

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Použití vícerychlostních asynchronních elektromotorů
Use of multi-speed asynchronous electric motors

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Mrva**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Použití vícerychlostních asynchronních elektromotorů**
Use of multi-speed asynchronous electric motors
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Typy trojfázových vícerychlostních asynchronních elektromotorů a jejich elektrické a mechanické vlastnosti.
2. Chování trojfázového vícerychlostního asynchronního elektromotoru v různých druzích pohonů.
3. Přehledová schemata pohonů s trojfázovými vícerychlostními asynchronními elektromotory.
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Chmelík, K.- Asynchronní a synchronní elektrické stroje, VŠB-TU Ostrava 2002
- 3) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2008


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



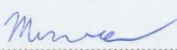

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 14. května 2020



.....

(podpis)

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad a připomínek a také za čas, který mi věnoval při konzultacích. V neposlední řadě mu děkuji za průvod základními funkcemi programu EPLAN.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vícerychlostními asynchronními elektromotory a jejich využitím. V první části jsou uvedeny metody, kterými lze měnit počet pólů asynchronního motoru, a dále jeho elektrické a mechanické vlastnosti. Tato část také obsahuje podrobný návod pro vykreslení momentové charakteristiky asynchronního motoru z hodnot, které udává výrobce. Dále je navržen pohon ventilátoru a pojezdu jeřábu, jehož výsledkem je sestavení momentové charakteristiky motoru i poháněného zařízení. Další bod pojednává o připojení vícerychlostních asynchronních elektromotorů k síti a o způsobech jejich jištění. Závěrem bakalářské práce autor navrhuje ovládání obou výše zmíněných pohonů.

Klíčová slova

vícerychlostní asynchronní elektromotor, Dahlanderovo zapojení, pohon ventilátoru, pohon pojezdu jeřábu, momentová charakteristika, připojení motoru k síti, jištění asynchronního motoru, ovládací obvod

Abstract

This Bachelor thesis occupies with multi-speed asynchronous electric motors and their use. The first part analyses the methods which can be used to change the number of poles of induction machine and its electrical and mechanical properties. This part also contains detailed instruction for construction of torque speed characteristic from values which gives producer. In the next part is designed fan drive and crane travel drive whose result is construction of torque speed characteristic of motor and driven equipment. Next point deals with connection of multi-speed asynchronous electric motors to electrical network and their methods of protection. At the end of Bachelor thesis author devises control of both aboved-mentioned drives.

Keywords

multi-speed asynchronous electric motor, Dahlander connection, fan drive, crane travel drive, torque speed characteristic, motor connection to electrical network, protection of induction machine, control circuit

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam ilustrací a tabulek.....	9
Úvod.....	10
1 Typy trojfázových vícerychlostních asynchronních elektromotorů a jejich elektrické a mechanické vlastnosti.....	11
1.1 Rozdělení podle zapojení statorového vinutí	11
1.1.1 Přepojení Y/YY	12
1.1.2 Přepojení D/YY	13
1.2 Rozdělení podle počtu rychlostí.....	14
1.3 Elektrické vlastnosti	14
1.4 Mechanické vlastnosti	17
2 Chování trojfázového vícerychlostního asynchronního elektromotoru v různých druzích pohonu	23
2.1 Rozdělení pracovních mechanismů podle momentové charakteristiky	23
2.1.1 Jeřábová charakteristika	23
2.1.2 Kalandrová charakteristika.....	24
2.1.3 Ventilátorová charakteristika	25
2.1.4 Navíječková charakteristika	26
2.2 Pohon ventilátoru	27
2.2.1 Výpočet momentové charakteristiky ventilátoru.....	27
2.2.2 Výpočet momentové charakteristiky elektromotoru pro pohon ventilátoru.....	29
2.2.3 Určení pracovních bodů pohonu	31
2.2.4 Popsání pohonu	31
2.3 Pohon pojezdu jeřábu	33
2.3.1 Výpočet momentové charakteristiky pojezdu jeřábu	33
2.3.2 Výpočet momentové charakteristiky elektromotoru pro pohon pojezdu jeřábu	34
2.3.3 Určení pracovních bodů pohonu	36
2.3.4 Popsání pohonu	36
3 Přehledová schémata pohonů s trojfázovými vícerychlostními asynchronními elektromotory	38
3.1 Schéma motoru pro pohon ventilátoru	38
3.2 Schéma motoru pro pohon pojezdu jeřábu.....	41
3.3 Schéma třírychlostního motoru	45
4 Závěr.....	48
Seznam použité literatury	49

Seznam použitých symbolů a zkratek

symbol/zkratka	název	jednotka
D	zapojení statorového vinutí do trojúhelníku	
F	jednofázový jistič / pojistka / nadproudové relé	
I_n	jmenovitý proud	[A]
I_z	záběrný proud	[A]
K	stykač	
KT	časové relé	
L1, L2, L3	označení fází elektrické sítě	
M	točivý moment	[Nm]
M_{max}	moment zvratu	[Nm]
M_n	jmenovitý moment	[Nm]
M_p	pracovní moment	[Nm]
M_r	rozběhový moment pojezdu jeřábu	[Nm]
M1	označení motoru	
N	nulový vodič	
P	výkon (elektromotoru, ventilátoru, pojezdu jeřábu)	[W]
PE	ochranný vodič	
Q_v	objemový průtok vzduchu	[m ³ ·s ⁻¹]
Q	trojfázový jistič	
S	tlačítko ovládání	
T	odpor pojíždějících kol pojezdu jeřábu	[N]
U, V, W	označení fází elektrické sítě	
Y	zapojení statorového vinutí do hvězdy	
YY	zapojení statorového vinutí do dvojité hvězdy	
Δp_c	tlaková diference	[Pa]
Ω	mechanická úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]
f	frekvence	[Hz]
n	otáčky	[min ⁻¹]
n_k	kritické otáčky	[min ⁻¹]

n_n	jmenovité otáčky	[min ⁻¹]
n_s	synchronní otáčky	[min ⁻¹]
např.	například	
p	počet pólů motoru	
s	skluz	[-]
s_k	kritický skluz	[-]
s_n	jmenovitý skluz	[-]
v	rychlost pojezdu jeřábu	[m·s ⁻¹]
η	účinnost (elektromotoru, ventilátoru, pojezdu jeřábu)	[-]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
1U	příkladné označení svorky motoru	
3~	třífázový	

Seznam ilustrací a tabulek

<i>Obr. 1 - Schéma zapojení statorového vinutí a svorkovnice při přepínání z hvězdy do dvojité hvězdy [6, s. 6].....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2 - Schéma zapojení statorového vinutí a svorkovnice při přepínání z trojúhelníku do dvojité hvězdy [6, s. 6].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3 - Průběh proudu při rozběhu dvourychlostního asynchronního elektromotoru, $I = f(t)$ [1, s. 45].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4 - Momentová charakteristika asynchronního stroje $M = f(n)$ [1, s. 27].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5 - Momentová charakteristika asynchronního stroje $M = f(s)$ [1, s. 27].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6 - Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru $M = f(n)$ [4, s. 43, 44].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7 - Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru $M = f(s)$ [4, s. 43, 44].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8 - Jeřábová charakteristika [12].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 9 - Kalandrová charakteristika [12].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10 - Ventilátorová charakteristika [12].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11 - Navíječková charakteristika [12].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12 - Tlaková charakteristika zvoleného ventilátoru z katalogu [7, s. 13].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13 - Chování dvourychlostního asynchronního elektromotoru při pohonu ventilátoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 14 - Chování dvourychlostního asynchronního elektromotoru při pohonu pojezdu jeřábu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 15 - Silové a ovládací schéma motoru pro pohon ventilátoru [5, s. 59–62].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 16 - Ovladač motoru pro pohon ventilátoru.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 17 - Silové a ovládací schéma motoru pro pohon pojezdu jeřábu [5, s. 75, 76].....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 18 - Ovladač motoru pro pohon pojezdu jeřábu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 19 - Silové schéma třírychlostního motoru [5, s. 83].....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 1 - Základní parametry zvoleného ventilátoru [7, s. 13].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 2 - Hodnoty zvolené a odečtené z tlakové charakteristiky ventilátoru pro maximální výkon.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3 - Základní parametry zvoleného elektromotoru pro pohon ventilátoru [6, s. 13].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4 - Zvolené parametry pojezdu jeřábu [9, s. 24, 25].....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5 - Základní parametry zvoleného elektromotoru pro pohon pojezdu jeřábu [6, s. 12].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6 – Příklad poměru rychlostí třírychlostního motoru M3 [5, s. 83].....</i>	<i>47</i>

Úvod

Asynchronní elektromotory patří mezi nejhojněji vyráběné točivé elektrické stroje. Rozšířené jsou zejména v průmyslu a domácnostech, kde jsou používány především kvůli relativně jednoduché konstrukci, spolehlivosti a nízkým pořizovacím i provozním nákladům.

Asynchronní motor přeměňuje elektrickou energii na energii mechanickou. Točivé magnetické pole, které vznikne průchodem trojfázového střídavého proudu statorovým vinutím, protíná vinutí rotorové klece spojené kruhy nakrátko. Tím se v rotoru indukuje napětí a následně jím začne protékat proud. Vzniká točivý moment a rotor se začíná točit asynchronní rychlostí. Tato rychlost je menší oproti rychlosti otáčení magnetického pole právě o skluz.

Otáčky asynchronního motoru závisí na frekvenci napájecího proudu, skluzu a počtu pólů motoru. V poslední době se díky rozvoji výkonové elektroniky a frekvenčních měničů stále více využívá regulace otáček pomocí frekvence, která je plynulá a skoro bezztrátová. Regulace pomocí skluzu se dá použít jen u kroužkových motorů, a navíc dochází k velkým ztrátám energie, protože se do vinutí rotoru zařazují regulační rezistory. Motory využívající k regulaci otáček změnu počtu pólů nazýváme vícerychlostní. Počet pólů motoru lze měnit pouze po stupních, proto se jedná o regulaci skokovou. Používá se v aplikacích, kde potřebujeme pouze pár provozních rychlostí, popřípadě pro hladší rozběh motoru. Tato bakalářská práce je zaměřena hlavně na vlastnosti, použití, připojení k síti, jištění a ovládání právě těchto vícerychlostních asynchronních elektromotorů. Cílem práce je komplexně navrhnout pohon dvou různých zařízení.

1 Typy trojfázových vícerychlostních asynchronních elektromotorů a jejich elektrické a mechanické vlastnosti

1.1 Rozdělení podle zapojení statorového vinutí

Skoková změna synchronní rychlosti magnetického pole se realizuje změnou počtu pólů statorového vinutí motoru.

Statorové vinutí vícerychlostního motoru dělíme podle zapojení na:

1) Samostatná vinutí

Motor obsahuje dvě samostatná statorová vinutí s rozdílným počtem pólů, přičemž vždy je napájeno pouze jedno z nich. Jedná se vlastně o dva různé motory v jedné kostře. Výhodou je, že poskytuje možnost libovolného poměru rychlostí. Takovéto řešení ovšem vede ke zvětšení rozměrů a váhy stroje. [2, s. 91]

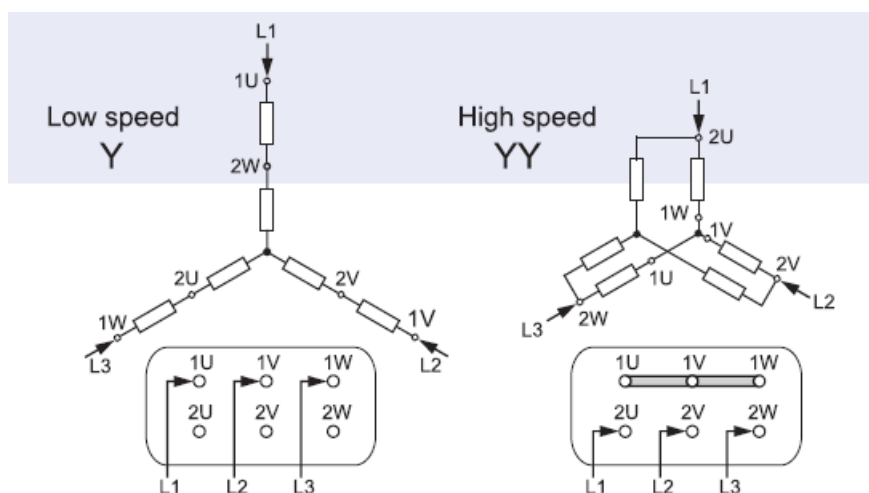
2) Přepínatelné vinutí s odbočkami

Motor obsahuje pouze jedno statorové vinutí, avšak každá cívka má na svorkovnici vyveden i svůj střed. Takovému zapojení se říká Dahlanderovo. V tomto případě lze dosáhnout poměru rychlostí pouze 1 : 2. Statorové vinutí může být zapojeno buď do hvězdy (Y) nebo do trojúhelníku (D). Po přepnutí do dvojité hvězdy (YY) se zmenší počet pólů na polovinu a magnetické pole se začne otáčet dvojnásobnou rychlostí. [2, s. 93] [3, s. 248]

3) Kombinace

Pro více než dvourychlostní motory se často používá kombinace obou metod pro zúžitkování výhod každé z nich.

1.1.1 Přepojení Y/YY

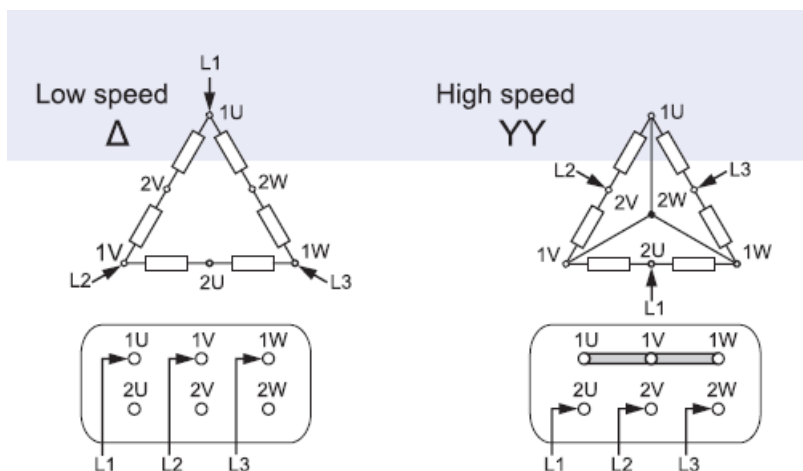


Obr. 1 - Schéma zapojení statorového vinutí a svorkovnice při přepínání z hvězdy do dvojité hvězdy [6, s. 6]

Statorové vinutí je zapojeno do hvězdy. Kromě začátků cívek každé fáze jsou na svorkovnici vyvedeny i jejich středy. Konce cívek jsou spojeny do společného uzlu. Při provozu na nižší rychlost (zapojení do hvězdy) jsou začátky cívek připojeny k trojfázové síti. Pro přepnutí na vyšší rychlost je nutné stykači přepojit statorové vinutí do dvojité hvězdy. Toho docílíme tak, že začátky cívek, které byly při nižší rychlosti připojeny k síti, spojíme do společného uzlu, a trojfázovým proudem budeme napájet vyvedené středy cívek. Zároveň musíme prohozením fází zajistit stejný směr otáčení motoru při obou rychlostech. Při zapojení do dvojité hvězdy má statorové vinutí motoru poloviční počet pólů a magnetické pole se tedy otáčí dvojnásobnou rychlostí než při zapojení do hvězdy. Jiný poměr rychlostí nelze touto metodou dosáhnout. Můžeme také říci, že v zapojení do hvězdy jsou cívky v každé fázi spojeny sériově, zatímco při zapojení do dvojité hvězdy jsou zapojeny paralelně.

Motor má teoreticky při zapojení do dvojité hvězdy dvojnásobný výkon než při zapojení do hvězdy, zatímco moment je při obou rychlostech stejný (za předpokladu stejných účinnků a účinností při obou rychlostech). [1, s. 58]

1.1.2 Přepojení D/YY



Obr. 2 - Schéma zapojení statorového vinutí a svorkovnice při přepínání z trojúhelníku do dvojitě hvězdy [6, s. 6]

Statorové vinutí je zapojeno do trojúhelníku. Kromě začátků cívek každé fáze jsou na svorkovnici vyvedeny i jejich středy. Při provozu na nižší rychlost (zapojení do trojúhelníku) jsou začátky cívek připojeny k trojfázové síti. Pro přepnutí na vyšší rychlost je nutné stykači přepojit statorové vinutí do dvojitě hvězdy. Toho docílíme tak, že začátky cívek, které byly při nižší rychlosti připojeny k síti, spojíme do společného uzlu, a trojfázovým proudem budeme napájet vyvedené středy cívek. Zároveň musíme prohozením fází zajistit stejný směr otáčení motoru při obou rychlostech. Při zapojení do dvojitě hvězdy má statorové vinutí motoru poloviční počet pólů a magnetické pole se tedy otáčí dvojnásobnou rychlostí než při zapojení do trojúhelníku. Jiný poměr rychlostí nelze touto metodou dosáhnout. Můžeme také říci, že v zapojení do trojúhelníku jsou cívky v každé fázi spojeny sériově, zatímco při zapojení do dvojitě hvězdy jsou zapojeny paralelně.

Platí, že při obou rychlostech má motor přibližně stejný výkon, konkrétně: $P_{yy} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot P_d = 1,16 \cdot P_d$. Moment při vyšších otáčkách bude tedy teoreticky poloviční oproti nižším otáčkám (za předpokladu stejných účinnků a účinností při obou rychlostech). [1, s. 58]

1.2 Rozdělení podle počtu rychlostí

1) Dvourychlostní

Naprostá většina vícerychlostních motorů jsou dvourychlostní. Podle požadavku na poměr rychlostí volíme buď dvě samostatná vinutí nebo přepínatelné vinutí s odbočkami. [3, s. 247, 248]

2) Třírychlostní

Většinou se používají dvě samostatná vinutí, přičemž jedno z nich je zároveň přepínatelné. Motory bývají velké a těžké a jejich přepínače značně komplikované. [3, s. 247, 248]

3) Čtyřrychlostní

Používají se dvě samostatná přepínatelná vinutí. Tři samostatná vinutí ve většině aplikací nelze použít, motor by byl příliš těžký a vinutí by se do něj ani nemusela vejít. Proto se více než čtyřrychlostní motory prakticky nevyrábějí. I čtyřrychlostní motory jsou velké a těžké a jejich přepínače značně komplikované. [3, s. 247, 248]

1.3 Elektrické vlastnosti

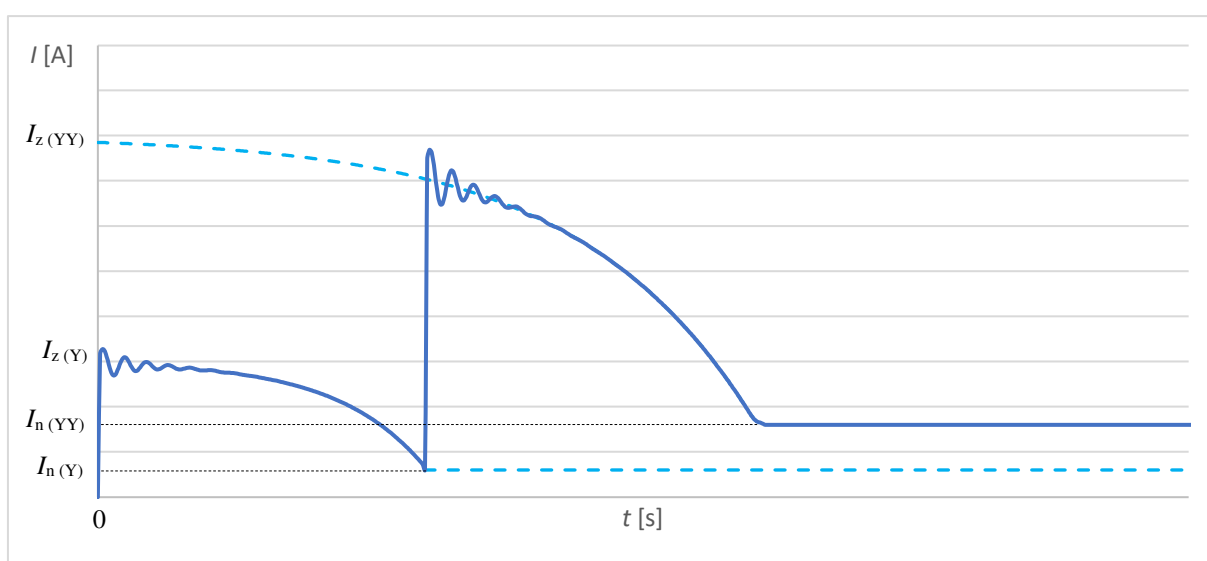
Trojfázové asynchronní elektromotory do výkonu cca 250 kW se připojují k trojfázové soustavě o velikosti sdruženého napětí 400 V. To je možné např. ve vlastní spotřebě elektráren, protože tam je tvrdá síť. Motory větších výkonů můžeme připojit k trojfázové soustavě o velikosti sdruženého napětí např. 690 V, 6 kV nebo 10 kV. Po připojení začne vinutími jednotlivých fází protékat trojfázový proud. Cívky jednotlivých fází jsou vzájemně mechanicky posunuty o 120°. Vlivem těchto proudů dojde ke vzniku točivého magnetického pole, které protíná rotorové vinutí (klec spojená kruhy nakrátko). Můžeme si představit, že asynchronní motor funguje stejně jako transformátor, jen má sekundární (rotorové) vinutí spojené nakrátko a může se otáčet. Do rotorového vinutí se tedy indukuje napětí a začíná jím téct elektrický proud. Vzniká síla, která začne rotorem otáčet. [1, s. 10–12] [3, s. 147] [11, s. 4]

Statorový a rotorový proud nemá během rozběhu motoru konstantní hodnotu. Ihned po připojení motoru k síti, kdy má rotor nulové otáčky, je rozdíl mezi rychlostí otáčení magnetického pole a rychlostí otáčení rotoru největší, tudíž se do rotoru indukuje nejvyšší napětí a teče jím největší proud. Nejvyšší proud teče ve stejnou dobu také statorovým vinutím. Tomuto proudu se říká záběrný proud a dosahuje 3 až 7,5násobku jmenovitého proudu. Záběrný proud je omezen pouze impedancí motoru nakrátko. [1, s. 41]

Poté rychlost rotoru stoupá a velikost indukovaného napětí i rotorového proudu se zmenšuje. Současně klesá i statorový proud až na svou jmenovitou hodnotu. Vzhledem k tomu, že se do rotoru proud transformuje ze statoru přes konstantní převod, proud protékající rotorem bude mít stejný průběh,

avšak jednotlivé hodnoty budou rozdílné. Délka rozběhu závisí na velikosti momentu setrvačnosti poháněného zařízení. Motory běžící naprázdno, popřípadě motory, které pohánějí např. malé ventilátory, jeřáby nebo výtahy, mají krátkou dobu rozběhu (2 až 4 s). Naopak rozběh motoru, který pohání velký elektrárenský mlýn s velmi velkým momentem setrvačnosti, může trvat až 55 s. Během rozběhu je vinutí motoru vystaveno vlivem vysokých proudů velkým mechanickým rázům a značnému oteplení, které musí po tuto dobu vydržet. [1, s. 41, 42] [11, s. 5]

Kdyby rychlost rotoru dosáhla stejné rychlosti, jakou se otáčí magnetické pole, přestalo by se do rotorového vinutí indukovat napětí a rotorový i statorový proud by byl nulový. Rotor by nebyl poháněn žádnou silou a jeho rychlost by klesala. Z toho vyplývá, že ke správné funkci motoru musí být rychlost rotoru menší než rychlost otáčení magnetického pole.



Obr. 3 - Průběh proudu při rozběhu dvourychlostního asynchronního elektromotoru, $I = f(t)$ [1, s. 45]

I_z záběrný proud

I_n jmenovitý proud

V případě dvourychlostního motoru se samočinným přepínáním vinutí Y/YY (např. pomocí časového relé) má statorový proud průběh, který vidíme na Obr. 3. Při rozběhu motoru dochází ke dvěma proudovým rázům. Při skokové změně proudu vždy nastává přechodný děj, kdy průběh proudu zakmitá. První proudový ráz přichází ihned po připojení motoru k síti a statorovým vinutím teče záběrný proud pro nižší rychlost. Při zvyšování rychlosti motoru proud klesá až na jmenovitou hodnotu při jmenovitých otáčkách pro nižší rychlost. V tom okamžiku se statorové vinutí přepojí pomocí stykačů a časového relé do dvojité hvězdy a dochází k druhému proudovému rázu. Při následném přechodném ději maximální hodnota proudu dosahuje téměř hodnoty záběrného proudu pro vyšší rychlost. Poté statorový proud opět klesá až na jmenovitou hodnotu pro vyšší rychlost při jmenovitých otáčkách po vyšší rychlost. Když budeme motor zatěžovat jmenovitým momentem, jmenovitá hodnota proudu bude téci rotorovým vinutím až do jeho vypnutí. [1, s. 45]

Automatické přepínání počtu pólů statorového vinutí pomocí časového relé se provádí za účelem hladšího rozběhu motoru. Rozběh po stupních vždy výrazně zmenší celkové oteplení vinutí motoru, protože v první polovině rozběhu teče statorovým vinutím mnohem menší proud, než kdybychom jej rozbíhali přímo na vyšší rychlost. Maximální proud je ovšem téměř shodný při rozběhu po stupních i přímým rozběhem, mechanicky je tedy vinutí motoru namáháno stejně.

Při předpokladu, že motor může být trvale provozován při obou rychlostech (např. u různých pojezdů), bude mít proud při rozběhu na nižší rychlost stejný průběh jako vidíme na Obr. 3. Když budeme po konci rozběhu motor zatěžovat jmenovitým momentem pro nižší rychlost, poteče jím jmenovitá hodnota proudu pro nižší rychlost až do doby, kdy ovladačem přepneme motor na vyšší rychlost, nebo jej vypneme. Při přepnutí na vyšší rychlost dojde ke stejnému proudovému rázu jako došlo při automatickém přepnutí ihned po dokončení rozběhu na nižší rychlost. V tomto případě musí být motor dimenzován na mechanické účinky záběrného proudu pro vyšší rychlost a musí vydržet oteplení, které způsobí rozběhový proud při zapnutí přímo na vyšší rychlost.

1.4 Mechanické vlastnosti

Základní mechanickou veličinou každého elektromotoru je jeho točivý moment.

„Točivý moment nebo také krouticí moment vyjadřuje působení síly na bod vzdálený od osy otáčení (hřídele).“ [10]

Výpočet točivého momentu elektromotoru: [1, s. 24]

$$M = \frac{P}{\Omega}$$

M moment [Nm]

P mechanický výkon na hřídeli [W]

Ω mechanická úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] [1, s. 12]

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

n otáčky rotoru [min^{-1}] [3, s. 245]

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$$

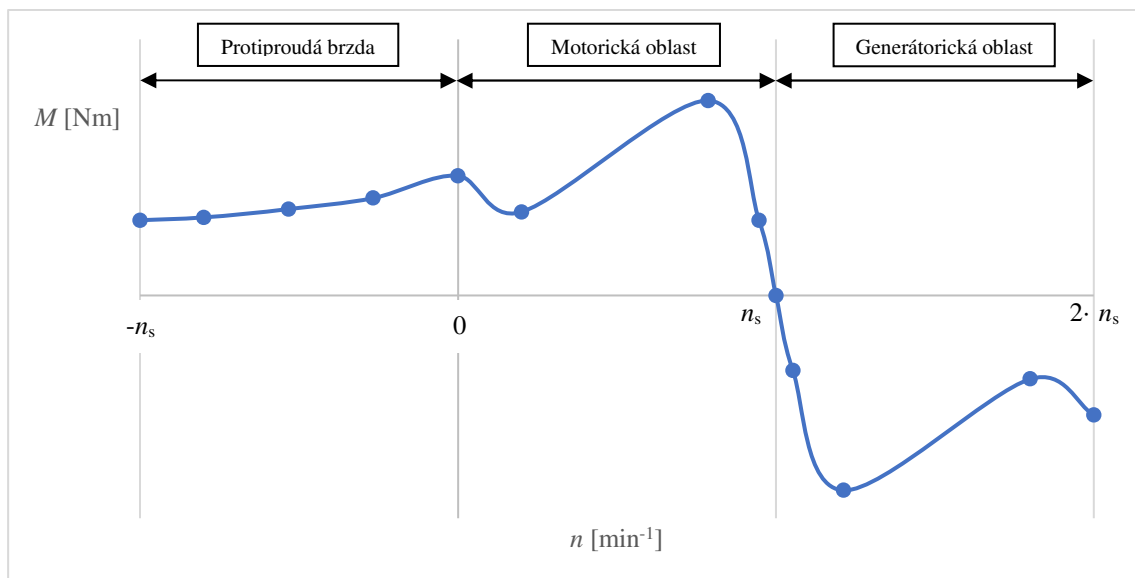
n_s synchronní otáčky (otáčky magnetického pole statoru) [min^{-1}]

s skluz [-]

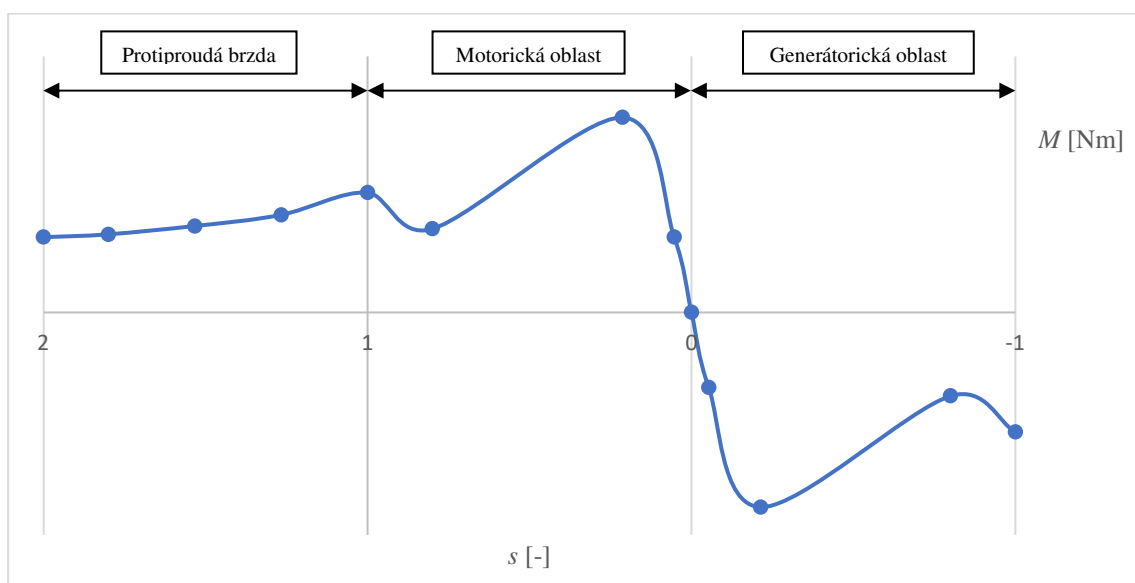
f napájecí frekvence [Hz] – počítá se 50 Hz (frekvence sítě)

p počet pólů statorového vinutí

Momentová charakteristika elektromotoru udává závislost točivého momentu na jeho otáčkách, respektive skluzu (u asynchronních elektromotorů). Počítá se s konstantním napájecím napětím a frekvencí. Točivý moment se mění s kvadrátem napětí. Protože jsou elektromotory zpravidla napájeny ze sítě, kde napětí i frekvence může drobně kolísat, musí se tyto parametry neustále sledovat a motor před jejich většími výkyvy chránit. [1, s. 46] [4, s. 43, 44]



Obr. 4 - Momentová charakteristika asynchronního stroje $M = f(n)$ [1, s. 27]



Obr. 5 - Momentová charakteristika asynchronního stroje $M = f(s)$ [1, s. 27]

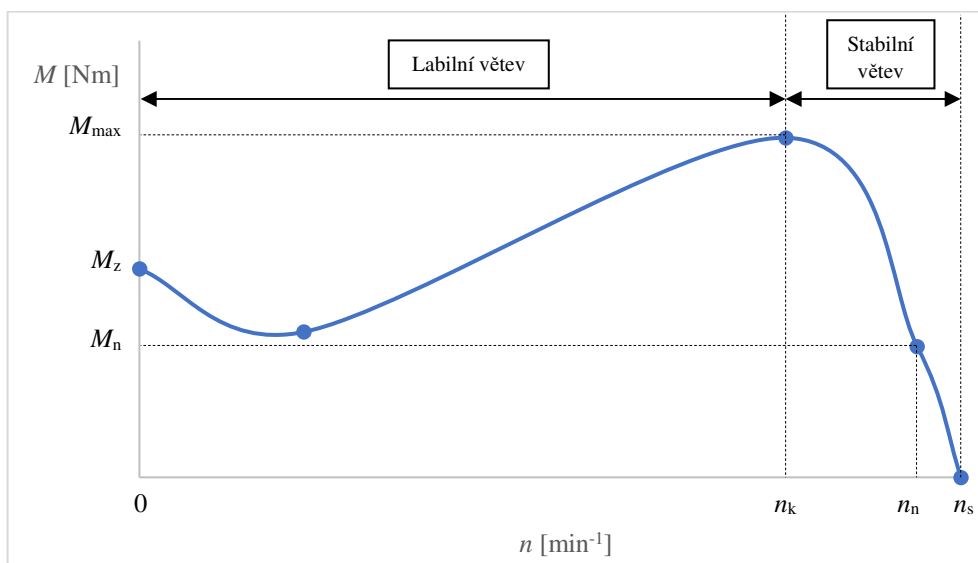
Na Obr. 4 a Obr. 5 vidíme, že asynchronní stroj se může nacházet v motorické nebo generátorické oblasti, popřípadě v oblasti protiproudé brzdy.

Asynchronní motor po většinu času pracuje v motorické oblasti, kde má i svůj pracovní bod. V tomto režimu spotřebovává elektrickou energii ze sítě, ke které je připojen.

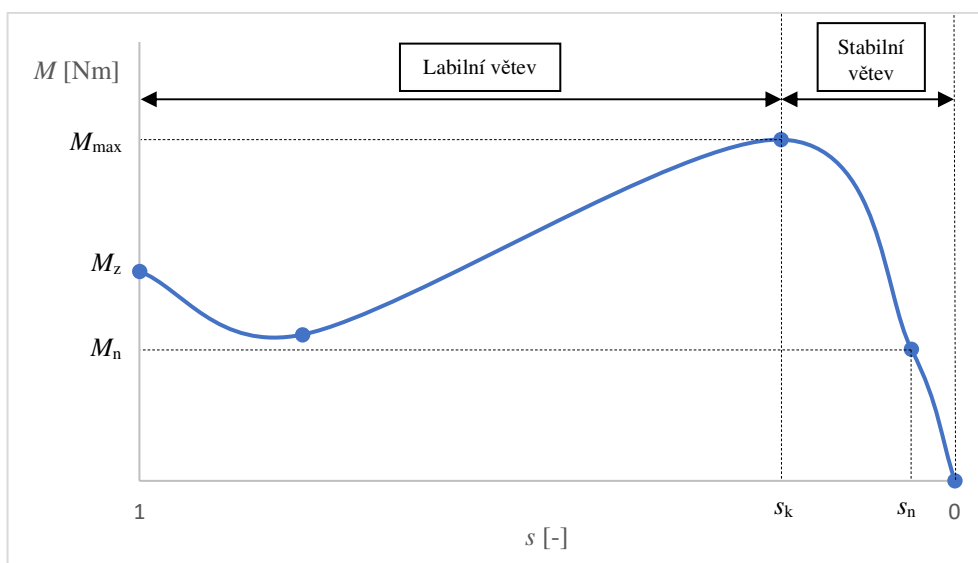
Při zvětšení otáček nad otáčky synchronní motor přejde do generátorické oblasti a dodává elektrickou energii do sítě. K tomuto jevu může dojít například při přepnutí na vyšší počet pólů, nebo můžeme rotoru trvale dodávat mechanickou energii a motor při shodné konstrukci používat jako generátor. Asynchronní generátory se využívají například v malých větrných a vodních elektrárnách. [1, s. 9]

Jeden ze způsobů brzdění asynchronního elektromotoru spočívá ve změně sledu fází napájení satorového vinutí a následný přechod do oblasti protiproudé brzdy. Magnetické pole vytvořené ve satoru náhle změni směr svého otáčení a bude se pohybovat opačně než rotor, který se díky setrvačnosti bude otáčet stále stejným směrem. Skluz tedy nabude hodnoty téměř 2 a následně budou klesat otáčky. V okamžiku zastavení rotoru je třeba motor odpojit od sítě, jinak by se znovu rozběhl, avšak opačným směrem. Tento způsob lze použít pouze u kroužkového motoru, u kterého je možné rezistorem v rotoru snížit momentovou a proudovou charakteristiku, jinak hrozí jeho zničení. [1, s. 61]

Motorická oblast momentové charakteristiky asynchronního elektromotoru



Obr. 6 - Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru $M = f(n)$ [4, s. 43, 44]



Obr. 7 - Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru $M = f(s)$ [4, s. 43, 44]

M_z záběrný moment
 M_{max} moment zvratu (maximální moment)
 M_n jmenovitý moment

 n_k kritické otáčky
 n_n jmenovité otáčky

 s_k kritický skluz
 s_n jmenovitý skluz

Ihned po připojení napájecího napětí má motor záběrný moment při nulových otáčkách a skluzu 1. Při postupném růstu otáček se moment zvětšuje až do maximálního momentu (momentu zvratu) při tzv. kritických otáčkách a kritickém skluzu. Úpravou tvaru rotorové klece lze měnit průběh rozběhového momentu v závislosti na otáčkách. Výrobci elektromotorů se většinou snaží dosáhnout co největšího záběrného momentu, v důsledku toho moment nejdříve klesá, a až poté roste do své maximální hodnoty. Dalším zvýšením otáček rotoru se motor dostává do stabilní části charakteristiky a moment klesá až na nulovou hodnotu – při chodu naprázdno. [4, s. 43, 44]

Je patrné, že asynchronní elektromotor ke své funkci potřebuje mít skluz neboli mít pracovní otáčky menší než synchronní. V labilní části momentové charakteristiky motor nemůže pracovat, protože by satorovým i rotorovým vinutím tekly proudy výrazně vyšší než jmenovité, na které je motor navržen. Ve stabilní části charakteristiky se nachází tzv. jmenovitý bod. Motor je tepelně i mechanicky navržen na dlouhodobý chod právě při jmenovitém momentovém zatížení, při kterém se motor otáčí jmenovitými otáčkami a má jmenovitý skluz a teče jím jmenovitý proud. Motor se tedy může trvale zatížit maximálně jmenovitým momentem, avšak v praxi se většinou nechává rezerva. Krátkodobě je asynchronní elektromotor možno zatížit až momentem zvratu, nesmí však sklouznout do labilní části charakteristiky. Hodnota maximálního momentu se u asynchronních elektromotorů pohybuje kolem dvou až čtyřnásobku jmenovitého momentu a výrobce jej udává v katalogu. Je důležité, aby po celou dobu rozběhu i v pracovním bodě motor dodával poháněnému zařízení větší moment, než jaký potřebuje pro svůj chod. [1, s. 26, 27] [3, s. 174, 175] [4, s. 49]

Výpočet motorické oblasti momentové charakteristiky asynchronního elektromotoru:

Nejdříve si v katalogu výrobce najdeme základní údaje o motoru:

- zapojení satorového vinutí a počet jeho pólů p
- jmenovitý výkon P_n
- jmenovité otáčky n_n
- jmenovitý moment M_n
- poměrný záběrný moment M_z/M_n
- poměrný moment zvratu M_{max}/M_n

Momentová charakteristika asynchronního elektromotoru se skládá z 5 bodů: [4, s. 43, 44]

- 1) Záběrný moment M_z při nulových otáčkách a skluzu 1

$$M_z = M_z / M_n \cdot M_n$$

- 2) 0,7násobek záběrného momentu při otáčkách odpovídajících skluzu přibližně 0,7

- Tento bod může být u různých motorů rozdílný. Prvotní pokles momentu po přiložení napájecího napětí je způsoben konstrukcí rotorové klece, protože výrobci se snaží dosáhnout co největší hodnoty záběrného momentu.

- 3) Moment zvratu M_{max} při otáčkách n_k a skluzu s_k

$$M_{max} = M_{max} / M_n \cdot M_n$$

Pro určení otáček n_k a skluzu s_k vycházíme z tzv. Klossova vztahu: [1, s. 26]

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Pro zjednodušení uvažujeme ve stabilní části charakteristiky, kde $\frac{s}{s_k} \ll 1$: [1, s. 28]

$$\frac{M}{M_{max}} = 2 \cdot \frac{s}{s_k}$$

A po dosazení jmenovitého momentu M_n a jmenovitého skluzu s_n :

$$\frac{M_n}{M_{max}} = 2 \cdot \frac{s_n}{s_k}$$

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s}$$

Vyjádříme si skluz s_k :

$$s_k = 2 \cdot \frac{M_{max}}{M_n} \cdot s_n$$

A otáčky n_k :

$$n_k = n_s \cdot (1 - s_k)$$

- 4) Jmenovitý moment M_n při jmenovitých otáčkách n_n a jmenovitém skluzu s_n

- 5) Nulový moment při synchronních otáčkách n_s a skluzu 0

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

frekvenci f počítáme 50 Hz (frekvence sítě)

Tyto body spojíme vyhlazenou křivkou ručně nebo pomocí vhodného grafického editoru.

V případě vícerychlostního asynchronního elektromotoru vykreslíme zvlášť momentové charakteristiky pro jednotlivé rychlosti. K přepnutí dojde skokově v pracovním bodě při dané rychlosti. Jestliže přepneme z vyšší rychlosti na nižší, motor se dostane do generátorické oblasti momentové charakteristiky pro nižší rychlost, a než sníží otáčky na pracovní bude dodávat elektrickou energii do sítě.

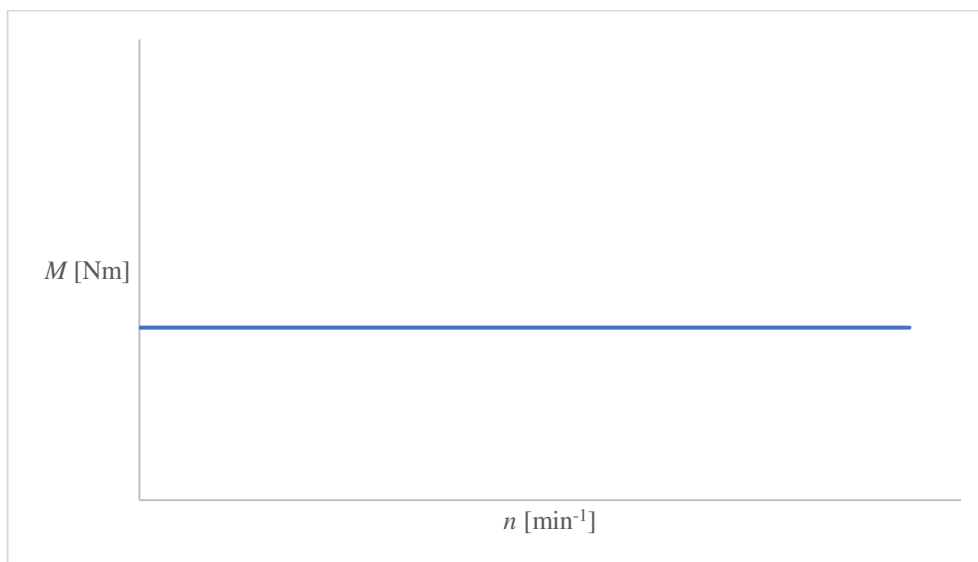
Momentová charakteristika pro generátorickou oblast je souměrná podle bodu pro synchronní otáčky (respektive skluz 0) a nulový moment. Dostáváme se tedy do otáček větších než synchronních, záporných hodnot skluzů a uvažujeme záporné hodnoty momentů.

2 Chování trojfázového vícerychlostního asynchronního elektromotoru v různých druzích pohonu

2.1 Rozdělení pracovních mechanismů podle momentové charakteristiky

2.1.1 Jeřábová charakteristika

Pracovní mechanismy s jeřábovou charakteristikou mají stejný moment při všech otáčkách. Takovou charakteristiku najdeme obecně u zdvihacích mechanismů, tzn. výtahů, těžních strojů nebo pojezdů jeřábů. [12]



Obr. 8 - Jeřábová charakteristika [12]

Výpočet momentové charakteristiky pojezdu jeřábu:

Výkon pojezdu jeřábu při pojíždění stálou rychlostí: [9, s. 25]

$$P = \frac{T \cdot v}{\eta}$$

T odpor pojíždějících kol [N], závisí na hmotnosti břemene a kočky, hmotnosti hlavního nosníku, součiniteli valivého tření, součiniteli čepového tření pojíždějících kol pro valivá ložiska, poloměru pojížděcího kola, poloměru čepu pojížděcího kola a součiniteli tření nákolku o kolejnice [9, s. 24]

v rychlost pojezdu jeřábu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

η účinnost pojezdu jeřábu

Pracovní moment pojezdu jeřábu při pojíždění stálou rychlostí:

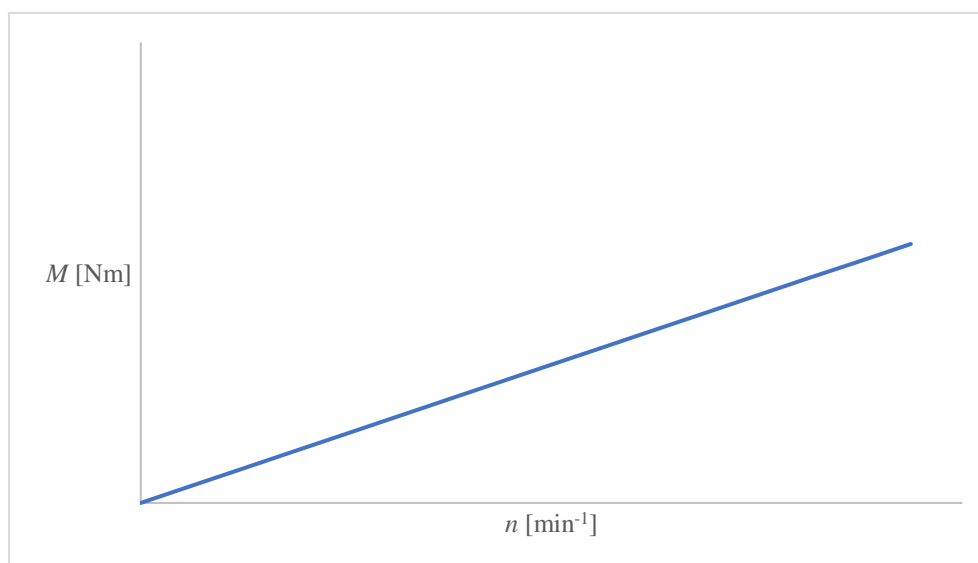
$$M_p = \frac{P}{\Omega} = \frac{T \cdot v}{\eta \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}}$$

Ω mechanická úhlová frekvence [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

Rozběhový moment pojezdu jeřábu M_r bývá asi 1,8 až 2krát větší, protože motor musí nejprve urychlit hmotu pojezdu jeřábu na jeho pracovní rychlost. Poté se zvyšující rychlostí pojezdu jeřábu se postupně snižuje moment na ustálenou hodnotu pracovního momentu. [9, s. 25] [11, s. 2]

2.1.2 Kalandrová charakteristika

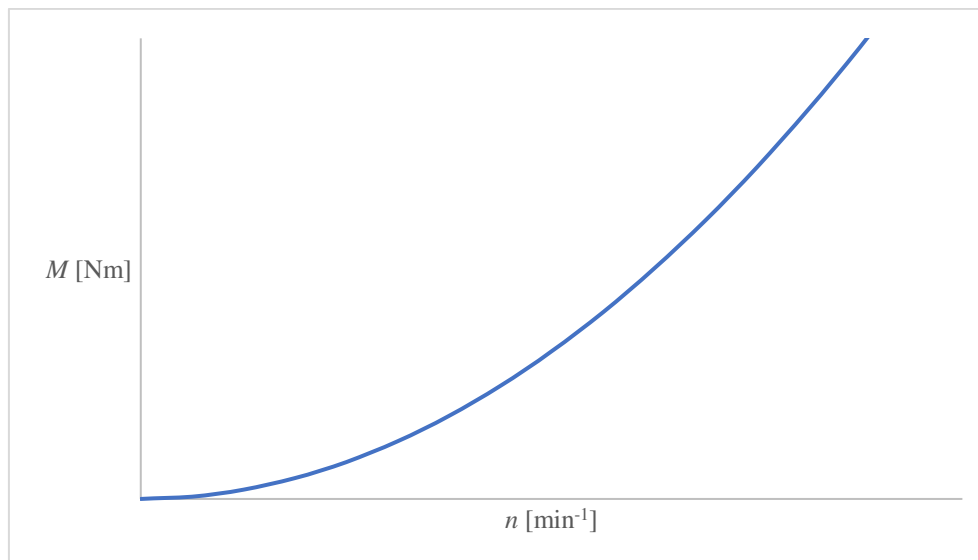
Pracovní mechanismy s kalandrovou charakteristikou mají lineární průběh momentu v závislosti na otáčkách. Jedná se například o válce v hutích, papírenské nebo textilní stroje. [12]



Obr. 9 - Kalandrová charakteristika [12]

2.1.3 Ventilátorová charakteristika

Pracovní mechanismy s ventilátorovou charakteristikou mají kvadratický průběh momentu v závislosti na otáčkách. Tuto charakteristiku mají ventilátory, čerpadla a lodní šrouby. [12]



Obr. 10 - Ventilátorová charakteristika [12]

Výpočet momentové charakteristiky ventilátoru:

Výkon ventilátoru: [13, s. 3]

$$P = \frac{Q_v \cdot \Delta p_c}{\eta}$$

Q_v objemový průtok vzduchu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Δp_c tlaková diference [Pa]

η účinnost ventilátoru

Hodnoty Q_v a Δp_c odečteme pro daný ventilátor z tlakové charakteristiky, kterou ke každému ventilátoru uvádí výrobce v katalogu. Odečítáme z křivky bez regulátoru otáček, tedy pro frekvenci 50 Hz a pro maximální výkon ventilátoru. [7, s. 13] [13]

Pracovní moment ventilátoru:

$$M_p = \frac{P}{\Omega} = \frac{Q_v \cdot \Delta p_c}{\eta \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}}$$

Okamžitý moment ventilátoru při určitých otáčkách: [11, s. 2, 3]

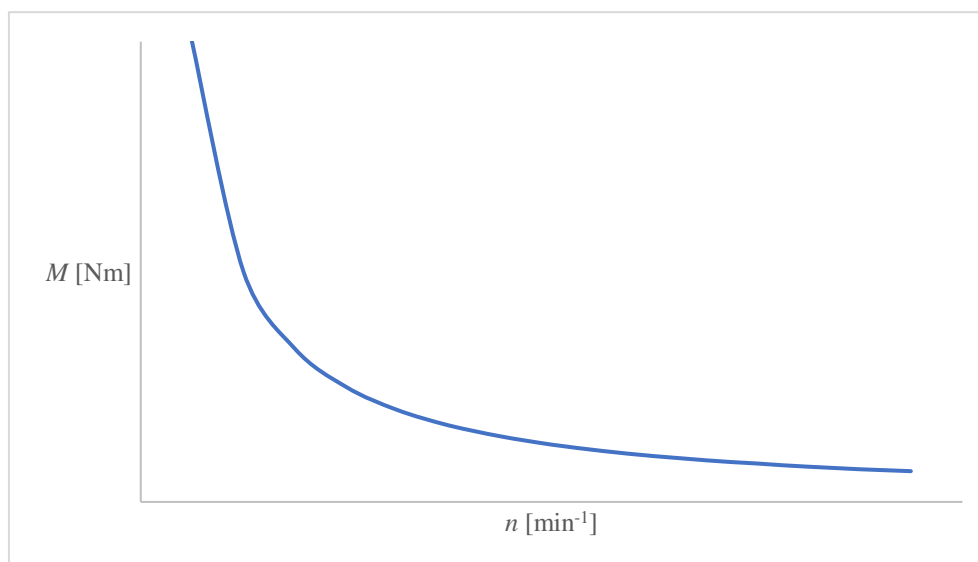
$$M = M_p \cdot \frac{(n')^2}{n^2}$$

n' okamžité otáčky ventilátoru

n pracovní otáčky ventilátoru

2.1.4 Navíječková charakteristika

Pracovní mechanismy s navíječkovou charakteristikou mají hyperbolický průběh momentu v závislosti na otáčkách. Najdeme je například v navíječkách pásů a plechů s konstantním tahem a navíjecí rychlostí. [12]



Obr. 11 - Navíječková charakteristika [12]

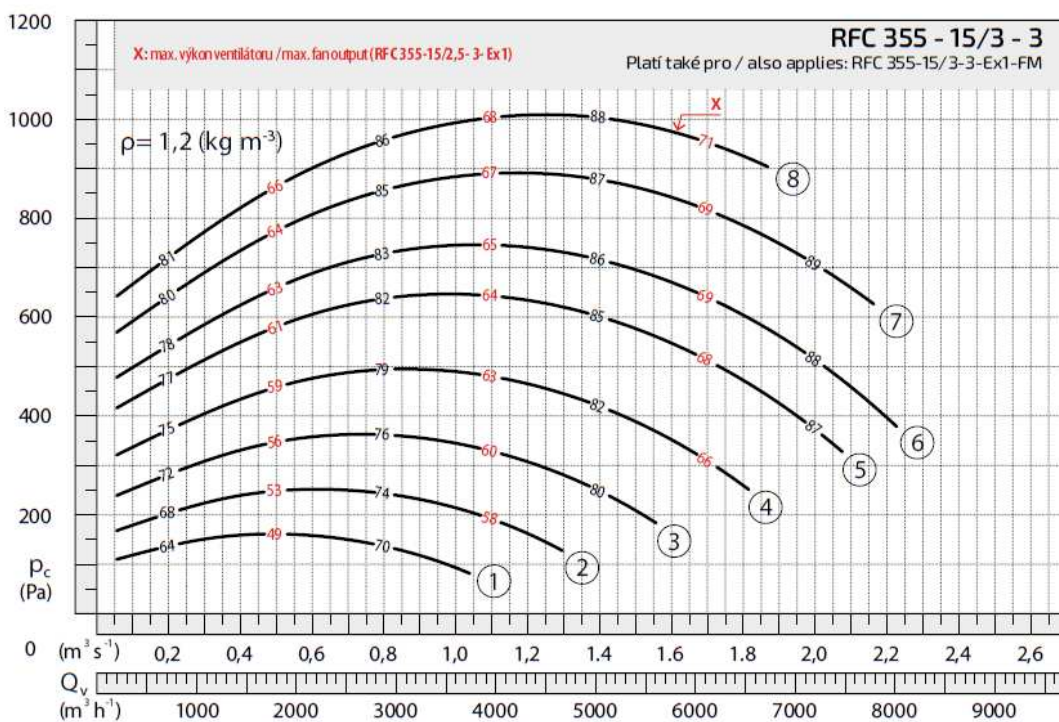
2.2 Pohon ventilátoru

Vybral jsem ventilátor RFC 355–15/3–3 z katalogu firmy ALTEKO VZDUCHOTECHNIKA poháněný trojfázovým dvourychlostním asynchronním elektromotorem s přepínatelným vinutím Y/YY Sg 132S-8/4W, který vyrábí polská firma Cantoni Group. [6, s. 13] [7, s. 13]

2.2.1 Výpočet momentové charakteristiky ventilátoru

Tab. 1 - Základní parametry zvoleného ventilátoru [7, s. 13]

Pracovní otáčky [min^{-1}]	1500
Výkon [kW]	3
Počet fází	3



Obr. 12 - Tlaková charakteristika zvoleného ventilátoru z katalogu [7, s. 13]

Tab. 2 - Hodnoty zvolené a odečtené z tlakové charakteristiky ventilátoru pro maximální výkon

$Q_v \text{ [m}^3\text{s}^{-1}\text{]}$	1,62
$\Delta p_c \text{ [Pa]}$	980
η	0,8

Výkon ventilátoru (spočítaný):

$$P = \frac{Q_v \cdot \Delta p_c}{\eta} = \frac{1,62 \cdot 980}{0,8} = 1984,5 \text{ kW}$$

Tento spočítaný výkon ventilátoru je menší než výkon udávaný výrobcem, protože výrobce počítá s připojením ventilátoru k potrubní síti, jejíž protimoment se přičítá k protimomentu ventilátoru. Výkon elektromotoru tedy vybíráme podle výkonu udávaného výrobcem. [8, s. 12]

Pracovní moment ventilátoru:

$$M_p = \frac{P}{\Omega} = \frac{Q_v \cdot \Delta p_c}{\eta \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{1,62 \cdot 980}{0,8 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60}} = 12,6 \text{ Nm}$$

Okamžitý moment ventilátoru při určitých otáčkách:

$$M = M_p \cdot \frac{(n')^2}{n^2} = \frac{12,6}{1500^2} \cdot (n')^2 = 5,6 \cdot 10^{-6} \cdot (n')^2$$

2.2.2 Výpočet momentové charakteristiky elektromotoru pro pohon ventilátoru

Tab. 3 - Základní parametry zvoleného elektromotoru pro pohon ventilátoru [6, s. 13]

	Nižší rychlost	Vyšší rychlost
Typ	asynchronní	
Počet fází	3	
Počet rychlostí	2	
Typ rotoru	klecový	
Zapojení statorového vinutí	Y	YY
Počet pólů	8	4
Synchronní otáčky [min ⁻¹]	750	1500
Jmenovitý výkon [kW]	1	4
Jmenovité otáčky [min ⁻¹]	700	1420
Jmenovitý moment [Nm]	13,6	26,9
Účinnost [%]	72,3	80,4
Účinník [-]	0,75	0,9
Jmenovitý proud [A]	2,7	8
Poměrný záběrný moment [-]	1,3	1,6
Poměrný záběrný proud [-]	3,6	5,3
Poměrný moment zvratu [-]	2	2
Moment setrvačnosti [kg·m ²]	0,031	
Hmotnost [kg]	56	
Provedení	úplně uzavřený	
Izolační třída	F	
Stupeň krytí	IP 55	

Výpočet hlavních hodnot pro vykreslení momentové charakteristiky elektromotoru při nižší rychlosti:

Záběrný moment:

$$M_z = M_z/M_n \cdot M_n = 1,3 \cdot 13,6 = 17,68 \text{ Nm}$$

Moment zvratu:

$$M_{max} = M_{max}/M_n \cdot M_n = 2 \cdot 13,6 = 27,2 \text{ Nm}$$

Jmenovitý skluz:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{750 - 700}{750} = 0,0667$$

Kritický skluz:

$$s_k = 2 \cdot \frac{M_{max}}{M_n} \cdot s_n = 2 \cdot 2 \cdot 0,0667 = 0,2667$$

Kritické otáčky:

$$n_k = n_s \cdot (1 - s_k) = 750 \cdot (1 - 0,26667) = 550 \text{ min}^{-1}$$

Výpočet hlavních hodnot pro vykreslení momentové charakteristiky elektromotoru při vyšší rychlosti:

Záběrný moment:

$$M_z = M_z/M_n \cdot M_n = 1,6 \cdot 26,9 = 43,04 \text{ Nm}$$

Moment zvratu:

$$M_{max} = M_{max}/M_n \cdot M_n = 2 \cdot 26,9 = 53,8 \text{ Nm}$$

Jmenovitý skluz:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,0533$$

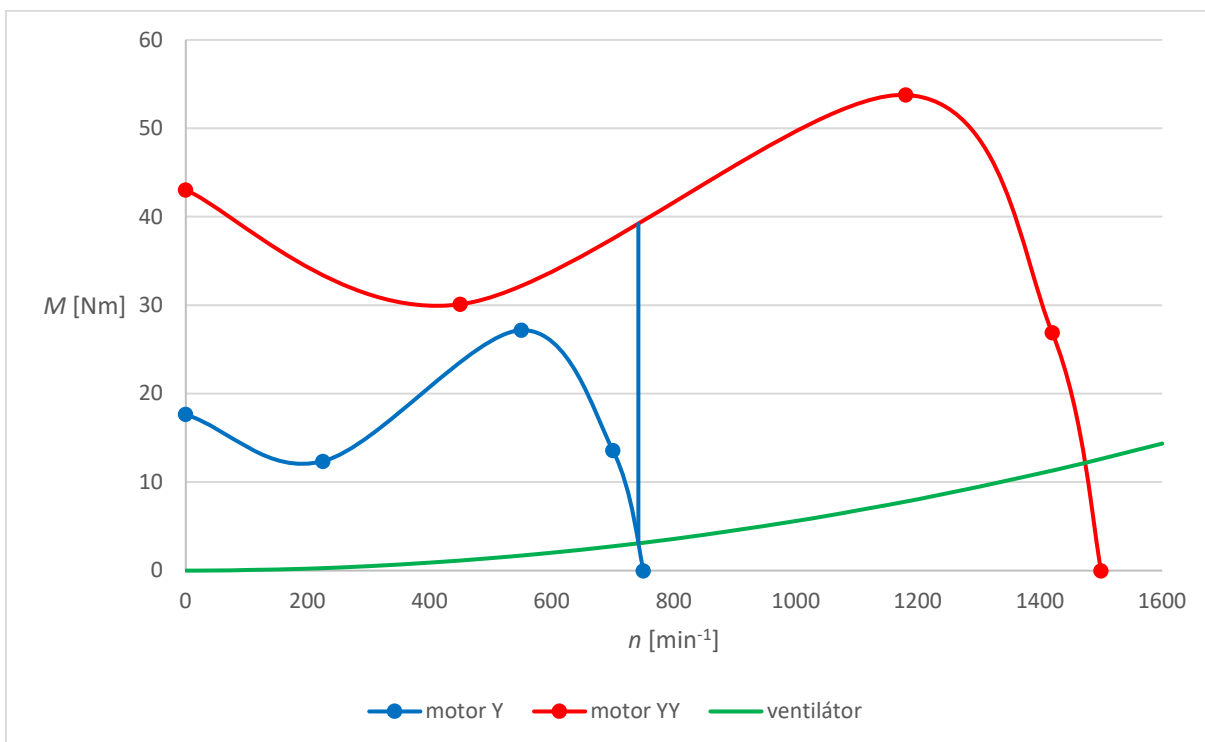
Kritický skluz:

$$s_k = 2 \cdot \frac{M_{max}}{M_n} \cdot s_n = 2 \cdot 2 \cdot 0,0533 = 0,2133$$

Kritické otáčky:

$$n_k = n_s \cdot (1 - s_k) = 1500 \cdot (1 - 0,21333) = 1180 \text{ min}^{-1}$$

2.2.3 Určení pracovních bodů pohonu



Obr. 13 - Chování dvourychlostního asynchronního elektromotoru při pohonu ventilátoru

Pracovní body pohonu se určí jako průsečíky momentových charakteristik elektromotoru s momentovou charakteristikou ventilátoru. Z těchto pracovních bodů se dají odečíst pracovní otáčky a pracovní moment pohonu. [1, s. 27]

2.2.4 Popsání pohonu

Na Obr. 13 vidíme, že moment ventilátoru roste s kvadrátem jeho otáček. Proto jsem pro pohon ventilátoru zvolil elektromotor, jehož poměr mezi výkonem při vyšší a nižší rychlosti je větší, v tomto případě 4 : 1. Z toho vyplývá, že jmenovitý moment při vyšší rychlosti bude přibližně dvakrát větší než při nižší rychlosti, což je pro pohon ventilátoru potřeba.

Výkon elektromotoru jsem zvolil vyšší než výkon ventilátoru udávaný výrobcem, aby pracovní body byly „pod“ jmenovitými body elektromotoru, tedy pracovní moment pohonu byl nižší než jmenovitý moment elektromotoru. Je to důležité zejména proto, že motor je tepelně dimenzován na jeho jmenovité hodnoty. Kdyby byl trvale provozován při vyšším zatížení než jmenovitém, mohl by se přehřát a následně zničit. Krátkodobé přetížení až do momentu zvratu je u asynchronních motorů v pořádku. Naopak ani velký rozdíl mezi jmenovitým a pracovním momentem není žádoucí, protože elektromotor pracuje s nejvyšší účinností právě při jmenovitém zatížení. Při zvyšujícím se rozdílu zatížení od jmenovitého se zvyšují ztráty elektromotoru. [1, s. 28] [3, s. 357, 358]

V případě pohonu ventilátoru jsem uvažoval s větší rezervou, protože ventilátor je při provozu zpravidla připojen k potrubní síti, jejíž moment se přičítá k momentu ventilátoru. Skutečné pracovní body po připojení k potrubní síti tudíž budou trochu výše na momentové charakteristice elektromotoru. [8, s. 12]

Pro pohon ventilátoru se používá dvourychlostní elektromotor výhradně pro jeho hladší rozběh a nepředpokládá se trvalý provoz při nižších otáčkách. Proto tento motor nepůjde z vyšší rychlosti přepnout na rychlost nižší. Z vyšší rychlosti lze pouze vypnout.

Na Obr. 13 vidíme, že při nižší rychlosti je záběrný moment mnohem menší než při vyšší rychlosti. To je pro tento pohon ideální, protože ventilátor potřebuje pouze velice malý rozběhový moment. Lopatky ventilátoru jsou tedy na začátku rozběhu namáhány menší mechanickou silou. Hned po ustálení otáček v pracovním bodě pro nižší rychlost dojde pomocí stykačů k přepnutí do zapojení statorového vinutí do dvojité hvězdy a motor skokově přejde na momentovou charakteristiku pro vyšší rychlost. Poté pokračuje růst otáček až do ustálení v pracovním bodě pro vyšší rychlost. Rozběh ventilátoru je tímto ukončen.

Doba rozběhu je v tomto případě poměrně krátká, proto nehrozí tepelné přehřátí elektromotoru vlivem vyšších rozběhových proudů. Jediné, na co si musíme dát pozor, je největší moment elektromotoru, který dosahuje hodnoty 53,8 Nm. Je to moment zvratu při vyšší rychlosti. Na silové působení tohoto momentu musí být mechanicky navrženy lopatky ventilátoru, jinak by se mohly prohnout nebo dokonce zlomit.

2.3 Pohon pojezdu jeřábu

Parametry pracovního mechanismu jsem zvolil tak, aby jednotlivé hodnoty odpovídaly průměrnému vyráběnému pojezdu jeřábu. Tento pojezd bude pohánět trojfázový dvourychlostní asynchronní elektromotor s přepínatelným vinutím D/YY Sg 112M-8/4, který vyrábí polská firma Cantoni Group. [6, s. 12]

2.3.1 Výpočet momentové charakteristiky pojezdu jeřábu

Tab. 4 - Zvolené parametry pojezdu jeřábu [9, s. 24, 25]

T [N]	2000
v [m·min ⁻¹]	50
η	0,9

Výkon pojezdu jeřábu při pojíždění stálou rychlostí:

$$P = \frac{T \cdot v}{\eta} = \frac{2000 \cdot \frac{50}{60}}{0,9} = 1851,9 \text{ W}$$

Pracovní moment pojezdu jeřábu při pojíždění stálou rychlostí:

$$M_p = \frac{P}{\Omega} = \frac{T \cdot v}{\eta \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60}} = \frac{2000 \cdot \frac{50}{60}}{0,9 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 1415}{60}} = 12,5 \text{ Nm}$$

Rozběhový moment pojezdu jeřábu:

$$M_r = 1,8 \cdot M_p = 1,8 \cdot 12,5 = 22,5 \text{ Nm}$$

2.3.2 Výpočet momentové charakteristiky elektromotoru pro pohon pojezdu jeřábu

Tab. 5 - Základní parametry zvoleného elektromotoru pro pohon pojezdu jeřábu [6, s. 12]

	Nižší rychlost	Vyšší rychlost
Typ	asynchronní	
Počet fází	3	
Počet rychlostí	2	
Typ rotoru	klecový	
Zapojení statorového vinutí	D	YY
Počet pólů	8	4
Synchronní otáčky [min ⁻¹]	750	1500
Jmenovitý výkon [kW]	1,6	3
Jmenovité otáčky [min ⁻¹]	715	1415
Jmenovitý moment [Nm]	21,4	20,2
Účinnost [%]	74,4	80,3
Účinník [-]	0,6	0,86
Jmenovitý proud [A]	5,1	6,3
Poměrný záběrný moment [-]	2,5	1,4
Poměrný záběrný proud [-]	4,6	5,4
Poměrný moment zvratu [-]	2,8	2,2
Moment setrvačnosti [kg·m ²]	0,018	
Hmotnost [kg]	33	
Provedení	úplně uzavřený	
Izolační třída	F	
Stupeň krytí	IP 55	

Výpočet hlavních hodnot pro vykreslení momentové charakteristiky elektromotoru při nižší rychlosti:

Záběrný moment:

$$M_z = M_z/M_n \cdot M_n = 2,5 \cdot 21,4 = 53,5 \text{ Nm}$$

Moment zvratu:

$$M_{max} = M_{max}/M_n \cdot M_n = 2,8 \cdot 21,4 = 59,92 \text{ Nm}$$

Jmenovitý skluz:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{750 - 715}{750} = 0,0467$$

Kritický skluz:

$$s_k = 2 \cdot \frac{M_{max}}{M_n} \cdot s_n = 2 \cdot 2,8 \cdot 0,0467 = 0,2613$$

Kritické otáčky:

$$n_k = n_s \cdot (1 - s_k) = 750 \cdot (1 - 0,2613) = 554 \text{ min}^{-1}$$

Výpočet hlavních hodnot pro vykreslení momentové charakteristiky elektromotoru při vyšší rychlosti:

Záběrný moment:

$$M_z = \frac{M_z}{M_n} \cdot M_n = 1,4 \cdot 20,2 = 28,28 \text{ Nm}$$

Moment zvratu:

$$M_{max} = \frac{M_{max}}{M_n} \cdot M_n = 2,2 \cdot 20,2 = 44,44 \text{ Nm}$$

Jmenovitý skluz:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1415}{1500} = 0,0567$$

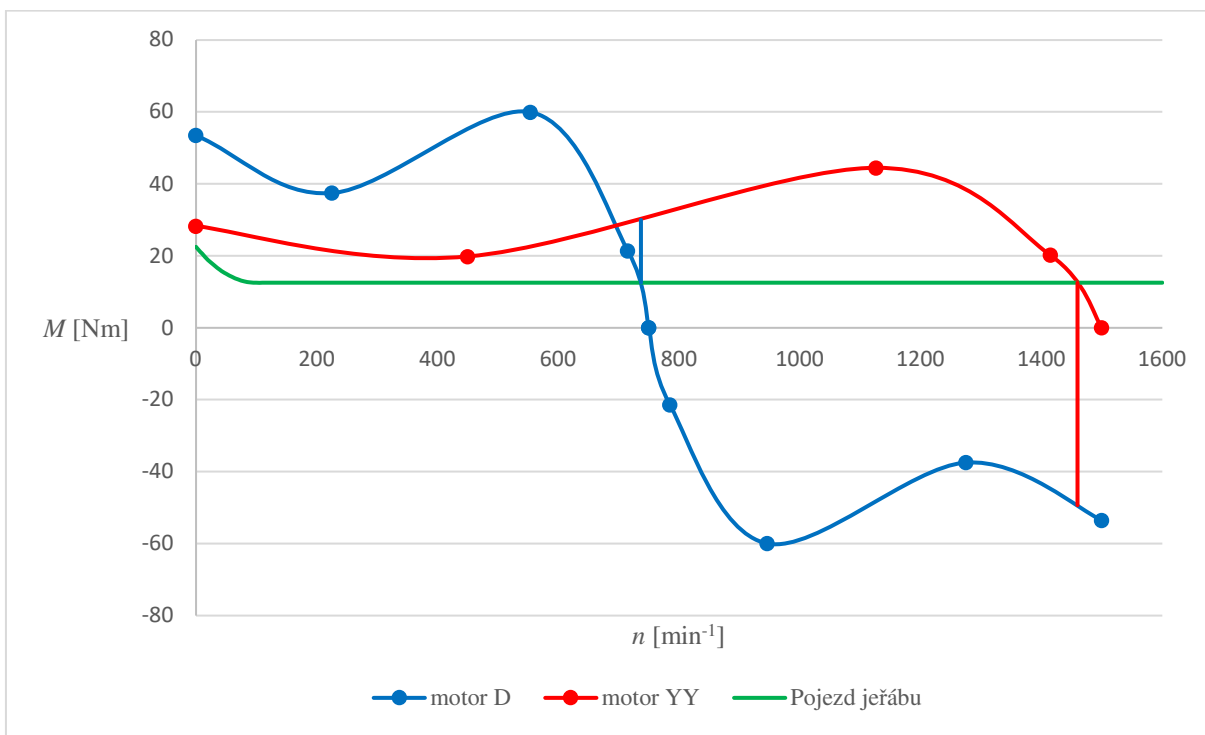
Kritický skluz:

$$s_k = 2 \cdot \frac{M_{max}}{M_n} \cdot s_n = 2 \cdot 2,2 \cdot 0,0567 = 0,2493$$

Kritické otáčky:

$$n_k = n_s \cdot (1 - s_k) = 1500 \cdot (1 - 0,2493) = 1126 \text{ min}^{-1}$$

2.3.3 Určení pracovních bodů pohonu



Obr. 14 - Chování dvourychlostního asynchronního elektromotoru při pohonu pojezdu jeřábu

Pracovní body pohonu se určí jako průsečíky momentových charakteristik elektromotoru s momentovou charakteristikou ventilátoru. Z těchto pracovních bodů se dají odečíst pracovní otáčky a pracovní moment pohonu. [1, s. 27]

2.3.4 Popsání pohonu

Na Obr. 14 vidíme, že moment pojezdu jeřábu je v celém rozsahu otáček konstantní, pouze rozběhový moment je 1,8krát větší než pracovní moment, protože motor musí nejdříve urychlit hmotu pojezdu jeřábu na jeho pracovní rychlost. Moment plynule přechází z hodnoty rozběhového momentu na hodnotu pracovního momentu. Proto jsem pro pohon pojezdu jeřábu zvolil elektromotor, jehož poměr mezi výkonem při vyšší a nižší rychlosti je menší, v tomto případě přibližně 1 : 2. Z toho vyplývá, že jmenovitý moment při vyšší rychlosti bude přibližně stejný jako při nižší rychlosti, což je pro pohon pojezdu jeřábu potřeba.

Výkon elektromotoru jsem zvolil vyšší než spočítaný výkon pojezdu jeřábu, aby pracovní body byly „pod“ jmenovitými body elektromotoru, tedy pracovní moment pohonu byl nižší než jmenovitý moment elektromotoru. Je to důležité zejména proto, že motor je tepelně dimenzován na jeho jmenovité hodnoty. Kdyby byl trvale provozován při vyšším zatížení než jmenovitém, mohl by se přehřát a následně zničit. Krátkodobé přetížení až do momentu zvratu je u asynchronních motorů

v pořádku. Naopak ani velký rozdíl mezi jmenovitým a pracovním momentem není žádoucí, protože elektromotor pracuje s nejvyšší účinností právě při jmenovitém zatížení. Při zvyšujícím se rozdílu zatížení od jmenovitého se zvyšují ztráty elektromotoru. [1, s. 28] [3, s. 357, 358]

Elektromotor je připojen k pojezdu jeřábu přes převodovku, která je navržena tak, aby se jeřáb při jmenovitých otáčkách elektromotoru $n_n = 1415 \text{ min}^{-1}$ pohyboval rychlostí $v = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. U tohoto typu pohonu se předpokládá provoz buď při nižší nebo vyšší rychlosti a také reverzace (změna směru pohybu).

Elektromotor se rozbíhá v zapojení statorového vinutí do trojúhelníku. Na Obr. 14 vidíme, že při této nižší rychlosti má motor vyšší záběrný moment, což je u tohoto typu pohonu žádoucí, protože pojezd jeřábu potřebuje poměrně velký rozběhový moment. Záběrný moment elektromotoru při vyšší rychlosti je menší a pro úspěšný rozběh by nemusel stačit. Záběrný moment nesmí být naopak ani příliš velký, protože by se kola pojezdu jeřábu při tak velké síle mohla protočit (proklouznout), což by byl nežádoucí jev. Otáčky elektromotoru se následně ustálí v pracovním bodě pro nižší rychlost.

Po přeprnutí na vyšší rychlost dojde pomocí stykačů k přepojení statorového vinutí do dvojité hvězdy a motor skokově přejde na momentovou charakteristiku pro vyšší rychlost. Následně budou růst otáčky, až se ustálí v pracovním bodě pro vyšší rychlost.

V případě přeprnutí opět na nižší rychlost stykače přepojí statorové vinutí zpět do trojúhelníku a motor skokově přejde na momentovou charakteristiku pro nižší rychlost. Okamžité otáčky elektromotoru budou větší než synchronní, znamená to tedy, že se motor bude nacházet v generátorickém režimu a bude postupně snižovat otáčky, které se ustálí v pracovním bodě pro nižší rychlost. Při brždění elektromotor pracuje jako generátor a dodává elektrickou energii do sítě, ke které je připojen.

Doba rozběhu je v tomto případě poměrně krátká, proto nehrozí tepelné přehřátí elektromotoru vlivem vyšších rozběhových proudů. Jediné, na co si musíme dát pozor, je největší moment elektromotoru, který dosahuje hodnoty 59,92 Nm. Je to moment zvratu při nižší rychlosti. Ani při silovém působení tohoto momentu nesmí kola pojezdu jeřábu proklouznout.

3 Přehledová schémata pohonů s trojfázovými vícerychlostními asynchronními elektromotory

Pro správnou funkci motorů je musíme připojit k elektrické síti a také vhodně jistit. Předpokládáme připojení ke střídavé trojfázové síti s uzemněným nulovým bodem, s ochranným (PE) a nulovým (N) vodičem, které jsou vedeny odděleně.

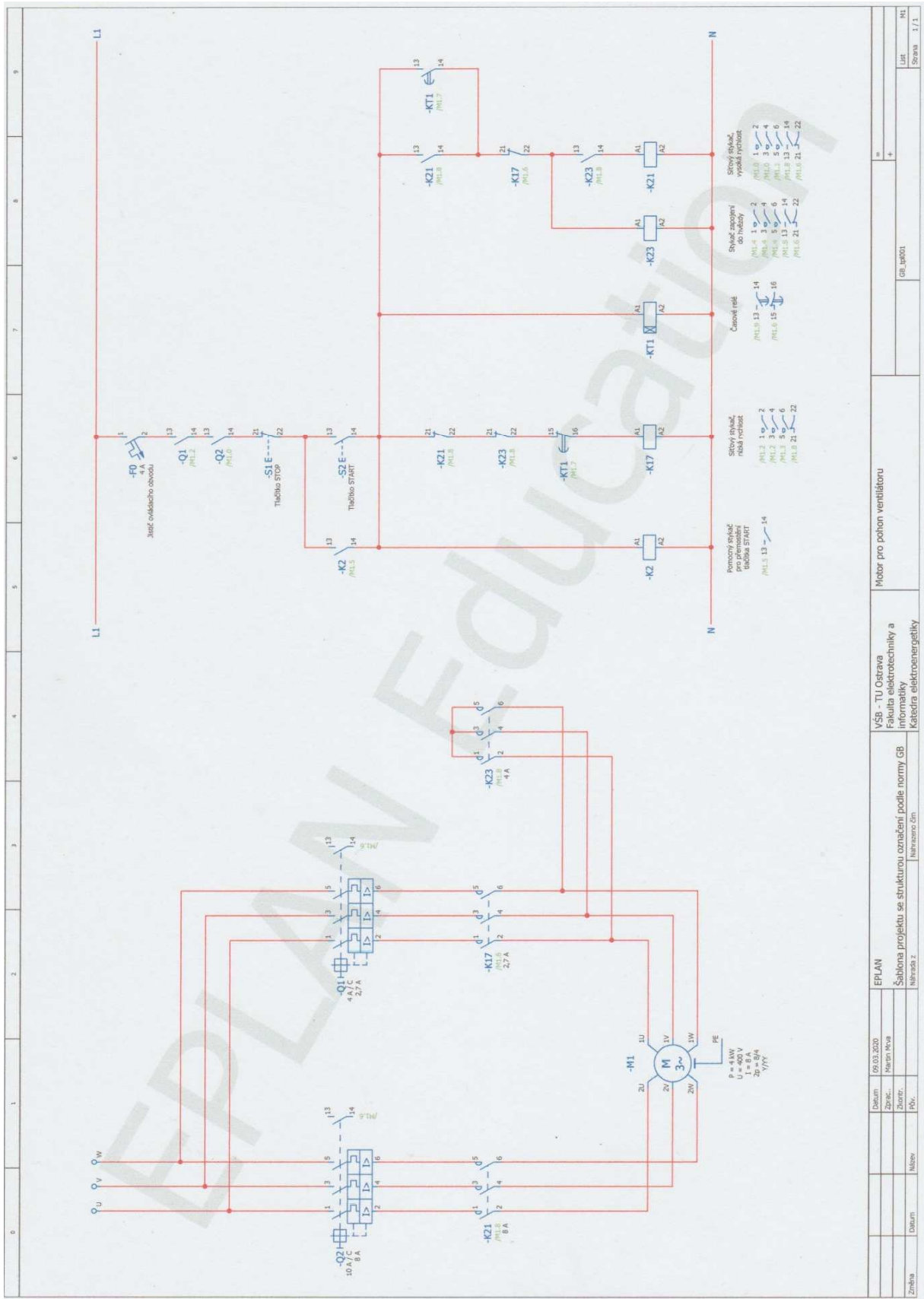
Dvourychlostní motor má na svorkovnici vyvedených šest svorek, třírychlostní motor poté devět svorek. Abychom je nemuseli pokaždé, když chceme změnit rychlost motoru, manuálně přepojovat, je vhodné navrhnout snadné dálkové ovládání přes stykače, popřípadě další elektrické přístroje.

Motory menších výkonů obecně jistíme pouze proti přetížení a zkratům, což jsou nejčastěji se vyskytující poruchy asynchronních motorů. Mohli bychom použít i jiné ochrany, avšak vzhledem k cenám menších motorů by to nebylo ekonomicky výhodné. [11, s. 12]

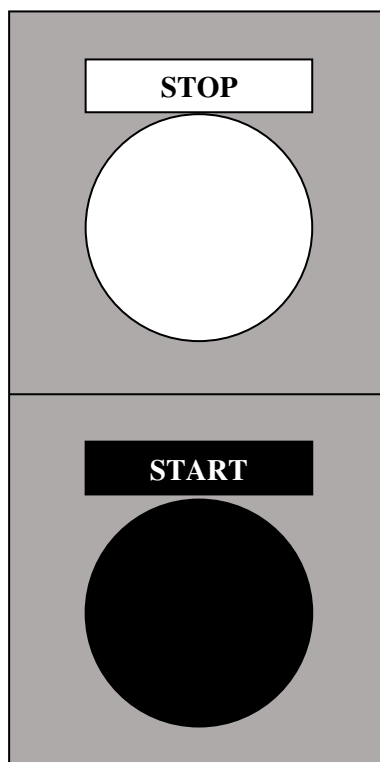
Existují dva způsoby, jak motor jistit proti přetížení a zkratu:

- 1) Použití motorového spouštěče nebo jističe s motorovou charakteristikou (C). Jistič má jak tepelnou spoušť, která zajišťuje ochranu proti menším nadproudům při přetížení (vypínací doba je delší, protože asynchronní motory můžeme krátkodobě přetěžovat až do momentu zvratu), tak zkratovou spoušť, která při vzniku zkratu hned odpojí motor od sítě. Jističe lze použít na rozdíl od pojistek opakovaně. [14, s. 13]
- 2) Použití kombinace nadproudového relé a tavné pojistky. Nadproudové relé jistí motor jen proti přetížení, proto musí mít předřazenou pojistku, která slouží jako ochrana proti zkratu. Pojistka je tavný vodič, který se průchodem velmi velkého zkratového proudu roztaví vzniklým teplem, a tím se přeruší obvod. Protože pojistka působí velmi rychle, je schopna zkratový proud vypnout ještě předtím, než dosáhne své maximální hodnoty. Říkáme, že pojistka má omezovací schopnost. Pojistku musíme po každém zapůsobení vyměnit za novou, ale zároveň je výrazně levnější než jistič. [14, s. 8, 9, 15, 16]

3.1 Schéma motoru pro pohon ventilátoru



Obr. 15 - Silové a ovládací schéma motoru pro pohon ventilátoru [5, s. 59–62]



Obr. 16 - Ovladač motoru pro pohon ventilátoru

Dvourychlostní motor pro pohon ventilátoru se používá pro jeho hladší rozběh. Proto potřebujeme, aby se po ukončení rozběhu na nižší rychlost motor automaticky přepnul na vyšší rychlost.

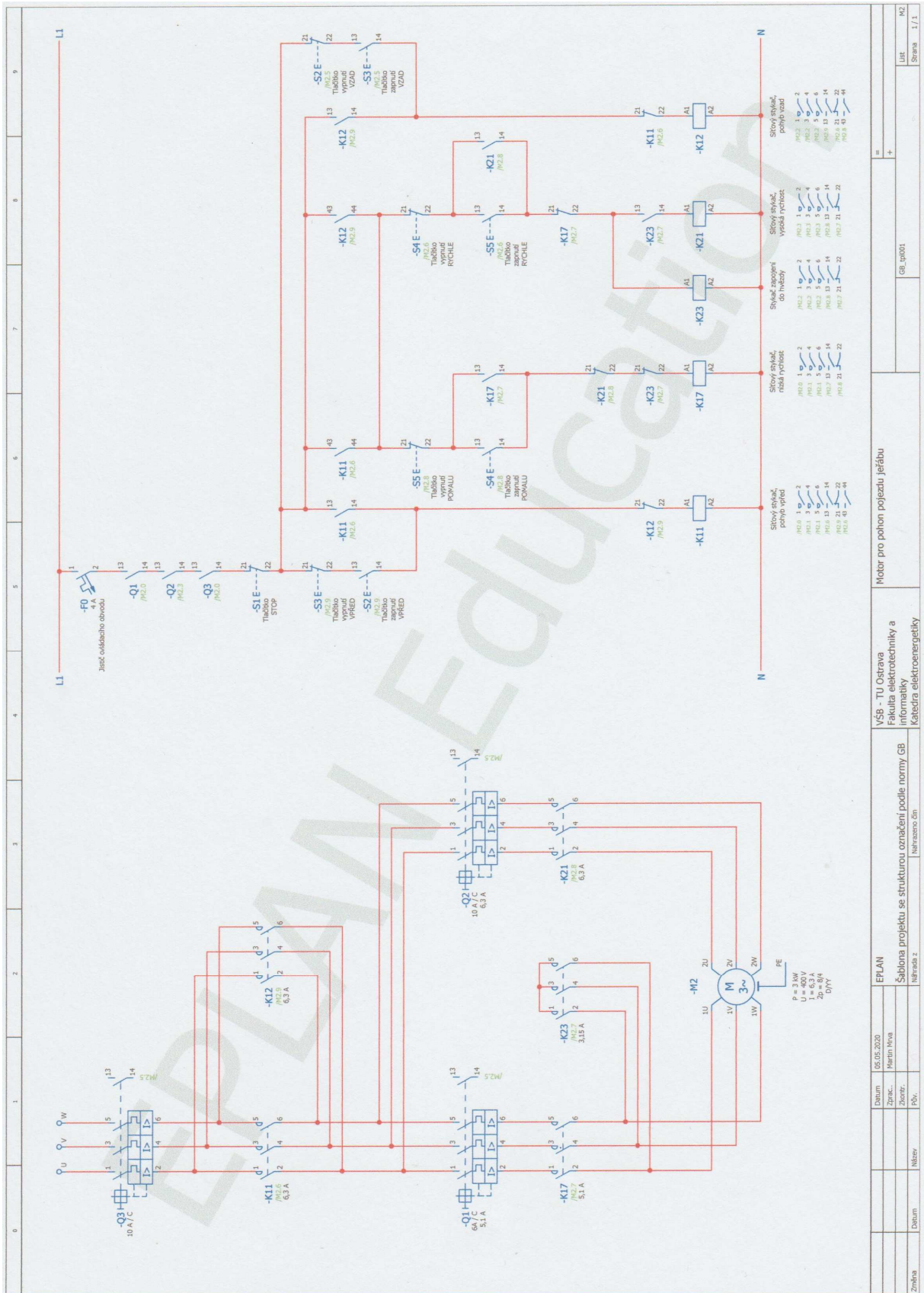
Tento motor má na svorkovnici vyvedených šest svorek a ochranný vodič (PE). Ochranný vodič vodič spojíme natrvalo k příslušnému vodiči sítě. Motor má statorové vinutí zapojeno do hvězdy. Aby se roztočil na nízkou rychlost, musíme konce cívek, které jsou vyvedeny na svorky 1U, 1V a 1W připojit k síti stykačem K17. V silovém zapojení se vždy používají silové kontakty stykače. Pro přepnutí na vyšší rychlost se musí nejdříve vypnout stykač K17, poté stykačem K23 zapojit svorky 1U, 1V a 1W do společného uzlu a k síti připojit vyvedené středy statorových cívek na svorky 2U, 2V a 2W. Tím je statorové vinutí zapojeno do dvojitě hvězdy a motor se rozbíhá na vyšší rychlost, kterou si udržuje až do odpojení od sítě. Motor je jištěn dvěma motorovými jističi s charakteristikou C, každý pro jednu rychlost. Jmenovitá hodnota jističe Q1 je 2,7 A, což je jmenovitý proud pro nižší rychlost. Stejnou jmenovitou hodnotu má i stykač K17. Jmenovitá hodnota jističe Q2 je 8 A, což je jmenovitý proud pro vyšší rychlost. Stejnou jmenovitou hodnotu má i stykač K21. Stykač K23 má poloviční jmenovitou hodnotu, tedy 4 A. Jističe jsou nastavitelné, proto použijeme nejbližší vyšší jistič z vyráběné řady a požadované hodnoty nastavíme. [5, s. 59–62] [15]

Ovládání motoru je zajištěno třemi stykači se silovými i pomocnými kontakty, pomocným stykačem, časovým relé a dvěma tlačítky. Ovládací napětí (napětí mezi fázovým vodičem L1 a nulovým vodičem N) je 230 V. Při stisknutí tlačítka START se ovládací napětí dostane na cívku stykače K17, který svými silovými kontakty spustí motor na nižší rychlost, dále k časovému relé a pomocnému stykači K2, který pomocí svého kontaktu 13–14 přidržuje tlačítko START a nemusíme ho pro chod motoru dále držet. Po uplynutí nastaveného času na časovém relé se pomocí kontaktu 15–16 TK1 odepne

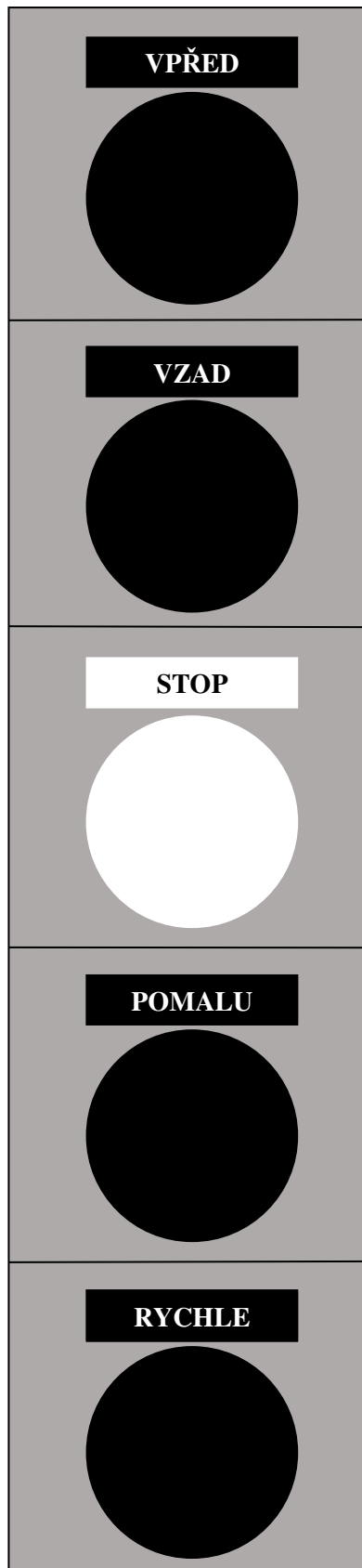
motor od sítě. Poté se pomocí kontaktu 13–14 TK1 aktivuje stykač K23, který spojí svorky 1U, 1V a 1W do společného uzlu a napětí se v ovládacím obvodu dostane k cívce stykače K21, který pomocí svých silových kontaktů připojí motor k síti a rozběhne ho na vyšší rychlost. Motor poběží do doby, dokud nestiskneme na ovladači tlačítko STOP, popřípadě dokud nezapůsobí některý z jističů Q1 nebo Q2. Všechny tři případy by znamenaly ztrátu napětí na cívkách všech stykačů a následné odpojení motoru od sítě. Zpět na nižší rychlost motor nelze přepnout. Ovládací obvod jistíme jednofázovým jističem s jmenovitou hodnotou 4 A. [5, s. 61, 62] [15]

Výkres silového a ovládacího schéma motoru, který je na Obr. 15, byl nakreslen v programu EPLAN ve verzi Education, která je volně dostupná pro studenty.

3.2 Schéma motoru pro pohon pojezdu jeřábu



Obr. 17 - Silové a ovládací schéma motoru pro pohon pojezdu jeřábu [5, s. 75, 76]



Obr. 18 - Ovladač motoru pro pohon pojezdu jeřábu

U dvourychlostního motoru pro pohon pojezdu jeřábu se předpokládá, že se bude moci trvale pohybovat buď při nižší nebo vyšší rychlosti a také reverzovat. Tomu je nutno přizpůsobit silové i ovládací schéma.

Tento motor má na svorkovnici vyvedených šest svorek a ochranný vodič (PE). Ochranný vodič vodič spojíme natrvalo k příslušnému vodiči sítě. Nejdříve musíme zvolit, jakým směrem chceme, aby se motor točil. Pro pohyb vpřed musí sepnout silové kontakty stykače K11, pro pohyb vzad silové kontakty stykače K12. Na silovém schéma na Obr. 17 vidíme, že reverzace spočívá v prohození fáze U a fáze W. Motor ale stále stojí, dále musíme zvolit, zda se má motor rozběhnout na nižší nebo vyšší rychlost. Motor má statorové vinutí zapojeno do trojúhelníku. Když na síť připojíme pomocí silových kontaktů stykače K17 svorky 1U, 1V a 1W, motor se rozběhne na nižší rychlost. Pokud stykačem K23 spojíme svorky 1U, 1V a 1W do společného uzlu, a zároveň sepnou silové kontakty stykače K21, statorové vinutí bude zapojeno do dvojité hvězdy a motor se rozběhne na vyšší rychlost (vše v předem zvoleném směru). Mezi jednotlivými rychlostmi lze libovolně přepínat. Avšak doporučuji motor rozbíhat z nulové rychlosti pouze přes nižší rychlost, dojde totiž k menšímu oteplení motoru během rozběhu, a zároveň (jak vidíme na Obr. 14) má motor při rozběhu na nižší rychlost větší záběrný moment, rozběh tedy bude rychlejší. Nicméně motor lze rozběhnout z nuly i přímo na vyšší rychlost. Motor je jištěn třemi motorovými jističi s charakteristikou C, jeden pro každou rychlost a jeden je předřazen před silové kontakty stykačů pro reverzaci. Jmenovitá hodnota jističe Q1 je 5,1 A, což je jmenovitý proud pro nižší rychlost. Stejnou jmenovitou hodnotu má i stykač K17. Jmenovitá hodnota jističe Q2 je 6,3 A, což je jmenovitý proud pro vyšší rychlost. Stejnou jmenovitou hodnotu má i stykač K21 a také stykače pro reverzaci K11 a K12. Stykač K23 má poloviční jmenovitou hodnotu, tedy 3,15 A. Jistič Q3 jistí přívod elektrické energie ze sítě a stykače pro reverzaci. Pro zajištění selektivity ochrany nastavíme jeho jmenovitou hodnotu o trochu vyšší než 6,3 A. Jističe jsou nastavitelné, proto použijeme nejbližší vyšší jistič z vyráběné řady a požadované hodnoty nastavíme. [5, s. 75, 76] [15]

Ovládání motoru je zajištěno pěti stykači se silovými i pomocnými kontakty a pěti tlačítky. Ovládací napětí (napětí mezi fázovým vodičem L1 a nulovým vodičem N) je 230 V. Nejdříve je nutné zmáčknout tlačítko pro výběr směru. Tlačítka pro volbu rychlosti zatím nejsou aktivována. Když zmáčkneme například tlačítko VPŘED, ovládací napětí se dostane na cívku stykače K11. Ten sepnou své silové kontakty, které zajistí, že se motor při pozdější volbě rychlosti roztočí právě směrem vpřed. Také sepnou svůj pomocný kontakt 13–14, který dále přidržuje tlačítko VPŘED, a také pomocný kontakt 43–44, který aktivuje obě tlačítka pro volbu rychlosti. Rozepínací kontakt 21–22 tlačítka S2 zároveň zajistí, aby se ovládací napětí nemohlo dostat k cívkám stykače K12 pro pohyb vzad. Když poté zmáčkneme tlačítko POMALU, ovládací napětí se dostane na cívku stykače K17, jehož silové kontakty připojí svorky 1U, 1V a 1W k síti, a motor se roztočí směrem vpřed na nižší rychlost. Zároveň svým pomocným kontaktem 13–14 přidržuje tlačítko S4. V případě potřeby můžeme rychlost motoru jakkoliv přepínat. Když zmáčkneme tlačítko RYCHLE, rozpínací kontakt 21–22 tlačítka S5 odpojí stykač K17, čímž zároveň odpojí svorky 1U, 1V a 1W od sítě. Ve stejnou chvíli kontakt 13–14 tlačítka S5 dovede ovládací napětí na cívku stykače K23, jehož silové kontakty spojí svorky 1U, 1V a 1W do společného uzlu a poté silové kontakty stykače K21 připojí svorky motoru 2U, 2V a 2W k síti, motor se roztočí směrem vpřed na vyšší rychlost. Pomocný kontakt 13–14 stykače K21 přidržuje tlačítko S5. V případě potřeby můžeme rychlost motoru opět snížit. Kdybychom chtěli změnit směr otáčení motoru, museli bychom jej první vypnout tlačítkem STOP, a poté znovu navolit

požadovaný směr a rychlost. Zastavení motoru může také způsobit zapůsobení některého z jističů Q1, Q2, Q3. Stejně jako v případě zmáčknutí tlačítka STOP by to znamenalo ztrátu napětí na cívkách všech stykačů a následné odpojení motoru od sítě. Ovládací obvod jistíme jednofázovým jističem s jmenovitou hodnotou 4 A. [5, s. 76] [15]

Výkres silového a ovládacího schéma motoru, který je na Obr. 17, byl nakreslen v programu EPLAN ve verzi Education, která je volně dostupná pro studenty.

3.3 Schéma třírychlostního motoru

Třírychlostní motor má na svorkovnici vyvedených devět svorek a ochranný vodič (PE). Ochranný vodič vodič spojíme natrvalo k příslušnému vodiči sítě. Třírychlostní motory mají dvě samostatná satorová vinutí, přičemž jedno z nich je zároveň přepínatelné. V tomto případě je jedno samostatné vinutí zapojeno do trojúhelníku a na svorkovnici má vyvedeny jak začátky cívek jednotlivých fází, tak jejich středy (celkem šest svorek). Druhé samostatné vinutí je zapojeno do hvězdy, na svorkovnici má vyvedeny pouze začátky cívek jednotlivých fází (celkem tři svorky). U tohoto motoru je rychlost otáčení při připojení motoru na samostatné nepřepínatelné vinutí mezi rychlostmi v případě, když motor zapojíme na obě varianty přepínatelného vinutí. [5, s. 83]

Tab. 6 – Příklad poměru rychlostí třírychlostního motoru M3 [5, s. 83]

Rychlost	Nízká	Střední	Vysoká
Vinutí	2	1	2
Svorky motoru	1U, 1V, 1W	2U, 2V, 2W	3U, 3V, 3W
otáčky · min ⁻¹	500	750	1000
Počet pólů	12	8	6

Když připojíme pomocí silových kontaktů stykače K17 svorky motoru 1U, 1V a 1W na síť, rozběhne se na nízkou rychlost. Když přepínatelné satorové vinutí přepojíme do dvojité hvězdy silovými kontakty stykačů K23 a K21, motor se roztočí vysokou rychlostí. Když motor připneme na nepřepínatelné satorové vinutí, tedy na svorky 2U, 2V a 2W pomocí silových kontaktů stykače K11, roztočí se střední rychlostí. Způsob ovládání tohoto motoru záleží na konkrétní aplikaci v daném typu pohonu a jeho specifikacích. Obecně platí, že ovládací obvody třírychlostních motorů jsou o hodně složitější, než je tomu u motorů dvourychlostních. Třírychlostní motor použijeme v aplikacích, kde je potřeba, aby se motor mohl pohybovat třemi různými rychlostmi, například u různých pojezdů a zdvihacích mechanismů. [5, s. 83] [15]

Jištění motoru je zprostředkováno třemi nadproudovými relé, které chrání proti přetížení, a jednou třípólovou pojistkou v přívodu elektrické energie ze sítě. „*Jmenovitý proud pojistky musí být v souladu s údaji na štítcích všech nadproudových relé. Jestliže není možné chránit všechna relé společnou pojistkou, musíme každému relé předřadit samostatnou pojistku.*“ [5, s. 64]

Výkres silového schéma motoru, který je na Obr. 19, byl nakreslen v programu EPLAN ve verzi Education, která je volně dostupná pro studenty.

4 Závěr

Změnu počtu pólů, a tím i změnu rychlosti otáčení rotoru, lze u dvourychlostního asynchronního elektromotoru dosáhnout třemi způsoby. Buď vložíme do motoru dvě samostatná statorová vinutí s rozdílným počtem pólů, nebo použijeme jedno přepínatelné statorové vinutí v tzv. Dahlanderově zapojení. V druhé variantě může být statorové vinutí zapojeno buď do hvězdy nebo trojúhelníku. Pro třírychlostní a čtyřrychlostní motory použijeme kombinaci těchto metod.

Při výběru konkrétní varianty motoru bereme ohled především na typ poháněného zařízení, zejména průběh jeho protimomentu v závislosti na otáčkách, a požadavky na konkrétní pohon. Jestliže v aplikaci potřebujeme poháněné zařízení provozovat při dvou rychlostech, jejichž poměr není 1 : 2, použijeme dvě samostatná statorová vinutí. Z výpočtů, které jsem provedl při vypracování bodu 2 zadání, vyplývá, že pro pohon pracovního mechanismu s ventilátorovou charakteristikou (např. ventilátoru) je vhodný motor s přepínatelným statorovým vinutím Y/YY s větším poměrem výkonů při nižší a vyšší rychlosti (kolem 1 : 4), a pro pohon pracovního mechanismu s jeřábovou charakteristikou (např. pojezdu jeřábu) nejlépe sedí motor s přepínatelným vinutím D/YY s poměrem výkonů při nižší a vyšší rychlosti přibližně 1 : 2. Vhodným výběrem motoru se zajistí správné přizpůsobení momentové charakteristiky motoru průběhu protimomentu poháněného zařízení.

Dvourychlostní asynchronní elektromotor se také často používá pro hladší rozběh motoru. Celkové oteplení motoru během rozběhu je mnohem menší při zapínání po stupních než jeho přímým spuštěním na nejvyšší rychlost. V některých aplikacích může tento způsob rozběhu např. přizpůsobit záběrný moment tak, jak to konkrétní pohon vyžaduje.

Asynchronní motory jistíme proti přetížení a proti zkratu. Používá se buď motorový jistič s charakteristikou C nebo kombinace nadproudového relé a pojistky. Pojistka je levnější, má omezovací schopnost, ale na druhou stranu se musí po každém zapůsobení vyměnit za novou. Proto se nedoporučuje její použití z důvodů údržby např. v jeřábech, kde motor chrání většinou jistič.

Důležité je navrhnout správné zapojení stykačů, jisticích a dalších elektrických přístrojů v silovém a ovládacím obvodu v závislosti na požadavcích na daný pohon. Takový návrh jsem udělal pro dva konkrétní pohony. Dvourychlostní motor pro pohon ventilátoru je použit pro jeho hladší rozběh. Proto jsem ovládací obvod navrhl tak, aby se motor hned po dokončení rozběhu na nižší rychlost automaticky přepnul na vyšší rychlost. Naopak u motoru pro pohon pojezdu jeřábu je důležité, aby se mohl pohybovat při nižší i vyšší rychlosti a to oběma směry. Proto jsem silové i ovládací schéma navrhl s možnou reverzací a libovolným přepínáním mezi rychlostmi. Tyto návrhy mohou sloužit pro přímé implementování motorů do daných pohonů v praxi, popřípadě je čtenář může brát jako návod pro výběr typu vícerychlostního motoru a návrh silového a ovládacího obvodu pro jinou konkrétní aplikaci.

Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [2] BOLDEA, Ion a Syed A. NASAR. *The Induction Machine Handbook*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0004-5.
- [3] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 2. vyd. Praha: Academia, 1982.
- [4] Motor torque, load torque and selection of motors. AGRAWAL, K. C. *Electrical Power Engineering: Reference & Applications Handbook*. CRC Press, 2007, s. 41-61. ISBN 81-901642-5-2.
- [5] EATON ELEKTROTECHNIKA S.R.O. *Příručka zapojení MOELLER 02/05: Vše o motorech* [online]. 2008 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <http://archiv.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/pdf/motory.pdf>
- [6] CANTONI MOTOR S.A. *Multi-Speed Three-Phase Induction Motors: Product Catalogue* [online]. In: [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: https://www.cantonigroup.com/storage/download/files/30/4437_multi_speed_catalogue_en.pdf
- [7] ALTEKO, S.R.O. *RFC, RFE: Radiální ventilátory s přímým pohonem* [online]. In: 2019 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: http://www.alteko.cz/upl/download/100387s_ALteko_RFC_RFE_10_15_WEB.pdf
- [8] TRNKA, Jakub. *Ověření vlastností ventilátorů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33022>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý.
- [9] MIHULEC, Michal. *Návrh mostového jeřábu* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65607>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav konstruování a částí strojů. Vedoucí práce Jan Čejka.
- [10] *Točivý moment*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 31.10.2019 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/To%C4%8Div%C3%BD_moment
- [11] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Elektrárny 2 - část 03: Přednášky do předmětu Elektrárny 2, přednášející: Karel Noháč* [online]. In: [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast03-v2.pdf>
- [12] VAVŘIŇÁK, Petr. *Elektrické stroje – pohony: Druhy poháněných pracovních mechanismů* [online]. In: 2013 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_esp_12.pdf
- [13] ČVUT V PRAZE, FEL, KATEDRA ELEKTRICKÝCH POHONŮ A TRAKCE. *Pohony s ventilátorovou charakteristikou a úspory elektrické energie: Přednáška 3* [online]. In: [cit. 2020-01-22]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A1M14PO2/Prednaska_3_Ventilator_charka.pdf

[14] PICMAUSOVÁ, Drahomíra. *ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE: P1* [online]. In: [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/06_Elektrotechnika_15-17/15_IUT/037_Elektricke-pristroje---Picmausova---P1.pdf

[15] SMÍLEK, Jiří. *Elektrické přístroje: Skripta 6 - Stykače* [online]. In: 2004 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/silnoprud/materialy/skripta/stykace_skripta_smilek.pdf