

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
TECHNICKÁ FAKULTA

Asynchronní motory a problematika jejich oprav

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zbyněk Vondrášek Ph.D.

Vypracoval: Bc. Pavel Jelínek

Praha 2012

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra elektrotechniky a automatizace

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jelínek Pavel

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Asynchronní motory a problematika jejich oprav

Anglický název

Asynchronous motors and and questions of their repairs

Cíle práce

Proveďte porovnávací studii zaměřenou na vlastnosti asynchronních motorů - jak jsou tyto ovlivněny opravami po elektrických poruchách. Porovnání proveďte mezi stroji shodné nebo velmi blízké štítkové výkonnosti během provozu v různých provozních režimech.

Metodika

Vyberte dvojici motorů shodných štítkových parametrů - jeden nově továrně vyrobený a druhý po opravě elektrické poruchy. Na těchto motorech proveďte základní elektrická měření - naprázdno, nakrátko, zatěžování. Ve vyhodnocení porovnejte vlastnosti motorů v jednotlivých sledovaných provozních režimech. Vyhodnoťte výhodnost opravy motoru a míru ovlivnění jeho sledovaných vlastností poruchou.

Osnova práce

- teoretický základ asynchronních motorů.
- problematika poruch asynchronních motorů.
- opravy asynchronních motorů.
- porovnání elektrických vlastností strojů - továrního nového a opraveného
- závěr a zhodnocení.

Rozsah textové části

35 - 45 stran

Klíčová slova

Výkon, asynchronní motor, momentová charakteristika, poruchy, opravy.

Doporučené zdroje informací

PETROV, G, N.: Elektrické stroje I. Praha, Academia, 1980, s. 385.

PETROV, G, N.: Elektrické stroje II. Praha, Academia, 1982, s. 728.

KOPYLOV, I, P.: Stavba elektrických strojů. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, s. 685.

MRAVEC, R.: Elektrické stroje a přístroje III. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, s. 235.

KRAEMER J., NÝVL J.: Elektrotechnická měření. II pro 4. ročník středních průmyslových škol elektrotechnických. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, s. 381.

Bašta J., Kulda V., Pavlásek F. a kolektiv/ Měření na elektrických strojích 4 (měření na indukčních strojích), Praha: SNTL 1962, stran 312

Roubíček O./ Elektrické motory a pohony, Praha: BEN 2004, stran 192, ISBN 80-7300-092-X

Vedoucí práce

Vondrášek Zbyněk, Ing., Ph.D.

Termín zadání

listopad 2010

Termín odevzdání

duben 2012

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 4.2.2011

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zbyňka Vondráška Ph.D. a použil pouze pramenů citovaných v příložené bibliografii.

V Praze dne 3.4.2012

Podpis

Rád bych poděkoval Ing. Zbyňku Vondráškovi Ph.D. za odborné vedení a pomoc při vypracování této diplomové práce. Společnosti pana Pečeného Elmot Dobříš za převinutí motoru. Dále své rodině za trpělivost a podporu, bez které bych práci nemohl dokončit.

Asynchronní motory a problematika jejich oprav

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je porovnávací studie zaměřená na vlastnosti opravených asynchronních motorů. Hlavní náplní této práce je porovnání motoru navinutého v továrně při sériové výrobě a motoru navinutého v podmínkách servisní navijárny s využitím běžných technologií. Na těchto motorech byla provedena základní elektrická měření (naprázdno, nakrátko, zatěžování). Hodnoty získané měřením v jednotlivých sledovaných provozních režimech byly vyhodnoceny. V kapitole „Teoretický základ asynchronních motorů“ je popsán princip činnosti těchto strojů od vzniku magnetického točivého pole až po konstrukci motorů. Jsou zde popsány nejčastěji používané druhy vinutí statoru a konstrukce rotorů. Část nazvaná „Problematika poruch asynchronních strojů“ je zaměřena na nejčastější druhy poruch, kdy jsou děleny na poruchy mechanické a elektrické částí motoru. Kapitola „Opravy asynchronních motorů“ se zabývá vlastní opravou motoru. V poslední kapitole je popsána měřicí metoda a porovnání naměřených hodnot zkoumaných strojů.

Asynchronous motors and questions of their repairs

Klíčová slova: výkon, asynchronní motor, momentová charakteristika, poruchy, opravy.

This thesis compares characteristics of repaired asynchronous motors. The main part of this thesis compares motors wound in a factory and motors wound in a service using regular technologies. Electric measurement has been performed on these motors. Figures gained in different regime modes have been assessed. The chapter “Theoretical basis of asynchronous motors” describes the principle of activities of these machines from the beginning of magnetic rotary field to motor construction. The most frequently used types of stator winding and rotor construction are described in this chapter. The chapter called “Problems of defects of asynchronous machines” describes the most common defects which are divided into two groups – mechanical defects and defects of electrical parts of machines. A mending of a motor has been described in chapter “Mending of asynchronous motors”. The last chapter describes ways of measurement and comparing of gained figures.

Key words: power, asynchronous motor, torque characteristics, disturbances, repairs.

Obsah

Úvod.....	1
1. Teoretický základ asynchronních motorů	2
1.1 Vznik točivého magnetického pole	2
1.1.1 Synchronní otáčky	5
1.2 Konstrukční uspořádání motorů	7
1.2.1 Třífázové vinutí	9
1.2.1.1 Jednovrstvová vinutí.....	12
1.2.1.2 Dvouvrstvová vinutí	14
1.2.1.3 Vinutí pro strojní navíjení	15
1.3.1 Rotor nakrátko	17
2. Problematika poruch asynchronních motorů.....	20
2.1 Závady mechanických částí asynchronního motoru	20
2.1.1 Opatření strojních součástí	20
2.1.2 Koroze	23
2.1.3 Otláčení	24
2.1.4 Deformace	24
2.1.5 Trhliny a lomy	24
2.2 Poškození vinutí motoru.....	27
3. Opravy asynchronních motorů	30
3.1 Mechanické opravy asynchronních motorů	30
3.1.1 Opravy statoru	30
3.1.2 Opravy rotoru	31
3.1.3 Opravy a ošetření ložisek	31
3.1.4 Ložiskové štíty a příruby	32
3.1.5 Povrchová ochrana	32
3.2 Opravy vinutí asynchronních motorů.....	33
3.2.1 Odstraňování starých vinutí.....	33
3.2.2 Izolování drážek	34
3.2.3 Navíjení cívek a jejich vkládání do drážek	35
3.2.3.1 Vodiče na vinutí	35

3.2.3.2 Krok vinutí	37
3.2.3.3 Určení počtu cívek podle počtu pólů.....	38
3.2.3.4 Zhotovení cívek a vsypávání do drážek	39
3.2.3.5 Prokládání čel vinutí a zapojení vinutí	40
3.2.3.6 Impregnace vinutí a kompletace motoru	41
4. Porovnání elektrických vlastností motorů	42
4.1. Měření naprázdno	42
4.2 Měření nakrátko	45
4.3 Měření při zatěžování	46
Závěr.....	51
Použité zdroje	53
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek.....	55
Seznam grafů.....	55
Seznam zkratk.....	55
Přílohy	56

Úvod

Tato práce se bude zabývat asynchronními motory, jejich konstrukcí a opravou. Důvody zvolení tohoto tématu jsou zajímavost této problematiky a osobní zájem o prohloubení znalostí v oboru asynchronních motorů.

Asynchronní motor je díky své jednoduché konstrukci, která umožňuje sériovou výrobu a velké provozní spolehlivosti nejpoužívanějším elektromotorem v průmyslových aplikacích [1]. Při poruše motoru je často nutné rozhodnutí zda koupit nový nebo zajistit jeho opravu. Při tomto rozhodnutí musí zodpovědná osoba zvážit všechny klady i zápory jednotlivých variant. Podrobnější znalosti dané problematiky umožňují zvolit nejvýhodnější variantu za daných podmínek.

V části teoretický základ asynchronních motorů je popsána konstrukce asynchronních motorů. V této části jsou zkráceně popsány elektrotechnické principy činnosti asynchronních motorů. Konstrukční uspořádání s popisem statoru a rotoru po mechanické i elektrické stránce. Větší část je věnována základním a nejpoužívanějším druhům vinutí.

Druhá část popisuje nejčastější druhy poruch asynchronních motorů a způsoby jak se dané poruchy projevují. Tato část popisuje jak poruchy mechanické části motoru tak elektrické. Nejčastější mechanické poruchy jsou doplněny fotografiemi zhotovenými v opravě motorů.

Třetí část je věnována opravám asynchronních motorů. Z důvodů rozsáhlosti dané problematiky je zaměřená na opravy motorů menších osových výšek. Výpočty a fotodokumentace převíjení se vztahuje k měřenému motoru, který byl vybrán pro svoji vhodnou osovou výšku, otáčky a časté využití v mnoha aplikacích.

Čtvrtá část je věnována popisu a samotnému měření továrně navinutého motoru a motoru převíjeného nejběžnější metodou v opravách motorů. Výsledky měření byly vzájemně porovnány. Z důvodů finanční náročnosti tohoto projektu byl měřen pouze jeden kus od každé varianty.

1. Teoretický základ asynchronních motorů

Asynchronní motor je elektrický stroj, který přeměňuje elektrickou energii v mechanickou působením elektromagnetické indukce [2]. Hlavními částmi asynchronního stroje jsou kostra, statorový paket magnetického obvodu s vinutím, rotorový paket s vinutím (většinou klecovým), hřídel, ložiska, ložiskové štíty, ventilátor a svorkovnice.

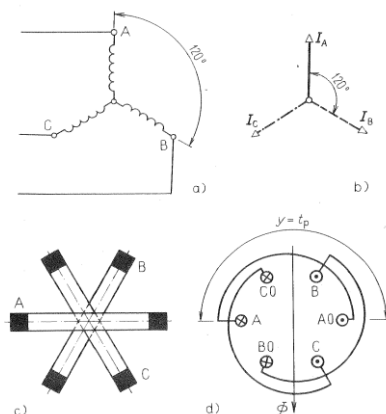
Asynchronní motor je díky své jednoduché konstrukci, která umožňuje sériovou výrobu a velké provozní spolehlivosti nejpoužívanějším elektromotorem v průmyslových aplikacích [1]. K jeho rozšíření přispěla nízká pořizovací cena a možnost regulace. Asynchronní motory jsou vyráběny pro výkony od zlomků wattu pro nízké napětí do desítek MW pro vysoká napětí [1]. Motory menších výkonů motorů mohou konstruovány i pro jednofázové napájení. Většina výrobců nabízí mnoho speciálních úprav zvyšujících rozsah použití (brzdy, ochranné termistory, cizí chlazení).

1.1 Vznik točivého magnetického pole

„Tažná síla asynchronního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole, které je výsledkem vzájemného působení dvou nebo několika střídavých magnetických polí vzájemně prostorově i časově posunutých, a magnetického pole rotoru“ [2].

Magnetické točivé pole lze např. vytvořit spojením tří stejných válcových cívek navzájem pootočených o 120° (obr. 1a) napájených třífázovou proudovou soustavou, fázový diagram napájecího proudu tohoto spojení je zobrazen na obrázku 1b [2].

Obr. 1 Uspořádání cívek pro vznik točivého magnetického pole

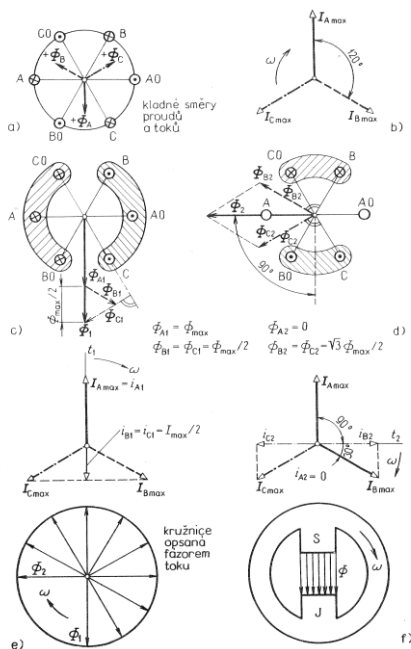


Zdroj: [2].

Uspořádání s válcovými cívkami je z konstrukčního hlediska nepraktické z důvodu velké potřeby místa, výhodnější je použití kotoučových cívek, jejichž roviny se protínají ve společné ose (obr. 1c) a jsou navzájem pootočený o 120° [2]. Z konstrukčních důvodů, aby čela cívek nepřekážela hřídeli stroje, jsou rozložena po obvodu stroje (obr. 1d) [2].

Zjednodušený vznik točivého magnetického pole zobrazuje (obr. 2a), kde je pro jednoduhost každá cívka zobrazena pouze dvěma vodiči v řezu (A – A0, B – B0, C – C0) [2]. Na tomto spojení jsou cívky spojeny do hvězdy a napájeny třemi proudy IA, IB, IC, které jsou navzájem posunuty o 120° [2].

Obr. 2 Vznik točivého magnetického pole



Zdroj: [2].

Na fázorovém diagramu obvodu (obr. 2b) je zřejmé, že proudy procházející jednotlivými cívkami mění svou velikost podle sinusovky průběhu proudu, od kladné maximální hodnoty přes nulu k zápornému maximu a zpět [2]. Procházející proudy vybudí v cívkách magnetické toky, které budou mít průběh sinusově proměnný v čase [2]. Za předpokladu konstantní permeability prostředí jsou jejich okamžité hodnoty přímo úměrné okamžitým hodnotám proudů [2]. Pro další popis bude okamžitá hodnota proudu bez ohledu na měřítko považována za okamžitou hodnotu jím vybuzeného magnetického toku [2].

Okamžité hodnoty proudů a magnetických toků v libovolném okamžiku lze zjistit průměty fázorů proudů do časové osy (t), při otáčení úhlovým kmitočtem ω proti směru otáčení fázorů [2]. Na obrázku (obr. 2c) je znázorněno rozložení proudů v okamžiku t_1 , v tomto bodě dosahuje proud maximální kladné hodnoty [2]. Z průmětu do časové osy je patrné, že proudy v cívkách B a C jsou záporné a jsou rovny poloviční hodnotě proudu v cívce A

$$i_{B1} = i_{C1} = I_{max} \cos 60^\circ = \frac{I_{max}}{2}$$

neboť amplitudy všech tří proudů jsou stejné

$$I_{A max} = I_{B max} = I_{C max} = I_{max} [2].$$

Okamžité směry proudů a jim odpovídající fázory magnetických toků jsou zobrazeny na obrázku (obr. 2c), směry fázorů magnetických toků lze zjistit pravidlem pravé ruky [2]. Jednotlivé magnetické toky tří cívek se sečtou a vytvoří výsledný magnetický tok Φ , daný jejich geometrickým součtem, podle obrázku 1c platí:

$$\Phi_I = \Phi_{A max} + \frac{1}{2} \Phi_{A max} = \frac{3}{2} \Phi_{A max} = \frac{3}{2} \Phi_{max}$$

protože stejným amplitudám proudů odpovídají i shodné amplitudy magnetických toků

$$\Phi_{A max} = \Phi_{B max} = \Phi_{C max} = \Phi_{max} [2].$$

„Směr výsledného magnetického toku odpovídá rozložení proudových vrstev, tvořených vodiči (C0 – A – B0) a (B – A0 – C)“ [2].

Stejným postupem lze zjistit velikost i směr výsledného magnetického toku v okamžiku t_2 (obr. 2d), tento okamžik odpovídá jedné čtvrtině periody (90° el) [2]. Velikost proudu a magnetického toku v cívce A má nulovou hodnotu, velikost proudů v cívkách B a C je shodná, ale směr je opačný [2]. Magnetické toky v tomto bodě mají velikost:

$$\Phi_{B2} = \Phi_{C2} = \Phi_{A max} \cos 30^\circ = \Phi_{A max} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

a výsledný magnetický tok

$$\Phi_2 = \Phi_{C2} - \Phi_{B2}$$

$$\Phi_2 = 2\Phi_{B2} \cos 30^\circ = 2\Phi_{A max} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} \Phi_{A max} = \frac{3}{2} \Phi_{max}$$

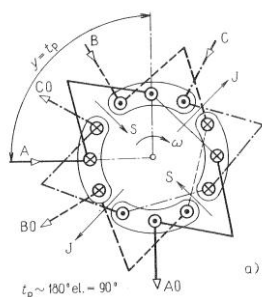
to znamená, že výsledná velikost magnetického toku v okamžiku t_2 je shodná s velikostí magnetického toku v okamžiku t_1 [2].

Velikost výsledného magnetického toku je totožná v obou okamžicích, ale fázor výsledného magnetického toku Φ je otočen o shodný úhel jako fázory proudu [2]. „Koncový bod fázoru výsledného magnetického toku opisuje kružnici (obr. 2e) a proto se nazývá, točivé kruhové magnetické pole“ [2]. Záměna přívodů k dvěma libovolným cívkám způsobí změnu směru otáčení magnetického pole, tato vlastnost umožňuje reversaci motorů [2].

Zapojení tří cívek vybudí dvupólové pole, toto homogenní točivé pole si lze pro zjednodušení představit jako věnec se dvěma pólovými nástavci z permanentního magnetu (obr. 2f), který se otáčí kolem své osy stálým úhlovým kmitočtem ω [2].

Zapojením šesti cívek lze vybudit točivé pole čtyřpólové (obr. 3) [2].

Obr. 3 Čtyřpólové magnetické točivé pole



Zdroj: [2].

1.1.1 Synchronní otáčky

„Otáčky točivého magnetického pole se nazývají synchronní otáčky, neboť přímo (synchronně) závisejí na kmitočtu napájecího proudu, a tedy i na otáčkách generátoru, který je jeho zdrojem“ [2].

U dvupólového magnetického pole dojde za jeden kmit k jedné otáčce, která odpovídá dvěma pólovým roztečím [2]. Synchronní otáčky n_s za jednu minutu při kmitočtu napětí statoru f jsou za těchto podmínek dány vztahem:

$$n_s = 60 \cdot f \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}] [2].$$

Obecný vztah pro výpočet synchronních otáček točivého pole při různém počtu pólových dvojic točivého pole p :

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}; \text{Hz}] [3].$$

Při provozu „ideálního“ asynchronního motoru, který nemá při provozu žádné mechanické ztráty, jsou po rozběhu otáčky rotoru synchronní a budou se otáčet souhlasně s točivým magnetickým polem [2]. Vodiče rotoru neprotínají žádné indukční čáry, tato skutečnost by měla za následek, že by zde nedocházelo k indukci proudu a vzniku magnetického pole [2]. Za těchto podmínek by byl točivý moment nulový a rotor by se dál otáčel pouze setrvačností [2]. Při mechanickém zatížení rotoru, dochází k jeho zpomalení, indukční čáry protínají vodiče rotoru, ve kterých se indukuje napětí a vzniká proud potřebný pro vznik tažné síly [2]. Velikost zátěže ovlivňuje rotorový proud a tím rychlost otáčení rotoru [2]. „S rostoucím zatížením se otáčky asynchronního motoru zmenšují“ [2].

Asynchronní stroje jsou většinou používány jako motory, ale mohou být provozovány jako generátory elektrické energie [3]. Při provozu asynchronního stroje jako generátoru dochází k přeměně mechanické energie v elektrickou a stroj dodává činný elektrický výkon [3]. K tomuto stavu dochází při zvýšení otáčivé rychlosti rotoru nad synchronní rychlost točivého magnetického pole [3]. Pro svoji jednoduchou konstrukci a snadné připojení k elektrické rozvodné síti jsou používány jako generátory větrných a malých vodních elektráren [3].

Asynchronní stroje mají ještě jeden provozní režim, kterým je asynchronní brzda [3]. „Nastává při pohonu rotoru mechanickým momentem proti směru otáčení točivého magnetického pole“ [3]. Při tomto stavu se je do stroje přiváděna energie ze dvou stran, elektrická energie ze sítě a mechanická energie hřídelí [3].

Pro určení druhu provozu asynchronního stroje je nutné definovat veličinu skluz s :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

kde n jsou otáčky rotoru [3].

Skluz bývá často udáván v procentech jeho jmenovitá velikost je v rozmezí jednoho až deseti procent v závislosti na výkonu motoru, průměrná velikost je pět procent [3].

„Pro jednotlivé provozní stavy asynchronního stroje platí následující vztahy pro otáčky rotoru a pro skluz:

- | | | |
|--------------|---------------------|-------------------|
| a) motor | $0 \leq n \leq n_s$ | $1 \geq s \geq 0$ |
| b) generátor | $n > n_s$ | $s < 0$ |
| c) brzda | $n < 0$ | $s > 1$ “ [3]. |

Příklad: Měřený motor 1LA7106-4AA10 má jmenovité otáčky rotoru 1420 min^{-1} , počet pólů motoru je čtyři, jaké hodnoty dosahují synchronní otáčky a jaká je velikost skluzu při frekvenci 50 Hz?

$$\text{Synchronní otáčky} \quad n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad n_s = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

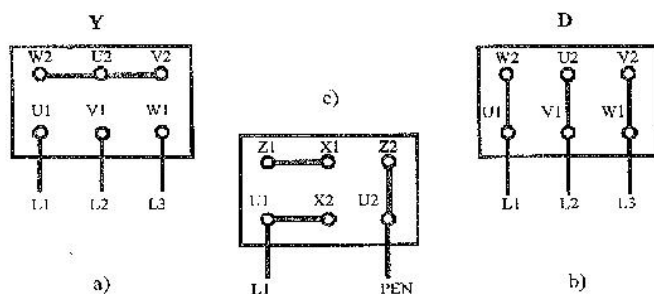
$$\text{Skluz motoru} \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad s = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0533$$

Při posouzení podmínek provozu synchronního stroje je patrné, že je určen k provozování, jako motor a jeho skluz má přibližně průměrnou hodnotu.

1.2 Konstrukční uspořádání motorů

Paket statoru asynchronního stroje se skládá z plechů o přibližné tloušťce 0,5 mm, do drážek těchto plechů je uloženo vinutí. Toto vinutí bývá nejčastěji třífázové [4]. Jeho konce jsou vyvedeny na svorkovnici v takovém uspořádání (obr. 4), aby bylo umožněno jeho snadné přepojení do hvězdy nebo trojúhelníku [4].

Obr. 4 Uspořádání vývodů trojfázového vinutí na svorkovnici



Zdroj: [5].

Začátky jednotlivých fází vyvedených na svorkovnici jsou označeny U, V, W (U1, V1, W1) a konce fází 0U, 0V, 0W (U2, V2, W2) [4]. Značení uvedené v závorce odpovídá ČSN 35 0000 část 8 [5]. Značení vinutí může být v některých případech u starších motorů matoucí, protože podle normy ČSN34 3230 byly značeny začátky vinutí A, B, C a konce vinutí A0, B0, C0 [4]. Propojení horizontálních svorek horních nebo dolních (W2-U2-V2 nebo W1-V1-U1) spojíme vinutí do hvězdy (obr. 4a) [4]. Při propojení svorek nad sebou (W2-U1, U2-V1, U2-W1) dojde k spojení vinutí do trojúhelníku (obr. 4b) [4]. Jednofázové

motory mají také svorkovnici s šesti svorkami (obr. 4c), vinutí hlavní fáze U1-U2, vinutí pomocné fáze Z1-Z2, a pomocné svorky (kondenzátor, odpojovač) X1-X2 [5].

Při konstrukci svorkovnic je volena stejná vzdálenost svorek v horizontálním i vertikálním směru, aby bylo možné použít na oba způsoby zapojení jednu trojici spojovacích plíšků [4]. V případě, že není vyžadováno přepínání vinutí, jsou na svorkovnici vyvedeny tři vývody od vinutí spojeného do hvězdy nebo trojúhelníku [4].

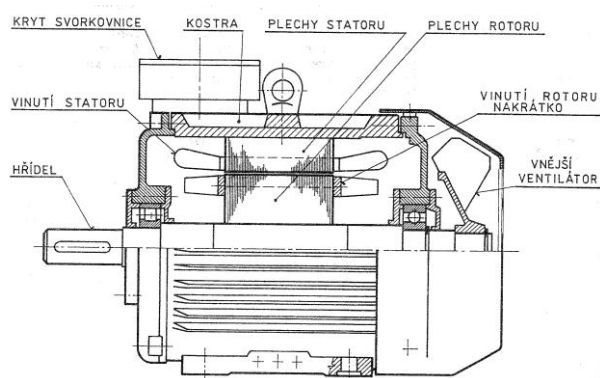
„Drážky statoru jsou používány polozavřené nebo otevřené (případně s magnetickými klíny), aby se příliš nezvětšovala efektivní délka vzduchové mezery a tím magnetizační proud stroje a nevznikaly velké pulsace magnetického toku“ [4].

Magnetický obvod rotoru je složen obdobně jako u statoru z plechů [4]. Rotor může mít vinutí z izolovaného vodiče a vyvedené na kroužky (motor kroužkový), nebo klecové (motor s kotvou nakrátko) [4].

U motorů s kroužkovými kotvami je k vinutí rotoru přes kroužky a kartáče připojen přídatný spouštěcí rezistor [4]. Jeho odpor omezuje při rozběhu rozběhový proud a umožňuje dosažení lepších spouštěcích vlastností motoru [4]. Po rozběhu je spouštěcí odpor vyřazen a dojde k spojení kroužků nakrátko a k odklopení kartáčů, aby nedocházelo k jejich zbytečnému opotřebení [4]. Je-li odklápečem stroj vybaven.

Motory s kotvou nakrátko (obr. 5) mají rotorové vinutí tvořené tyčemi uloženými v drážkách [4]. Tyče jsou na čelech rotoru spojeny kruhy nakrátko [4]. Klecové vinutí je nejčastěji odstříknuto z hliníku, ve zvláštních případech jsou tyče klece z mědi, bronzu nebo jiných slitin [4].

Obr. 5 Asynchronní motor s kotvou nakrátko



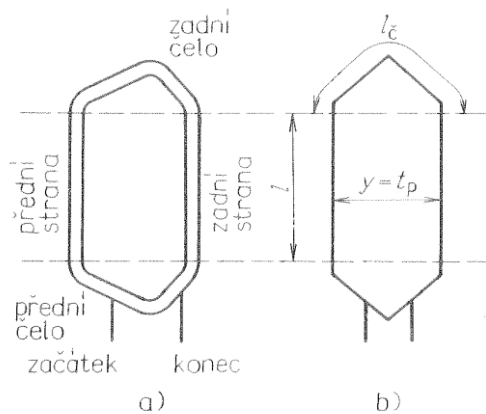
Zdroj: [4].

1.2.1 Třífázové vinutí

Vinutí asynchronního motoru musí mít schopnost vybudit magnetické točivé pole s určitým počtem pólových dvojic, tento počet určuje otáčky motoru [2]. Elementárním prvkem vinutí je cívka [2]. Cívka může mít podle konstrukce drážek různý počet závitů a různé tvary. Části cívek uložené v drážkách se nazývají cívkové strany [2]. Cívkové strany jsou spojeny čely (obr. 6a), ve schématech se cívky s větším počtem závitů kreslí pouze jednou čarou (obr. 6b) [2].

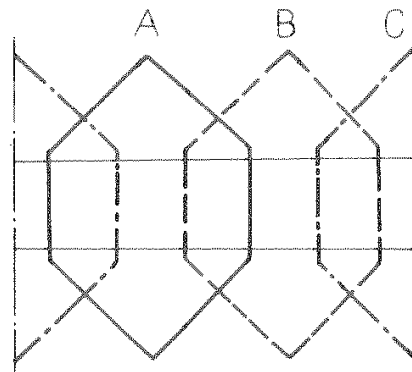
Nejčastěji používané je schématické zobrazení vinutí se třemi cívkami (obr. 7) [2]. Cívky a drážky jednotlivých fází se odlišují různou čarou [2].

Obr. 6 Cívky vinutí



Zdroj: [2].

Obr. 7 Schématické zobrazení vinutí



Zdroj: [2].

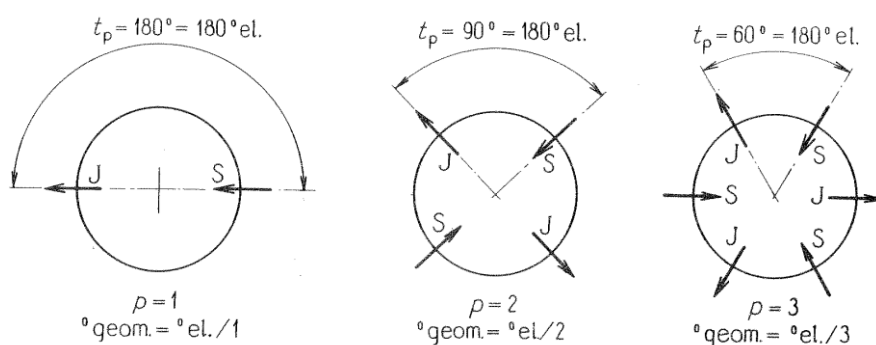
Čela cívek jsou vyklenuta podél obvodu vzduchové mezery motoru, aby nepřekážela rotoru v otáčení, jejich uspořádání závisí na druhu vinutí [2]. Pro popis konstrukce vinutí je nutné definovat použité označení:

- m počet fází
- p počet pólových dvojic
- Q celkový počet drážek
- Q_p celkový počet drážek na jeden pól
- n_c počet cívek
- q počet drážek na pól a fázi
- t_p pólová rozteč (vzdálenost os dvou sousedních pólů "počtu drážek")
- y cívkový krok (rozteč dvou cívkových stran téže cívky) [2].

Z důvodů nejlepšího využití vinutí je nutné, aby se velikost cívkového kroku shodovala s pólovou roztečí ($y = t_p$) [2]. Výjimkou jsou speciální druhy vinutí, kdy je cívkový krok mírně zkrácený nebo prodloužený [2]. Motor dvupólový má pólovou rozteč odpovídající geometrickému úhlu 180° , u čtyřpólového motoru je tato velikost 90° [2]. Posun točivého pole o dvě pólové rozteče odpovídá jednomu kmitu (360°), tato skutečnost je důvodem, že se jedna pólová rozteč udává úhlem 180° elektrických (obr. 8) [2]. Pro převod platí vztah:

$$\text{geometrické stupně} = \frac{\text{elektrické stupně}}{p} \quad [2].$$

Obr. 8 Vztah mezi geometrickými a elektrickými stupni



Zdroj: [2].

Nejdůležitějším údajem o vinutí je počet drážek na pól a fázi q , při známém počtu drážek na pól a fázi je celkový počet drážek motoru dán vztahem:

$$Q = q2pm$$

vztah při známém Q je počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q}{2pm} \quad [2].$$

„Cívkový krok y a pólová rozteč se výhodně udávají v počtu drážkových roztečí. Tzv. plný krok je dán vztahem“:

$$y = t_p = qm \quad [2].$$

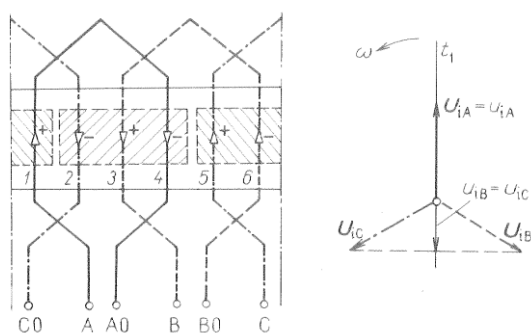
Dvě pólové rozteče jsou totožné s 360° elektrickými neboli $2qm$ drážkovým roztečím ($2p = 2$) a začátky jednotlivých fází musí být proti sobě posunuty o 120° elektrických:

$$120^\circ \text{ el} = \frac{360^\circ \text{ el}}{3} = \frac{2qm}{3}$$

při počtu fází $m = 3$ dostaneme po zkrácení $120^\circ = 2q$ drážkových roztečí [2].

Při posuzování správnosti konstrukce vinutí a jeho zapojení jsou do schématu u drážek zakresleny smysly napětí, která jdou do vinutí indukovaná pohybem točivého magnetického pole [2]. Směry indukovaného napětí jsou zakresleny v libovolně zvoleném okamžiku, ale nejčastěji v okamžiku, kdy U_{iA} je maximální a kladné U_{iB} i U_{iC} jsou stejné velikosti, záporné a rovnající se polovině napětí U_{iA} (obr. 9) [2].

Obr. 9 Napětí indukované pod póly vinutí



Zdroj: [2].

Přední cívkové strany jsou značeny kladným znaménkem (+) a zadní strany záporným znaménkem (-) [2]. Orientace kladného indukovaného napětí je od počátku vinutí k jeho konci, zatímco u záporného je naopak od konce vinutí k jeho začátku [2].

„Při správně navrženém a zapojeném vinutí leží potom drážky se stejným směrem indukovaných napětí vedle sebe. To odpovídá skutečnosti, že ve všech vodičích pod jedním pólem se indukuje napětí stejného směru. Jednotlivé póly můžeme potom nakreslit vždy v rozpětí drážek se stejným směrem indukovaného napětí“ [2].

Vinutí motorů lze rozdělit podle několika hledisek:

„1. Podle tvaru cívek

- a) se stejnými cívkami
- b) se soustřednými cívkami q nebo $q/2$ soustředných cívek tvoří cívkový svazek.

2. Podle uložení cívkových stran

- a) jednovrstvové, v každé drážce je jen jedna cívková strana, počet všech cívek je roven $Q/2$

- b) dvouvrstvé, v každé drážce jsou dvě cívkové strany dvou různých cívek, každá cívka má jednu stranu v horní a druhou stranu ve spodní vrstvě drážky, počet cívek se rovná počtu drážek.
3. Podle cívkového kroku
 - a) s plným krokem ($y = t_p$)
 - b) se zkráceným krokem ($y < t_p$)
 4. Podle počtu drážek na pól a fázi
 - a) vinutí s celistvým počtem drážek na pól a fázi,
 - b) vinutí se zlomkovým počtem drážek na pól a fázi
 5. Podle uspořádání
 - a) skupinové – cívky jednotlivých fází tvoří skupiny
 - a1) pólpárové – jednu fázi tvoří p cívkových skupin
 - a2) pólové – fázi tvoří $2p$ cívkových skupin
 - b) rozložené – vzniklé rozstříháním původních stejnosměrných vinutí“ [2].

1.2.1.1 Jednovrstvová vinutí

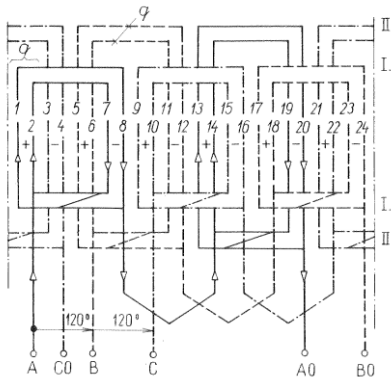
V dnešní době se používá jen zřídka u motorů v kusové výrobě [2]. Existuje mnoho druhů jednovrstvových vinutí, ale používaná jsou jen některé (soustředné vinutí pólpárové, dvupolohové, soustředné vinutí pólové-třípolohové, rozložené vinutí se stejnými cívkami) [2].

Soustředné vinutí – pólpárové, dvupolohové bylo používáno jako jedno z prvních druhů vinutí, ale pro svojí jednoduchost je používáno i v dnešní době [2]. „Je upraveno tak, že q soustředných cívek s nestejným krokem tvoří cívkový svazek (obr. 10), čela cívek v jednom svazku jsou obvykle společně izolována“ [2]. Uspořádána jsou do dvou pater [2].

Postup při výrobě je následující: nejprve jsou uložena v drážkách cívkové svazky s čely v první poloze (I), blíž k železu a následně jsou uloženy svazky s čely ve druhé poloze (II), dále od železa [2]. Pro každou fázi platí, že má p svazků, $p/2$ v první poloze a $p/2$ v poloze druhé [2]. Čela vinutí mohou být upravena rovnoběžně v případě šablonového vinutí na vysoká napětí, nebo vějířovitě což bývá používáno u ručně vinutých motorů menších napětí [2].

U vinutí na vysoké napětí jsou cívky vinutí vytvářeny jednotlivě na šablonách, zvláště izolovány a impregnovány [2]. Jednotlivě jsou následně vkládány do otevřených drážek stroje [2].

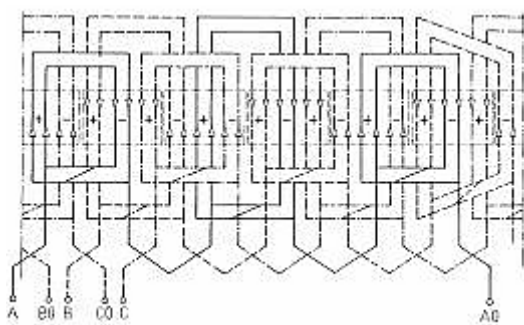
Obr. 10 Soustředné vinutí – pólpárové, dvoupolohové ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)



Zdroj: [2].

Při vinutí motoru o lichém počtu pólových dvojic je i celkový počet cívkových svazků $3p$ lichý, v takovém případě je není možné rozdělit rovnoměrně do I a II polohy [2]. „Jeden svazek musí být přechodný (obr. 11) a jeho čelo přechází z první polohy do druhé“ [2].

Obr. 11 Soustředné vinutí – pólpárové, dvoupolohové ($2p = 6, q = 2, m = 3, Q = 36$)



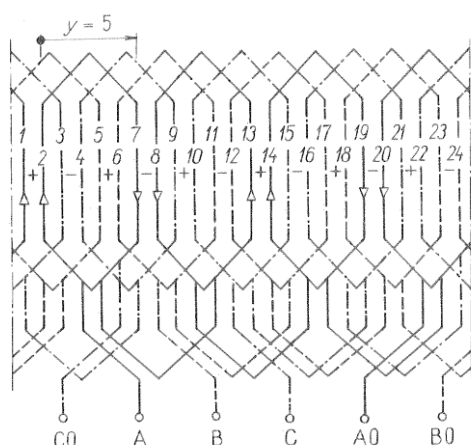
Zdroj: [2].

Rozložené vinutí se stejnými cívkami (obr. 12) je v dnešní době z jednovrstvových vinutí používáno v největší míře [2]. Tento druh vinutí vznikne rozdělením (rozstříháním) jednovrstvého jednoduchého stejnosměrného vinutí [2].

Slangový výraz pro toto vinutí je košíkové vinutí. Tento název je dán vzhledem vinutí, kdy všechny cívky mají stejný krok a jejich čela vycházejí z jedné drážky doprava a ze sousední drážky doleva [2]. Tento druh střídání je možný za podmínky, že cívkový krok je lichý [2].

Čela vinutí jsou po obvodu rovnoměrně rozložena bez ohledu na příslušnost k jednotlivým fázím, tato skutečnost vyžaduje důkladnější izolaci [2].

Obr. 12 Jednovrstvové vinutí se stejnými cívkami ($2p = 4$, $q = 2$, $m = 3$, $Q = 24$)



Zdroj: [2].

Z hlediska výroby jsou jednovrstvová vinutí vhodnější při automatickém nebo poloautomatickém navíjení, protože lze výrobu lépe mechanizovat než při vinutích dvouvrstvých [5].

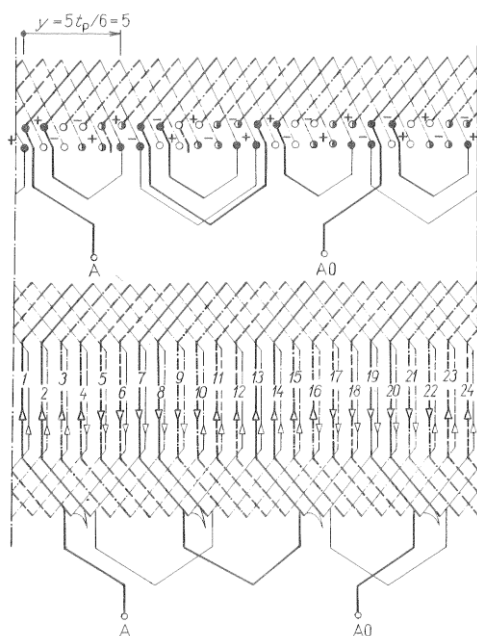
1.2.1.2 Dvouvrstvová vinutí

Dvouvrstvová vinutí (obr. 13) mají v každé drážce dvě cívkové strany [2]. Celkový počet cívek je roven počtu drážek, tato skutečnost znamená, že u tohoto druhu vinutí je počet cívek dvojnásobný než u jednovrstvových vinutí [2]. Vzhledem ke skutečnosti, že jsou v některých drážkách uloženy cívkové strany různých fází, tak je nutné je navzájem důkladně izolovat na plné sdružené napětí [2].

Nutnost důkladnější izolace mezi čely vinutí zvyšuje pracnost výroby dvouvrstvového vinutí, ale příznivější prostorový průběh magnetického pole vybuzeného tímto vinutím je velkým kladem [2]. Prostorový průběh magnetického pole je více blízký sinusovému

průběhu než průběh magnetického pole jednovrstvového vinutí [2]. Toho se dosáhne zkrácením kroku vinutí (přibližně na 7/9 pólové rozteče) [2].

Obr. 13 Dvouvrstvové vinutí se stejnými cívkami ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)



Zdroj: [2].

Ekonomickou výhodou dvouvrstvového vinutí je, že zkrácením kroku vinutí vycházejí kratší čela cívek a tím klesá spotřeba měděných vodičů na vinutí [2]. Kratší čela cívek umožňují zkrátit celkovou délku motoru, což je výhodné nejen z ekonomického hlediska, ale i prostorového [2]. Hlavní předností dvouvrstvových vinutí je možnost zkrácení kroku k potlačení vyšších harmonických v křivce magnetomotorického napětí a tím i proudu [6].

Dvouvrstvové vinuté je možné na hotovém statoru poznat podle toho, že na vnitřním obvodu jsou čela cívek formována jedním směrem a na vnějším obvodu směrem opačným [2].

1.2.1.3 Vinutí pro strojní navíjení

Navíjecí stroje v současné době pracují buď na principu postupného ukládání vodičů do drážek statoru podle kroku vinutí, nebo je do drážek současně vtahován svazek vodičů, náležející jedné nebo několika cívkovým skupinám [6]. „Oba uvedené způsoby navíjení jsou použitelné pouze pro vinutí, u nichž se při navíjení nevyžaduje vyjmutí dřívě ulože-

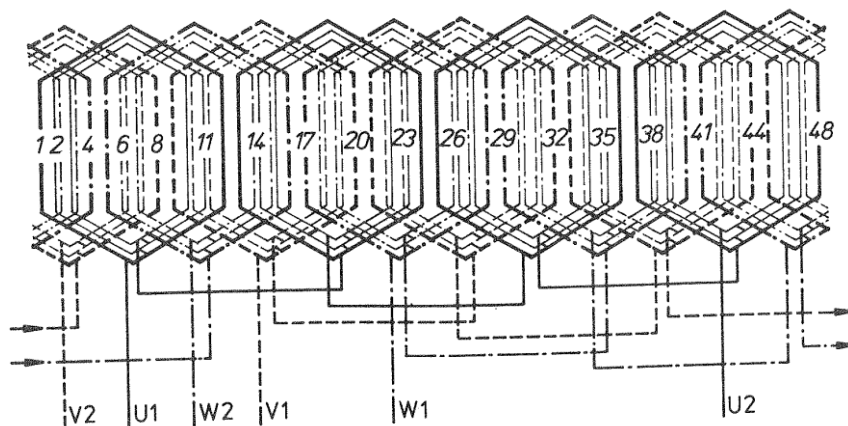
ných aktivních stran z drážek (technologická operace při navíjení)“ [6]. Strojní navíjení protahováním z čelních prostorů je možné použít pouze pro vinutí soustředná [6].

Novější typy vinutí (jedno-dvouvrstvá a dvouvrstvá soustředná) umožňují zkrácení kroku [6].

Jedno-dvouvrstvé vinutí (obr. 14) spojuje vlastnosti jednovrstvového a dvouvrstvového vinutí [6]. U klasického dvouvrstvového vinutí se v některých drážkách nacházejí aktivní strany cívek téže fáze, a v jiných drážkách se nacházejí strany cívek různých fází [6].

„V jedno-dvouvrstvých vinutích se do drážek, v kterých mají být uloženy strany cívek téže fáze, ukládá jednovrstvá cívka (velká) s dvojnásobným počtem závitů a do ostatních drážek se zakládají strany cívek různých fází ve dvou vrstvách, v soustředném provedení“ [6]. Vinutí je pólové (počet cívkových skupin je roven počtu pólů) [6]. Cívková skupina je nejčastěji složena z jedné velké a z $q-2$ malých cívek (celkem $q-1$ cívek) [6]. „Krok velké cívky je $y_v = Q_p - 1$, kroky malých cívek jsou pak $y_{m1} = y_v - 2$, $y_{m2} = y_v - 4$ “ [6].

Obr. 14 Jedno-dvouvrstvové vinutí ($2p = 4$, $q = 4$, $m = 3$, $Q = 48$)

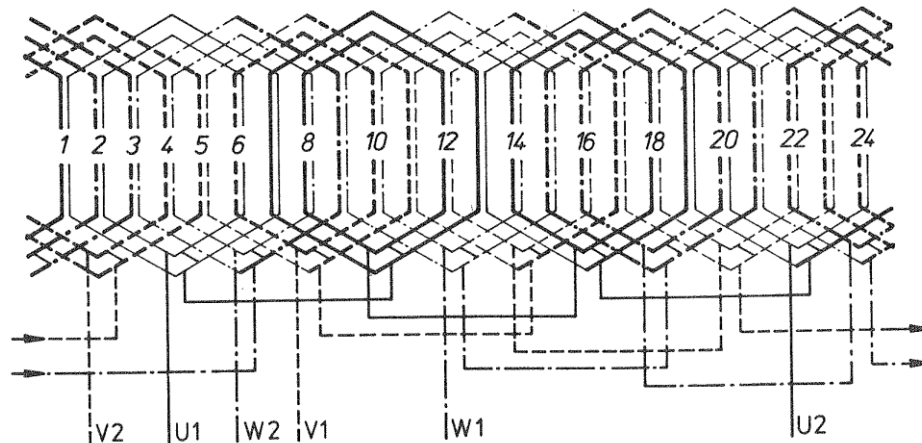


Zdroj: [6].

Dvouvrstvé soustředné vinutí (obr. 15) je navrhováno na základě dvouvrstvového vinutí (stejný počet pólů $2p$ a q), odlišný je krok cívek a čelní spojky [6]. Cívkové skupiny jsou tvořeny soustřednými cívkami [6]. „Krok největší cívky je roven počtu drážkových roztečí mezi první a poslední stranou cívek jedné cívkové skupiny základního dvouvrstvového vinutí“ [6].

Specifický postup zakládání cívkových skupin dvouvrstvého soustředného vinutí umožňuje po několika obězích strojově navinout všechny cívky bez nutnosti nadzvednutí stran [6].

Obr. 15 Dvouvrstvé soustředné vinutí ($2p = 4$, $q = 2$, $m = 3$, $Q = 24$)



Zdroj: [6].

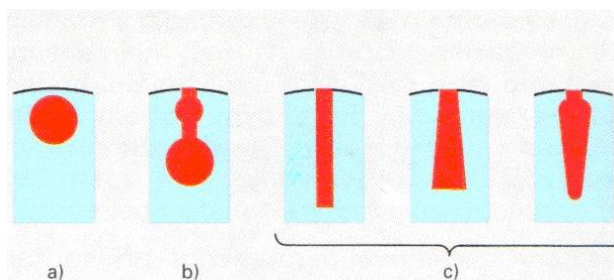
„Cívkové skupiny soustředného vinutí vinutého strojem nejsou úplně identické, protože mají různé umístění aktivních stran v drážkách“ [6]. Různé umístění aktivních stran v drážkách má za následek určité nerovnosti rozptylových reaktancí různých cívkových skupin [6]. Z toho důvodu může být soustředné dvouvrstvé vinutí spojeno do několika paralelních větví za podmínky, že v každé z nich bude stejný počet cívkových stran, uložených v dolních a horních vrstvách drážek [6]. Tato podmínka limituje možnost vytváření paralelních větví [6].

Kladem soustředného dvouvrstvého vinutí je menší vyložení čel než u klasického dvouvrstvého vinutí, to vede ke zmenšení střední délky závitu [6]. Zmenšená střední délka závitu znamená rozměrovou úsporu díky menší osově délce navinutého statoru, menší hmotnost mědi a s tím spojenou ekonomickou úsporu [6].

1.3.1 Rotor nakrátko

Rotor asynchronního motoru je tvořen rotorovými plechy nasazenými ve svazku na hřídel a vodiči v drážkách rotoru [7]. Vodiče (hliníkové nebo měděné tyčky) jsou na čelních stranách svazků rotorových plechu spojeny nakrátko kruhy nakrátko [7]. Tato konstrukce je podobná kleci, proto je možné se v literatuře setkat s názvem klecový rotor [7]. Průřez vodičů odpovídá tvaru drážek svazků rotorových plechů (obr. 16) [7].

Obr. 16 Základní tvary drážek v rotorech nakrátko



a) kruhové tyče, b) dvojitá klec, c) hluboké drážky

Zdroj: [7]

Rotor s jakostními vodiči kruhového průřezu má velký rozběhový proud. Je dán malým činným odporem vodičů klece a dosahuje až desetinásobku jmenovitého proudu I_N . Jeho fázový posun za magnetickým tokem Φ je značný. Důsledkem velkého fázového posunu za magnetickým tokem je malý točivý moment při záběru [7].

Omezit rozběhové proudy a zvětšit rozběhový moment lze použitím materiálů s větším elektrickým odporem např. použitím odporových slitin na vodiče klece rotoru [7]. Tím se zvětší činná složka impedance rotoru a zmenší se tak fázový posun mezi točivým magnetickým polem statoru a proudem rotoru. Při startu motoru i přes pokles rozběhového proudu stoupne jeho činná složka, která se přeměňuje na záběrový moment [7]. Negativem je větší skluz s a horší účinnost η .

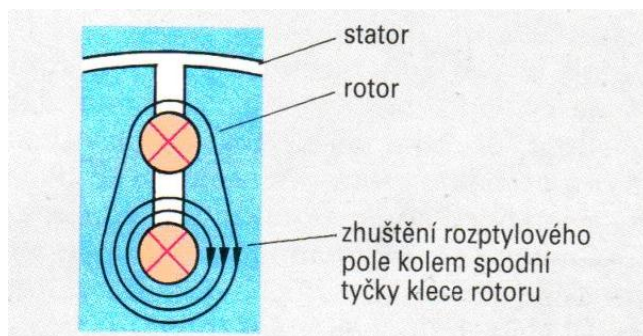
Zmenšení provozních ztrát ve vodičích rotoru lze dosáhnout různými konstrukcemi [7]. Rotory s hlubokými drážkami využívají efekt vytlačování proudu do vnějších vrstev vodičů s větším odporem při rozběhu [7].

Rotory s hlubokými drážkami nebo dvojitou klecí svou konstrukcí zdánlivě zvyšují odpor klece při rozběhu [7].

Konstrukci klece tvoří dvojice vodivých tyček nad sebou (obr. 17), vnější tyčky jsou menšího průřezu a většího odporu [7]. „Indukovaný proud vytváří kolem tyček magnetické pole a obě rozptylová pole indukují zpětně napětí, která se snaží podle Lenzova pravidla zmenšit původní střídavé proudy v tyčkách“ [7]. Magnetický tok kolem tyček bližších k ose rotoru je silnější, ačkoli se může hlavně uzavírat v železe [7]. To je důvodem většího

zeslabujícího účinku na výsledné pole než ve vnějších tyčkách rotorové klece [7]. Dochází k vytlačování proudu do vnějších tyček klece rotoru (skinefekt) [7].

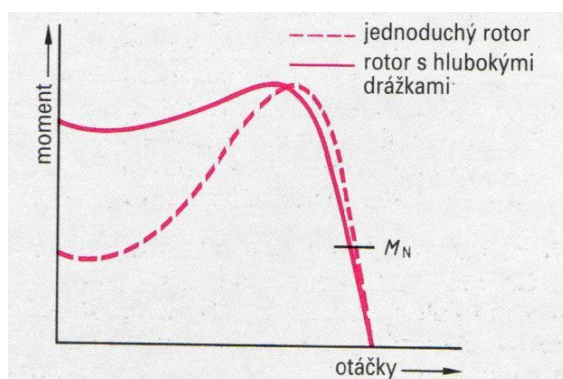
Obr. 17 Vytlačování proudů (rotor s dvojitou klecí)



Zdroj: [7]

Motor s tímto druhem rotoru má větší hodnotu činné složky odebíraného proudu a menší fázové zpoždění rotorových proudů za průběhem magnetického toku a tím také větší silové účinky [7]. Záběrný moment (obr. 18) tohoto motoru je výrazně příznivější než u rotoru s tyčkami kruhového průřezu [7].

Obr. 18 Průběh točivého momentu u dvou různých konstrukcí rotoru



Zdroj: [7]

Podobného efektu a výhodných vlastností jako u drážek pro dvojitou klec lze dosáhnout použitím různých tvarů hlubokých drážek [7].

2. Problematika poruch asynchronních motorů

Poruchy asynchronních motorů mohou být způsobeny závadou mechanické části nebo elektrické části stroje. V mnoha případech dojde k poruše stroje kombinací těchto závad, kdy mechanické poškození způsobí poškození elektrické části stroje a naopak.

Příčinou závad mechanických částí bývá v mnoha případech zanedbaná údržba (kontrola stavu ložisek, mazání) a nevhodná konstrukce stroje nebo nesprávné použití např. přetěžování, nevhodný typ stroje atd.

Závady elektrických částí stroje (vinutí) jsou často důsledkem špatného stavu elektrického vedení, nevhodným způsobem spouštění a jištění. Relativně nízká investice do vhodného jištění a spouštění může ušetřit náklady na opravy nebo výměnu motoru i ztráty způsobené prostojem stroje.

2.1 Závady mechanických částí asynchronního motoru

Při provozu asynchronního motoru dochází k degradaci mechanických částí (stator, rotor s hřídelí, ložiska, ložiskové štíty, ventilátor a kryt ventilátoru).

„Různé kombinace strojních součástí jejich provozního namáhání a dalších vlivů a procesů mají za následek vznik a rozvoj různých druhů degradace strojních součástí:

- opotřebení
- koroze
- otlačení
- deformace
- trhliny a lomy
- ostatní poškození“ [8].

Uvedené druhy představují nejčastější základní případy [8].

2.1.1 Opotřebení strojních součástí

„Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává“ [8].

Při opotřebení dochází k odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z povrchu součásti, mechanickými účinky působících sil, které jsou někdy doprovázeny i jinými vlivy

(chemické nebo elektrochemické) [8]. „Opotřebení se podle ČSN 01 50 50 rozděluje na šest základních druhů (adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační)“ [8].

Zmiňované druhy opotřebení označují pouze základní případy [8]. „V technické praxi se obvykle jednotlivé druhy kombinují, jeden druh přechází v jiný, uplatňují se další vlivy, takže vzniká řada variant“ [8].

Uvedené typy opotřebení se vyskytují v menší nebo větší míře u asynchronních motorů. Kavitační opotřebení se vyskytuje hlavně u čerpadel a částí hydraulických systémů.

Adhezivní opotřebení se nejčastěji vyskytuje v případech, kdy dochází ke smýkání dvou tuhých těles, přitlačovaných k sobě normálovou silou [8]. „Následkem toho dochází k jejich dotyku, k porušování povrchových absorpčních a oxidových vrstev a k vzniku adhezivních mikrospojů, které jsou vzápětí rozrušovány. Na vznik a průběh adhezivního opotřebení mají vliv zejména tyto faktory:

- hloubka vnikání a poloměr zakřivení povrchových mikronerovností
- velikost zatížení a rychlost relativního pohybu
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje“ [8].

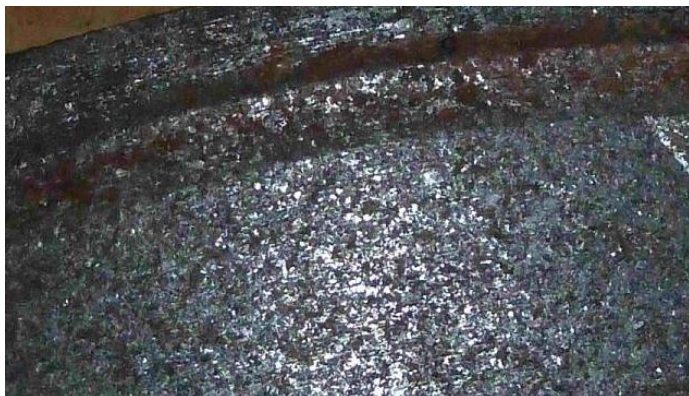
V provozu se často vyskytuje případ, kdy opotřebení součásti začne probíhat jako adhezivní a zvyšující se vůle, případně zhoršené podmínky mazání umožňují vznik volných otěrových částic [8]. Tyto částice působí jako abrazivo a součást je dále opotřebována i abrazivně [8]. Adhezivní opotřebení se často vyskytuje u ložiskových štítů motoru a hřídelí. Opotřebení lze zmírnit mazáním součástí.

Motory s většími osovými výškami a motory v těžších provozech bývají vybaveny maznicemi na ložiskových štítech, které umožňují přimazání bez nutnosti demontáže. V modernějších provozech jsou motory často vybaveny automatickými mazacími lisami nebo jsou připojeny na centrální mazací soustavy. Malé motory jsou namazány trvalou mazací náplní (vazelínou), která má za normálních provozních teplot životnost přibližně 200 000 provozních hodin. Tato životnost závisí na druhu provozu a provozních podmínkách.

Abrazivní opotřebení je typické pro případy, kdy se stýkají dva povrchy a při tom jeden nebo oba jsou drsné a tvrdé, dále v případě přítomnosti volných tvrdých částic mezi dvěma povrchy a v případě zpracovávání materiálu který obsahuje tvrdé částice [8].

Tento druh opotřebení se vyskytuje u ložiskových štítů, hřídelí a zejména u brzdového obložení, kterými jsou vybaveny brzdy brzdových motorů (obr. 19). Zmírnit opotřebení lze pravidelnou údržbou (mazání a odstranění volných částic čistícími prostředky).

Obr. 19 Abrazivní opotřebení brzdového obložení



Erozivní opotřebení je charakterizováno oddělením materiálu součásti účinkem:

- částic, nesených proudem kapaliny nebo plynu (vyskytuje se např. u čerpadel na znečištěné kapaliny, ventilátorů atd.)
- částic samotné kapaliny, páry nebo plynu [8].

Kavitační opotřebení „Je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu součásti v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině. Kavitační dutiny vznikají tehdy, sníží-li se změnou rychlosti nebo podmínek proudění tlak v určité oblasti kapaliny tak, že se dosáhne při dané teplotě tlaku nasycených par. V tom případě se začnou v kapalině tvořit malé dutinky, vyplněné párami kapaliny“ [9]. V některých případech, změnou chemického prostředí nebo zavedením elektrického napětí na části hydraulických strojů je možné účinky kavitace omezit [9]. Tento druh opotřebení často postihuje oběhová kola čerpadel a tlakově mazaná ložiska [8].

Únavové opotřebení „je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích. Dosahují-li tato napětí hodnot nad mezí kluzu, jde o nízkocyklovou únavu, jsou-li pod mezí kluzu, jde o vysokocyklovou únavu“ [8].

Únavové opotřebení se často vyskytuje u valivých ložisek vznik a průběh je závislý na provozních podmínkách. Při výměně ložisek je výhodnější použít kvalitních výrobků.

Vibrační opotřebení „Je charakterizováno oddělením částic a poškozením povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů těles při působení normálního zatížení“ [9]. Tento druh opotřebení často postihuje valivá ložiska, čepy, hřídele a nalisovaná spojení (řemenice, spojky atd.) [8].

2.1.2 Koroze

Koroze je trvalá změna povrchu materiálu, která je způsobena elektrochemickými a chemickými vlivy okolního prostředí [8]. Podle mechanismu korozivních procesů je korozi možné dělit na chemickou a elektrochemickou korozi [8].

Elektrochemická koroze je nejčastější a lze si jí zjednodušeně představit jako proces probíhající v galvanickém článku [8]. Proces koroze může probíhat všude, kde dochází ke styku různých kovů za přítomnosti elektrolytu (dostačující je vzdušná nebo kondenzační vlhkost) [8].

Z hlediska vzhledu je možné korozi dělit na rovnoměrnou a nerovnoměrnou [8]. Podle prostředí lze korozi dělit na půdní, ve vodě, v plynech a atmosférickou, která se vyskytuje nejčastěji [8].

Koroze může často vyvolat poškození motoru, ale i znesnadnit demontáž jednotlivých částí (šrouby, řemenice, příruby, ložiskové štíty, ventilátory). Při demontáži je vhodné použít uvolňující prostředky (WD-40, SPARK atd.). Při demontáži řemenice je vhodné použít trojramenný stahovák, aby se snížilo riziko možnosti poškození řemenice.

Koroze v mnoha případech postihuje ložiska (obr. 20) a může vést až k neschopnosti se otáčet a spálení motoru. Předcházet tomuto jevu lze pravidelnou výměnou maziva.

Kostra motoru je masivní, ale části vyrobené z tenčích materiálů jako jsou kryty ventilátorů (obr. 21) a kryty svorkovnic mohou za relativně krátkou dobu dle prostředí ztratit svojí schopnost kryt pohyblivé části v případě krytů ventilátorů nebo části pod elektrickým napětím v případě krytů svorkovnic. Oba případy mohou nejen ohrozit samotný provoz stroje, ale i obsluhu zařízení.

Obr. 20 Ložisko opotřebené korozí



Obr. 21 Kryt ventilátoru



2.1.3 Otláčení

„Otláčení je trvalá nežádoucí změna povrchu, způsobená vnějšími silami“ [8]. K této nežádoucí změně dojde za předpokladu, že kontaktní tlak překročí mez kluzu materiálu povrchové vrstvy [8].

Technické kovy lze považovat za objemově nestlačitelné, proto při otláčení působením kontaktního tlaku dojde k toku materiálu z místa působení tlaku [8]. Tato skutečnost má za následek, že se materiál neubývá, ale přemisťuje se a vytváří valy okolo místa působení tlaku [8]. „To má v technické praxi zpravidla za následek změnu vůlí v daném spojení, čímž může být vyvoláno např. zvýšené opotřebení nebo lomy v důsledku rázů [8].

2.1.4 Deformace

„Deformace je trvalá nežádoucí změna geometrického tvaru součásti“ [8]. K této nežádoucí změně dojde, překročí-li napětí v některém průřezu součásti mez kluzu [8]. Deformace je vzácná u křehkých materiálů, protože zde už poměrně malé deformace vedou k překročení meze pevnosti [8]. „Napětí vedoucí k deformaci může být způsobeno vnějšími nebo vnitřními silami“ [8].

Deformace může také vzniknout změnou rovnováhy vnitřních pnutí např. v důsledku stárnutí materiálu, který obsahoval vnitřní pnutí, jako důsledek působení zvýšených teplot, nebo jako následek opotřebení, kterým je odstraněna povrchová vrstva materiálu s koncentrovaným napětím [8].

Deformace se u motorů vyskytuje hlavně u součástí z ocelového plechu a plastu (kryty ventilátoru, ventilátor). Litinová kostra statoru a hřídel jsou z důvodů křehkosti materiálů ze kterých jsou vyrobeny náchylnější ke vzniku trhlin a lomů.

2.1.5 Trhliny a lomy

„Trhlina je porušení homogenity materiálu v části průřezu. Lom je porušení homogenity materiálu v celém průřezu“ [8].

„Příčiny vzniku trhlin a lomů jsou stejné jako u otláčení a deformací, tj. působení vnějších nebo vnitřních napětí, které v části průřezu, popř. v celém průřezu překročí mez pevnosti nebo mez únavy materiálu“ [8]. Vlivy ovlivňující vznik lomu:

- „nevhodná konstrukce (nevhodný tvar nebo rozměry)
- nevhodný materiál (nedostatečně pevný nebo nedostatečně houževnatý)

- nevhodná technologie výroby (zbytkové pnutí, vruby)
- nesprávný provoz (přetěžování, zanedbávání údržby)
- časové změny vlastností materiálu (stárnutí, koroze, únava materiálu)“ [8].

Trhliny se často vyskytují především u odlitků, u svařenců a u tepelně zpracovaných součástí [8]. Trhliny mají za následek snížení pevnosti součástí, působí netěsnosti a u součástí namáhaných dynamicky vedou k vzniku únavových lomů [8].

Lomy lze rozdělit na lomy statické (křehké nebo houževnaté) a lomy únavové [8].

Lom statický „vznikne tehdy, je-li překročena mez pevnosti materiálu v některém průřezu. Vzhled lomové plochy statického lomu se mění podle vlastností materiálu a způsobu namáhání. Nejčastěji dochází k lomům vyvolaným ohybovým namáháním. Lomová plocha takového statického lomu je přibližně rovinná a kolmá na směr napětí. Její povrch je zrnitý, drsný, hrubší nebo jemnější v závislosti na velikosti zrna materiálu. Vzhled celé lomové plochy je stejný (nedojde-li k druhotnému poškození lomové plochy např. vzniklými rázy)“ [8].

Lomem statickým je často poškozena kostra motoru, ložiskové štíty (obr. 22), příruby, patky a ostatní součásti vyrobené z litiny a jiných křehkých slitin, toto poškození je často neopravitelné. V takových případech je nutná výměna celé součásti. U starších motorů je náhrada často nemožná, protože tento díl nelze pořídit.

Obr. 22 Příruba motoru poškozená lomem statickým



Lom únavový, vznikne tehdy, je-li překročena mez únavy materiálu. V místě povrchu, kde dochází ke koncentraci napětí, vznikne po určitém počtu cyklů zárodek trhliny. Pokračujícím proměnlivým zatížením se střídavě "otevívá" a "zavírá" a šíří se do hloubky materiálu. Tímto otevíráním a zavíráním se povrchy vyhladí až vyleští, dostávají typický lasturovitě vyhlazený vzhled. Jak se tato únavová oblast vznikajícího lomu rozšiřuje, zmenšuje se nosný průřez součásti až napětí vyvolané okamžitým zatížením překročí mez pevnosti a součást se ve zbývajícím průřezu zlomí statickým lomem. Lomová plocha únavového lomu má tedy dvě typické, vzhledově odlišné oblasti:

- únavovou, s lasturovitě vyhlazeným povrchem
- statickou, s typickým drsným povrchem křehkého lomu „ [8].

Na vznik trhlín u oceli mají největší vliv metalurgické a výrobní faktory:

- Velikost zrna: jemnější zrno je více odolné proti křehkému lomu než hrubé, ale zvyšuje mez kluzu [10]. U oceli válcované za tepla je velikost zrna ovlivněna mnoha vlivy (chemické složení, způsob válcování, konečná tloušťka výrobku atd.) [10].
- Chemické složení: pro dosažení určité meze pevnosti se přidává mangan Mn [10]. Přičemž se snižuje náchylnost ke křehkému lomu [10].
- Stárnutí oceli: „stárnutí a jeho vliv na zkřehnutí je zejména důležité v souvislosti s tavným svařováním, zde je zkřehnutí v přechodové oblasti způsobeno stárnutím po rychlém ochlazení z teplot pod $AC1 \approx 720^\circ C$ “ [10].
- Tváření za studena: některé výrobní operace (ohýbání, kování, stříhání atd.) zpevňují ocel a mohou vést ke zkřehnutí, které způsobuje deformační stárnutí [10].
- Tepelné zpracování: „normalizační žihání, kalení a popouštění na odstranění zbytkového napětí obvykle zvyšují odolnost proti křehkým lomům“ [10].
- Svařování: je častá příčina vzniku křehkých lomů [10].
- Zbytková napětí: jednoosá zbytková napětí, neovlivňují zkřehnutí materiálu, ale mohou způsobit, že k lomu dojde za nižší velikosti napětí vlivem vnějšího zatížení [10].

Obr. 23 ukazuje lomy hřídele rotoru, jsou patrné oblasti lomu statického označené „A“ a únavového oblast „B“.

Obr. 23 Zlomená hřídel motoru (lom únavový)



2.2 Poškození vinutí motoru

Elektrické poruchy jsou často zaviněny vadným jištěním, špatným spínáním stykačů, vypínačů a jiných spouštěcích zařízení [11]. Častým případem je spálení vinutí trojfázového asynchronního motoru u domácí vodárny se samočinným spínáním, dojde-li k přerušení přívodu jedné fáze (např. při bouřce) [11]. Při chodu na dvě fáze se motor nerozběhne a nevypne-li jistící prvek včas může dojít k zničení vinutí [11].

„Jiné poruchy nastávají rychlým zestárnutím izolací, ať už přehříváním stroje nebo jeho navlhnutím“ [11]. V případě tohoto poškození dochází k proražení izolace mezi fázemi navzájem nebo proti kostře [11]. Při poškození izolace vodičů mohou vzniknout závitové zkraty [11].

Závitové zkraty v cívkách patří mezi nejčastější poruchy elektrických strojů [11]. K těmto zkratům dochází při přetěžování vodičů větším proudem, než je udáván na štítku [11]. Další příčinou závitového zkratu jsou skryté vady materiálu, které vznikají při zpracování vodiče nebo při vlastním zhotovení vinutí [11].

Závady lze dělit na závady při rozběhu (vzniklé nebo rozpoznatelné) (tab. 1) a závady vzniklé nebo rozpoznatelné při běhu motoru (tab. 2) v tabulkách je uveden typ závady, místo závady a způsob vyhledávání závad. Vzhledem k tomu, že poruchy motoru jsou často způsobeny závadou elektrické části i mechanické často jsou v tabulkách uvedeny i vybrané typy mechanických závad.

Tab. 1 Závady při rozběhu motoru

Typ závady	Místo závady	Vyhledávání závady
Otáčky motoru při zatížení klesají	- chod na dvě fáze	- zkontrolovat napětí sítě
		- zkontrolovat přívod a pojistky
		- zkontrolovat stykač a svorky na svorkovnici
		- zkontrolovat odpory vinutí
	- vytavení klece motoru	- zkontrolovat klec
	- nízké napětí sítě	- změřit napětí sítě
	- chybné zapojení statorového vinutí	- zkontrolovat zapojení statorového vinutí
Motor se nerozbíhá a je zcela tichý	- přetížený motor	- změřit příkon motoru
	- síť bez napětí	- změřit napětí v rozvaděči
	- motor bez napětí	- změřit napětí na motoru
	- vadné pojistky	- zkontrolovat pojistky
	- stykač nezapíná	- zkontrolovat stykač
	- přerušené vinutí	- změřit odpory vinutí
	- přerušený přívod	- zkontrolovat obvod přívodního kabelu
Motor se nerozbíhá a slabě mručí	- pokles napětí v síti	- změřit napětí sítě
	- zapojení Y místo D	- zapojit stator do D
Motor se nerozbíhá a silně bručí	- vyřazena jedna fáze	- zkontrolovat přívody a pojistky
		- změřit odpory vinutí
		- zkontrolovat připojení přívodu ve svorkovnici
	- velký pokles napětí	- zkontrolovat napájecí napětí
	- zadřená ložiska	- zkontrolovat volné pootáčení rotoru
- přetížení poháněným strojem	- zkontrolovat vhodnost použitého motoru	
Motor se při rozběhu spouštěčem rozbíhá trhavě	- opálené kontakty spouštěče	- zkontrolovat kontakty spouštěče
	- přerušené spoje ve spouštěči	- zkontrolovat odpor spouštěče
Motor má nízké otáčky a malý moment	- nízké napětí	- zkontrolovat napětí sítě
		- zkontrolovat kontakty spouštěče
	- velké přetížení	- prověřit vhodnost motoru
	- přehozený začátek a konec jedné fáze	- zkontrolovat zapojení jednotlivých fází statorového vinutí
	- závitový zkrat ve statoru	- ověřit možnost závitového zkratu ve statoru
	- vytavená klec	- zkontrolovat klec
- zapojení Y místo D	- zkontrolovat zapojení statorového vinutí	
Motor odebírá zvětšený proud, statorové vinutí se na některých místech přehřívá, nesymetrické proudy, zmenšený moment	- zkrat ve statorovém vinutí	- změřit odpory statorového vinutí
		- ověřit možnost závitového nebo mezifázového zkratu ve vinutí statoru

Zdroj: [5].

Tab. 2 Závady za chodu motoru

Typ závady	Místo závady	Vyhledání závady
Otáčky motoru při zatížení klesají	- chod na dvě fáze	- zkontrolovat napětí sítě
		- zkontrolovat přívod a pojistky
		- zkontrolovat stykač a svorky na svorkovnici
		- zkontrolovat odpory vinutí
	- vytavená klec motoru	- zkontrolovat klec
	- nízké napětí sítě	- změřit napětí sítě
Motor se za provozu nadměrně ohřívá, současně se zvětší skluz	- přetížený motor	- změřit příkon motoru
	- snížené nebo zvýšené napětí v síti	- změřit napětí sítě
	- chybné zapojení vinutí	- zkontrolovat odpory a zapojení včetně začátků a konců vinutí statoru
	- velká vzduchová mezera po opravě	- prověřit velikost vzduchové mezery
	- přerušena jedna z paralelních větví vinutí statoru	- změřit odpor statorového vinutí
	- zhoršená ventilace	- vyčistit motor, odstranit ventilační překážky
	- chod na dvě fáze	- změřit napětí motoru, změřit odpor vinutí
	- vnitřní zkrat ve statoru	- ověřit možnost závitových zkratů statoru
	- zkrat plechů navzájem	- provést frekvenční analýzu napájecího proudu
Proud motoru kolísá při stálém zatížení	- přerušené tyče nebo kruhy rotoru nakrátko	- provést frekvenční analýzu napájecího proudu
Z motoru vystupuje kouř a zápach	- motor je přehřátý	- stejný postup, jako při nadměrném zahřívání
	- vnitřní zkraty	- ověřit možnost závitových zkratů
	- rotor dře o stator	- zkontrolovat volné otáčení rotoru
	- zadřená ložiska	- zkontrolovat hluk motoru
Motor silně hlučí, po odpojení od sítě hluk okamžitě zmizí	- elektromagnetická příčina závady	- zkontrolovat hluk motoru
	- excentricita vzduchové mezery	- zkontrolovat volné pootáčení rotoru
	- nesouměrné magnetické stavy	- prověřit velikost vzduchové mezery
	- axiální posunutí statorového a rotorového svazku	- zjistit excentricitu vzduchové mezery z frekvenční analýzy proudu
		- změřit kmitání a provést frekvenční analýzu, prověřit možné zdroje magnetické nesymetrie (ohnutá hřídel, ložiska, nepřesnosti ve vzduchové mezeře)
		- proměřit mechanické rozměry svazku

Zdroj: [5].

3. Opravy asynchronních motorů

3.1 Mechanické opravy asynchronních motorů

Při opravě mechanických částí asynchronních motorů je nutné pečlivě zvážit, zda lze poškozenou součást opravit, nebo je nutná z důvodů bezpečnosti a funkčnosti celku výměna. V mnoha případech je nutné posoudit z hlediska časové a finanční náročnosti zda zvolit výměnu nebo opravu.

Během demontáže je nutné použít odpovídající vybavení a náradí, aby nedošlo k většímu poškození opravované součásti, nebo dalších částí motoru.

3.1.1 Opravy statoru

U statoru se nejčastěji vyskytují uvolnění statorového svazku, zkraty na svorkovnici a drobné mechanické závady kostry [5].

Uvolnění statorového svazku (pólů v kostře) není časté, ale přesto se v praxi vyskytuje jako následek předcházející poruchy, zvýšenými vibracemi z důvodů nevyváženého rotoru, špatného spojení spojkami, malé tuhosti zařízení atd. [5].

Při opravě je nutné statorový svazek demontovat z kostry po odvrtání zajišťovacích kolíků [5]. „Vnitřní průměr kostry se přesoustruží, na vnější průměr svazku se navaří a opracují ocelové pásy o počtu shodném s počtem svazkových spon“ [5]. Takto opracovaný svazek se nalisuje a zajistí v kostře [5].

Při uvolnění pólů musí dojít k jejich utažení [5]. V případě, že není uchycení ani po dotažení dostačující, je nutné opravit závitovými vložkami (např. výrobky firmy NAREX nebo BÜLLHOFF) [5]. Poškozený závit se přeřeže na tzv. lůžkový závit, do kterého je vložena pomocí přípravku závitová vložka [5]. Tato vložka vytvoří v součásti přesný vnitřní závit, který odpovídá původním rozměrům [5]. „Vzhledem ke kvalitě základního materiálu a celkového zpracování je obnovený závit mechanicky pevnější než původní“ [5]. Vložky lze použít k zvýšení únosnosti závitu v materiálech z lehkých slitin [5].

Zkrat na svorkovnici vede často kromě utavení silových vývodů a kabelových ok, které je nutné vyměnit, také k poškození svorkové desky [5]. Lisované svorkové desky se vyměňují za nové [5]. V případě náhrady za neoriginální svorkovou desku je nutné použít substitut, který je dimenzovaný na procházející proud. Je nutné zkontrolovat výšku svorek, aby se nedotýkaly krytu svorkovnice.

Drobné mechanické závady kostry jsou nejčastěji způsobeny při manipulaci se strojem [5]. Kostra motoru je většinou vyráběna z litiny nebo slitin hliníku. Křehkost těchto materiálů má za následek výskyt statických lomů (uražení patek, uražení žeber). Drobné závady se opravují svařováním. V případě provedení motoru, který má patky přichyceny ke kostře motoru šrouby lze patky vyměnit. Stržené závity lze opravit použitím závitových vložek, nebo převrtáním na vyšší rozměr [5].

3.1.2 Opravy rotoru

Hlavní druhy oprav u rotoru jsou z důvodu prohnutí hřídele, zadření ložiskové plochy, abnormální opotřebení čepů, kuželovitost a oválnost čepů, zlomení hřídele a poškození drážky pero hřídele [5].

Prohnutí rotorové hřídele se v případě malých prohnutí odstraní, osoustružením a přibroušením hřídelových čepů, takto upravený hřídel je nutné dynamicky vyvážit [5]. V případě, že je prohnutí velké a nelze odstranit třískovým obráběním je nutné rovnat hřídel pod lisem [5].

Poškozené ložiskové průměry a čepy jsou do určené tolerance opravovány broušením [5]. Při překročení této tolerance je nutné plochy průměrově zmenšit soustružením až o 0,2 až 0,4 mm a elektrochemickou reakcí na upravené plochy nanést tvrdochrom [5]. Pokovené plochy je nutné přebrousit na požadovaný rozměr [5].

Zlomená hřídel a poškození drážky v případě tohoto poškození je nutná výměna celého rotoru nebo hřídele. Při výměně hřídele je nejprve poškozená hřídel vylišována a nahrazena novou. Při kusové výrobě hřídele je nutné dodržet předepsané parametry oceli a technologické postupy při výrobě.

3.1.3 Opravy a ošetření ložisek

Asynchronní motory jsou opatřeny valivými ložisky (kuličková a válečková). Válečková mají schopnost přenášet velké radiální síly, proto jsou používána u pohonů s řemenicemi nebo ozubenými koly.

Poruchy valivých ložisek jsou v mnoha případech způsobeny nedostatkem tuku nebo použitím nevhodného maziva [5]. Typ tuku, množství a intervaly doplnění nebo výměny tuku jsou předepsány výrobcem [5]. „Výběr vhodného ložiskového tuku závisí na otáčkovém faktoru, který je součinem otáček stroje n_s a středního průměru ložiska d_s , teplotnímu

rozsahu použití a odolnosti vůči vnějším vlivům (např. vodě, benzínu atd.)“ [5]. Velmi důležitá je správná dávka maziva [5]. Malé množství je při provozu snadno vytěsněno z vnitřního prostoru ložiska a to se z důvodů nedostatečného mazání zahřívá [5]. Při velkém množství tuku má ložisko velký valivý odpor, který má za následek přehřívání ložiska a tím i degradaci tuku [5].

Vážná poškození způsobuje nečistota, která se dostane do stykových ploch ložisek a během provozu mohou tvrdší částice způsobovat abrazivní opotřebení [5]. Z těchto důvodů je nutná při výměně tukové náplně hlavně čistota [5].

Při delším provozu se u ložisek na oběžných drahách objevují plošky, které jsou způsobeny otlačením a rytmickým pohybem [5]. Tato opotřebení se projevují rázy, zvětšením tření a zahřátí [5].

Poškozená ložiska se neopravují, ale jejich životnost lze prodloužit pečlivou údržbou (výměnou tukové náplně, seřízením vůle od přidruženého zařízení atd). Při výměně je nutné použít, jak pro demontáž tak následnou montáž vhodného lisu, aby nedošlo k poškození hřídele a nového ložiska.

3.1.4 Ložiskové štíty a příruby

Většina povrchových poškození vzniká neopatrnou manipulací, vážná poškození vyžadují výměnu celé části, protože oprava je velmi problematická z důvodů přesnosti. U vnitřních stykových ploch s ložiskem části vzniká opotřebení adhezivní a v případě přítomnosti ostrých tvrdých částic opotřebení abrazivní. Takto poškozenou část je možné vysoustružit a opatřit vhodnou vložkou. I v tomto případě platí, že pečlivá údržba (včasná výměna vadného ložiska, čistota atd.) může výrazně prodloužit životnost součástí.

3.1.5 Povrchová ochrana

Nejen z estetických důvodů, ale i jako ochranu před korozí je vhodná povrchová ochrana částí motoru. Nátěr se provádí po úplné opravě a při volbě nátěru je nutné brát v úvahu typ prostředí, kde bude zařízení provozováno [5]. Pro dobrou přilnavost a funkčnost nátěru je nutné znát skladbu původního nátěru [5].

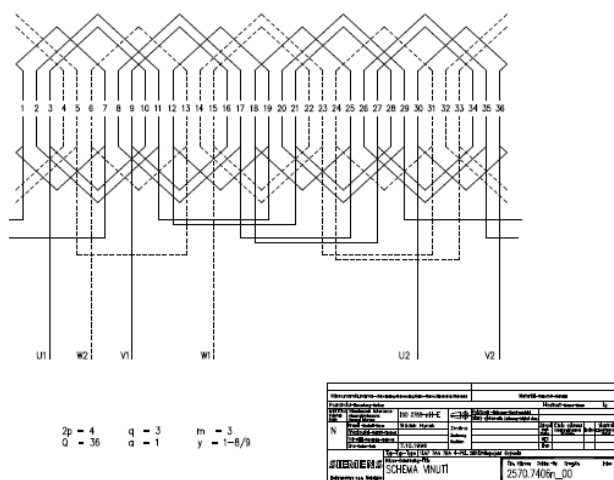
3.2 Opravy vinutí asynchronních motorů

3.2.1 Odstraňování starých vinutí

Před vlastním odstraňováním starého vinutí je nutná demontáž motoru (ložiskové štíty, svorkovnice, rotor). V případě, že má být převinut motor u kterého není k dispozici potřebná dokumentace je nutné zdokumentovat co nejvíce parametrů od údajů na štítku (typ motoru, výkon, napětí) až po mechanické jako typ vinutí počet drážek, průměr vodiče, délka svazku, počet vodičů v drážce atd. [5].

Příklad schématu vinutí motoru 1LA7106-4AA10 získaného od výrobce (obr. 24) ukazuje, že jsou zde uvedeny základní údaje o vinutí, ale chybí údaj o počtu paralelních vodičů a jejich průměru. Tyto údaje jsou často jen v kompletní dokumentaci k danému typu motoru. Z daného schématu lze pouze vyčíst druh vinutí, počet pólových dvojic $2p = 4$, počet drážek $Q = 36$, počet drážek na pól a fázi $q = 3$, počet fází $m = 3$ a cívkový krok $y = 1-8/9$.

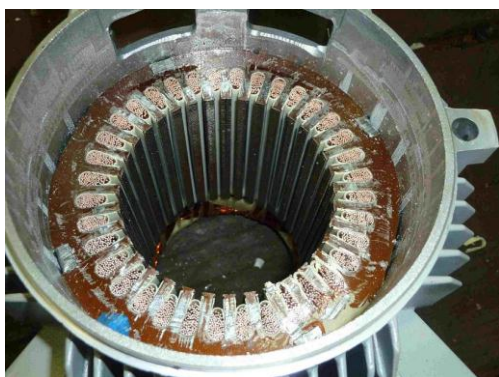
Obr. 24 Schéma vinutí motoru 1LA7106-4AA10 společnosti Siemens, s.r.o.



Zdroj: [12].

V případě, že je vše potřebné zaznamenáno nebo se jedná o typ ke kterému je dostupná dokumentace je možné započít s odstraňováním starého vinutí. Čela cívek z jedné strany je výhodné odstranit co nejdříve k drážce (obr. 25). Odstranění se provádí sekáčkem z dřeva, pilkou na kov nebo jiným způsobem v závislosti na velikosti a konstrukci motoru [5].

Obr. 25 Stator po odsekání čela cívek



Drážky motoru musí být čisté, ale zároveň nesmí dojít k jejich poškození, proto je v mnoha případech nutné odstranit izolaci a tím i uvolnit vodiče v drážkách termochemickou cestou např. vyvařením v roztoku Alkon [11]. Roztok a dobu působení volíme v závislosti na materiálu magnetického obvodu a druhu izolace [11].

Po odstranění izolace a starého vinutí je nutné zkontrolovat stav drážek a v případě jejich deformace je opravit [11]. Stator je nutné vyčistit proudem vzduchu a zkontrolovat čistotu drážek [11]. Působením chemikálie dochází k poškození vnějšího nátěru motoru, proto je vhodné očistit i stator z vnější strany pro případ pozdější povrchové úpravy. Při konečné povrchové úpravě je nutné použít nátěry s ohledem na druh prostředí, kde bude motor provozován.

3.2.2 Izolování drážek

Drážky je nutné izolovat pouze na vyčištěném statoru [11]. „izolace drážek musí vyhovět těmto požadavkům:

- Po elektrické stránce musí vydržet zkušební napětí dané normami.
- Po mechanické stránce musí mít předepsanou pevnost“ [11].

Dříve se používala drážková elektrotechnická lepenka o tloušťce 0,35 až 0,8 mm v závislosti na velikosti motoru, ale v dnešní době se s ní můžeme setkat pouze u starších opravených motorů [5].

V současné době se nejčastěji používá elektroizolačních materiálů, složených z několika vrstev (dvě až tři) [5]. Vrstvy jsou z různých materiálů a díky vhodné kombinaci materiálů lze dosáhnout vyšší izolační i mechanické pevnosti při menší tloušťce materiálu [5]. Základem většiny izolací je polyethylentereftalátová (PET) folie v kombinaci s různými materiály (polyesterová rohož, elektrotechnická lepenka atd.) [5].

Typ drážkové izolace a tzv. měsíčku pro oddělení cívek jednotlivých fází v čelech se volí podle maximální provozní teploty (třídy teplotní odolnosti) [5]. Tyto teplotní třídy se podle ČSN 34 0270 označují velkými písmeny Y, A, E, B, F H a C v tomto pořadí od nejnížší mezní teploty po nejvyšší [5].

V dnešní době je nejpoužívanější teplotní třída B (130 °C) a F (155 °C) [5]. Typ použité tepelné třídy izolace bývá uveden na štítku motoru [5]. V případě nového motoru Siemens 1LA7106-4AA10 je teplotní třída F, u převíjeného je shodně použita třída F. Doporučovaným materiálem je pro tuto třídu materiál NE nebo NEN [5]. Jedná se o PET folii polepenou buď jednostranně (NE) nebo oboustranně (NEN) [5]. Tato izolace se vyrábí v tloušťkách od 0,2 do 0,4 mm a v různém poměru tloušťky PET folie k celkové tloušťce izolace [5].

Izolace jsou stříhány na požadovaný rozměr pákovými nůžkami [5]. Délka izolace musí být delší než svazek přibližně o 5 až 15 mm (obr. 26) [5]. Při stříhání je výhodná zároveň nastříhat vkládací vložky (u dvouvrstvého vinutí) a uzavírací vložky [5].

Obr. 26 Izolace drážek



3.2.3 Navíjení cívek a jejich vkládání do drážek

3.2.3.1 Vodiče na vinutí

Vodiče používané při opravách motorů jsou nejčastěji vodiče měděné [11]. V některých případech, převážně pro pomocná vinutí jednofázových asynchronních motorů, se používají vodiče z mosazi, konstantanu nebo nikelinu [11]. Dříve se používalo na vinutí statorů i hliníkových vodičů.

Vodiče používané pro vinutí motorů musí být izolované, aby z nich mohly být navinuty cívky [11]. Nejvíce jsou používané vodiče, na které je strojově nanášena vrstva laku, která se vytvrzuje při teplotě přibližně 180 °C, podle druhu laku [11]. Vytvrzením laku vznikne na vodiči měkký smalt, který je odolný elektrickému i mechanickému namáhání (do určeného rozsahu) [11]. Smaltované vodiče jsou značeny dle normy ČSN 34 7325 [11].

Při převíjení motorů je často nutné nahradit z mnoha důvodů jeden vodič několika paralelními vodiči, aniž by došlo ke změně velikosti průřezu původního vodiče [11]. V tab. 3 jsou uvedeny příklady kombinací jak nahradit dva, tři, i čtyři vodiče jedním vodičem a obráceně. V případě, že není vodič uveden v tabulkách pro přepočítání, lze použít činitel pro přepočítání, který je pro dva paralelní vodiče 0,71 a pro tři 0,58 (má-li být zachován původní poměr vodiče), a činitelem vynásobíme původní průměr vodiče [11]. Při přepočtu použijeme toto značení:

- d_v průměr původního vodiče
- d'_v průměr paralelního vodiče
- k_2 činitel pro dva paralelní vodiče
- k_3 činitel pro tři paralelní vodiče [11].

Uvedené příklady se vztahují k převíjenému motoru Siemens 1LA7106-4AA10.

Při nahrazování jednoho vodiče o průměru 0,950 mm dvěma vodiči postupujeme následovně:

$$d'_v = d_v k_2 = 0,950 \cdot 0,71 = 0,6745$$

Vodič průměru 0,950 mm lze nahradit dvojicí vodičů 0,67 mm, výsledek lze zkontrolovat v tabulce č. 3.

Touto dvojicí vodičů je navinut továrně navinutý elektromotor Siemens 1LA7106-2AA10. Protože nemáme vždy vodiče tohoto průřezu k dispozici volíme při převíjení kombinaci, při které nedojde k podstatné změně průřezu vodiče. Dvojici vodičů průměru 0,67 mm (průřez 0,35 mm²) o celkovém průřezu 0,7 mm² nahradíme vodiči průměru 0,6 mm (průřez 0,28 mm²) a 0,75 mm (průřez 0,44 mm²) což znamená, že původní průřez bude navýšen o zanedbatelných 0,02 mm².

Za běžných okolností není vhodné použít více než tři paralelní vodiče [11]. Možnost použití paralelních vodičů je výhodná z finančního hlediska, protože umožňuje snížit počet druhů skladovaných průřezů vodičů.

Tab. 3 Vodiče vinutí a jejich náhrada dvěma, třemi vodiči paralelními

Průměr (mm)	Průřez (mm ²)	Náhradní vodiče	
		Dvěma	Třemi
		průměru (mm)	
0,850	0,567	0,600 + 0,600	0,355 + 0,375 + 0,375
0,900	0,637	0,630 + 0,630	0,375 + 0,375 + 0,400
0,950	0,709	0,670 + 0,670	0,400 + 0,400 + 0,425
1,000	0,785	0,710 + 0,710	0,425 + 0,425 + 0,450
1,060	0,882	0,750 + 0,750	0,450 + 0,450 + 0,475
1,120	0,985	0,800 + 0,800	0,475 + 0,500 + 0,500
1,180	1,094	0,850 + 0,850	0,500 + 0,500 + 0,560
1,250	1,227	0,900 + 0,900	0,560 + 0,560 + 0,560
1,320	1,369	0,900 + 0,950	0,560 + 0,560 + 0,600
1,400	1,539	1,000 + 1,000	0,600 + 0,600 + 0,630

Zdroj: [11].

3.2.3.2 Krok vinutí

Krok vinutí může být plný nebo zkrácený a to o jednu nebo několik drážek [11]. Pro určení kroku vinutí je nutné znát počet drážek Q (36) a počet pólů čtyři ($2p$ pólových dvojic) [11]. Pro výpočet platí vztah:

$$y = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad [11].$$

Krok je vyjádřen jednoduchým číslem, v tomto případě $y = 9$, což představuje rozdíl pořadových čísel drážek, v nichž je cívka uložena, nebo údajem v kterých drážkách je první cívka nebo první cívková skupina uložena [11].

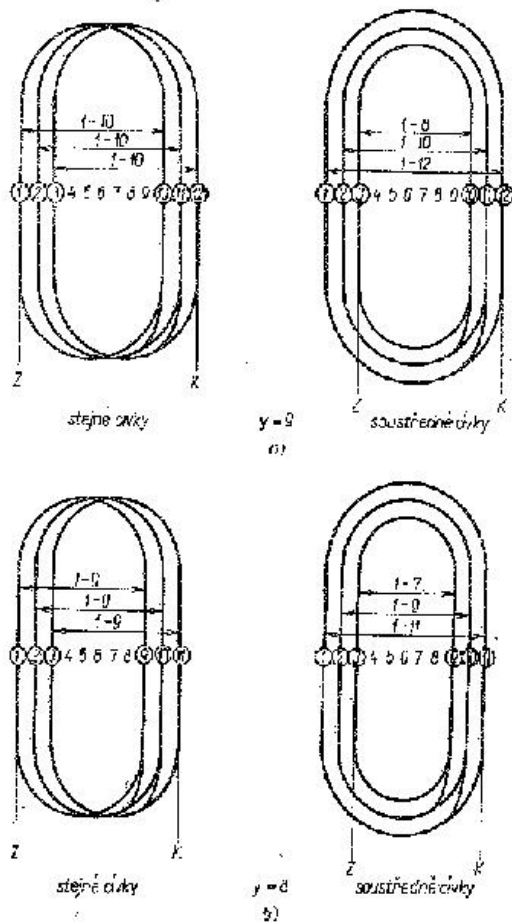
Druhý způsob je vhodný pro vinutí se soustřednými cívkami a symbol 1-8-10-12 znamená, že se jedná o soustředné vinutí rovnocenné třem cívkám s uložení skupiny cívek do drážek (obr. 27a) [11].

Krok lze v některých případech zkrátit přibližně na $4/5 t_p$, což lze vyjádřit činitelem zkrácení kroku $k_y = 0,8$. V našem případě by výsledný zkrácený krok byl $y' = 9 \cdot 0,8 = 7,2$, což zaokrouhlíme dolů na $y' = 7$ a cívka bude uložena do drážek 1 a 8 (obr. 27b) [11].

Počet cívek ve skupině podle počtu fází m lze určit dle vztahu:

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad [11].$$

Obr. 27 Uložení magneticky rovnocenných trojcívek



Zdroj: [11].

Cívky lze použít stejné a nebo soustředné cívky. Pro převinutí motoru 1LA7106-4AA10 s využití, jednovrstvého vinutí musí být pro převijáče uvedeny údaje $y = 9$, $q = 3$, a uložení je 1-8-10-12 (obr. 27a).

3.2.3.3 Určení počtu cívek podle počtu pólů

Počet cívkových skupin je závislý na způsobu vinutí (jednovrstvové soustředné, jednovrstvové rozložené nebo dvouvrtvové rozložené) [11]. Pro jednovrstvové vinutí platí, že má poloviční počet cívek, než kolik je drážek, oproti dvouvrtvovému, kde je počet cívek roven počtu drážek [11]. „Počet potřebných cívkových skupin pro dvouvrtvové vinutí vychází z počtu drážek statoru, které dělíme počtem drážek na pól a fázi, Q/q “ [11]. U jednovrstvových vinutí dělíme výsledný počet z Q/q dvěma, protože počet skupin je zde polo-

viční [11]. Počet cívkových skupin lze také dle druhu vinutí a počtu pólů určit z tabulky č. 4 [11]. Počet cívek ve skupině lze určit z tabulky č. 5 [11].

Tab. 4 Počet cívkových skupin v závislosti na druhu vinutí a počtu pólů

$2p$	Jednovrstvové	Dvouvrstvé nebo rozložené jednovrstvové
2	6	6
4	6	12
6	9	18
8	12	24
10	15	30
12	18	36

Zdroj: [11].

Tab. 5 Počet drážek na pól a fázi q ve vztahu k počtu drážek statoru Q

Počet pólů stroje $2p$	Počet drážek statoru Q						
	12	18	24	36	48	54	72
2	2	3	4	6	8	9	12
4	1	$1^d/$	2	3	4	$4^{1/2}$	6
6		1	$1^{1/3}$	2	$2^{1/3}$	3	4
8			1	$1^{1/2}$	2	$2^{1/4}$	3

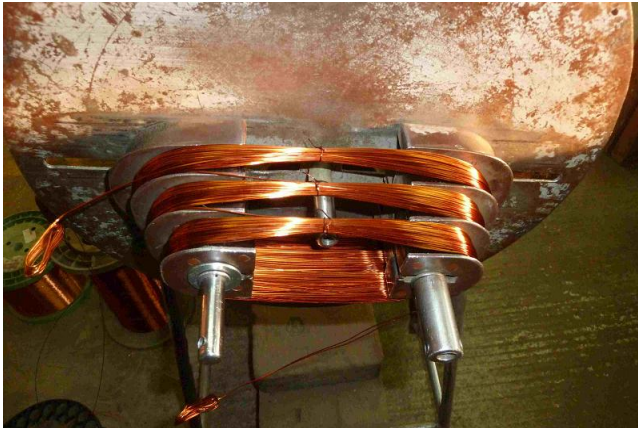
Zdroj: [11].

3.2.3.4 Zhotovení cívek a vsypávání do drážek

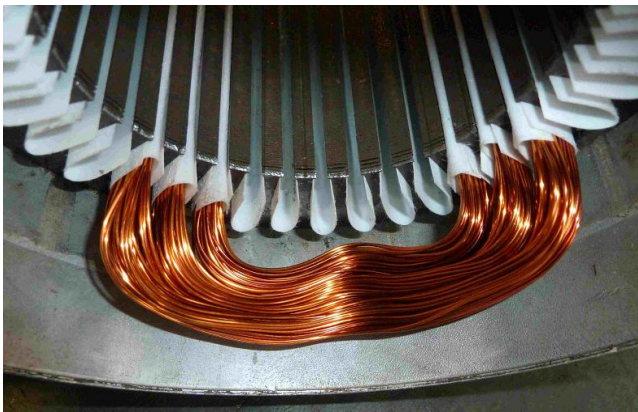
Cívky menších motorů vkládáme tzv. vsypáním, kdy se závitky neskládají přesně vedle sebe, ale při navíjení je nutné dbát co nejmenšího zkřížení [11]. Cívkové skupiny vytváříme najednou při využití šablony kruhového průměru a odměření potřebné délky cívek [11]. Navíjecí zařízení je vybaveno počítacím zařízením, které zaznamenává počet závitů [11]. Navinutá cívková skupina na navíječe (obr. 28).

Navinuté cívky a skupiny je nutné svázat drátky, aby držely před vložením do drážek tvar [11]. Během procesu vinutí a vkládání je nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k odření izolace vodiče a vsypání vodiče za izolaci drážek [11]. Na obrázku č. 29 je vsypána jedna cívková skupina do drážek motoru. Stejným postupem dochází k vsypání zbývajících skupin cívek. Na převinutí motoru bylo spotřebováno 2,7 kg mědi.

Obr. 28 Navinutá cívková skupina jednovrst. vinutí na šabloně kruhového průměru



Obr. 29 Vsypaná cívková skupina jednovrst. vinutí do drážek motoru



3.2.3.5 Prokládání čel vinutí a zapojení vinutí

Po umístění cívek do statorových drážek je nutné vložit mezi cívky nebo cívkové skupiny různých fází izolaci [11]. Nejčastěji je používána stejná izolace jako pro izolování drážek. Izolace je nazývána podle svého tvaru měsíček. Pruhy izolace jsou nastříhány pákovými nůžkami a ručními nůžkami jsou vytvořeny jednotlivé měsíčky.

Po vložení izolačních půlměsíčků je nutné zapojit vinutí. Vinutí může být zapojeno sériově, paralelně nebo sériově paralelně [11]. Cívky je nutné zapojit tak, aby vytvořily potřebný počet pólů [11]. „Začátky jednotlivých fází musí být od sebe vzdáleny o 120° (elektrických)“ [11]. Na konce a začátky jednotlivých fází je přivařen vodič s očkem a následně vyveden na svorkovnici.

Aby nedošlo k vysunutí cívky je nutné vinutí bandážovat. Bandáž je provedena bavlněnou tkanicí (obr. 30) [11].

Obr. 30 Bandáž cívek statoru



3.2.3.6 Impregnace vinutí a kompletace motoru

Poslední operace při převíjení vinutí je impregnace vinutí [5]. Impregnace vinutí má mnoho výhod, zvyšuje elektrickou a mechanickou pevnost vinutí, zlepšuje přestup tepla mezi vodiči a svazkem v drážce, zamezuje navlhání [5]. Impregnační laky mohou být s rozpouštědlem nebo bez rozpouštědla [5]. Jednotlivé skupiny jsou dále děleny podle teplotní odolnosti a použitelnosti pro jednotlivé třídy izolace [5]. Nejčastěji používané laky s rozpouštědlem jsou syntetické laky S 1921 a S 1914 pro teplotní třídu B, S 1942 pro teplotní třídu F [5]. K ředění je používáno ředidlo S 6904 [5]. Pro navíjený motor byl použit izolační lak S 1903 pro teplotní třídu F [5]. Impregnování lze provést:

Máčením, kdy je svazek ponořen do nádoby s impregnačním lakem (tento způsob byl použit u převíjeného motoru) s následným okapáním na sítu nad nádobou s lakem. Tento způsob je nejpoužívanější pro svoji jednoduchost.

Vakuově umístěním svazků do kotle, ve kterém se vytvoří vakuum a následně napustí impregnační lak. Tento způsob je nejdokonalejší, ale technologicky nejnáročnější.

Zakapáváním čel vinutí otáčejícího se svazku impregnačním lakem, do doby než pronikne do celého vinutí [5].

Naimpregnovaný stator je následně vysušen v peci po dobu od jedné hodiny do šesti hodin při teplotě od 80°C do 110°C podle použitého laku a výkonu pece.

Vysušený motor je zkompletován a vyzkoušen podle potřeby a požadavků zákazníka.

4. Porovnání elektrických vlastností motorů

4.1. Měření naprázdno

Před samotným měřením je nutné uvést potřebné štítkové údaje o motoru (tab. 6) pro srovnání s převíjeným motorem a nastavení hodnot souvisejících s jmenovitými hodnotami proudu atd.. Uvedené hodnoty jsou při jmenovitém výkonu, napájení 400 V, přímém spouštění a frekvenci 50 Hz.

Tab. 6 Technické parametry motoru 1LA7106-4AA10 při jmenovitých hodnotách

Jmenovitý výkon [kW]	Otáčky [min ⁻¹]	Účinnost η 100% [%]	Účinnost η 75% [%]	Účinník $\cos \varphi$	Jmenovitý proud I_N [A]	Jmenovitý moment [Nm]	Poměrný záběrný moment M_z/M_n	Poměrný záběrný proud I_k/I_n
2,2	1420	82	82,5	0,82	4,7	14,8	2,5	5,6

Zdroj: [13].

Chod naprázdno je provozní režim motoru, kdy není motor mechanicky zatížen a jeho rotor se otáčí synchronními otáčkami [2]. „V rotorových vodičích se neindukuje žádné napětí, neprochází jím tedy proud a točivý moment je nulový“ [2]. Nejprve byl v tomto režimu změřen převíjený motor (tab. 7) a následně motor továrně navinutý (tab. 8). Motor byl zapojen do hvězdy. Byl zaznamenán aritmetický průměr napětí U_0 při snižování od 110 % U_N (440 V) do 10 % U_N (40 V). Dále byly zaznamenávány hodnoty proudu na jednotlivých vinutích I_1 , I_2 , I_3 , a následně vypočítán jejich aritmetický průměr I_0 . Na wattmetru byla při každém měření odečtena hodnota ztrát naprázdno ΔP_0 . Z naměřených a vypočtených hodnot byl vypočten účinník $\cos \varphi_0$ podle vztahu:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0} \quad [14].$$

Po naměření všech údajů byl změřen odpor jednotlivých vinutí R_1 , R_2 , R_3 , (tab. 9) a následně vypočten aritmetický průměr jednotlivých odporů R_{1f} , pro následný výpočet ztrát v satorovém vinutí ΔP_{j10} , podle vztahu:

$$\Delta P_{j10} = 3I_0^2 R_{1f} \quad [14].$$

„Ztráty $\Delta P_0 - \Delta P_{j10}$ budou rozděleny na ztráty mechanické ΔP_m a ztráty v železe magnetického obvodu ΔP_{Fe} extrapolací v grafu až k ose souřadnic“ [14].

Tab. 7 Naměřené a vypočítané hodnoty převíjeného motoru při režimu naprázdno

U_0 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_0 [A]	ΔP_0 [W]	$\cos \varphi_0$	ΔP_{j10} [W]	ΔP_{m+Fe} [W]
440	4,3	4,1	4,5	4,3	380	0,12	171,96	208,04
400	2,55	2,95	2,7	2,73	280	0,15	69,31	210,69
360	1,9	2,15	2,1	2,05	200	0,16	39,08	160,92
320	1,55	1,7	1,6	1,62	140	0,16	24,41	115,59
280	1,3	1,4	1,3	1,33	110	0,17	16,45	93,55
240	1	1,1	1,15	1,08	100	0,22	10,85	89,15
200	0,82	0,9	0,88	0,87	80	0,27	7,04	72,96
160	0,64	0,71	0,74	0,7	60	0,31	4,56	55,44
120	0,48	0,58	0,52	0,53	46	0,42	2,61	43,39
80	0,38	0,44	0,42	0,41	36	0,63	1,56	34,44
40	0,53	0,62	0,6	0,58	35	0,87	3,13	31,87

Tab. 8 Naměřené hodnoty továrně navinutého motoru při režimu naprázdno

U_0 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_0 [A]	ΔP_0 [W]	$\cos \varphi_0$	ΔP_{j10} [W]	ΔP_{m+Fe} [W]
440	4,5	4,6	4,6	4,57	400	0,11	181,7	218,3
400	2,95	3,1	3	3,02	260	0,12	79,35	180,65
360	2,1	2,25	2,1	2,15	180	0,13	40,22	139,78
320	1,7	1,8	1,6	1,7	140	0,15	25,14	114,86
280	1,3	1,5	1,35	1,38	100	0,15	16,57	83,43
240	1,1	1,2	1,2	1,17	100	0,21	11,91	88,09
200	0,89	0,94	0,92	0,92	80	0,25	7,36	72,64
160	0,68	0,76	0,68	0,71	60	0,3	4,39	55,61
120	0,51	0,59	0,53	0,54	44	0,39	2,54	41,46
80	0,36	0,43	0,46	0,42	33	0,57	1,53	31,47
40	0,42	0,52	0,42	0,45	28	0,9	1,76	26,24

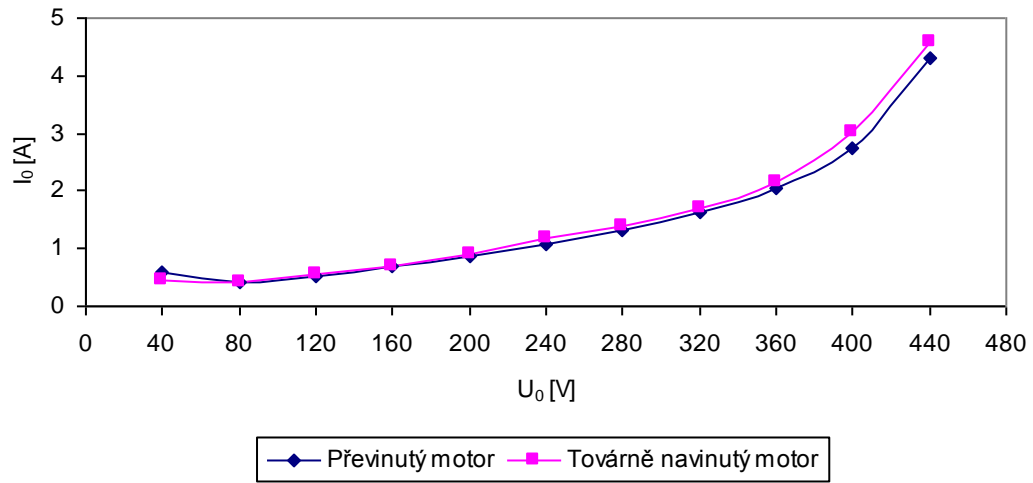
Tab. 9 Naměřené hodnoty odporu jednotlivých vinutí

Převínutý motor				Továrně navinutý motor			
R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	R_{1f} [Ω]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	R_{1f} [Ω]
3,1	3,1	3,1	3,1	2,9	2,9	2,9	2,9

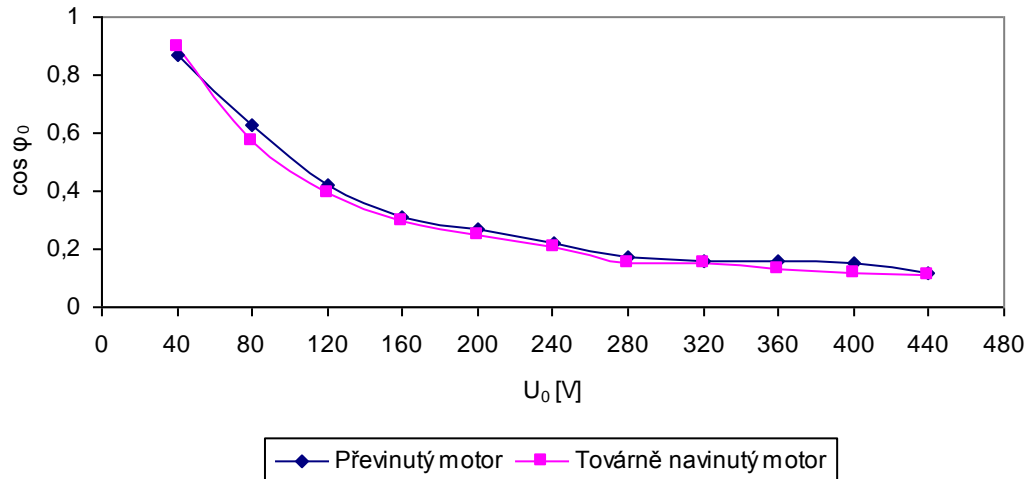
Na závislosti proudu I_0 na napětí U_0 pro oba motory (graf. 1) nejsou patrné výrazné odchylky mezi převíjeným a továrně navinutým motorem.

Graf 2 zobrazuje závislosti účinníku $\cos \varphi_0$ na napětí U_0 pro oba motory. Při pohledu na křivku převíjeného motoru a továrně navinutého motoru nejsou patrné výraznější rozdíly. Oblasti ztrát jsou znázorněny na grafu 3.

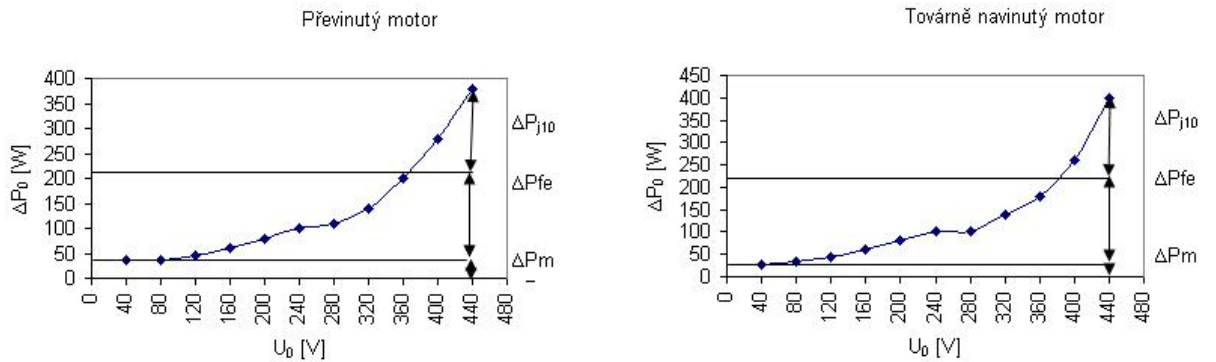
Graf. 1 Závislost proudu I_0 na napětí U_0 pro měřené motory



Graf. 2 Závislost účinníku $\cos \varphi_0$ na napětí U_0 pro měřené motory



Graf. 3 Oblasti ztrát pro měřené motory



4.2 Měření nakrátko

„Indukční motor pracuje nakrátko, jestliže jeho rotor stojí ($n = 0, s = 1$), tedy při rozběhu, v okamžiku připojení na síť nebo při zastavení způsobeném přetížením“ [2]. Měření bylo provedeno při zabrzděném rotoru a sníženém napětí, které vyvolalo přibližně jmenovité hodnoty proudu (4,85 A).

Otáčky motoru nebyly zcela nulové. Naměřené hodnoty u převíjeného motoru (tab. 10) byly při 57 otáčkách za minutu proti směru točivého pole. U továrně navinutého motoru (tab. 11) při 54 otáčkách za minutu proti směru točivého pole. Z výsledku měření proudu I_1, I_2, I_3 byl vypočten průměrný proud I_K .

Účinník byl z naměřených hodnot vypočten podle vztahu:

$$\cos \varphi_K = \frac{\Delta P_K}{\sqrt{3}U_K I_K} \quad [14].$$

Pro výpočet ztrát v statorovém vinutí při provozu nakrátko byly použity dříve naměřené hodnoty odporů $R_{lf} = R_K$ (tab. 9). Ztráty v statorovém vinutí ΔP_{jKl} byly vypočteny podle vztahu:

$$\Delta P_{jKl} = 3I_K^2 R_K \quad [14].$$

Tab. 10 Naměřené hodnoty převíjeného motoru při režimu nakrátko

U_K [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_K [A]	ΔP_K [W]	Otáčky [min ⁻¹]	$\cos \varphi_K$	ΔP_{jKl} [W]
100	4,95	5	4,9	4,95	490	57	0,57	227,87

Tab. 11 Naměřené hodnoty továrně navinutého motoru při režimu nakrátko

U_K [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_K [A]	ΔP_K [W]	Otáčky [min ⁻¹]	$\cos \varphi_K$	ΔP_{jKl} [W]
90	4,8	4,85	4,9	4,85	410	54	0,54	204,65

Z naměřených hodnot je patrné, že převíjený motor dosahuje přibližně jmenovitých hodnot proudu při vyšším napětí 100 V oproti, továrně navinutému motoru, který dosahuje přibližně jmenovitých hodnot proudu při napětí 90 V. Továrně navinutý motor má podle výpočtů přibližně o 10% vyšší ztráty v statorovém vinutí.

4.3 Měření při zatěžování

Měření při zatěžování začínáme od hodnoty proudu procházejícím jedním vinutím 9,8 A což je přibližně dvojnásobná hodnota jmenovitého proudu. Zatížení snižujeme od 20 Nm plynule po 5 Nm. Při každém měření byl zaznamenán příkon P_p a otáčky motoru. Nejprve byl v tomto režimu změřen převíjený motor a následně motor továrně navinutý. Měření byla provedena třikrát pro převíjený motor (příloha 1) a pro továrně navinutý motor (příloha 2). Z výsledků těchto tří měření pro každý motor byl vypočten průměr a použit pro výsledný výpočet a grafické znázornění. V tabulce 12 jsou zaznamenány průměrné hodnoty a výpočty převíjeného motor, v tabulce 13 továrně navinutého. Měření probíhá při jmenovitém napětí a frekvenci. Z výsledku měření proudu I_1, I_2, I_3 byl vypočítán průměrný proud I_{1f} . Z naměřených a vypočtených hodnot byl vypočten účinek $\cos \varphi$ podle vztahu:

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{\sqrt{3}U_{1f}I_{1f}} \quad [14].$$

Pro výpočet ztrát v satorovém vinutí při zatěžování byly použity dříve naměřené hodnoty odporů $R_{10} = R_{1f}$ (tab. 9). Ztráty v satorovém vinutí ΔP_{j1} byly vypočítány podle vztahu:

$$\Delta P_{j1} = 3I_{1f}^2 R_{1f} \quad [14].$$

Mechanické ztráty ΔP_m (35 W převíjený motor, 28 W továrně navinutý motor) a ztráty v železe magnetického obvodu ΔP_{Fe} (175,5 W převíjený motor a 152,8 W továrně navinutý motor) jsme odečetli z hodnot pro 400 V (graf. 3) z měření naprázdno. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet výkonu přeneseného točivým polem ve vzduchové mezeře na rotor podle vztahu:

$$P_r = P_p - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j1} \quad [14].$$

Pro další výpočty bylo nutné spočítat skluz podle vztahu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [3].$$

Jouleovy ztráty v rotorovém vinutí byly vypočítány podle vztahu:

$$\Delta P_{j2} = sP_r \quad [14].$$

Přídavné ztráty ΔP_d lze odhadnout jako $0,0005P_p$ [14].

Celkové ztráty motoru jsou:

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_d \quad [14].$$

Tab. 12 Naměřené průměrné hodnoty převrženého motoru při zatěžování

U_n [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_{rr} [A]	P_p [W]	Otáčky [min ⁻¹]	M [Nm]	$\cos \phi_0$	ΔP_{11} [W]	P_r [W]	s [%]	ΔP_{12} [W]	ΔP_d [W]	ΔP [W]	P [W]	η [%]
400	9,70	9,80	9,75	9,75	4970	1323	23	0,74	884,08	3910,4	11,8	461,43	24,85	1580,9	3389,1	68,19
400	7,10	7,20	7,15	7,15	4000	1377	20	0,81	475,44	3349,1	8,2	274,62	20	980,56	3019,4	75,49
400	5,30	5,40	5,30	5,33	2960	1411	15	0,8	264,53	2520	5,9	148,68	14,8	638,51	2321,5	78,43
400	4,00	4,10	4,00	4,03	2040	1440	10	0,73	151,29	1713,2	4	68,528	10,2	440,52	1599,5	78,41
400	3,10	3,20	3,10	3,13	1160	1470	5	0,53	91,31	893,19	2	17,864	5,8	325,47	834,53	71,94
400	2,80	2,90	2,85	2,85	400	1492	0,4	0,2	75,54	148,96	0,5	0,7448	2	288,78	111,22	27,81

Tab. 13 Naměřené průměrné hodnoty továrně navinutého motoru při zatěžování

U_n [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_{rr} [A]	P_p [W]	Otáčky [min ⁻¹]	M [Nm]	$\cos \phi_0$	ΔP_{11} [W]	P_r [W]	s [%]	ΔP_{12} [W]	ΔP_d [W]	ΔP [W]	P [W]	η [%]
400	9,80	9,80	9,80	9,80	5680	1314	23	0,84	835,55	4691,7	12,4	581,76	28,4	1626,5	4053,5	71,36
400	7,00	7,00	7,00	7,00	4000	1382	20	0,82	426,3	3420,9	7,9	270,25	20	897,35	3102,7	77,57
400	5,40	5,40	5,40	5,40	2880	1419	15	0,77	253,69	2473,5	5,4	133,57	14,4	582,46	2297,5	79,78
400	4,30	4,30	4,30	4,30	2000	1447	10	0,67	160,86	1686,3	3,5	59,022	10	410,68	1589,3	79,47
400	3,50	3,50	3,50	3,50	1160	1471	5	0,48	106,58	900,62	1,9	17,112	5,8	310,29	849,71	73,25
400	3,30	3,30	3,30	3,30	440	1493	0,4	0,19	94,74	192,46	0,5	0,9623	2,2	278,7	161,3	36,66

Vztah pro výpočet výkonu:

$$P = P_p - \Delta P \quad [14].$$

Účinnost motoru byla vypočítána podle vztahu:

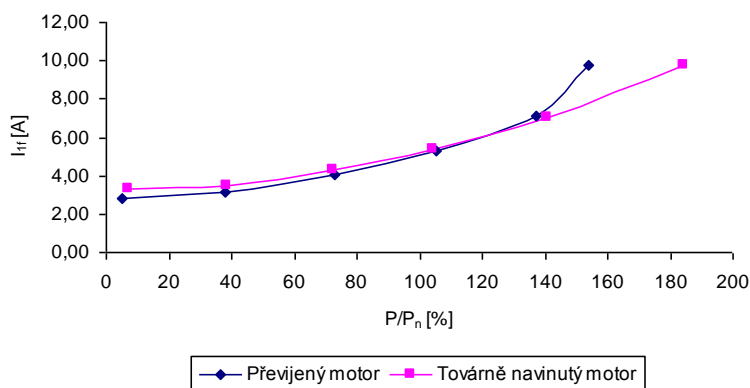
$$\eta = \frac{P_p - \Delta P}{P_p} 100 \quad [14].$$

Výsledky měření a výpočtů pro převíjený motor a továrně navinutý motor byly vyneseny do grafů současně s cílem názornějšího zobrazení výsledků.

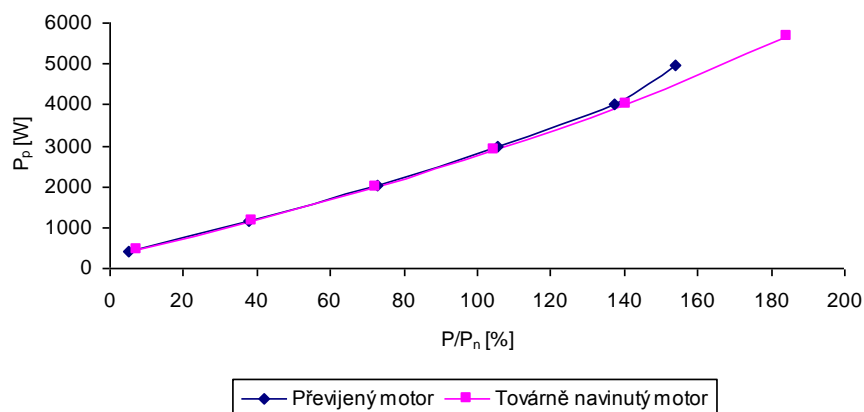
Pracovní charakteristiky závislosti proudu I_{If} (graf. 4), příkonu P_p (graf. 5), skluzu s (graf. 6), účinnosti η (graf. 7) a účíniku $\cos \varphi$ (graf. 8) byly vyneseny do grafů jako poměr výkonu P a jmenovitého výkonu P_n při stálém jmenovitém napětí a kmitočtu.

Na závislosti I_{If} na P/P_n je patrné, že převíjený motor nedosahuje při stejném proudu stejného výkonu jako motor továrně navinutý, zvláště velký rozdíl je při dvojnásobku jmenovitého proudu.

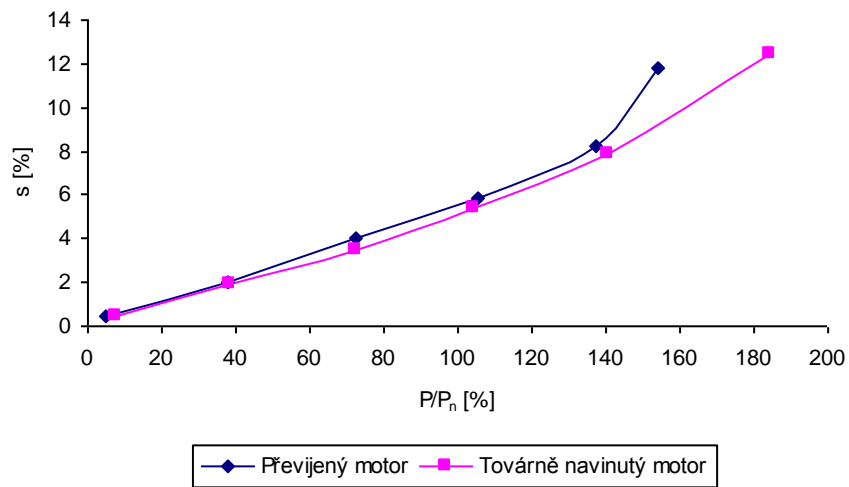
Graf. 4 Závislost I_{If} na P/P_n pro měřené motory



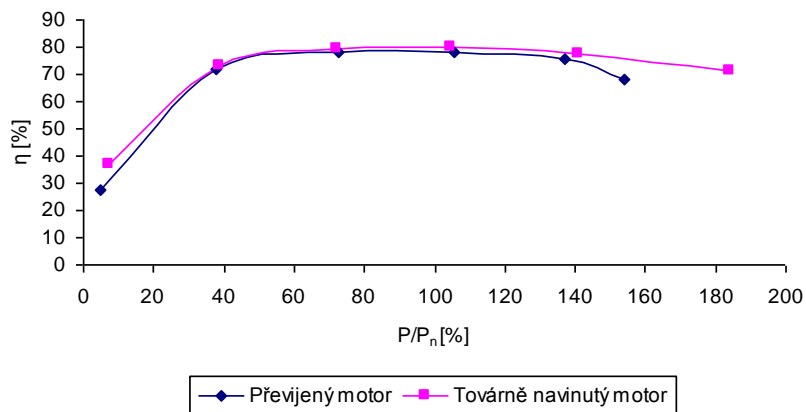
Graf. 5 Závislost P_p na P/P_n pro měřené motory



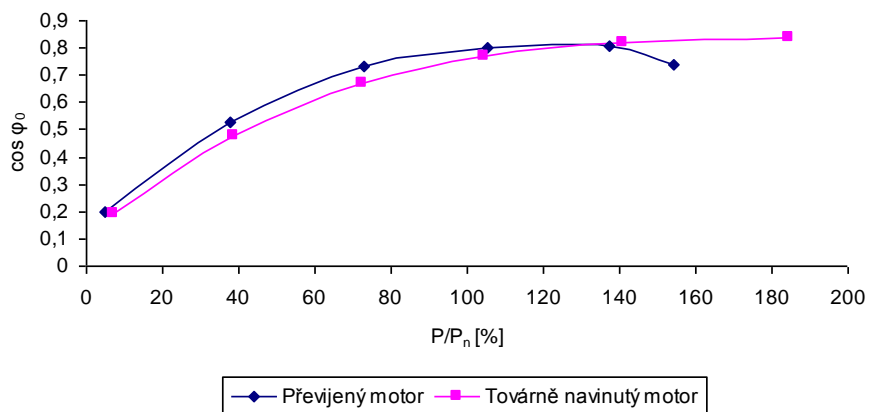
Graf. 6 Závislost s na P/P_n pro měřené motory



Graf. 7 Závislost η na P/P_n pro měřené motory



Graf. 8 Závislost $\cos \varphi$ na P/P_n pro měřené motory



Na charakteristice skluzu je patrné, že továrně navinutý motor má menší skluz při zatížení než motor převíjený. Tento rozdíl je zvláště v oblasti větších výkonů (zatížení).

Na charakteristice účinnosti je patrné, že továrně navinutý motor dosahuje lepší účinnosti než motor převíjený, což znamená, že dokáže lépe využít spotřebovanou elektrickou energii.

Na charakteristice účinníku jsou patrné vyšší hodnoty u továrně navinutého motoru v oblasti nejmenovitých proudů, a naopak vyšší hodnoty v oblasti jmenovitých proudů u převíjeného motoru.

Měřicí přístroje použité pro jednotlivá měření jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14 Seznam použitých měřících přístrojů

Měřicí přístroj	Výrobce, inv. číslo	Měření odporu	Měření naprázdno	Měření nakrátko	Měření zatěžování
OMEGA I	Metra (974196)	X			
Dynanometr	MEZ		X	X	X
Voltmetr	Metra ELI (1677626)		X		
Měř. souprava	Metra (QWIII 6089824)		X		
Měř. souprava	Metra (QWI 1474200)			X	X

Závěr

Cílem této práce je porovnání vlastností továrně navinutého motoru a motoru převinutého nejrozšířenější technologií v servisní dílně. Většina práce byla zaměřena na všeobecnou problematiku konstrukce a oprav asynchronních motorů. Uvedené výpočty potřebné pro převíjení motoru byly pro porovnávané motory Siemens 1LA7106-4AA10. Tento typ byl vybrán z důvodů ekonomických, z důvodů velkého rozšíření tohoto typu a vhodných parametrů pro měření.

Důvodem tohoto porovnání je zda má motor po převinutí parametry rovnocenné motoru továrně navinutému.

Pro potřeby této práce bylo nutné zdokumentovat opravu motoru, zda byly použity odpovídající materiály (izolace, vodiče). Z časových důvodů nebylo možné porovnávat vlastnosti motorů po dlouhodobějším používání. Vzhledem k skutečnosti, že byly použity na izolaci vinutí a vodiče vinutí materiály podobných vlastností, jako u továrně vinutého motoru lze předpokládat stejnou životnost.

Vlastnosti motoru byly porovnávány z hlediska elektrických vlastností. Na tyto vlastnosti mají vliv i části mechanické. Z těchto důvodů nebyl převinutý motor před převinutím nikdy v provozu, aby se co nejvíce omezil vliv mechanických ztrát. Je nutné ovšem připustit vliv vzniklých nepřesností, které mohly vzniknout při montáži převinutého motoru.

Při porovnávání naměřených hodnot obou motorů lze prohlásit, že motory se svými vlastnostmi liší zanedbatelně z hlediska provozu. Při použití převíjeného motorů by nemuselo dojít k změně spouštění a jištění motoru. Převíjený motor je svým výkonem dostatečný pro většinu aplikací. Výraznější rozdíly byly patrné na charakteristice skluzu a účinnosti.

U továrně navinutého motoru s menším skluzem nedochází při zatížení k výraznému snížení otáček a vyšší účinnost znamená, že tento motor účinněji využije spotřebovanou energii.

Z hlediska finanční náročnosti samotné náhrady lze doporučit motor převíjený. Cena nového motoru je přibližně 4 300 Kč bez DPH 20%. Převinutí motoru v servisní dílně stojí od 2000 do 3000 Kč bez DPH 20%. Výhodnost převíjení porouchaných motorů nelze všeobecně vyjádřit. V případě poškození mechanických částí motoru může částka za opravu přesáhnout cenu motoru nového. U speciálních motorů je částka za opravu často několikanásobně nižší než za motor nový. Některé motory nelze novým motorem nahradit vůbec

bez dalších změn celého pohonu. Zvláště při opravách starších konstrukcí motorů je nutné zvážit zda výměna motoru nebude přínosem z hlediska novější konstrukce. Vzhledem k vzrůstajícím cenám energií je nutné zvážit návratnost nákladů na nový motor díky úspoře výdajů za jeho provoz. Od 30.6.2011 nesmí být prodávány na území EU asynchronní motory s třídou účinnosti IE 1, ale nejméně IE 2. Tato pravidla neplatí např. pro motory brzdové. Motor použitý pro tuto práci je s třídou účinnosti IE 1.

Z práce je zřetelné, že převíjení motorů je časově náročné díky času potřebnému na uvolnění vinutí, převinutí, naimpregnování a následnému vysušení v peci. U malých motorů celé převinutí od demontáže do montáže motoru po převinutí trvá 24 hodin, ale je nutné vzít v potaz vytíženost dílny a jednotlivé operace. Z důvodů finanční náročnosti je například pec pro vysoušení spouštěna pouze v noci a při celkovém nebo alespoň rentabilním vytížení.

Při rozhodnutí zda neprovozušopný motor opravit nebo vyměnit za nový musí zodpovědná osoba zvážit mnoho faktorů. Z hlediska času, rychlost opravy motoru nebo dostupnost a dodání nového motoru v závislosti na vzniklých nákladech za prostoj stroje. Finanční náročnost z hlediska samotné opravy nebo pořízení nového motoru. Uvážit vzniklé úspory nákladů za elektrické energie použitím nového motoru s vyšší třídou účinnosti.

Všeobecně lze opravy asynchronních motorů doporučit za předpokladu využití stávených postupů a technologií. Při posuzování finanční náročnosti je nutné vzít v potaz i budoucí náklady za energii a údržbu podle časového vytížení motoru.

Použité zdroje

- 1. UHLÍŘ, I., et al., J. *Elektrické stroje a pohony*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007. 137s. ISBN: 978-80-01-03730-0
- 2. MRAVEC, R., *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1982. 432s. ISBN: 04-520-82
- 3. RYCHETNÍK, V. – JANOUŠEK, J. – PAVELKA, J. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. 199s. ISBN: 80-01-01563-7
- 4. MĚŘIČKA, J. – HAMATA, V. – VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 311s. ISBN: 80-01-01020-1
- 5. HAVELKA, J. – DRESLER, J. – JÍLEK, V. *Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých*. Praha: Vydavatelství STRO.M, 1995. 227s.
- 6. KOPYLOV, I., et al., J. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1988. 688s. ISBN: 04-532-88.
- 7. TKOTZ, K., *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Vydavatelství Europa-Sobotáles cz. s.r.o., 2002. 564s. ISBN: 80-86706-00-1.
- 8. POŠTA, J. - VESELÝ, P. - DVOŘÁK, M.: *Degradace strojních součástí*. [Monografie]. Praha, ČZU, 2002, 67 s., ISBN 80-213-0967-9
- 9. VOCEL, M. – DUFEK, V. – KOLEKTIV. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1976. 376s., ISBN: 04-224-76
- 10. VLK, M. – FLORIAN, Z.: *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007. 235s. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>
- 11. KNOTEK, J. – KNOTEK, J. *Navíjení a převíjení malých elektrických strojů točivých*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1990. 536s. ISBN: 04-505-89
- 12. SIEMENS, s.r.o. *Schéma vinutí 1LA7106-4AA10*. 00. Mohelnice, 07-10-1996.
- 13. SIEMENS, s.r.o. *Trojfázové asynchronní motory nakrátko 1LA7*. : Praha, 2011. 36s. Dostupné z: http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_1la7.pdf
- 14. KRAEMER, J. – NÝVLT, J. *Elektrotechnická měření II*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1981. 384s. ISBN: 04-527-81

Seznam obrázků

- Obr. 1 Uspořádání cívek pro vznik točivého magnetického pole
- Obr. 2 Vznik točivého magnetického pole
- Obr. 3 Čtyřpólové magnetické točivé pole
- Obr. 4 Uspořádání vývodů trojfázového vinutí na svorkovnici
- Obr. 5 Asynchronní motor s kotvou nakrátko
- Obr. 6 Cívky vinutí
- Obr. 7 Schématické zobrazení vinutí
- Obr. 8 Vztah mezi geometrickými a elektrickými stupni
- Obr. 9 Napětí indukované pod póly vinutí
- Obr. 10 Soustředné vinutí – pól párové, dvoupolohové ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)
- Obr. 11 Soustředné vinutí – pól párové, dvoupolohové ($2p = 6, q = 2, m = 3, Q = 36$)
- Obr. 12 Jednovrstvové vinutí se stejnými cívkami ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)
- Obr. 13 Dvouvrstvé vinutí se stejnými cívkami ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)
- Obr. 14 Jedno-dvouvrstvé vinutí ($2p = 4, q = 4, m = 3, Q = 48$)
- Obr. 15 Dvouvrstvé soustředné vinutí ($2p = 4, q = 2, m = 3, Q = 24$)
- Obr. 16 Základní tvary drážek v rotorech nakrátko
- Obr. 17 Vytlačování proudů (rotor s dvojitou klecí)
- Obr. 18 Průběh točivého momentu u dvou různých konstrukcí rotoru
- Obr. 19 Abrazivní opotřebení brzdového obložení
- Obr. 20 Ložisko opotřebované korozí
- Obr. 21 Kryt ventilátoru
- Obr. 22 Příruba motoru poškozená lomem statickým
- Obr. 23 Zlomená hřídel motoru (lom únavový)
- Obr. 24 Schéma vinutí motoru 1LA7106-4AA10 společnosti Siemens, s.r.o.
- Obr. 25 Stator po odsekání čela cívek
- Obr. 26 Izolace drážek
- Obr. 27 Uložení magneticky rovnocenných trojcívek
- Obr. 28 Navinutá cívková skupina na šabloně kruhového průměru
- Obr. 29 Vsypaná cívková skupina do drážek motoru
- Obr. 30 Bandáž cívek statoru

Seznam tabulek

- Tab. 1 Závady při rozběhu motoru
Tab. 2 Závady za chodu motoru
Tab. 3 Vodiče vinutí a jejich náhrada dvěma, třemi vodiči paralelními
Tab. 4 Počet cívkových skupin v závislosti na druhu vinutí a počtu pólů
Tab. 5 Počet drážek na pól a fázi q ve vztahu k počtu drážek statoru
Tab. 6 Technické parametry motoru 1LA7106-4AA10 při jmenovitých hodnotách
Tab. 7 Naměřené a vypočítané hodnoty převíjeného motoru při režimu naprázdno
Tab. 8 Naměřené hodnoty továrně navinutého motoru při režimu naprázdno
Tab. 9 Naměřené hodnoty odporu jednotlivých vinut
Tab. 10 Naměřené hodnoty převíjeného motoru při režimu nakrátko
Tab. 11 Naměřené hodnoty továrně navinutého motoru při režimu nakrátko
Tab. 12 Naměřené průměrné hodnoty převíjeného motoru při zatěžování
Tab. 13 Naměřené průměrné hodnoty továrně navinutého motoru při zatěžování
Tab. 14 Seznam použitých měřících přístrojů

Seznam grafů

- Graf. 1 Závislost proudu I_0 na napětí U_0 pro měřené motory
Graf. 2 Závislost účinníku $\cos \varphi_0$ na napětí U_0 pro měřené motory
Graf. 3 Oblasti ztrát pro měřené motory
Graf. 4 Závislost I_{lf} na P/P_n pro měřené motory
Graf. 5 Závislost P_p na P/P_n pro měřené motory
Graf. 6 Závislost s na P/P_n pro měřené motory
Graf. 7 Závislost η na P/P_n pro měřené motory
Graf. 8 Závislost $\cos \varphi$ na P/P_n pro měřené motory

Seznam zkratk

EU	Evropská unie
Inv.	Inventární
Měř.	Měřící

Přílohy

Seznam příloh:

Příloha č. 1: Měření při zatěžování převíjený motor

Příloha č. 2: Měření při zatěžování továrně navinutý motor

Příloha č. 1: Měření při zatěžování převíjený motor

U _{1n} [V]	Proud proch. jednotlivými vynutími			P _p [W]	Otáčky [min ⁻¹]	M [Nm]
	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]			
1. měření						
400	9,70	9,80	9,75	4980	1321	23
400	7,10	7,20	7,15	4000	1378	20
400	5,30	5,40	5,30	2970	1409	15
400	4,00	4,10	4,00	2050	1436	10
400	3,10	3,20	3,15	1170	1468	5
400	2,75	2,80	2,75	400	1493	0,4
2. měření						
400	9,70	9,75	9,70	4970	1324	23
400	7,10	7,20	7,15	4000	1377	20
400	5,25	5,40	5,30	2960	1413	15
400	3,95	4,05	4,00	2040	1442	10
400	3,05	3,15	3,10	1160	1470	5
400	2,75	2,90	2,85	400	1492	0,4
3. měření						
400	9,70	9,80	9,75	4970	1323	23
400	7,15	7,25	7,15	4000	1376	20
400	5,25	5,35	5,25	2960	1411	15
400	4,00	4,10	4,00	2040	1441	10
400	3,10	3,20	3,10	1160	1471	5
400	2,80	2,90	2,90	400	1491	0,4

Příloha č. 2: Měření při zatěžování továrně navinutý motor

U _{1n} [V]	Proud proch. jednotlivými vynutími			P _p [W]	Otáčky [min ⁻¹]	M [Nm]
	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]			
1. měření						
400	9,75	9,75	9,75	5670	1318	23
400	6,95	6,95	6,95	3990	1388	20
400	5,30	5,30	5,30	2870	1422	15
400	4,25	4,25	4,25	1990	1451	10
400	3,55	3,55	3,55	1170	1465	5
400	3,25	3,25	3,25	430	1495	0,4
2. měření						
400	9,80	9,80	9,80	5680	1312	23
400	7,05	7,05	7,05	4010	1376	20
400	5,45	5,45	5,45	2890	1416	15
400	4,30	4,30	4,30	2000	1446	10
400	3,50	3,50	3,50	1160	1473	5
400	3,35	3,35	3,35	450	1490	0,4
3. měření						
400	9,80	9,80	9,80	5680	1313	23
400	7,00	7,00	7,00	4000	1383	20
400	5,35	5,35	5,35	2880	1420	15
400	4,30	4,30	4,30	2000	1445	10
400	3,45	3,45	3,45	1150	1476	5
400	3,30	3,30	3,30	440	1493	0,4