

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Tomáš Šidlík

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Porovnání stejnosměrného a asynchronního motoru pro pohon lanové dráhy**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Lanové dráhy a používané el. pohony pro přepravu osob
- 2) Porovnání stejnosměrného motoru a asynchronního motoru a jejich použití
- 3) Návrh asynchronního pohonu pro LD Medvědíň – náhrada stávajícího pohonu DC

Seznam odborné literatury:

- [1] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. Meranie a modelovanie elektrických strojov. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009.
- [2] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Elektrické stroje. Praha: ČVUT, 2000
- [3] CHAPMAN, S., Electric Machinery Fundamentals

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Jan Bauer, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

## **Poznámka**

Při zadávání práce došlo k nedorozumění, práce se nezabývá porovnáním stejnosměrného a asynchronního, nýbrž stejnosměrného a synchronního motoru.



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Porovnání stejnosměrného a synchronního motoru pro pohon  
lanové dráhy**

**Comparison of DC and synchronous engine for driving cableway**

bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

**Tomáš Šidlík**

---

**Praha 2016**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 27.5.2016

.....

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá porovnáním stejnosměrného a synchronního motoru pro pohon lanové dráhy. Zaměřuje se na specifické vlastnosti obou typů motorů a porovnává jejich použití. Následně pro lanovou dráhu Medvědin ve Špindlerově Mlýně navrhuje pohon se synchronním motorem jako náhradu současného stejnosměrného motoru.

## **Annotation**

This bachelor's thesis deals with comparison of DC and synchronous engine for driving cableway. It focuses on specific characteristics of both engines and compares their application. Then it proposes new drive with synchronous engine for Medvedin cableway located in Spindleruv Mlyn as a substitute for current DC engine.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za cenné rady a připomínky k bakalářské práci. Dále děkuji panu Janu Podrapskému ze společnosti SIEMENS za pomoc při návrhu nového pohonu, panu Jiřímu Čermákovi ze společnosti MELIDA za poskytnutí údajů o spotřebě a panu Petru Růžičkovi ze společnosti MELIDA za umožnění vstupu do prostor lanové dráhy Medvědín. Na závěr bych chtěl poděkovat panu Robinu Hofmanovi za připomínky z praxe, jenž se významně podílely na směru, kterým se práce odvíjela.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Lanové dráhy</b> .....	<b>2</b>
1.1 Lanová dráha – základní pojmy .....	2
1.2 Oblasti využití lanových drah .....	2
1.3 Rozdělení lanových drah .....	3
1.3.1 Pozemní lanové dráhy .....	3
1.3.2 Visuté lanové dráhy .....	4
1.4 Možnosti budoucího vývoje .....	4
<b>2. Porovnání funkce stejnosměrného a synchronního motoru pro pohon lanové dráhy</b> .....	<b>5</b>
2.1. Stejnosměrné motory .....	5
2.1.1. Princip funkce .....	5
2.1.2. Konstrukční provedení .....	6
2.1.3. Rozdělení stejnosměrných motorů .....	7
2.1.4 Napájení cize buzeného stejnosměrného motoru .....	8
2.1.5 Rozběh, brzdění a řízení otáček cize buzeného stejnosměrného motoru .....	10
2.2 Synchronní motory .....	11
2.2.1 Princip funkce .....	11
2.2.2 Konstrukční provedení .....	12
2.2.3 Rozdělení synchronních motorů .....	13
2.2.4 Napájení synchronních motorů .....	13
2.1.5 Rozběh, řízení otáček a brzdění synchronního motoru .....	14

2.3 Porovnání funkce stejnosměrného cize buzeného a	
synchronního motoru pro pohon lanové dráhy .....	15
2.3.1 Požadavky na pohon .....	15
2.3.2 Stabilita chodu .....	16
2.3.3 Účinnost pohonu .....	16
2.3.4 Nároky na údržbu .....	17
2.3.5 Možnost výměny v případě havárie .....	18
2.3.6 Zhodnocení .....	19
<b>3. Lanová dráha Medvědín – náhrada stávajícího stejnosměrného motoru</b>	
<b>motorem synchronním .....</b>	<b>20</b>
3.1. Obecný popis zařízení .....	20
3.2 Stávající pohon .....	20
3.3 Návrh nového pohonu .....	21
3.4 Důsledky výměny pohonu .....	22
<b>Závěr .....</b>	<b>24</b>
<b>Seznam použité literatury a dalších zdrojů .....</b>	<b>25</b>



## Úvod

Prudký rozvoj polovodičové techniky v posledních dvaceti letech vede k postupnému prosazování synchronních motorů i do oblastí, ve kterých bylo jejich používání ještě nedávno nemyslitelné. Děje se tak na úkor motorů stejnosměrných, jejichž dříve jedinečných vlastností je dnes možno docílit i u motorů synchronních a to právě díky rozvoji polovodičových měničů, používaných pro jejich napájení.

Přechod k synchronním motorům však mnohdy probíhá pozvolně a i u velmi specifických aplikací, jako například u pohonu lanové dráhy, kde by se dal předpokládat příklon k jedné, či druhé variantě se setkáváme se souběžným používáním obou typů motorů. Tato skutečnost je dána tím, že náklady spojené s přechodem k synchronnímu motoru tedy pořizovací cena samotného motoru, výkonového měniče, dalších součástí pohonu a také konstrukční úpravy celého zařízení, jsou často vyšší než předpokládané úspory, které souvisí zejména s vyšší účinností a nižšími nároky na údržbu.

Vzhledem k tomu, že se dnes u nově stavěných lanových drah používají výhradně motory synchronní, se dá předpokládat, že časem stejnosměrné motory zcela nahradí. Dlouhá doba, po kterou jsou konstrukce lanových drah schopny provozu a skutečnost, že se mnoho z nich, v České republice zejména, nachází v chráněných krajinných oblastech nebo dokonce v národních parcích, což především administrativně stěžuje případnou celkovou rekonstrukci, vedou k tomu, že alespoň pro několik následujících desetiletí bude otázka, zda zachovat stávající stejnosměrný nebo přejít na synchronní pohon stále aktuální.

Cílem této práce je jednak porovnání funkce stejnosměrného a synchronního motoru pro pohon lanové dráhy a následná analýza pohonu lanové dráhy Medvědíň ve Špindlerově Mlýně. Lanová dráha Medvědíň prošla v minulých letech několika rekonstrukcemi, při žádné nedošlo k nahrazení stejnosměrného motoru za synchronní. Cílem práce je zjistit, co vedlo k setrvání u stejnosměrného motoru, navrhnout přechod na synchronní motor a zhodnotit důsledky tohoto přechodu.

# 1. Lanové dráhy

## 1.1 Lanová dráha – základní pojmy

Lanovou dráhu určenou k přepravě osob můžeme rozdělit na tři základní části. Horní a dolní stanici a trasu.

Horní a dolní stanice jsou budovy nebo soustavy budov sloužící k nástupu a výstupu pasažérů. V jedné ze stanic, zpravidla v té dolní, se nachází poháněcí mechanismus, tedy motor, jeho napájecí součásti a převodovka. S motorem v horní stanici se setkáváme zřídka, neboť horní stanice je většinou hůře přístupná jak z hlediska napájení, tak případného servisu. S motorem v horní stanici se můžeme setkat v případě, kdy se v blízkosti stanice nachází trafostanice.

Moment, který vytváří poháněcí mechanismus je přes hřídel převáděn na jedno ze dvou kol, mezi kterými je napnuto tažné lano. Výhodou lanové dráhy je, že síla kterou působí sedačky, popřípadě kabinky, a pasažéři při pohybu z horní do dolní stanice na tažné lano vytváří na hřídeli kladný moment. Tím je podstatně snížen potřebný dodávaný výkon. V případě, že výrazně převažuje počet pasažérů směrem z horní stanice, může dojít k obrácení směru toku výkonu v motoru a motor může dodávat elektrickou energii do sítě.

Trasu visuté lanové dráhy tvoří soustava ocelových sloupů. Na hlavách sloupů jsou umístěny tzv. baterie, což jsou soustavy kladek, na kterých je zavěšeno tažné lano. Dále se na sloupech mohou nacházet měřicí přístroje například pro určení rychlosti větru, či teploty. Na základě jejich údajů vyhodnocuje obsluha bezpečnost provozu.

Důležitou součástí trasy je tzv. kontrola trasy, což je obvod vedoucí přes všechny sloupy, jehož účelem je detekce havarijního stavu, konkrétně vypadnutí lana z kladek. V tomto případě dojde k mechanickému přerušení části obvodu ať už pomocí koncového spínače nebo tzv. tyčinek, které se při vypadnutí lana jednoduše zlomí. Proud kontroly trasy je poté nucen téct přes odpor, který má u každého sloupu jinou hodnotu. Měřením úbytku napětí na obvodu je tedy možné jednak zjištění havarijního stavu a také určení konkrétního místa havárie.

## 1.2 Oblasti využití lanových drah

Lanová dráha je zařízení určené k přepravě osob nebo materiálu. Často se využívá v místech, kde je nutno překonat velký výškový rozdíl a nebo v místech s těžko přístupným terénem.

Pro přepravu osob se lanové dráhy používají nejčastěji v horských oblastech, kde slouží zejména potřebám cestovního ruchu, avšak můžeme se setkat i s lanovými drahami ve městech. Ty mohou sloužit buď jako turistická atrakce nebo jako prostředek městské hromadné dopravy. Takovou lanovou dráhu můžeme najít například v kolumbijském městě Medellín, kde tamní tři lanové dráhy přepraví denně přibližně 30 000 osob. [1]



Obr. [1] Lanová dráha ve městě Medellín [2]

Ve výrobních závodech se lanových drah využívá například pro přenos součástí při výrobě automobilů. V těžebním průmyslu se s lanovými drahami můžeme setkat u těžby dřeva, kde se využívá lanových drah s jednoduchou konstrukcí, které mohou být snadno přemísťovány podle toho, kde právě probíhá kácení. Jednou z dalších oblastí využití je těžba vápence. Jako konkrétní příklad může posloužit lanová dráha vedoucí z lomu v Černém Dole do vápenky v Kunčicích nad Labem. Vápenka nebyla vybudována přímo u lomu protože přes Černý Důl nevede železniční síť. Mezi lety 1959 až 1963 byla tedy vybudována 8 350 m dlouhá lanová dráha. Převýšení mezi horní stanicí v Černém Dole a dolní stanicí v Kunčicích činí 215 m. Lanová dráha je tzv. spádová, elektromotor o výkonu 130 kW se používá pouze při rozjezdu a pro brzdění. V momentě kdy jsou naplněny všechny vozíky na tzv. plné straně vedoucí směrem do vápenky, jsou prázdné vozíky v opačném směru taženy nahoru do lomu a motor rekuperací produkuje elektrickou energii, která částečně pokrývá spotřebu lomu. V roce 2015 bylo takto přepraveno 170 000 tun materiálu, pro jehož přepravu po silnici by bylo nutné použít 9 000 plně naložených nákladních automobilů. [3]

## 1.3 Rozdělení lanových drah

### 1.3.1 Pozemní lanové dráhy

Trasu pozemní lanové dráhy tvoří jedna nebo dvě kolejnice. V případě použití jedné kolejnice bývá trasa v jednom místě rozdvojena, aby mohla být dráha provozována současně v obou směrech. Pomocí tažného lana jsou vozy vytahovány směrem nahoru, při cestě dolů jsou lanem naopak bržděny. Pozemních lanových drah se využívá v místech kde není vhodné použít visutou lanovou dráhu například proto, že trasa prochází tunelem, avšak převýšení trasy je takové, že není možné použít jiný způsob dopravy.

Asi nejznámější českou pozemní lanovou dráhou je lanová dráha na Petřín. Původní lanová dráha byla uvedena do provozu již v roce 1891. Její pohon byl založen na vodním převahu.[4] Nádrže vozu v horní stanici byly naplněny vodou. Tento vůz vytáhl vůz z dolní stanice, který měl nádrže prázdné. Nevýhodou tohoto systému byla závislost na dodávkách vody.



Obr. [2] Lanová dráha na Petřín [4]

### 1.3.2 Visuté lanové dráhy

Visuté lanové dráhy mají trasu tvořenou sloupy, na nichž je zavěšeno tažné lano. Výhodou jsou velmi malé nároky na terénní úpravy v porovnání s ostatními druhy pozemní dopravy a tedy i menší zátěž pro životní prostředí.

Tažné lano visuté lanové dráhy má oproti pozemní lanové dráze ještě nosnou funkci. Někdy se tyto dvě funkce rozdělují a lanová dráha má potom zpravidla jedno nebo dvě další lana, která plní pouze funkci nosnou. Celková nosnost je tímto způsobem výrazně zvýšena, což snižuje nároky na počet sloupů na trase.

### 1.4 Možnosti budoucího vývoje

Pokud jde o lanové dráhy sloužící k rekreaci, je v posledních letech patrný nárůst výstavby ve střední a východní Evropě. Stále se však jedná pouze o zlomek v porovnání s výstavbou v alpských zemích. Zajímavé možnosti se otevírají například v Asii, kde růst životní úrovně obyvatel vede k tomu, že si stále více lidí může dovést dovolenou spojenou s lyžováním.

Hromadnějšímu využití k přepravě osob ve městech zatím brání zejména vyšší pořizovací cena a nižší přepravní rychlost v porovnání s tradičními způsoby dopravy. V budoucnu by se mohlo jednat o zajímavou alternativu pro města, kde pozemní přeprava dosáhne svých limitů.

## 2. Porovnání funkce stejnosměrného a synchronního motoru pro pohon lanové dráhy

### 2.1. Stejnosměrné motory

#### 2.1.1. Princip funkce

Funkce stejnosměrného motoru je založena na skutečnosti, že na vodič umístěný v magnetickém poli, protékaný proudem působí síla  $F_m$ , pro kterou platí:

$$F_m = B \cdot l \cdot i$$

kde

$B$  [T] je magnetická indukce,

$l$  [m] je délka vodiče,

$i$  [A] je proud protékaný vodičem.

Směr působení síly můžeme určit pomocí tzv. Flemingova pravidla levé ruky, které říká:

*„Položíme-li otevřenou dlaň levé ruky na vodič, kterým protéká proud tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, odtažený palec ukazuje směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič.“*

Magnetické pole je vytvořeno budícím vinutím. Budícím vinutím protéká proud  $I_b$ , který vytváří magnetické pole o intenzitě  $H$  [ $A \cdot m^{-1}$ ]. Intenzitu magnetického pole můžeme určit podle

1. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru. [6]

$$\oint H \cdot dl = \sum I$$

Magnetickou indukci  $B$  můžeme poté vypočítat ze vztahu

$$B = \mu \cdot H$$

kde

$\mu$  [ $H \cdot m^{-1}$ ] je magnetická permeabilita prostředí, pro kterou platí:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

kde

$\mu_0$  [ $H \cdot m^{-1}$ ] je permeabilita vakua a má hodnotu  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ,

$\mu_r$  [-] je relativní permeabilita prostředí. [5]

Pro homogenní magnetické pole ( $B = \text{konst.}$ ) platí:

$$\Phi = B \cdot S_\Phi$$

kde

$\Phi$  [Wb] je celkový magnetický tok,

$S_\Phi$  [ $m^2$ ] je aktivní průřez magnetického obvodu. [5]

S využitím předchozích vztahů můžeme vyjádřit vztah pro moment motoru, který má tvar

$$M = k \cdot \Phi \cdot I$$

kde

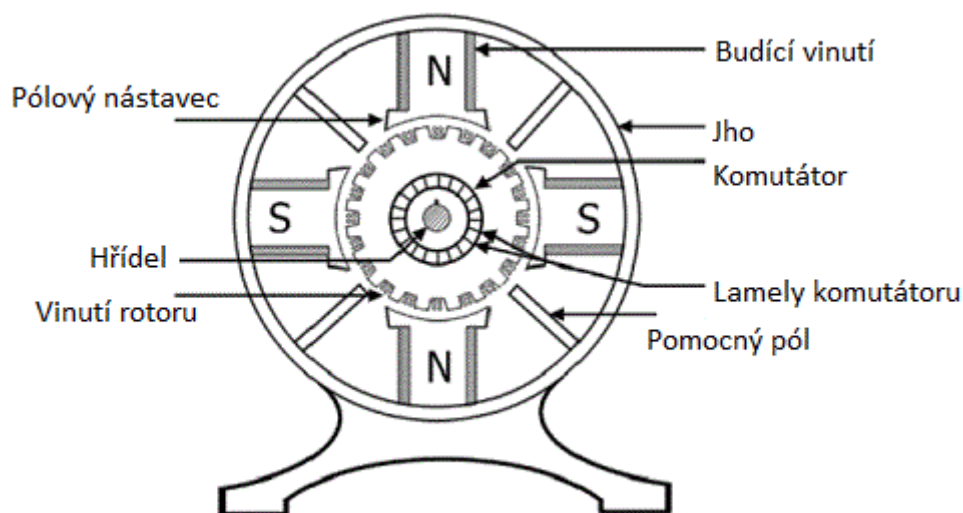
$M$  [N·m] je celkový moment motoru

$k$  [-] je konstanta motoru

$\Phi$  [Wb] je celkový magnetický tok

$I$  [A] je proud kotvy motoru.

### 2.1.2. Konstrukční provedení



Obr.[3] Příčný řez stejnosměrným motorem [6]

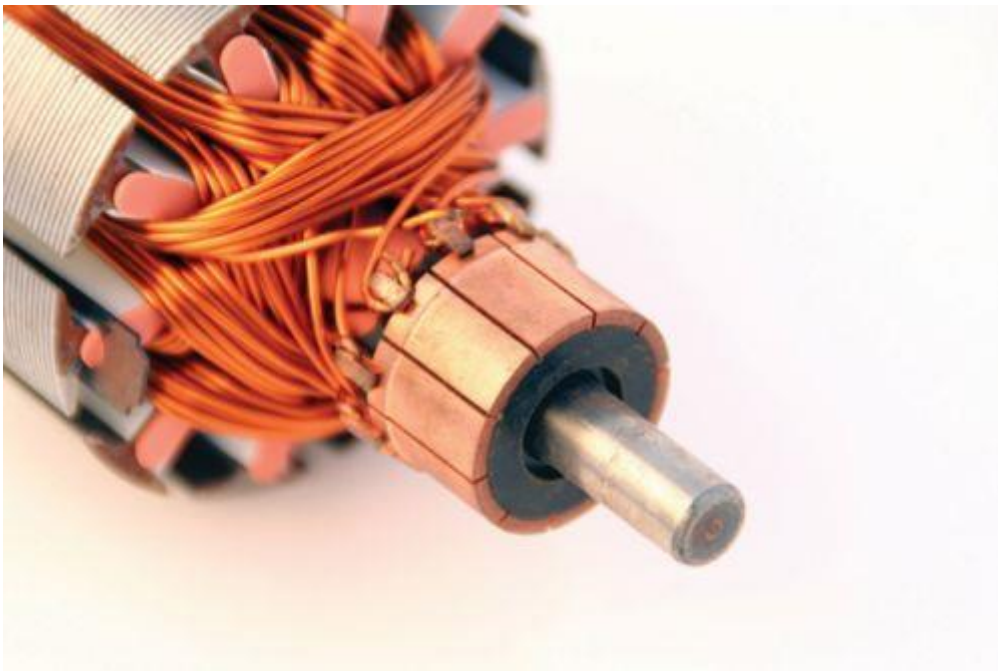
Budící vinutí je na hlavních pólech statoru. Aby bylo zajištěno co nejrovnoměrnější rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře, jsou póly opatřeny pólovými nástavci. Magnetický tok se uzavírá přes tzv. jho statoru. Protože je magnetický tok stálý mohou být póly a jho vyrobeny z plného materiálu. Chceme-li omezit ztráty způsobené pulzací magnetického pole, ke kterým dochází v důsledku drážkování rotoru, mohou být nástavce nebo celé póly složeny ze vzájemně izolovaných plechů pro elektrotechniku tloušťky 0,5 – 1 mm. [5]

Magnetické pole které vytváří proud protékající kotvou na jedné straně oslabuje hlavní magnetické pole, vytvářené budícím vinutím, na straně druhé ho posiluje. Mluvíme o tzv. zpětné reakci kotvy. Jejimi důsledky jsou např. nižší stabilita chodu motoru nebo lokální zvýšení lamelového napětí. Možným řešením je pootočení kartáčů do magneticky neutrální osy, avšak tento způsob se hodí pouze pro konstantní zatížení a pouze jeden smysl otáčení. V aplikacích s proměnným zatížením a s požadavkem na oba směry otáčení, jako je například pohon lanové dráhy se tedy používá tzv.

pomocných pólů, jejichž magnetické pole působí proti účinkům zpětné reakce kotvy. Protože kompenzují účinky proudu kotvy, je jejich vinutí proudem kotvy protékáno.

Rotor, který je uložen v ložiskách, je vždy složen z plechů pro elektrotechniku tloušťky zpravidla 0,5 mm. [5] V drážkách rotoru je uloženo vinutí, jehož cívky jsou vyvedeny na lamely komutátoru. Čela vinutí jsou zajištěna klíny, aby vinutí odolalo působení odstředivých sil.

Komutátor je vyroben z elektrolytické mědi. Jeho jednotlivé lamely jsou izolovaně uloženy v nosné konstrukci. Při výrobě komutátorů je velký důraz kladen na přesné broušení. Na lamely komutátoru dosedají kartáče, které se vyrábí z grafitu a příměsí mědi nebo dalších kovů. Je to právě technická náročnost výroby komutátorů, která vede k vyšší ceně stejnosměrných motorů, což má za následek jejich stále častější nahrazování motory střídavými. [5]



Obr. [4] Stator stejnosměrného motoru [7]

### 2.1.3. Rozdělení stejnosměrných motorů

Stejnoseměrné motory můžeme rozdělit podle zapojení budícího vinutí na:

1. stejnosměrné motory se sériovým buzením
2. stejnosměrné motory s paralelním buzením
3. stejnosměrné motory se smíšeným (kompaundním) buzením
4. stejnosměrné motory s cizím buzením

U motorů se sériovým buzením je proud kotvy zároveň proudem budícím. Motor má tzv. měkkou charakteristiku, to znamená, že se zvyšujícím se zatížením se snižují otáčky, což je vlastnost výhodná např. v trakci, kde se tyto motory dříve používaly, avšak dnes jsou již nahrazovány motory střídavými.

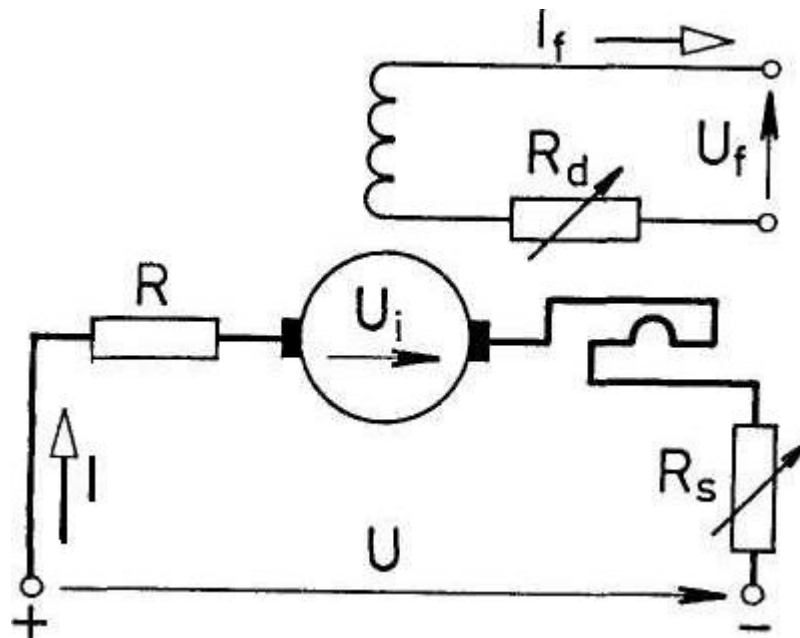
Paralelně buzené motory mají společný zdroj napětí jak pro kotvu, tak pro buzení, což je řešení výhodné konstrukčně, avšak změna napětí při rozběhu a řízení otáček musí být realizována pomocí odporu v obvodu kotvy a je tedy ztrátová.

Motory se smíšeným buzením jsou přechodem mezi sériovým a paralelním buzením. Mají dvě budící vinutí, jedno zapojeno do série s kotvou, druhé paralelně. Jejich mechanická charakteristika



tedy závislost otáček na momentu je měkčí než u strojů paralelně buzených, resp. tvrdší než u strojů sériově buzených. [8]

Cize buzené motory mají vlastní zdroj napětí pro buzení i kotvu. Nevýhodou je potřeba vlastního zdroje pro buzení a tedy i vyšší pořizovací náklady, za které však získáme široké pásmo řízení otáček a možnost rekuperačního brzdění, kterou u paralelního zapojení nemáme. Pro pohon lanových drah se používají právě motory s cizím buzením a proto se dále budeme zabývat výhradně jimi.

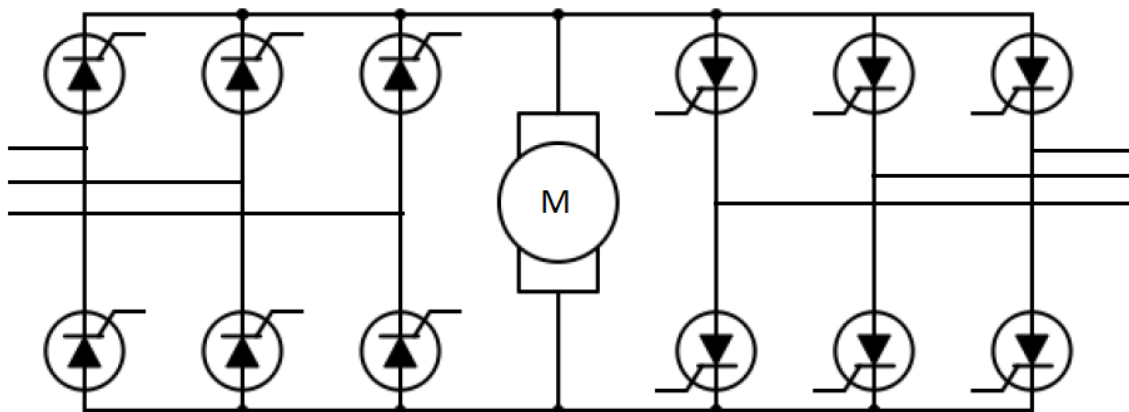


Obr. [5] Schéma zapojení cize buzeného stejnosměrného motoru [5]

#### 2.1.4 Napájení cize buzeného stejnosměrného motoru

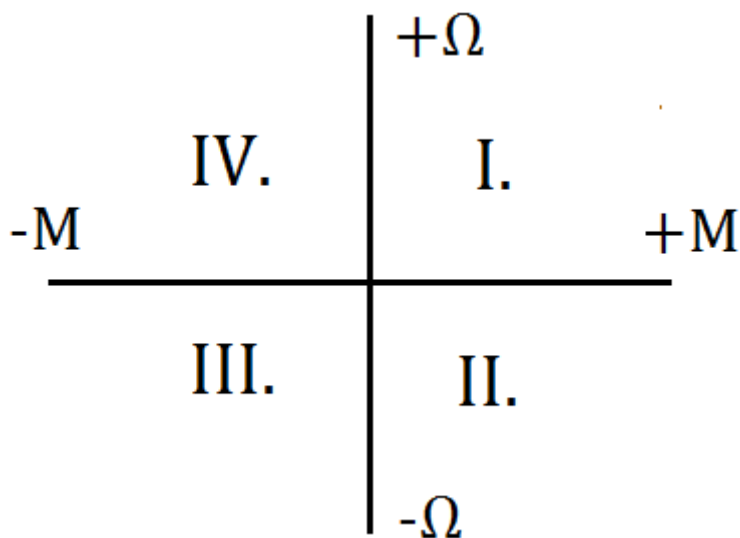
Vzhledem k tomu, že pohon lanové dráhy není dynamicky náročný pracují motory s konstantním buzením a veškerá regulace pohonu se provádí změnou napětí na obvodu kotvy. K napájení kotvy se používá třífázového tyristorového usměrňovače v můstkovém zapojení. Aby mohl motor snadno pracovat ve všech čtyřech kvadrantech M- $\Omega$  diagramu, používá se zapojení se dvěma můstky které jsou k obvodu kotvy připojeny antiparalelně.





Obr. [6] Napájení kotvy motoru dvěma antiparalelně zapojenými tyristorovými můstkami

V tomto zapojení může motor pracovat v 1. a 3. kvadrantu v motorickém chodu a ve 2. a 4. kvadrantu může rekuperačně brzdit.



Obr. [7] M- $\Omega$  diagram

Změna napájecího napětí se provádí pomocí řídicího úhlu  $\alpha$  jenž určuje dobu sepnutí tyristorů. Úhel  $\alpha$  je výstupem regulátoru řídicích pulzů, jehož vstupem je  $U_{\check{r}}$ . Závislost střední hodnoty výstupního napětí usměrňovače  $U_{d(AV)}$  na  $U_{\check{r}}$  je dána vztahem

$$\frac{U_{d(AV)}}{U_{d(AV)0}} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_{\check{r}}}{U_{\check{r}max}}\right)$$

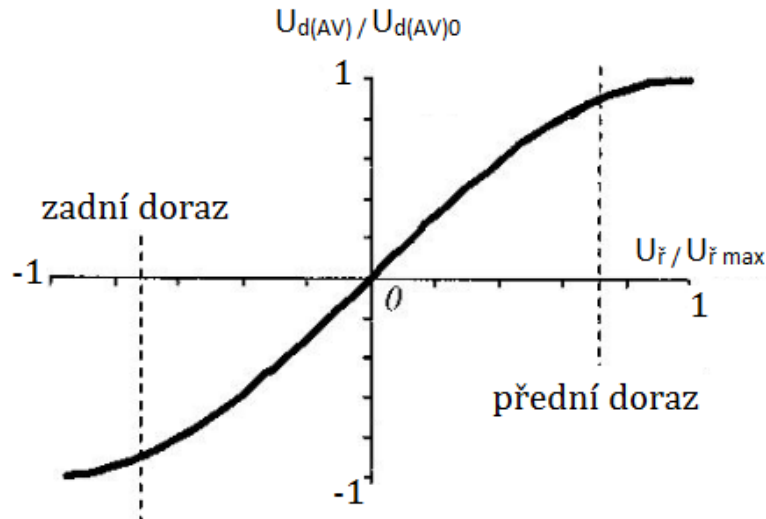
kde

$U_{d(AV)}$  je střední hodnota výstupního napětí usměrňovače

$U_{d(AV)0}$  je střední hodnota výstupního napětí usměrňovače pro  $U_{\check{r}} = U_{\check{r}max}$

$U_{\check{r}}$  je vstupní napětí generátoru řídicích pulzů

$U_{\check{r}max}$  je maximální vstupní napětí generátoru řídicích pulzů [8]



Obr. [8] Závislost  $U_{d(AV)} / U_{d(AV)0}$  na  $U_f / U_{f \max}$  [8]

### 2.1.5 Rozběh, brzdění a řízení otáček cize buzeného stejnosměrného motoru.

Do vodičů kotvy pracujícího motoru se indukuje napětí jehož velikost určuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce, který má tvar

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

kde

$U_i$  [V] je indukované napětí,

$\Phi$  [Wb] je magnetický tok.

Pro proud kotvy platí vztah

$$I = \frac{U - U_i}{R}$$

kde

$U$  [V] je napětí zdroje

$U_i$  [V] je indukované napětí

$R$  [ $\Omega$ ] je odpor obvodu kotvy. [5]

Na začátku rozběhu kdy motor stojí je  $U_i = 0$ . Proud kotvy je dán pouze napětím  $U$ , které je nutné postupně zvyšovat protože při připojení plného napětí na stojící motor by byl záběrný proud příliš velký a mohlo by dojít k poškození motoru. Aby byl motor schopen vytvořit dostatečně velký záběrný moment, musí být při spouštění plně nabuzen.

Brzdit je možno jednak rekuperací kdy se mechanická energie přiváděná do motoru přes hřídel mění na energii elektrickou nebo protiproudem. Při brzdění protiproudem je proud kotvy dán vztahem

$$I = \frac{U + U_i}{R}$$

a je několikrát vyšší než proud jmenovitý. Brzdění protiproudem se tedy používá pouze výjimečně v situacích kdy je potřeba lanovou dráhu brzdit velmi rychle např. při špatném vystoupení pasažérů při kterém by mohlo být ohroženo jejich zdraví. Pro případ výpadku elektrické energie, při kterém by nebylo možné brzdit rekuperací ani protiproudem je lanová dráha vybavena mechanickými brzdami které v případě výpadku proudu uvedou zařízení automaticky do klidu.

Pro otáčky cize buzeného stejnosměrného motoru platí vztah

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_E \cdot \Phi}$$

kde

$U$  [V] je napájecí napětí

$R \cdot I$  [V] je úbytek na kotvě

$k_E$  [-] je konstanta

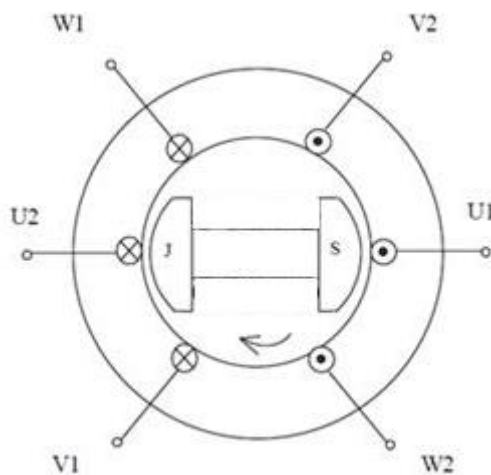
$\Phi$  [Wb] je magnetický tok. [5]

Otáčky můžeme řídit zařazením odporu do obvodu kotvy, jedná se však o řízení ztrátové a proto se pro pohon lanové dráhy nepoužívá. Protože pracujeme s konstantním buzením je magnetický tok neměnný a řízení otáček změnou  $\Phi$  také použít nemůžeme. Otáčky tedy řídíme pouze změnou napájecího napětí  $U$ .

## 2.2 Synchronní motory

### 2.2.1 Princip funkce

Střídavé proudy, které protékají vinutím statoru, vytvářejí točivé magnetické pole. Rotor, jehož magnetické pole je tvořeno permanentním magnetem nebo budícím vinutím je tímto polem unášen a pohybuje se stejnou úhlovou rychlostí – synchronně.



Obr. [9] Princip funkce synchronního motoru [9]

Pro moment synchronního motoru platí vztah:

$$M = \frac{3 \cdot p_p}{\Omega_1} \cdot \left( \frac{U \cdot U_{ie}}{x_d} * \sin \beta + \frac{U^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) * \sin 2\beta \right)$$

Kde

$p_p$  [-] je počet pólů

$\Omega_1$  [rad·s<sup>-1</sup>] je elektrická úhlová rychlost

$U$  [V] je napájecí napětí

$U_{ie}$  [V] je vnitřní napětí

$x_d$  [Ω] je podélná synchronní reaktance

$x_q$  [Ω] je příčná synchronní reaktance

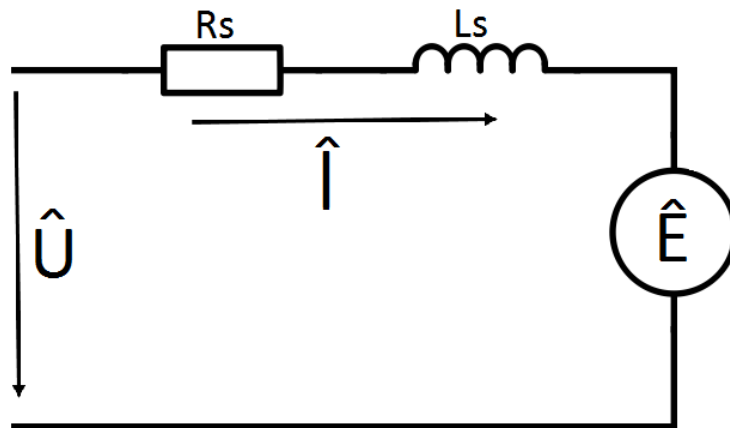
$\beta$  [rad] je zátěžný úhel [8]

Moment má dvě složky. Moment synchronní  $M_s$  je přímo úměrný součinu napájecího a vnitřního napětí, nepřímo úměrný podélné synchronní reaktanci a přímo úměrný sinu zátěžného úhlu. Moment reluktanční  $M_{rel}$  je přímo úměrný kvadrátu napájecího napětí, rozdílu převrácených hodnot příčné a podélné synchronní reaktance a sinu dvojnásobku zátěžného úhlu. [8]

### 2.2.2 Konstrukční provedení

Stator synchronního motoru je totožný se statorem asynchronního motoru. Je složen z plechů pro elektrotechniku, vzájemně izolovaných. V jeho drážkách je uloženo většinou trojfázové vinutí. Synchronní motor nemusí ze sítě odebírat jalový výkon, což dovoluje výrazně větší rozměry vzduchové mezery (5 – 100 mm), než u strojů asynchronních. [5]

Rotory synchronních motorů používaných pro pohon lanových drah nejsou buzeny elektricky. Jejich magnetické pole je tvořeno permanentními magnety ze vzácných zemin jako SaCo nebo NdFeB. Ty mají vysoká sycení  $B_r$  od 1 T do 1,2 T a vysokou koercitivní sílu  $H_b$  od 7 kA/m do 9kA/m. Výhodou motorů s permanentními magnety je, že nevyžadují zdroj pro buzení. Jejich nevýhodou je, že magnetický tok nelze regulovat. [8]



Obr. 10 Náhradní schéma synchronního motoru s permanentními magnety [8]

$\hat{U}$  – fázové napájecí napětí,  $\hat{E}$  – napětí indukované mag. tokem  $\Phi_{PM}$ ,  $\hat{I}$  – proud jedné fáze statoru

$R_s$  – odpor jedné fáze statorového vinutí,  $L_s$  – náhradní indukčnost reakce kotvy

### 2.2.3 Rozdělení synchronních motorů

Synchronní motory můžeme podle provedení rotoru rozdělit na:

1. Synchronní motory s hladkým rotorem
2. Synchronní motory s vyniklými póly

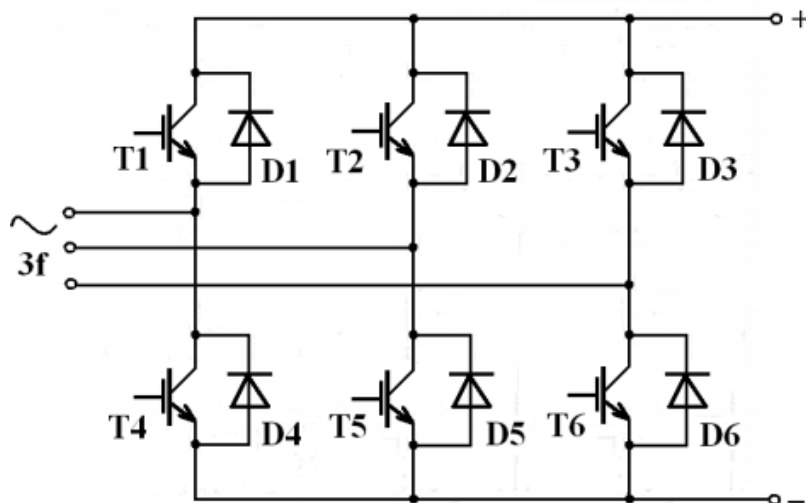
Synchronní motory s hladkým rotorem se nejčastěji vyrábí jako dvoupólové. Při napájení trojfázovým proudem s kmitočtem 50 Hz mají rychlost 3000 ot/min, při napájení z kmitočtového měniče mohou dosáhnout i vyšší rychlosti. Jako generátory jsou nejčastějším strojem pro výrobu elektrické energie.

Synchronní motory s vyniklými póly jsou vícepólové a používají se v aplikacích s nižší požadovanou otáčivou rychlostí. Výhodou strojů s vyniklými póly je reluktanční moment, který vzniká v důsledku snahy rotoru zaujmout pozici s co nejmenším magnetickým odporem. U strojů s hladkým rotorem je magnetický odpor konstantní a reluktanční moment u nich nevzniká.

### 2.2.4 Napájení synchronních motorů

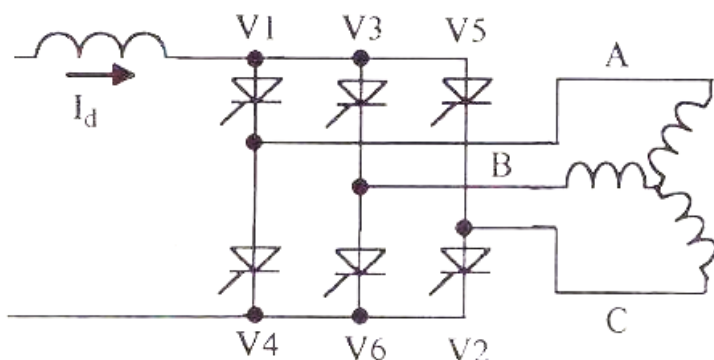
Synchronní motory jsou napájeny z měničů frekvence s proudovým meziobvodem. [8]

Měnič frekvence se skládá z usměrňovače a střídače. Jako usměrňovač umožňující rekuperační brzdění může sloužit trojfázový můstek osazený tranzistory a zpětnými diodami.



Obr. Obr. [11] Můstkový usměrňovač osazený tranzistory IGBT [10]

Jako střídač může sloužit tyristorový střídač zapojený dle obr. 12. Dvojice tyristorů postupně spínají v pořadí uvedeném v tabulce na obr. 13.



Obr. 12. Obvodové schéma proudového tyristorového střídače [8]

1.	V1	V2
2.	V3	V2
3.	V3	V4
4.	V5	V4
5.	V5	V6
6.	V1	V6

Obr. 13 Pořadí spínání tyristorů [8]

### 2.1.5 Rozběh, řízení otáček a brzdění synchronního motoru.

Rozběh synchronního motoru je realizován postupným zvyšováním napájecí frekvence.

Pro otáčky synchronního motoru platí vztah:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

kde

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky za minutu

$f$  [Hz] je napájecí frekvence

$p$  [-] je počet pólpárů

Je zřejmé, že otáčky jsou přímo úměrné napájecí frekvenci, změna rychlosti je tedy realizována změnou napájecí frekvence.

Při brzdění se obrátí směr toku výkonu a synchronní motor pracuje jako generátor. Ze střídače se stane usměrňovač, z usměrňovače střídač a stroj dodává elektrickou energii do sítě.

## **2.3 Porovnání funkce stejnosměrného cize buzeného a synchronního motoru pro pohon lanové dráhy**

### **2.3.1 Požadavky na pohon**

Lanová dráha musí pracovat s konstantní rychlostí, aby byla zajištěna bezpečnost provozu. Maximální rychlost je dána konstrukcí trasy a tím, jestli je lanová dráha vybavena odpojovacím systémem ve stanicích, bez něhož je maximální rychlost provozu dána rychlostí vhodnou pro nástup a výstup, což provozní rychlost významně snižuje. Většina sedačkových lanových drah vybavených odpojovacím systémem ve stanicích, pracuje v České republice s provozní rychlostí sedaček přibližně  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při zhoršených provozních podmínkách, zejména při vysoké rychlosti větru se provozní rychlost snižuje. Při přesáhnutí určité úrovně rychlosti větru je nutno provoz zastavit, u lanové dráhy Medvědíň tato hodnota činí  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při překročení této hodnoty dochází k automatickému snížení rychlosti, obsluha lanové dráhy je povinna udržet zařízení v provozu dokud se všichni pasažéři z trasy nedostanou do stanice a poté provoz ukončit, dokud se rychlost větru nevrátí pod maximální povolenou hodnotu. V případě nedodržení tohoto postupu hrozí jako důsledek houpajících se sedaček vypadnutí lana z nosných kladek a následná újma na zdraví, popřípadě na životech pasažérů.

Konstantní rychlost je nutno udržovat navzdory velice proměnlivému momentu, který může v případech, kdy je počet pasažérů z horní stanice výrazně vyšší než v opačném směru, dokonce změnit smysl. V takovém případě se nabízí otázka, zda-li je možné zlepšit ekonomiku provozu prodejem elektrické energie vzniklé při rekuperačním brzdění. Navzdory velkému převýšení, které lanová dráha překonává je energie vzniklá brzděním příliš malá, neboť hmotnost pasažérů je příliš nízká v porovnání s hmotností nákladu přepravovaného lanovými drahami v těžebním průmyslu, kde se energie vzniklá rekuperační využívá.

Náklady na elektrickou energii dosahují řádově statisíců ročně, i malé zvýšení účinnosti může tedy znamenat výraznou úsporu.

Nízké nároky na údržbu a možnost snadné výměny v případě havárie jsou obecné požadavky kladené na všechny typy pohonů, stejně tak je tomu i u pohonu lanové dráhy. Porovnání funkce stejnosměrného cize buzeného a synchronního motoru tedy provedeme podle následujících čtyř kritérií:

1. stabilita chodu
2. účinnost pohonu
3. nároky na údržbu
4. možnost výměny v případě havárie

### 2.3.2 Stabilita chodu

Závislost mezi rychlostí otáčení a momentem ukazuje mechanická charakteristika. Ta udává závislost úhlové rychlosti  $\Omega$  na elektromagnetickém momentu  $M$  tedy  $\Omega = f(M)$ , při konstantním budícím proudu. [8]

Pro stejnosměrný cize buzený motor platí:

$$\Omega = \Omega_0 - k_M \cdot M$$

kde

$\Omega$  [rad·s<sup>-1</sup>] je úhlová rychlost rotoru

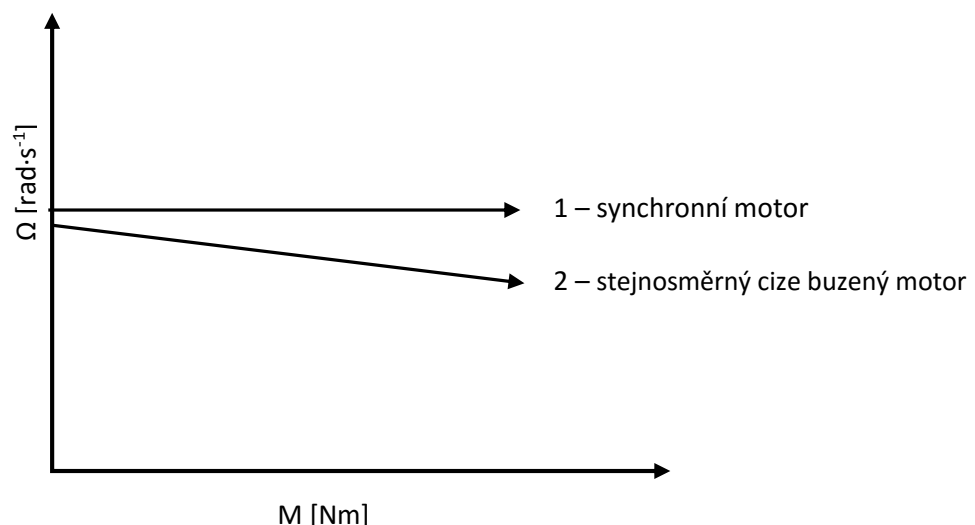
$\Omega_0$  [rad·s<sup>-1</sup>] je úhlová rychlost rotoru při chodu naprázdno

$k_M$  [-] je konstanta

$M$  [Nm] je elektromagnetický moment

U synchronního motoru je rychlost na momentu nezávislá a je dána pouze napájecí frekvencí. [8]

Mechanická charakteristika  $\Omega = f(M)$



Obr. 14 Mechanická charakteristika synchronního a stejnosměrného cize buzeného motoru

Jak je patrné z obr. 14, oba motory mají tzv. tvrdou charakteristiku. Ačkoli u stejnosměrného motoru dochází k mírnému poklesu otáček, který je způsoben úbytkem  $RI$  na obvodu kotvy, není tento pokles nijak významný a může být snadno vykompenzován regulátorem pohonu.

### 2.3.3 Účinnost pohonu

Pro stejnosměrné motory v oblasti výkonů kolem 400 kW je běžná účinnost přibližně 92 %. Účinnost synchronních motorů pro stejné výkony je vyšší a to přibližně 96 %.

Tyristorový usměrňovač používaný pro napájení stejnosměrného motoru má účinnost 98 %. [11]  
U měniče frekvence užívaného k napájení synchronních motorů udává výrobce taktéž účinnost 98 %. [12]



Motor nepohání lanovou dráhu přímo, ale přes převodovku, protože požadovaný moment je příliš veliký. Stejnoseměrný motor má pro stejný výkon nižší moment než motor synchronní a potřebuje tedy převodovku s vyšším převodem, přibližně 70:1, které odpovídá účinnost 94%. Naproti tomu motor synchronní potřebuje převodovku s převodem pouze 10:1, které odpovídá účinnost 96%.

Pro celkovou účinnost pohonu se stejnosměrným motorem tedy platí:

$$\eta = 0,92 \cdot 0,98 \cdot 0,94 = 0,85$$

Pro celkovou účinnost pohonu se synchronním motorem platí:

$$\eta = 0,96 \cdot 0,98 \cdot 0,96 = 0,90$$

Účinnost pohonu se synchronním motorem je tedy vyšší o 5 %

### 2.3.4 Nároky na údržbu

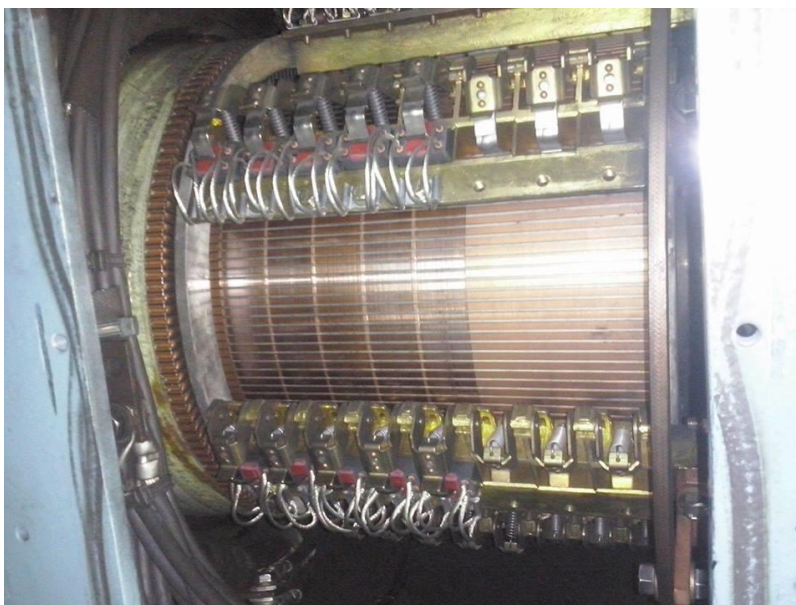
Kromě čištění a měření izolačních odporů, což vyžadují oba typy motorů, je u stejnosměrného motoru nutno měnit kartáče a kontrolovat opotřebení komutátoru. Právě opotřebení komutátoru je často uváděnou nevýhodou stejnosměrných strojů.

Výměna kartáčů neprobíhá periodicky, ale až po jejich opotřebení. Na lanové dráze Medvědin se výměna provádí přibližně jednou za 3 roky.

Ačkoli je komutátor vyroben z tvrdé elektrolytické mědi, postupem času dochází k jeho zbrusušení. Zbrusušení komutátoru je možné omezit použitím kompenzačního vinutí, které zajistí, že v okamžiku komutace se do cívký rotoru neindukuje napětí, což omezí jiskření na komutátoru.

Pro motor DMI315M od firmy ABB je v servisním manuálu uvedena hloubka maximálního možného opotřebení komutátoru 6 mm, tedy zmenšení průměru komutátoru o 12 mm. Optickou kontrolou bylo zjištěno, že od roku 2006, kdy byl motor instalován, tedy za 10 let provozu došlo k opotřebení do hloubky max. 2 mm. Malé opotřebení je dáno faktem, že motor pracuje pouze několik hodin denně, v zimní sezóně přibližně 9, v letní pouze 5 hodin denně a mimo sezónu, tedy další přibližně 3 měsíce nepracuje v podstatě vůbec.

Z hlediska celkových nároků na údržbu se tedy nedá hovořit o velké výhodě ve prospěch synchronního motoru.



Obr. 15 Komutátor stejnosměrného motoru pohánějícího lanovou dráhu Medvědín

### 2.3.5 Možnost výměny v případě havárie

Lanová dráha je zařízení, které zejména v podmínkách střední Evropy vytváří největší část celkového ročního zisku v poměrně krátké době. V případě nevratné poruchy, ke které občas dochází i přes dodržení veškerých předpisů a řádné údržbě, je nezbytné uvést zařízení co nejrychleji opět do provozu.

Současný stejnosměrný motor, pohánějící lanovou dráhu Medvědín, má hmotnost 1 950 kg. Synchronní motory s permanentními magnety o srovnatelném výkonu, tedy přibližně 420 kW, mají hmotnost okolo 7 000 kg.

Dolní stanice lanových drah jsou většinou dobře přístupné i pro větší náklad a výměna motoru proto nepřináší větší překážky. U lanové dráhy Medvědín je však motor umístěn v horní stanici. Mimo zimu je horní stanice přístupná po silnici i pro nákladní automobily, ale v případě, že by bylo třeba měnit motor během zimy, stává se samotná doprava motoru do místa potřeby velkým problémem.

Jako možné řešení se jeví přeprava pomocí rolby, avšak rolby používané ve skiareálu Špindlerův Mlýn mají nosnost do 5 000 kg. Další možností je využití helikoptéry s velkou nosností, tzv. létajícího jeřábu, který má nosnost až do 20 000 kg. Ani tento způsob dopravy však neřeší následnou montáž motoru, ke které je třeba použít jeřáb. Celkově je tedy výměna synchronního motoru v horní stanici, během zimy na hranici proveditelnosti a každý den, kdy je zařízení mimo provoz, přichází firma o zisk v řádech statisíců korun.

### 2.3.6 Zhodnocení

Pokud jde o požadavek na stabilitu chodu a nároky na údržbu, jsou si stejnosměrný a synchronní motor v podstatě rovny. Pro synchronní motor hovoří vyšší účinnost pohonu s jeho použitím, která je dána jednak vyšší účinností samotného motoru a také potřebou převodovky s menším převodem. Na druhou stranu má synchronní motor výrazně vyšší hmotnost, což může v případě těžko přístupné stanice v podstatě znemožnit jeho včasnou výměnu v případě havárie.

Ačkoli je možné tvrdit, že synchronní motor je obecně vhodnější, pro jisté specifické případy jako je pohon lanové dráhy umístěný v horní stanici, je vhodnější motor stejnosměrný.

### 3. Lanová dráha Medvědí – náhrada stávajícího stejnosměrného motoru motorem synchronním

#### 3.1. Obecný popis zařízení

Lanová dráha Medvědí se nachází v obci Špindlerův Mlýn. Její dolní stanice je ve výšce 745 m.n.m., horní stanice je výšce 1235 m.n.m., lanová dráha tak překonává převýšení 490 m. Celková délka dráhy je 1 912 m, na trati je umístěno 17 sloupů. Pohon lanové dráhy je umístěn v horní stanici.

Maximální rychlost je  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Lanová dráha je vybavena odpojovacím systémem ve stanicích, který snižuje rychlost jízdy ve stanicích na třetinu.

Lanová dráha je osazena 135 čtyřmístnými sedačkami. Teoretická maximální přepravní kapacita je 2400 osob za hodinu.

Současná lanová dráha byla vybudována v roce 1994, kdy nahradila původní lanovou dráhu z roku 1978 s přepravní kapacitou 500 osob za hodinu.

V roce 2006 došlo k výměně motoru, v roce 2011 k celkové rekonstrukci elektroinstalace včetně napájení motoru.



Obr. 16 Horní stanice lanové dráhy Medvědí [13]

#### 3.2 Stávající pohon

V současné době je lanová dráha poháněna motorem firmy ABB DMI315M s následujícími parametry:

$P_n$	424 kW
$U_n$	400 V
$A_n$	1144 A
$n_n$	1 610 ot/min
Hmotnost	1 950 kg
$U_f$	310 V
$I_f$	5,3 A
Účinnost	92,5 %

Motor je napájen z dvojmístkového usměrňovače DCS800-S02-1500-04, taktéž od firmy ABB, s maximálním výstupním výkonem 622,5 kW.

Převodovka GPW 235 SL 72 / 2248 od firmy LOHMANN+STOLTERFOHT má převod 72,207 : 1.

### 3.3 Návrh nového pohonu

Při výměně poháněcího zařízení je nutno dbát na to, aby byl nový pohon schopný vyvinout minimálně stejný maximální moment jako pohon stávající. Hodnota maximálního momentu stávajícího motoru činí:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{424\,000}{168,6} = 2\,515 \text{ Nm}$$

Výsledný moment je poté roven:

$$2\,515 \cdot 72,207 = 181\,601 \text{ Nm}$$

Pro nový pohon byly ve spolupráci se společností SIEMENS vybrány následující komponenty. Motor synchronní, 18-ti pólový, s permanentními magnety 1FW4505-3HA70-1AA0 o výkonu 481 kW a jmenovitých otáčkách 200 ot/min.

Měnič frekvence SINAMICS S120.

Převodovka Flender H2SH s převodem 10:1.

Motor má moment 23 000 Nm. V použití s převodovkou 10:1 tedy vyvine pohon moment 230 000 Nm a motor tedy vyhovuje.

Ceny jednotlivých komponent jsou uvedeny v následující tabulce. Cena měniče obsahuje i cenu přípojovacích vodičů. Původní ceny v eurech jsou přepočteny na koruny podle kurzu 27 CZK/EUR.

Motor	3 755 700 Kč
Měnič	2 049 300 Kč
Převodovka	290 115 Kč
Celková cena	6 095 115 Kč

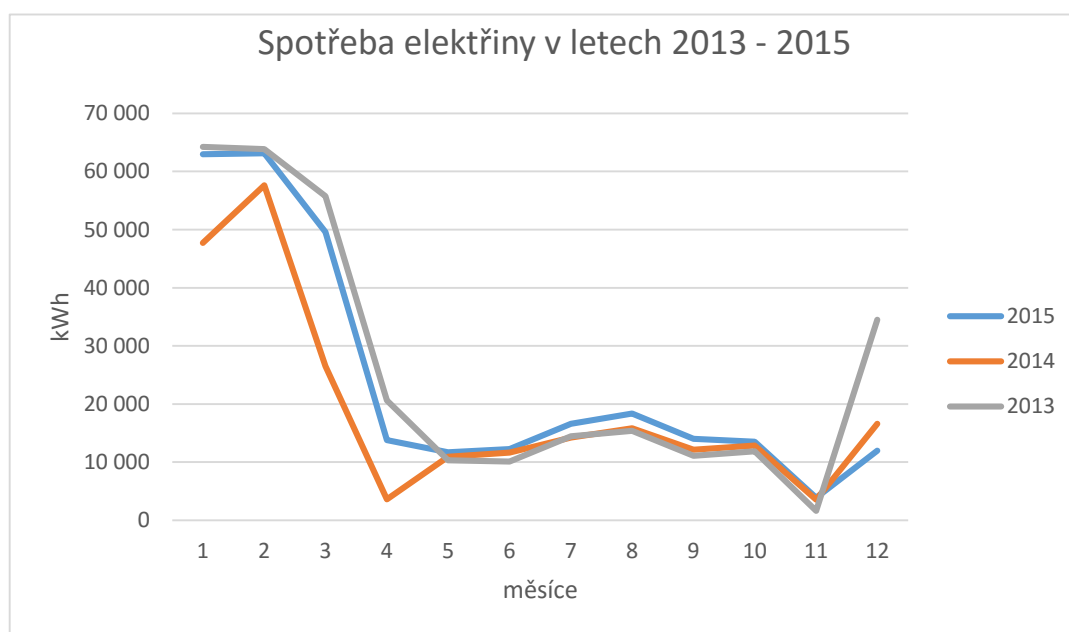
Náklady na montáž pohonu jsou přibližně 100 000 Kč, celková hodnota investice tedy činí 6 195 115 Kč.

Porovnání základních parametrů stávajícího a navrhovaného pohonu je uvedeno v následující tabulce.

Pohon	Stávající	Navrhovaný
Výkon motoru	424 kW	481 kW
Účinnost motoru	92,5 %	96,3 %
Hmotnost motoru	1 950 kg	7 070 kg
Převod převodovky	72:1	10:1
Celková účinnost pohonu	85%	90%

### 3.4 Důsledky výměny pohonu

Náklady na provoz se v průběhu roku značně liší. Nejvyšší náklady jsou v zimě, kdy je provoz v podstatě nepřetržitý od 7:00 do 16:00. V létě je zařízení v provozu každou půlhodinu mezi 8:00 -12:00 a 13:00-18:00 a počet přepravených pasažérů je výrazně nižší. Na konci podzimu a začátkem jara probíhá údržba, během níž je zařízení v provozu pouze pro potřeby servisu.



Obr. 17 Spotřeba elektřiny LD Medvědí v letech 2013 - 2015

Průměrné roční náklady na elektrickou energii činili v letech 2010-2015 1 327 005 Kč.

Zvýšením účinnosti pohonu z 85 % na 90 % klesnou náklady na elektrickou energii o 5,9 %.

Průměrná roční úspora je tedy při použití pohonu se synchronním motorem 73 722 Kč. Při uvažování stávající ceny elektřiny a 2 % inflaci je návratnost investice 51 let.

Přenesme nyní pomyslně lanovou dráhu Medvědí na nějaký rakouský ledovec a nechme ji pracovat celoročně v zimním režimu. Vezmeme-li jako referenční náklady únor 2015, stoupnou

celkové roční náklady na 2 415 130 Kč. Vezmeme-li v úvahu, že cena elektřiny pro velkoodběratele byla v Rakousku v letech 2012 – 2014 vyšší o 16 %, budou náklady na provoz 2 797 810 Kč. V tomto případě bude roční úspora 155 434 Kč a návratnost investice se sníží na 30 let, což je stále více než životnost pohonu.

Je třeba brát v úvahu i fakt, že lanové dráhy provozované v Alpách překonávají podstatně vyšší převýšení a mají výrazně vyšší přepravní kapacitu. Náklady na jejich pohon jsou tedy podstatně vyšší. Přesto se synchronní motory používají pro pohon lanových drah v České republice a to nejen u nových zařízení, ale i v případě rekonstrukcí. Důvodem vysoké doby návratnosti ve výše uvedeném příkladu, která značně převyšuje životnost pohonu, je vysoká pořizovací cena komponentů. Komponenty užívané v praxi mají cenu podstatně nižší, avšak nižší cena s sebou přináší vyšší poruchovost, jejíž dodatečné náklady jako výpadek příjmů v případě, že je zařízení mimo provoz, mohou značně převýšit úspory.

## **Závěr**

Otázka zda-li pro pohon lanové dráhy použít stejnosměrný nebo synchronní motor nemá jednoznačnou odpověď. Při rozhodování je třeba brát v potaz řadu faktorů.

Výhodou pohonu se synchronním motorem je vyšší účinnost, avšak náklady spojené s přechodem na tento typ pohonu jsou velmi vysoké a pro klimatické a provozní podmínky, ve kterých pracují lanové dráhy v České republice je doba návratnosti investice vyšší než životnost pohonu. Možným řešením tohoto problému je použití komponent s nižší pořizovací cenou, což s sebou však přináší vyšší poruchovost.

Navzdory současnému trendu používat pro pohon lanových drah synchronní motory, jsou stále případy, kdy je vhodné zachovat pohon s motorem stejnosměrným. Jedná se zejména o zařízení jejichž pohon je umístěn v těžko přístupné lokalitě, například v horní stanici. V tomto případě hovoří pro stejnosměrný motor zejména jeho nižší hmotnost. Konkrétním příkladem této situace je lanová dráha Medvědin.

## **Seznam použité literatury a dalších zdrojů**



- [1] [www.bartlett.ucl.ac.uk](http://www.bartlett.ucl.ac.uk) [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.bartlett.ucl.ac.uk/dpu/metrocables/dissemination/Davila-Daste-2012-UNEP.pdf>
- [2] <http://www.yourlifeisatrip.com/> [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.yourlifeisatrip.com/home/medellin-colombia-dance-capitol-of-my-heart.html>
- [3] [www.kvk.cz](http://www.kvk.cz) [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [http://www.kvk.cz/novinky/kameni-se-vznasi-aneb-53let-prepravy-vapence-lanov\\_38/](http://www.kvk.cz/novinky/kameni-se-vznasi-aneb-53let-prepravy-vapence-lanov_38/)
- [4] [www.dpp.cz](http://www.dpp.cz) [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.dpp.cz/lanova-draha-na-petrin/>
- [5] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. Elektromechanické měniče. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [6] [www.electrical-engineering-portal.com](http://www.electrical-engineering-portal.com) [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/basics-of-dc-motors-for-electrical-engineers-beginners>
- [7] [www.electrical-engineering-portal.com](http://www.electrical-engineering-portal.com) [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/basics-of-dc-motors-for-electrical-engineers-beginners>
- [8] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. Elektrické pohony a jejich řízení. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05785-8.
- [9] <https://eluc.kr-olomoucky.cz> [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/791>
- [10] <http://p.kobrlc.sweb.cz> [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://p.kobrlc.sweb.cz/pohony/blok12.pdf>
- [11] <https://www.citacepro.com> [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/dok/ITVbGUACHzYBj645>
- [12] <https://www.citacepro.com> [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [http://www1.siemens.cz/ad/current/content/data\\_files/katalogy/d31/cat\\_d-31\\_2015\\_en.pdf](http://www1.siemens.cz/ad/current/content/data_files/katalogy/d31/cat_d-31_2015_en.pdf)
- [13] <http://www.gastpro.cz> [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.gastpro.cz/rychla-obcerstveni/detail/restaurace-lanovka-medvedin-spindleruv-mlyn/>
- [14] <http://www.tzb-info.cz> [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliva-energie/12823-srovnani-cen-elektriny-a-plynu-v-evrope>