg, krytí IP 44. Tento motor pohání vřeteno obráběcího stroje.



Obr. 4.4 Obráběcí centrum
Zdroj: [archiv autora]



Obr. 4.5 Motor z obráběcího centra
Zdroj: [archiv autora]

5 Předpokládaný vývoj asynchronních strojů

Asynchronní stroje prochází postupným vývojem od samého počátku. Nejinak je tomu i dnes. Dalo by se však říci, že tento vývoj probíhá za „zavřenými vratky“. Tím mám na mysli, že si firmy zabývající se danou problematikou, pečlivě střeží své nápady. My takto můžeme jen diskutovat a domýšlet se, čím novým nás ještě konstruktéři překvapí.

Nesporné možnosti budoucího využití v sobě skrývá supravodivost. Tato pozoruhodná vlastnost pevných látek byla objevena již na začátku 20. století. Trvalo však velmi dlouho, než se začala využívat v praxi. Dnes se již vyrábí tisíce tun supravodivého materiálu, ale svůj vrchol má zatím stále před sebou. Většina z tohoto materiálu jsou totiž tzv. nízkoteplotní supravodiče a ty jsou značně nákladné. S vývojem výhodnějších vysokoteplotních supravodičů se začalo teprve nedávno. K pochopení supravodivosti uvedu ještě pár řádek. Představme si elektrický vodič. Je známo, že bude-li jím procházet proud, vznikne teplo. To je tím větší čím, vyšší proud jím prochází. Tomu odpovídá také větší měrný odpor vodiče. Běžně používané vodiče např. měď, hliník mají měrný odpor nízký a používají se proto pro rozvod energie. Přestože je jejich měrný odpor nízký, stále na nich dochází ke ztrátám ve formě tepla (až 25%). To je nežádoucí, proto by bylo vhodné objevit materiál s nepatrným nebo nulovým měrným odporem. Takovým materiálem může být právě supravodič. Proto se mi hned do hlavy vkrádá myšlenka využití supravodičů, ve vinutí asynchronních strojů. Existuje již zmíněný supravodič s nulovým měrným odporem? Dosud známé materiály vykazující supravodivé vlastnosti, se do supravodivého stavu dostávají jen při teplotách, hluboko pod pokojovou teplotou. Při postupném ochlazování daný materiál tedy ztrácí měrný odpor. Prochází kritickou teplotou a pod ní je již supravodivý. Zřejmou nevýhodou využití takovýchto supravodičů je tedy jejich nutné ochlazování a tím zvýšené náklady. Proto jsou vkládány velké naděje do tzv. vysokoteplotních supravodičů (velmi křehkých keramických materiálů). Je ale, zřejmé, že jejich vývoj nebude tak jednoduchý. Mají tu nevýhodu, že oproti klasickým snadno tvárným supravodičům jsou tyto velmi křehké a technologie výroby vodičů z nich je velmi náročná. V současnosti se již vyskytují cesty jak obejít tyto křehké materiály. Např. válcováním polykrystalického materiálu ve stříbrné matici, napařováním a chemickým procesem. Nějaké cívky takto vyrobené se již zkoušejí, ale cesta k jejich ekonomickému využití v praxi je ještě dlouhá. [15]

Zkusme se dále zaměřit na to, jaké jsou nyní hlavní požadavky na výrobu strojů? Bezesporu je to např. maximální účinnost (ta úzce souvisí s výkonem) stroje, životnost, požadavek na minimální hmotnost (u strojů menších výkonů) a také neopomenutelný faktor, kterým je cena. Nelze také zapomenout na design stroje, jenž jde ruku v ruce s jeho funkčností. Předpokládaný vývoj se tedy bude ubírat těmito směry. Budou zkoumány nové materiály s lepšími vlastnostmi, budou probíhat pokusy o dokonalejší konstrukci a nechme se tedy překvapit, s jakými stroji se za pár let setkáme.

Závěr

V první kapitole této práce jsem se věnoval vývoji asynchronních strojů. Tento vývoj je zářným důkazem všeobecného technického pokroku, kterého jsme svědky. Po vynálezu asynchronního motoru Nikolou Teslou byly ihned studovány všechny jejich podstatné vlastnosti. O tyto studie se následně opírali všichni konstruktéři. Proto již roku 1976 byl na světě motor, který měl více jak desetkrát vyšší výkon, než stejný typ motoru z roku 1897. Zajímavou částí této kapitoly je také snaha o využití asynchronních motorů v trakci, ještě před nástupem elektronického věku.

Druhá kapitola nás ve zkratce seznámila s asynchronním strojem. Od principu, znázornění jeho pracovních oblastí až po jeho konstrukční řešení.

Třetí část se zabývala rozdělením asynchronních strojů. Ty jsou však tak rozšířené, existují v tolika různých provedeních, že není reálné se o všech zmínit.

Ve čtvrté kapitole jsem tak říkajíc pustil uzdu fantazii. Především co se týká rozebrání taťkova retro magnetofonu. Nutno podotknout, že se mi povedlo najít to, v co jsem doufal.

V páté kapitole jsem se zabýval možným budoucím vývojem asynchronních strojů. Je zřejmé, že jak se mění vše kolem, nás budou se vyvíjet i asynchronní stroje. Bude zajímavé sledovat, zdali se podaří využít supravodivých materiálů. Těším se také na vývoj designu stroje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ALGER, P.L. a R.E. ARNOLD. The history of induction motors in America. *Proceedings of the IEEE* [online]. 1976, vol. 64, issue 9, s. 1380-1383. Datum aktualizace 28.6.2005 [cit. 2013-04-24]. DOI: 10.1109/PROC.1976.10329. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1454598>
- [2] *Tesla – pán blesků* [Tesla – Master of Lightning] [dokumentární film]. Produkce a režie Robert UTH, výkonná produkce Phylis GELLER. USA, 2000. V digitalizované podobě dostupný prostřednictvím YouTube z: <http://www.youtube.com/watch?v=5agJU1xdIcM>
- [3] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 427 s. ISBN 80-723-2219-2.
- [4] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [5] DUFFY, M.C. Three-phase motor in railway traction. *Science, Measurement and Technology, IEEE Proceedings A* [online]. 1992, vol. 139, issue 6, s. 329-337. Datum aktualizace 13.2.2006 [cit. 2013-06-20]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356&queryText%3DThree-phase+motor+in+railway+traction>
- [6] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [7] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [8] MĚŘIČKA, Jiří, HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Vyd. 2, dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.
- [9] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce. II., Vozidla s asynchronním trakčním motorem*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. 113 s. ISBN 978-80-7043-813-8.
- [10] Elektra 13 T., *ŠKODA TRANSPORTATION* [online]. [cit. 2013-06-22]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/tramvaj-13-t/Contents.3/0/A25B637232DC25D734A6AEA22AEA58D7/resource.pdf>
- [11] 109 E ČD., *ŠKODA TRANSPORTATION* [online]. [cit. 2013-06-22]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/elektricke-lokomotivy/lokomotiva-109-e-cd/Contents.3/0/B10E057B9100E2E50F601E9C0B2AC728/resource.pdf>
- [12] Jednofázové asynchronní elektromotory: A24N. *ATAS elektromotory Náchod a.s.* [online]. 2013 [cit. 2013-06-23]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=13&lng=cz>
- [13] Vysokonapětové třífázové motory s kroužkovým rotorem: Cooling IC 611. *RAVEO* [online]. 2013 [cit. 2013-06-26]. Dostupné z: <http://raveo.cz/vysokonapetovy-motor-krouzkovy>
- [14] JANČAR, Rost'a. Vídeňské elektrobusy topí bateriemi místo nafty. Jezdí totiž „na tramvaj“. *Technet.cz* [online]. 2013, datum aktualizace 25.5.2013 [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/elektrobusy-s-topenim-067-tec_tecnika.aspx?c=A130317_145046_tec_reportaze_rja
- [15] JIRSA, M. Supravodivost - naděje pro 21. století. *Fyzikální ústav, Akademie věd ČR* [online]. 2010. [cit. 2013-07-05]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1 – Aragův disk	11
OBRÁZEK 1.2 - Bailiho pokus z roku 1879	11
OBRÁZEK 1.3 – Ferrarisův 2f indukční motorek	12
OBRÁZEK 1.4 – Teslův 2f asynchronní motor	14
OBRÁZEK 1.5 – Praktické využití Teslovo motorů v domácnostech	14
OBRÁZEK 1.6 – Klecová kotva	17
OBRÁZEK 1.7 – Postupná vizuální přeměna indukčního motoru	19
OBRÁZEK 2.1 – Obecný průběh momentové charakteristiky	23
OBRÁZEK 2.2 – Konstrukční řešení motoru s kotvou vinutou	26
OBRÁZEK 2.3 – Konstrukční řešení motoru s kotvou nakrátko	26
OBRÁZEK 3.1 – 1f motor se stíněným pólem A24N	28
OBRÁZEK 3.2 – 3f vysokonapěťový asynchronní motor s kroužkovou kotvou	29
OBRÁZEK 3.3 – Tramvaj Elektra 13 T	30
OBRÁZEK 3.4 – Lokomotiva 109 E ČD	30
OBRÁZEK 4.1 – Magnetofon Tesla B400	31
OBRÁZEK 4.2 – Motorek v magnetofonu Tesla B400	31
OBRÁZEK 4.3 – Vídeňský elektrobus	32
OBRÁZEK 4.4 – Obráběcí centrum	33
OBRÁZEK 4.5 – Motor z obráběcího centra	33

Seznam tabulek

TABULKA 1.1 – Tabulka převodu velikosti výkonů asynchronních motorů mezi HP a kW	15
TABULKA 1.2 – Růst výkonu 3f indukčního motoru v období 1897-1976	19