

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Porovnání návratnosti nákladů u několika variant
rekonstrukce el. pohonu**

**vedoucí práce: Ing. Martin Pittermann, Ph.D.
autor: Lubomír Machala**

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lubomír MACHALA**
Osobní číslo: **E12B0066K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Porovnání návratnosti nákladů u několika variant rekonstrukce el.pohonu**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Proveďte porovnání návratnosti nákladů na rekonstrukci el.pohonu. Práce bude obsahovat tyto body:

1. Formulace modelových příkladů, pro které bude provedeno porovnání. Jako tyto případy volte minimálně tyto modelové příklady : a) pohon čerpadla, b) pohon ventilátoru, c) pohon výtahu (zde odděleně uvažujte min.3 případy lišící se požadaváním provozním režimem).
2. U modelového příkladu proveďte popis funkce "tradičního" řešení bez měniče (as.motor napájený přímo ze sítě 50Hz) a odhad spotřebované energie.
3. U modelových příkladů proveďte odhad nákladů na rekonstrukci, kdy bude as.motor napájen z měniče napětí. Proveďte odhad úspor na spotřebované energii a návratnost investice.
4. U modelových příkladů proveďte odhad nákladů na rekonstrukci, kdy bude as.motor napájen z měniče kmitočtu. Proveďte odhad úspor na spotřebované energii a návratnost investice.
5. U modelového příkladu ad 1c) dodatečně proveďte odhad úspor na spotřebované energii a návratnost investice pro případ, že zde bude využit měnič s možností rekuperace energie zpět do sítě.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

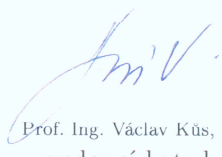
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Pittermann, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení porovnání návratnosti nákladů při rekonstrukci různých variant elektrických pohonů.

Klíčová slova

Elektrický pohon

Rekonstrukce

Napěťový měnič

Frekvenční měnič

Návratnost nákladů

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the solution's cost recovery in the reconstruction of different variations of electric drives.

Key words

Electric drive

Reconstruction

Voltage donverter

Frequency donverter

Recovery of costs

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Lubomír Machala

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Pittermannovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 ELEKTRICKÝ POHON	13
2 DEFINOVÁNÍ MODELOVÝCH PŘÍKLADŮ	14
2.1 DEFINOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO POHONU - ČERPADLO	14
2.2 DEFINOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO POHONU - VENTILÁTOR	16
2.3 DEFINOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO POHONU - VÝTAH	18
3 POPIS TRADIČNÍHO ŘEŠENÍ A ODHAD SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE	19
3.1 TEORETICKÝ ODHAD SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE A ZTRÁT Z MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY	19
3.2 ODHAD SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE – ČERPADLO.....	20
3.3 ODHAD SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE – VENTILÁTOR	22
3.4 ODHAD SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE – VÝTAH	23
3.4.1 Pracovní režim výtahu – rozjezd výtahu	23
3.4.2 Pracovní režim výtahu – chod při stálé rychlosti	24
3.4.3 Pracovní režim výtahu – brždění	25
4 ASYNCHRONNÍ MOTOR NAPÁJEN Z MĚNIČE NAPĚTÍ	26
4.1 ŘÍZENÍ RYCHLOSTI MOTORU ZMĚNOU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	26
4.2 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU ČERPADLO A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	27
4.3 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU VENTILÁTOR A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	30
4.4 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU VÝTAH A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	33
5 ASYNCHRONNÍ MOTOR NAPÁJEN Z MĚNIČE FREKVENCE	35
5.1 ŘÍZENÍ RYCHLOSTI MOTORU ZMĚNOU NAPÁJECÍ FREKVENCE.....	35
5.2 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU ČERPADLO A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	36
5.3 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU VENTILÁTOR A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	39
5.4 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU VÝTAH A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	42
5.5 ODHAD NÁKLADŮ NA REKONSTRUKCI MODELOVÉHO PŘÍKLADU VÝTAH S POUŽITÍM REKUPERAČNÍHO MĚNIČE A NÁVRATNOST TĚCHTO NÁKLADŮ	44
6 ZÁVĚR	46

POUŽITÁ LITERATURA.....	47
7 PŘÍLOHY	1

Úvod

V dnešním světě se klade na elektrické spotřebiče velký důraz, musí být energeticky nenáročné. Spotřebič musí být nejlépe ekologický, musí pracovat s vysokou účinností a hlavně s nízkou spotřebou elektrické energie. S rozvíjející se výkonovou elektronikou posléze napět'ovými a frekvenčními měniči se vyskytla možnost, že spotřebu elektrické energie můžeme snižovat. V podstatě se jedná o správné řízení elektrického spotřebiče pro definovanou výstupní práci tak, aby neunikaly zbytečné ztráty. V dnešní době je spousta aplikací kde již jsou napět'ové a frekvenční měniče instalovány a spotřebu elektrické energie snižují o již zmíněné ztráty. Bohužel tyto moderní přístroje mají nemalé pořizovací náklady, proto by se v každé nově uvažované aplikaci měla vypočítávat návratnost nákladů.

A přesně toto téma o návratnosti nákladů je cílem mé bakalářské práce. Aby se toto téma mohlo řešit, musí se nadefinovat uvažované elektrické spotřebiče, na kterých se tato rekonstrukce bude provádět. Na definování elektrických spotřebičů se zaměřuje začátek mé práce. Postupně se nadefinují elektrické pohony použité jako čerpadlo, ventilátor a výtah. Po tomto kroku se práce zaměří na odhad spotřeby těchto pohonů. Po této části se bude pracovat s náklady na rekonstrukci napět'ového měniče a bude proveden odhad o poklesu spotřeby elektrické energie. V poslední řadě těchto kroků bude odhad návratnosti nákladů při napájení pohonu pomocí měniče napětí a bez měniče. To samé se pak provede pro rekonstrukci, kdy pohon bude napájen přes frekvenční měnič.

Seznam symbolů

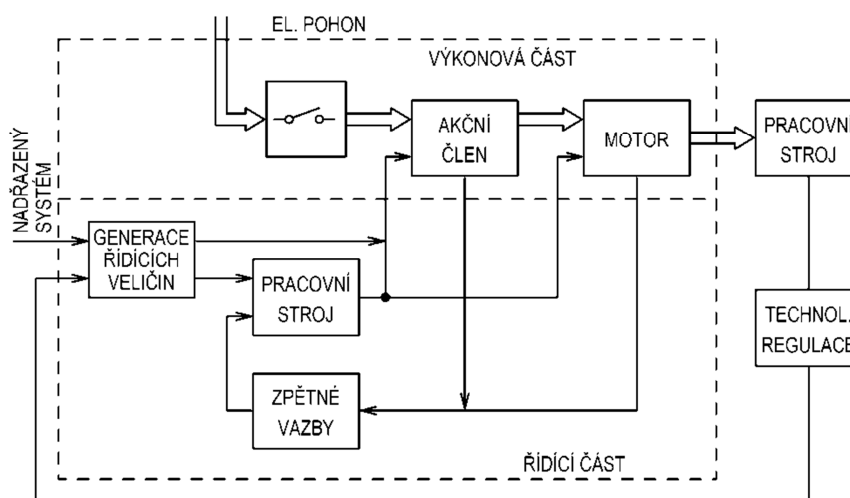
$M [N.m]$	Moment
$M_N [N.m]$	Moment jmenovitý
$M_Z [N.m]$	Moment zátěžný
$M_z [N.m]$	Moment zvratu
$M_m [N.m]$	Moment maximální
$M_i [N.m]$	Moment elektromagnetický
$P [W]$	Činný výkon
$P_\delta [W]$	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru asynchronního motoru
$U [V]$	Elektrické napětí
$I [A]$	Elektrický proud
$\omega [rad.s^{-1}]$	Přepočítaná rychlost otáček v mechanické úhlové míře k počtu pólů
$\omega_N [rad.s^{-1}]$	Přepočítaná jmenovitá rychlost otáček v mechanické úhlové míře k počtu pólů
$\omega_s [rad.s^{-1}]$	Přepočítaná synchronní rychlost otáček v mechanické úhlové míře k počtu pólů
$\omega_r [rad.s^{-1}]$	Přepočítaná rotorová rychlost otáček v mechanické úhlové míře k počtu pólů
$\omega_Z [rad.s^{-1}]$	Přepočítaná zátěžná rychlost otáček v mechanické úhlové míře k počtu pólů
$\Delta\omega [rad.s^{-1}]$	Rozdíl otáček v mechanické úhlové míře
$\Delta P_m [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru mechanický
$\Delta P_i [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru od zatížení
$\Delta P_0 [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru chodu naprázdno
$\Delta P_{Fe} [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru v železe
$\Delta P_{RR} [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru v odporu rotoru
$\Delta P_{RS} [W]$	Ztrátový výkon asynchronního motoru v odporu statoru
$R_R [\Omega]$	Elektrický odpor rotoru asynchronního motoru
$R_S [\Omega]$	Elektrický odpor statoru asynchronního motoru
$p_p [-]$	Počet pólů asynchronního motoru
$L_k [H]$	Vlastní indukčnost asynchronního motoru
$\Psi [Wb]$	Spřažený magnetický tok

f [Hz]	Frekvence
$L_{l\sigma}$ [H]	Vlastní indukčnost statoru asynchronního motoru
s [-]	Skluž asynchronního motoru
s_m [-]	Skluž asynchronního motoru při maximálním momentu
W [J]	Energie všeobecně
W_Z [J]	Energie potřebná pro zátěž
W_k [J]	Energie kinetická
W_d [J]	Energie potřebná pro dynamický ráz
ΔW_{ztr} [J]	Energie ztrátová
ΔW_s [J]	Energie ztrátová ve statoru
ΔW_r [J]	Energie ztrátová v rotoru
J_{mekv} [kg.m ²]	Moment setrvačnosti
m [kg]	Hmotnost
v [m.s ⁻¹]	Rychlost
h [m]	Výška zdvihu
g [m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
A [kWh]	Elektrická práce

1 Teoretická část

1.1 Elektrický pohon

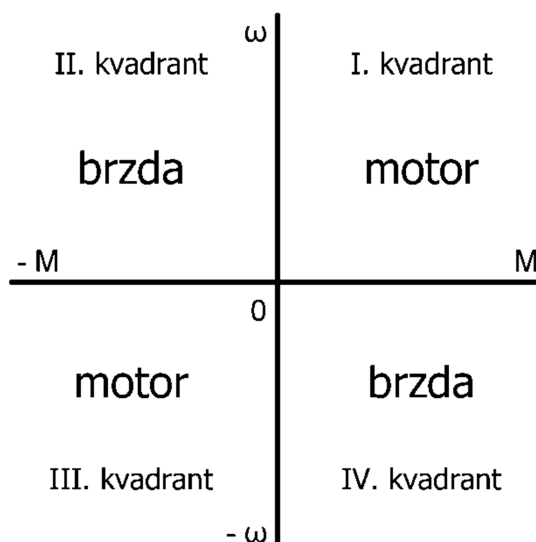
Elektrickým pohonem se rozumí soustava elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní veličiny jsou určeny nadřazeným systémem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu [2]. Na obrázku *Obr. 1.1* je znázorněné blokové schéma elektrického pohonu jako celku.



Obr. 1.1: Blokové schéma elektrického pohonu [obrázek převzat z 1]

Elektrický pohon se skládá ze dvou funkčních částí. Část řídicí představuje systém napájení, systém regulace, systém logického řízení apod. Pak se elektrický pohon skládá z druhé funkční části a to je výkonová část. V této práci bude věnována pozornost zejména výkonové části. Tato funkční část sestává z akčního členu, motoru a pracovního stroje. [1]

Převážná část elektrického pohonu vykonává točivý pohyb, některé pohony vykonávají pohyb přímočarý. Co se týče říditelnosti otáčivé rychlosti, existují pohony jednorychlostní, dvourychlostní nebo vícerychlostní. Závislost mezi otáčivou rychlostí a momentem na hřídeli se znázorňuje v $M(\omega)$ diagramu. Diagram se skládá ze čtyř kvadrantů a z těchto kvadrantů lze pak určit režim pohonu. [2]

Obr. 1.2: Kvadranty diagramu $M-\omega$ [obrázek převzat z 1]

V I. a III. kvadrantu je součin $M \cdot \omega$ kladný – pohon pracuje v motorickém režimu. Zatímco ve II. a IV. kvadrantu je součin záporný – pohon pracuje v režimu brzda. [2]

2 Definování modelových příkladů

2.1 Definování elektrického pohonu - čerpadlo

V objektu čerpací stanice se nachází šest odstředivých čerpadel pracujících do společného výtlačného řádu. Čerpadla jsou poháněna elektrickými asynchronními motory s kotvou nakrátko, rozběh se uskutečňuje přímým připojením k elektrické síti sdruženého napětí 6kV. Pro modelový příklad v této práci se bude uvažovat jeden z těchto šesti elektrických pohonů.

Štítkové hodnoty odstředivého čerpadla:

Objemový průtok:	$625 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$	Jmenovité otáčky:	$980 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$
Jmenovitý výkon:	414 kW		

Štítkové hodnoty asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	500 kW	Jmenovité moment:	4857 N.m
Jmenovité otáčky:	$983 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$	Poměr M_z/M_n :	2,7
Jmenovité napětí:	6000 V	Poměr M_m/M_n :	2,9



Obr. 2.1: Elektrický pohon – čerpadlo [vlastní tvorba]

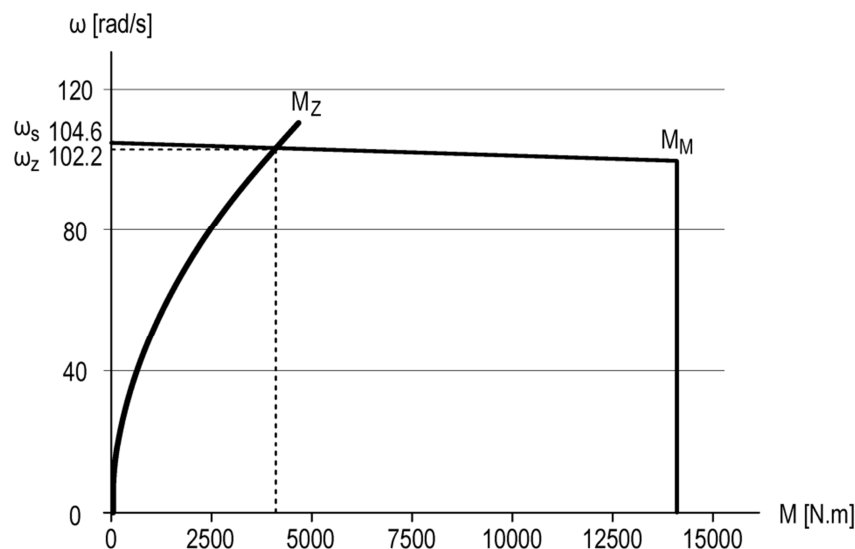
Čerpadlo je dimenzováno při 980 ot.min^{-1} na maximální výkon 415 kW . Z těchto štítkových hodnot lze určit maximální moment zátěže:

$$M_Z = \frac{P}{\omega_Z} = \frac{414 \cdot 10^3}{102,2} = 4050 \text{ N.m}$$

Typická momentová charakteristika čerpadlové zátěže elektrického pohonu je $M = k \cdot \omega_Z^2$ [1], ze známých veličin lze určit k :

$$k = \frac{M_Z}{\omega_Z^2} = \frac{4050}{102,2^2} = 0,387$$

Ze štítkových a vypočtených hodnot lze sestavit momentovou charakteristiku vzájemné interakce asynchronního motoru (M_M) a poháněného čerpadla (M_Z).



Obr. 2.2: Vzájemná interakce el. motoru a čerpadla vyjádřené $M(\omega)$ charakteristikou [vlastní tvorba]

2.2 Definování elektrického pohonu - ventilátor

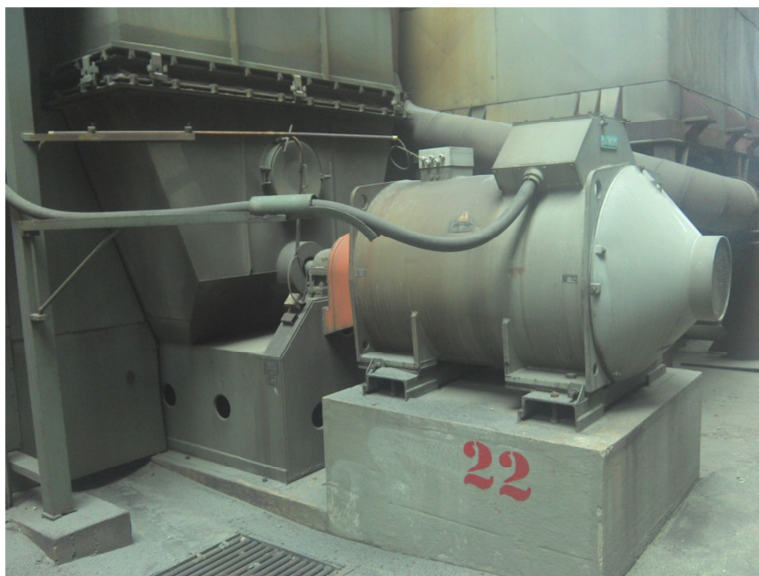
V tomto případě se jedná o ventilátor sloužící pro dmychání vzduchu a odtah kouřových plynů z kotle tepelné elektrárny. Ventilátor je též poháněn asynchronním motorem s kotvou nakrátko, rozběh se uskutečňuje přímým připojením k elektrické síti sdruženého napětí 6kV. Dmychání vzduchu se provádí dvěma ventilátory stejného provedení, pracují buď paralelně, nebo jednotlivě dle požadovaného vzduchu vstupující do kotle. Pro modelový příklad se bude uvažovat jeden z těchto dvou pohonů.

Štítkové hodnoty vzduchového ventilátoru:

Objemový průtok:	$47,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Jmenovitý výkon:	226 kW
Celkový tlak:	3700 Pa	Otáčky:	$991 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Štítkové hodnoty asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	400 kW	Jmenovitý moment:	3858 N.m
Jmenovité otáčky:	$990 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	Poměr M_z/M_n :	2,6
Jmenovité napětí:	6000 V	Poměr M_m/M_n :	2,8



Obr. 2.3: Elektrický pohon – ventilátor [vlastní tvorba]

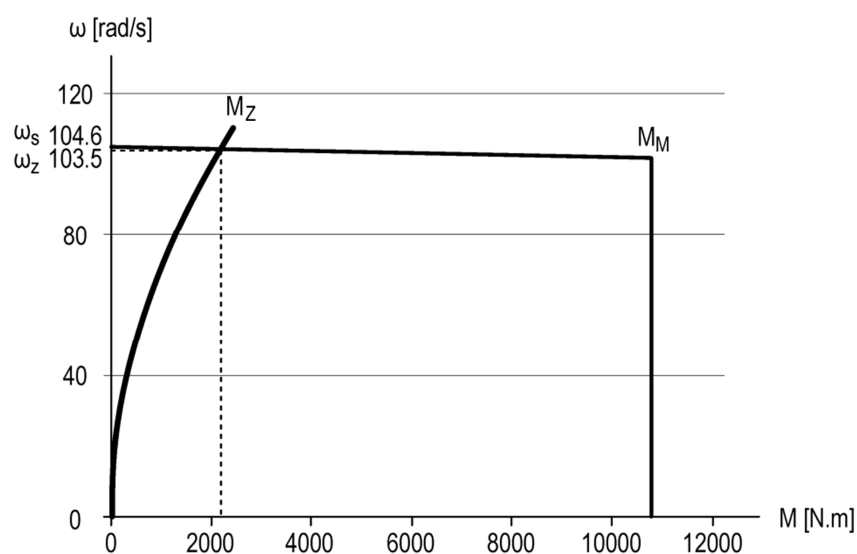
Ventilátor je dimenzováno při 991 ot.min^{-1} na maximální výkon 226 kW . Z těchto štítkových hodnot lze určit moment zátěže:

$$M_Z = \frac{P}{\omega_Z} = \frac{226 \cdot 10^3}{103,5} = 2183 \text{ N.m}$$

Typická momentová charakteristika ventilátorové zátěže elektrického pohonu je $M = k \cdot \omega_Z^2$ [1], ze známých veličin lze určit k :

$$k = \frac{M_Z}{\omega_Z^2} = \frac{2183}{103,5^2} = 0,203$$

Ze štítkových a vypočtených hodnot lze sestavit momentovou charakteristiku vzájemné interakce asynchronního motoru (M_M) a poháněného ventilátoru (M_Z).

Obr. 2.4: Vzájemná interakce el. motoru a ventilátoru vyjádřené $M(\omega)$ charakteristikou [vlastní tvorba]

2.3 Definování elektrického pohonu - výtah

Výtah se nachází v sedmipodlažním objektu. Středem tohoto objektu vede výtahová šachta. Elektrické soustrojí se nachází v horní části výtahové šachty a zdvihací mechanismus je proveden s protizávažím o hmotnosti 500kg. Výška zdvihu je 20m, rychlost zdvihu výtahové kabiny o hmotnosti 450kg je $0,67\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Maximální nosnost výtahu je 320kg.

Štítkové hodnoty převodovky a navíjecího bubnu:

Převod:	1:53
Průměr kotouče:	0,725 m

Štítkové hodnoty elektrického motoru:

Jmenovitý výkon:	3 kW	Poměr M_z/M_n :	1,9
Jmenovité otáčky:	950 ot.min ⁻¹	Poměr M_m/M_n :	2,2
Jmenovité napětí:	400 V	Moment setrvačnosti:	0,015 kg.m ²
Jmenovitý moment:	30 N.m		

Výtahová šachta se pohybuje přímočarým pohybem pomocí navíjecího bubnu, který je pevně spojen s hřídelí asynchronního motoru. Při definování a sestrojení momentové charakteristiky vzájemné interakce elektrického motoru a zátěže budu předpokládat výtahové zatížení při maximální nosnosti výtahové kabiny. Pro výpočet zatěžovacího momentu na straně kotouče M_k platí:

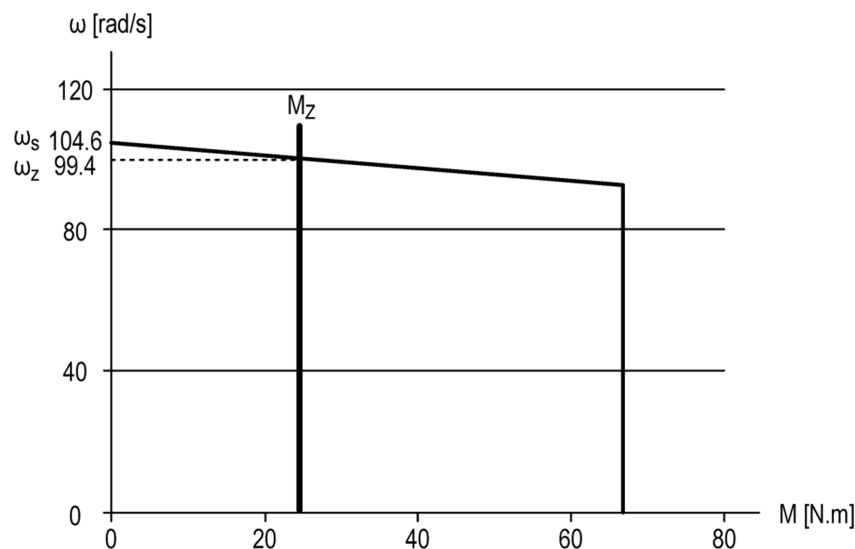
$$M_k = F \cdot r = (m_k + m_n + m_l - m_z) \cdot g \cdot \frac{d}{2} = (450 + 320 + 75 - 500) \cdot 9,82 \cdot \frac{0,725}{2}$$

$$= 1228,1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Přepočet zatěžovacího momentu na stranu hřídele motoru M_z :

$$M_z = \frac{M_k}{i \cdot \eta_p} = \frac{1228,1}{53,095} = 24,4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Z vypočtené hodnoty zátěžného momentu a jmenovitých hodnot elektrického motoru lze sestrojit momentovou charakteristiku.



Obr. 2.5: Vzájemná interakce el. motoru a výtahu vyjádřené $M(\omega)$ charakteristikou [vlastní tvorba]

3 Popis tradičního řešení a odhad spotřebované energie

3.1 Teoretický odhad spotřebované energie a ztrát z momentové charakteristiky

Zanedbáním mechanických ztrát stroje ΔP_m je moment na hřídeli roven elektromagnetickému momentu M_i a točivé pole se točí rychlostí ω_s . [5] Proto výkon P_δ přenesený přes vzduchovou mezeru lze vyjádřit součinem aktuálního momentu M ($M=M_i$) a synchronní rychlostí ω_s . [6]

$$P_\delta = M \cdot \omega_s \quad (3.1)$$

Asynchronní motor z hlediska určení ztrát je velmi složitá operace. I z výpočtového získání těchto ztrát se při nejlepším dostaneme pouze na jejich odhad. [4]

Při odhadování ztrát lze ztráty rozdělit na ztráty od zatížení ΔP_i a na ztráty naprázdno ΔP_0 . Ztrátovým výkonem naprázdno je motor buzen, tyto ztráty jsou tvořeny ztrátami v železe ΔP_{Fe} a ztrátami ve statorovém a rotorovém vinutí ΔP_{RS} resp. ΔP_{RR} . Odhad ztrát ΔP_{Fe} je v této práci nemožné provádět, a to z důvodů neexistence dat pro výpočet. Proto bude hodnota ΔP_{Fe} stanovena na přibližnou hodnotu 3% z výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru elektrického motoru.

Pro odhad ztrát je důležitý zejména vliv zátěžného momentu a tudíž ztrátový výkon ΔP_{RR} na odporu rotoru R_R , který lze vyjádřit součinem aktuálního momentu a rotorové úhlové rychlosti. [6]

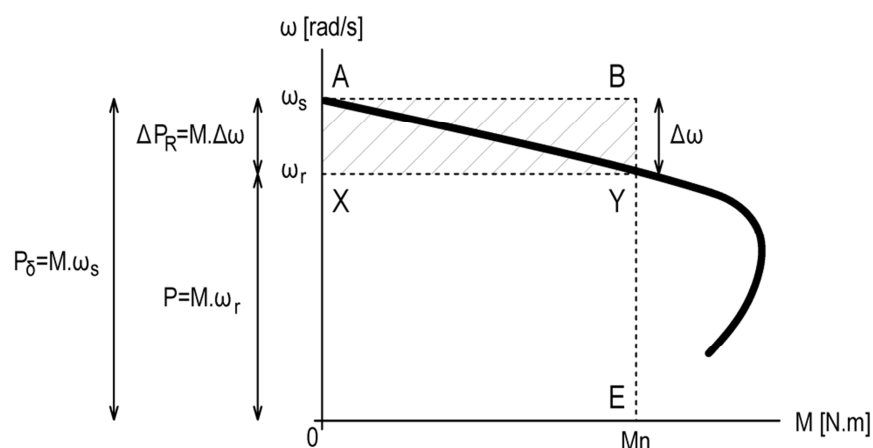
$$\Delta P_{RR} = M \cdot \Delta\omega \quad (3.2)$$

U asynchronního motoru je také nutnost uvažovat ztráty na odporu statoru R_S , tyto ztráty jsou úměrné ztrátám ΔP_{RR} . [6]

Z grafického znázornění ztrát ASM na *Obr. 3.1* je zřejmé umístění pracovního bodu Y . Velikost mechanického výkonu na *Obr. 3.1* zde reprezentuje obdélník $XYE0$. [6]

$$P = M \cdot \omega_r \quad (3.3)$$

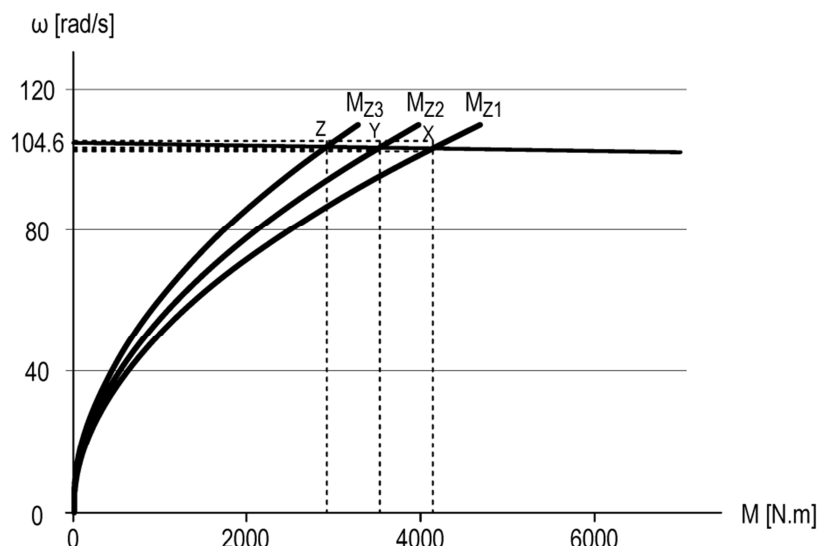
Ztrátový výkon na R_R je úměrný ploše vyšrafovaného obdélníka $ABXY$ na *Obr. 3.1*. [6]



Obr. 3.1: Grafické vyjádření ztrát ASM [obrázek převzat z 6]

3.2 Odhad spotřebované energie – čerpadlo

Z provozního hlediska jsou provozována dvě až čtyři čerpadla, které pracují společně do výtlačného řádu, zbytek čerpadel které nejsou v provozu plní funkci zálohy. Kombinace provozu čerpadel se řídí dle požadovaného množství vytlačené tekutiny, z tohoto důvodu není možné určit přesný režim provozu jednotlivého čerpadla, a proto se provede odhad spotřebované energie 100%, 85% a 70% pro zátěžnou konstantu k . Regulace průtoku kapaliny se provádí pomocí regulační armatury (škrcením), vlivem tohoto škrcení se snižuje k ve vztahu $M = k \cdot \omega_Z^2$. [7]



Obr. 3.2: Vzájemná interakce el. motoru a čerpadla (zátěž 100%, 85% a 70%) [vlastní tvorba]

Spotřebovanou energii a ztráty lze teoreticky odhadnout. Postup odhadu blíže popisuje kapitola 3.1 a podle této kapitoly se bude odhad provádět.

Tab. 1: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 3.2

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	4152 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z1}	103,0 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	3540 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z2}	102,5 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	2928 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z3}	102,0 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 4152 \cdot 104,6 \cong 434 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 434 \cdot 0,03 \cong 13 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_s - \omega_{Z1}) = 4152 \cdot (104,6 - 103) \cong 6,6 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 4152 \cdot 103 \cong 427 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot t = (6,6 + 6,6 + 13 + 427) \cdot 720 \cong 236 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 2: Vypočtené hodnoty pro zátěž čerpadla před rekonstrukcí

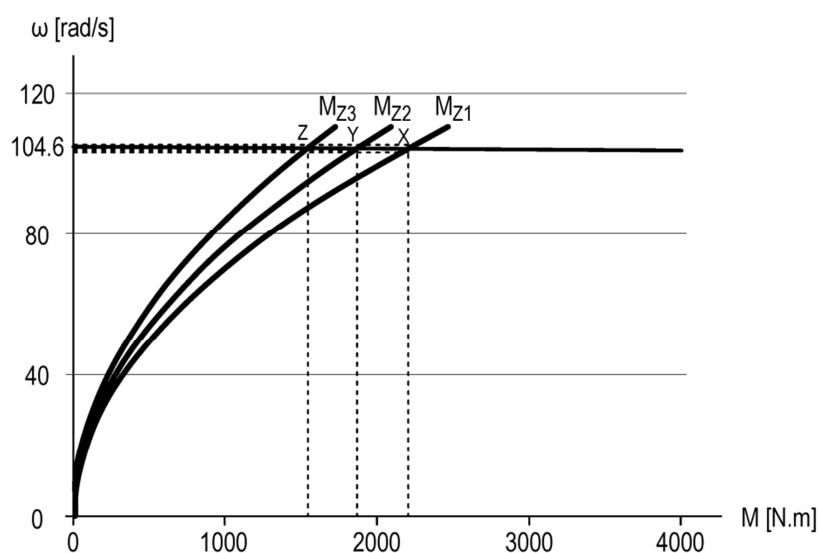
Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 13 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 11,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 9,2 \text{ kW}$

$\Delta P_{RR} = 6,6 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 7,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 7,6 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 6,6 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 7,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 7,6 \text{ kW}$
$P = 427 \text{ kW}$	$P = 362,8 \text{ kW}$	$P = 298,6 \text{ kW}$
A = 236 MWh	A = 280 MWh	A = 233 MWh

3.3 Odhad spotřebované energie – ventilátor

U velkých elektrárenských kotlů je potřeba ventilátorů pro podporu hoření, zplyňování paliva a tahu kouřových zplodin. Jedná se o tzv. vzduchové a spalínové ventilátory. V této kapitole se bude odhadovat spotřeba vzduchového ventilátoru, odhad se provede pomocí momentové charakteristiky vzájemné interakce zátěže a motoru. Funkce ventilátoru spočívá v dopravě spalovacího vzduchu z atmosféry (ventilátory jsou umístěné mimo budovu kotle) do ohniště.

Vzduchový ventilátor pracuje společně s dalším vzduchovým ventilátorem, společně tvoří skupinu vzduchových ventilátorů, které vhání vzduch do ohniště kotle. Jejich provozní zatížení je závislé na výkonu kotle, který je velmi variabilní. Z tohoto důvodu se opět provede odhad spotřebované energie 100%, 85% a 70% pro zátěžnou konstantu k . Pro zátěžnou konstantu k i v tomto případě platí vztah $M = k \cdot \omega_z^2$. [1]



Obr. 3.3: Vzájemná interakce el. motoru a ventilátor (zátěž 100%, 85% a 70%) [vlastní tvorba]

Spotřebovanou energii a ztráty lze teoreticky odhadnout. Postup odhadu blíže popisuje kapitola 3.1 a podle této kapitoly se bude odhad provádět.

Tab. 3: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 3.3

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	2212 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z1}	103,8 rad.s ⁻¹
--------------------------	----------	-----------------------------------	---------------------------

Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	1875 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z2}	103,3 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	1550 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z3}	102,7 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 2212 \cdot 104,6 \cong 231,3 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 231,3 \cdot 0,03 \cong 6,9 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_s - \omega_{Z1}) = 2212 \cdot (104,6 - 103,8) \cong 1,8 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 2212 \cdot 103,8 \cong 229,6 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot t = (1,8 + 1,8 + 6,9 + 229,6) \cdot 720 \cong 173 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 4: Vypočtené hodnoty pro zátěž ventilátor před rekonstrukcí

Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 6,9 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 5,8 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 4,8 \text{ kW}$
$\Delta P_{RR} = 1,8 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 2,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 2,9 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 1,8 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 2,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 2,9 \text{ kW}$
$P = 229,6 \text{ kW}$	$P = 193,6 \text{ kW}$	$P = 159,1 \text{ kW}$
A = 173 MWh	A = 147 MWh	A = 122 MWh

3.4 Odhad spotřebované energie – výtah

Odhad spotřebované energie se bude provádět pro tři pracovní režimy – rozjezd výtahu, chod při stálé rychlosti přímočarého pohybu a při brždění. Při těchto pracovních režimech se bude předpokládat 50% zatížení maximální nosnosti výtahové kabiny, což odpovídá hodnotě momentu 12,2N.m. Dále se bude uvažovat 400 rozjezdů denně resp. 400 brždění.

3.4.1 Pracovní režim výtahu – rozjezd výtahu

Při rozjezdu se jedná o dynamické zatížení, kde momenty působí změnu rychlosti. Změny rychlosti jsou provázány změnami energie. Vychází se z energetické bilance. [3]

$$W = W_z + W_k + \Delta W_{ztr} \quad (3.4)$$

Po zanedbání ztrát platí rovnice rovnováhy energií, která má tvar:

$$W = W_k + W_z \quad (3.5)$$

Pro vyjádření W_z je zapotřebí znát moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru:

$$\begin{aligned} J_{mekv} &= m \cdot \left(\frac{v^2}{\omega_r^2} \right) = (m_k + m_n + m_l) \cdot \left(\frac{v^2}{\omega_r^2} \right) = (450 + 160 + 75) \cdot \left(\frac{0,67^2}{98^2} \right) = \\ &= 0,032 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

Pro energii potřebnou pro dynamický pohyb výtahu platí:

$$\begin{aligned} W_d = W_k + W_z &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J_{mekv} \cdot \omega_r^2 = \frac{1}{2} \cdot 1185 \cdot 0,67^2 + \frac{1}{2} \cdot 0,032 \cdot 98^2 = 266 + 154 \\ &= 420 \text{ J} \end{aligned}$$

Pro roční spotřebu energie pro dynamický pohyb výtahu a za předpokládaných podmínek uvedené v kap. 3.4, platí:

$$W_{d \text{ roční}} = W \cdot (n_{start}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 420 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 1,84 \text{ GJ}$$

Přepočítané na elektrickou energii:

$$W_{d \text{ roční}} = 1,84 \text{ GJ} \rightarrow A = 511 \text{ kWh}$$

Pro vyjádření ztrát energie ve vinutí rotoru platí:

$$\Delta W_r = \frac{1}{2} \cdot J_{mekv} \cdot \omega_s^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,032 \cdot 104,6^2 = 175 \text{ J}$$

Pro roční spotřebu ztrátové energie pro dynamický pohyb výtahu a za předpokládaných podmínek uvedené v kap. 3.4, platí:

$$\Delta W_r \text{ roční} = \Delta W_r \cdot (n_{start}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 175 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 0,77 \text{ GJ}$$

Dále platí, že $\Delta W_r \cong \Delta W_s$, z čehož platí:

$$\Delta W_s \text{ roční} = \Delta W_s \cdot (n_{start}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 175 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 0,77 \text{ GJ}$$

Přepočítané na elektrickou energii:

$$\Delta W_r \text{ roční} = 0,77 \text{ GJ} \rightarrow A = 214 \text{ kWh}$$

$$\Delta W_s \text{ roční} = 0,77 \text{ GJ} \rightarrow A = 214 \text{ kWh}$$

3.4.2 Pracovní režim výtahu – chod při stálé rychlosti

Tento režim je charakterizován ustálenou rychlostí výtahové kabiny. Spotřebovaná energie je závislá na hmotnosti pohybující se kabiny rychlostí $0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a na výšce zdvihu. Pro výpočet budu předpokládat 10m výšky zdvihu, tato hodnota byla zvolena z teoretického odhadu průměrného zdvihu za den.

Pro výpočet potřebné energie na jednu jízdu platí:

$$W_{zdvih} = F \cdot h = (m_k + m_n + m_l - m_z) \cdot g \cdot h = (450 + 160 + 75 - 500) \cdot 9,82 \cdot 10 = \\ \cong 18150 \text{ J}$$

Pro roční spotřebu energie zdvihu výtahu a za předpokládaných podmínek uvedené v kap. 3.4, platí:

$$W_{ročni} = W \cdot (n_{zdvih}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 18150 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 79 \text{ GJ}$$

Přepočítané na elektrickou energii:

$$W_{zdvih} = 79 \text{ GJ} \rightarrow A = 22 \text{ MWh}$$

Pro odhad mechanické úhlové rychlosti platí:

$$\omega_r = \frac{v}{r} \cdot i = \frac{0,67}{0,3625} \cdot 53 = 98 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro odhad ztrát ΔP_r platí:

$$\Delta P_r = M_z \cdot (\omega_s - \omega_r) = 12,2 \cdot (104,6 - 98) = 80,5 \text{ W}$$

Kabina pohybující se rychlostí $0,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ překoná 10m zdvihu za 15s a pro odhad ztrát elektrické energie ve vinutí rotoru platí:

$$\Delta P_1 = \Delta P_r \cdot t_{zdvih} = 80,5 \cdot 15 \cong 1200 \text{ W} \cdot \text{s}^{-1}$$

Přepočítané na energii:

$$\Delta P_1 = 1200 \text{ W} \cdot \text{s}^{-1} \cong 1200 \text{ J}$$

Pro odhad roční spotřeby energie pokrývající ztráty v rotoru a za předpokládaných podmínek platí:

$$\Delta W_{r roční} = \Delta W_r \cdot (n_{zdvih}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 1200 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 5,3 \text{ GJ}$$

Dále platí, že $\Delta W_r \cong \Delta W_s$, z čehož platí:

$$\Delta W_{s roční} = \Delta W_s \cdot (n_{start}) \cdot (n_{den/měsíc}) \cdot (n_{den/rok}) = 1200 \cdot 400 \cdot 30 \cdot 365 \cong 5,3 \text{ GJ}$$

Přepočítané na elektrickou energii:

$$\Delta W_{r roční} = 5,3 \text{ GJ} \rightarrow A = 1470 \text{ kWh}$$

$$\Delta W_{s roční} = 5,3 \text{ GJ} \rightarrow A = 1470 \text{ kWh}$$

3.4.3 Pracovní režim výtahu – brždění

Tento režim je principiálně shodný jako režim rozběh výtahu, který byl rozebrán v kapitole 3.4.1. Jedná se o ztrátový režim, jelikož energii, kterou při pohybu výtah vykonává, musí být nějakým způsobem odvedena resp. zmařena. U tohoto případu výtahu je využíváno brždění stejnosměrným proudem a tato energie je zmařena v odporu rotoru. [4]

Shrnutí energií, které jsou při brždění zmařeny:

$$W_d = W_k + W_z = 420 J$$

$$\Delta W_r = \frac{1}{2} \cdot J_{mekv} \cdot \omega_s^2 = 175 J$$

$$\Delta W_s = \frac{1}{2} \cdot J_{mekv} \cdot \omega_s^2 = 175 J$$

Přepočítané na elektrickou energii:

$$W_{d\text{ roční}} = 1,84 GJ \rightarrow A = 511 kWh$$

$$\Delta W_{r\text{ roční}} = 0,77 GJ \rightarrow A = 214 kWh$$

$$\Delta W_{s\text{ roční}} = 0,77 GJ \rightarrow A = 214 kWh$$

4 Asynchronní motor napájen z měniče napětí

4.1 Řízení rychlosti motoru změnou napájecího napětí

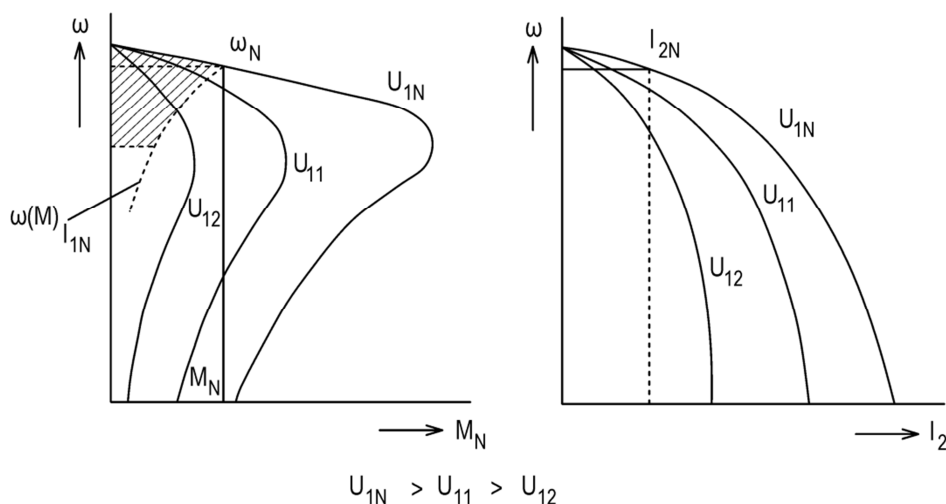
Tento způsob řízení se používá pro řízení rychlosti motoru a ke zmenšení rozběhových proudů.[1] U tohoto řízení se velikost skluzu zvratu s napětím nemění, moment zvratu a záběrový moment se mění s druhou mocninou napětí a záběrný proud je lineárně úměrný napětí. [2] Řízení napájecím napětím je velmi ztrátové, protože při užitečném výkonu na hřídeli P vznikají v rotorovém obvodu ztráty dle následujícího vztahu:

$$\Delta P_{RR} = \frac{s}{1-s} \cdot P_\delta \quad (4.1)$$

nebo

$$\Delta P_{RR} = M \cdot (\omega_s - \omega_r) \quad (4.2)$$

Při tomto řízení lze napětí pouze snižovat, pokud dojde ke zvyšování napětí, přesytil by se stroj a vznikaly by velké magnetizační proudy. Vyšrafovaní na *Obr. 4.1* je oblast, ve které může motor trvale pracovat. Zařazením odporu do obvodu kotvy se oblast rozšíří, neboť charakteristika zvětší svůj sklon a vznikne tak větší oblast řízení, ale s většími ztrátami. [1]



Obr. 4.1: Charakteristika při řízení motoru napětím [obrázek převzat z 1]

Proměnné a říditelné napětí lze získat různými způsoby, např. z točivého měniče, z otočného transformátoru nebo z tyristorového měniče napětí. [1]

V dnešní době se uskutečňuje řízení rychlosti motoru napětím pomocí tyristorového měniče napětí.

4.2 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu čerpadlo a návratnost těchto nákladů

U rekonstrukce elektrického pohonu použitého jako čerpadlo jsem se rozhodl pro variantu s převodovým transformátorem 6000/690V. Měnič napětí bude řídit napětí na nn straně transformátoru, tato varianta rekonstrukce je jednou z několika možných variant, které je možno použít v této aplikaci. Samozřejmě by v tomto případě byla výhodnější varianta s napěťovým měničem pro vysoké napětí, kde by se nemusel pořizovat nový motor a nový transformátor. Ale vzhledem k možnosti práce s ceníkem napěťových měničů na 690V jsem se rozhodnul pro variantu s převodovým transformátorem. U této rekonstrukce je zapotřebí výměna elektrického motoru a s tím související i nová montáž transformátoru a v neposlední řadě montáž měniče napětí. Čerpadlo jakožto strojní část zůstane stávající. Rekonstrukce se týká pouze elektro části čerpadla.

Štítkové hodnoty stávajícího odstředivého čerpadla:

Objemový průtok:	625 l.s ⁻¹	Jmenovitý otáčky:	980 ot.min ⁻¹
Jmenovitý výkon:	414 kW		

Štítkové hodnoty nového asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	500 kW	Jmenovitý moment:	4847 N.m
Jmenovité otáčky:	985 ot.min ⁻¹	Poměr M_z/M_n :	3,0
Jmenovité napětí:	690 V	Poměr M_m/M_n :	3,2

Štítkové hodnoty nového transformátoru:

Primární napětí:	6300 V	Jmenovité výkon:	0,63 MW
Sekundární napětí:	690 V	Zapojení:	Dyn1
Napětí nakrátko:	6%		

Štítkové hodnoty nového měniče frekvence:

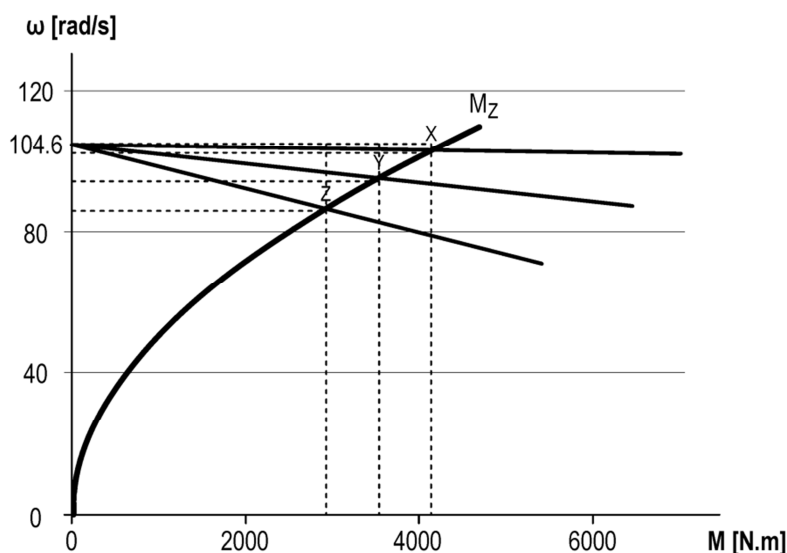
Jmenovité zatížení:	500 kW
Výstupní napětí:	690 V

Typová řada měniče napětí Emotron MSF Softstarter, výrobce CG Drives & Automation, www.cgglobal.com / www.emotron.com

Náklady na rekonstrukci:

Čerpadlo:	0 Kč
Elektrický motor:	600 tis. Kč
Transformátor:	380 tis. Kč
Měnič napětí:	140 tis. Kč
Montážní práce:	420 tis. Kč
Celkem:	1,54 mil. Kč

K výpočtu návratnosti nákladů použiji teoretickou momentovou charakteristiku vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a elektrického motoru po rekonstrukci. V kapitole 3.2 se prováděl odhad spotřebované energie před rekonstrukcí pro tři různá procentuální zatížení. Aby bylo možné odhadnuté hodnoty porovnat, tak i u tohoto odhadu použiji různá procentuální zatížení.



Obr. 4.2: $M(\omega)$ charakteristika vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a el. motoru, po rekonstrukci [vlastní tvorba]

Odhad spotřebované energie a ztrát budou teoreticky odhadnuty dle kapitoly 3.1.

Tab. 5: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 4.2 :

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	4130 N.m	Mechanická rychlost ω_{s1}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z1}	101,9 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	3523 N.m	Mechanická rychlost ω_{Z2}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{s2}	93,9 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	2923 N.m	Mechanická rychlost ω_{s3}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z3}	85,6 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 4130 \cdot 104,6 \cong 432 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 432 \cdot 0,03 \cong 13 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_{s1} - \omega_{Z1}) = 4130 \cdot (104,6 - 101,9) \cong 11,1 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 4130 \cdot 101,9 \cong 420,8 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

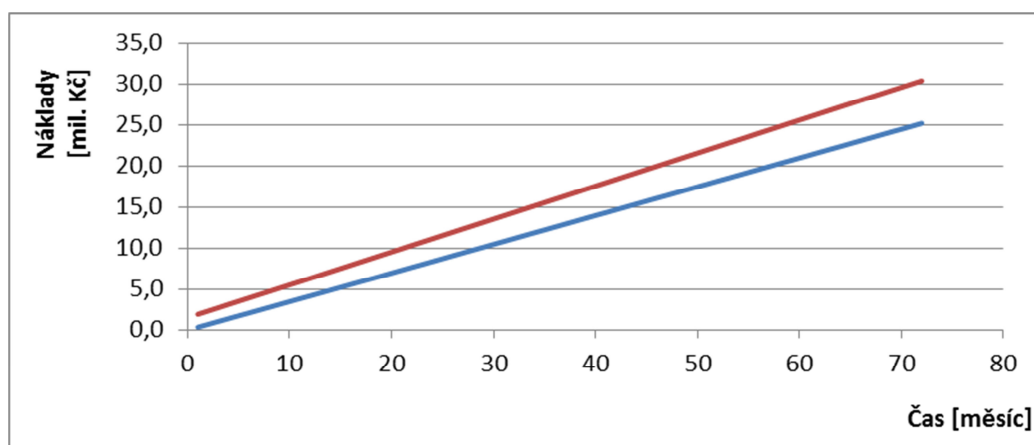
$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot 720 = (11,1 + 11,1 + 13 + 420,8) \cdot 720 \cong 328 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 6: Vypočtené hodnoty pro zátěž čerpadlo po rekonstrukci

Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 13 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 11 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 9,2 \text{ kW}$
$\Delta P_{RR} = 11,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 37,7 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 55,5 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 11,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 37,7 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 55,5 \text{ kW}$
$P = 420,8 \text{ kW}$	$P = 330,8 \text{ kW}$	$P = 250,2 \text{ kW}$
A = 328 MWh	A = 300 MWh	A = 267 MWh

Na níže uvedeném Obr. 4.3 je v časové oblasti vyobrazen graf, který znázorňuje návratnost nákladů při pracovním zatížení 70%. Modrá křivka znázorňuje teoretickou spotřebu elektrické energie, je uvažován ideální případ, čerpadlo je v provozu 24 hod. denně. Červená křivka znázorňuje spotřebu elektrické energie povýšenou o investici na rekonstrukci elektrického pohonu napájený pomocí napěťového měniče. Z Obr. 4.3 je zřejmé, že v tomto případě se návratnosti nákladů nedosáhne, jelikož se křivky v žádném bodě neprotínají. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 4.3: Návratnost nákladů na rekonstrukci v časové ose – pohon čerpadlo, napěťový měnič [vlastní tvorba]

4.3 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu ventilátor a návratnost těchto nákladů

U rekonstrukce elektrického pohonu použitého jako ventilátor bude také využita varianta s převodovým transformátorem 6000/690V. K této variantě jsem se rozhodl ze stejných důvodů, které byly uvedeny v kapitole 4.2. U této rekonstrukce je zapotřebí výměna elektrického motoru, nová montáž transformátoru a samozřejmě montáž napěťového měniče. Ventilátor jakožto strojní část zůstane stávající. Rekonstrukce se týká pouze elektro části ventilátoru.

Štítkové hodnoty ventilátoru:

Objemový průtok:	47,7 m ³ .s ⁻¹	Jmenovitý výkon:	226 kW
Celkový tlak:	3700 Pa	Otáčky:	991 ot.min ⁻¹

Štítkové hodnoty nového asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	315 kW	Jmenovité moment:	3038 N.m
Jmenovité otáčky:	990 ot.min ⁻¹	Poměr M _z /M _n :	2,8
Jmenovité napětí:	690 V	Poměr M _m /M _n :	3,0

Štítkové hodnoty nového transformátoru:

Primární napětí:	6300 V	Jmenovité výkon:	0,4 MW
Sekundární napětí:	690 V	Zapojení:	Dyn1
Napětí nakrátko:	6%		

Štítkové hodnoty nového měniče frekvence:

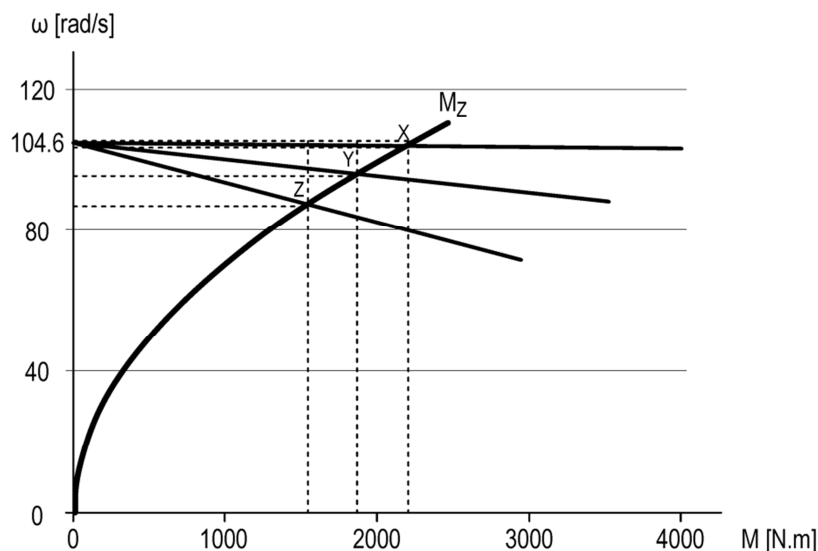
Jmenovité zatížení:	400 kW
Výstupní napětí:	690 V

Typová řada měniče napětí Emotron MSF Softstarter, výrobce CG Drives & Automation, www.cgglobal.com / www.emotron.com

Náklady na rekonstrukci:

Ventilátor:	0 Kč
Elektrický motor:	450 tis. Kč
Transformátor:	290 tis. Kč
Měnič napětí:	130 tis. Kč
Montážní práce:	400 tis. Kč
Celkem:	1,27 mil. Kč

K výpočtu návratnosti nákladů použiji teoretickou momentovou charakteristiku vzájemné interakce zátěže (ventilátor) a elektrického motoru po rekonstrukci. V kapitole 3.3 se prováděl odhad spotřebované energie před rekonstrukcí pro tři různá procentuální zatížení. Aby bylo možné odhadnuté hodnoty porovnat, tak i u tohoto odhadu použiji různá procentuální zatížení.



Obr. 4.4: $M(\omega)$ charakteristika vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a el. motoru, po rekonstrukci [vlastní tvorba]

Odhad spotřebované energie a ztrát zobrazené na Obr. 4.4 budou teoreticky odhadnuty dle kapitoly 3.1.

Tab. 7: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 4.4

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	2212 N.m	Mechanická rychlost ω_{s1}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z1}	103,0 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	1875 N.m	Mechanická rychlost ω_{s2}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z2}	94,8 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	1550 N.m	Mechanická rychlost ω_{s3}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z3}	86,2 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 2212 \cdot 104,6 \cong 231,3 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 231,3 \cdot 0,03 \cong 7 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_s - \omega_{Z1}) = 2212 \cdot (104,6 - 103,0) \cong 3,5 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 2212 \cdot 103,0 \cong 227,8 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

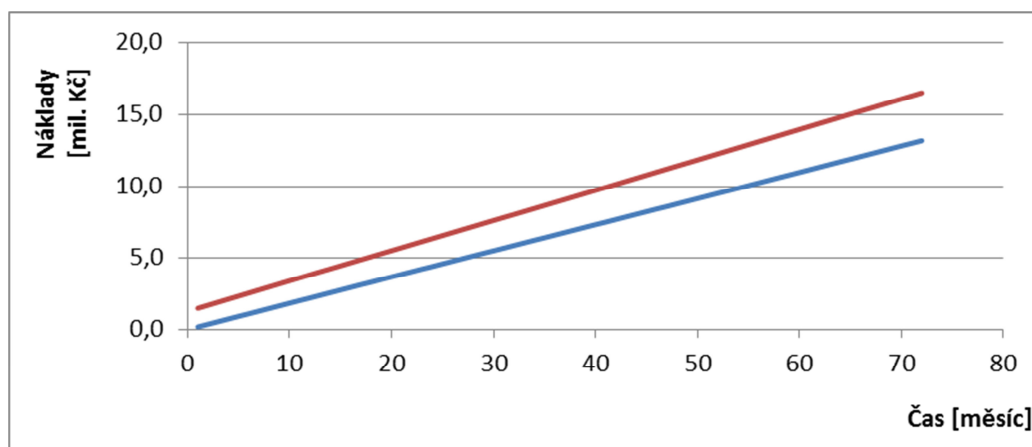
$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot t = (3,5 + 3,5 + 7 + 227,8) \cdot 720 \cong 174 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 8: Vypočtené hodnoty pro zátěž ventilátor po rekonstrukci

Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 7 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 5,9 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 4,8 \text{ kW}$
$\Delta P_{RR} = 3,5 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 18,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 28,5 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 3,5 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 18,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 28,5 \text{ kW}$
$P = 227,8 \text{ kW}$	$P = 177,7 \text{ kW}$	$P = 133,6 \text{ kW}$
A = 174 MWh	A = 159 MWh	A = 141 MWh

Na Obr. 4.5 je v časové oblasti vyobrazen graf, který znázorňuje návratnost nákladů při pracovním zatížení 70%. Modrá křivka znázorňuje teoretickou spotřebu elektrické energie, je uvažován ideální případ, čerpadlo je v provozu 24 hod. denně. Červená křivka znázorňuje spotřebu elektrické energie povýšenou o investici na rekonstrukci elektrického pohonu napájený pomocí napěťového měniče. Z Obr. 4.5 je zřejmé, že v tomto případě se návratnosti nákladů nedosáhne, jelikož se křivky v žádném bodě neprotínají. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 4.5: Návratnost nákladů na rekonstrukci ventilátoru napájeného napěťovým měničem [vlastní tvorba]

4.4 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu výtah a návratnost těchto nákladů

Napěťový měnič je vhodný prostředek na omezení velkých záběrových proudů a nejčastější využití jsou aplikace s mnoha starty za určitý časový úsek. Výtah by byl teoreticky ideální aplikací, ale bohužel již při prvním pohledu na spotřebovanou energii ztrátového výkonu při častých startech. Tak si myslím, že tato rekonstrukce nebude finančně výhodná. U této rekonstrukce se pouze nahradí spínací prvek silové části napěťovým měničem. [9]

Štítkové hodnoty stávajícího elektrického motoru:

Jmenovitý výkon:	3 kW	Poměr M_z/M_n :	1,9
Jmenovité otáčky:	950 ot.min ⁻¹	Poměr M_m/M_n :	2,2
Jmenovité napětí:	400 V	Moment setrvačnosti:	0,015 kg.m ²
Jmenovitý moment:	30 N.m		

Štítkové hodnoty nového napěťového měniče:

Jmenovité zatížení:	5 kW
Výstupní napětí:	200 - 525V

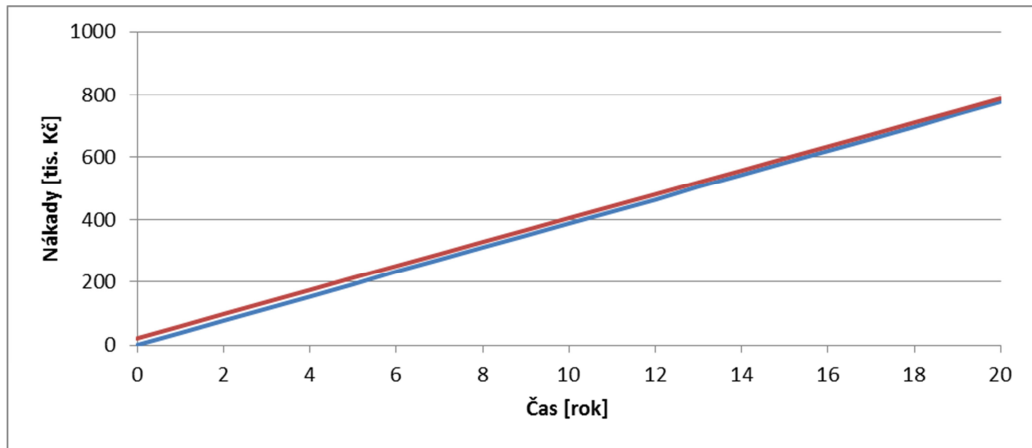
Typová řada měniče napětí Emotron TSA Softstarter, výrobce CG Drives & Automation

www.cgglobal.com / www.emotron.com

Náklady na rekonstrukci:

Elektrický motor:	0 Kč
Měnič napětí:	15 tis. Kč
Montážní práce:	8 tis. Kč
Celkem:	23 tis. Kč

Na Obr. 4.6 je graficky znázorněna návratnost investice do rekonstrukce výtahu, který by byl řízen napěťovým měničem. Červená křivka znamená prvotní náklady na rekonstrukci včetně provozních nákladů na spotřebu elektrické energie, modrá křivka zobrazuje spotřebu elektrické energie před rekonstrukcí. V křivce po rekonstrukci se počítá s dokonalým snížením ztrátového výkonu při startech, které by byly odbourány napěťovým měničem. Z grafu je zřejmé, že se křivky k sobě pomalu blíží, ale ani ideálním odbouráním ztrátového výkonu při rozběhu by návratnost investice byla vyšší než 20 let. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 4.6: Návratnost nákladů na rekonstrukci výtahu napájeného napěťovým měničem [vlastní tvorba]

5 Asynchronní motor napájen z měniče frekvence

5.1 Řízení rychlosti motoru změnou napájecí frekvence

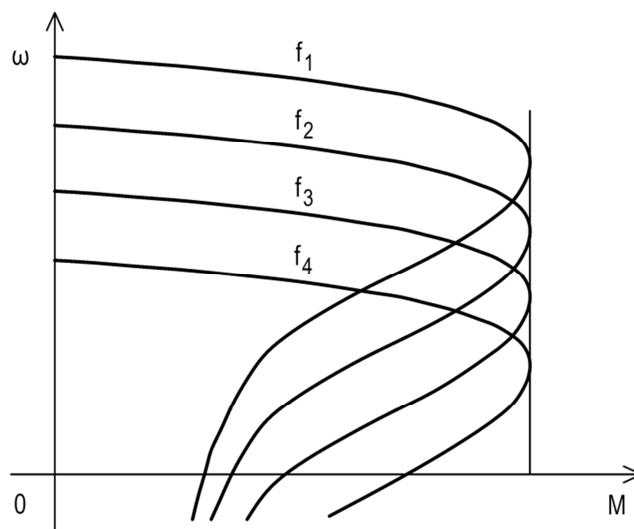
V momentové charakteristice je dán maximální moment a platí pro něj vztah:

$$M_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_1^2}{\omega_s^2} \cdot \frac{p_p}{L_k} \quad (5.1)$$

Ze vzorce je zřejmé, že maximální moment je přímo úměrný $\left(\frac{U_1}{\omega_s}\right)^2$. V lineární části mechanické charakteristiky pro $(s \ll s_m)$ se mechanická rychlost určí [2]:

$$\omega = \frac{\omega_s}{p_p} - \frac{R_R}{K \cdot p_p \cdot \Psi_1^2} \cdot M \quad (5.2)$$

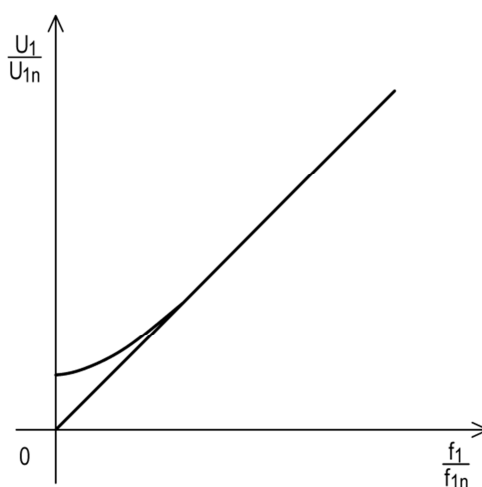
U uvedeného vztahu pro mechanickou rychlost se jedná o rovnici přímky. Při zachování stejného poměru $\left(\frac{U_1}{\omega_s}\right) = \Psi_1$ se zachová spřažený tok o stejné velikosti. Maximální moment se nebude měnit a motor lze řídit v rozsahu $0 < f_1 < f_{1n}$.



Obr. 5.1: Mechanické charakteristiky při kmitočtovém řízení [obrázek převzat z 2]

Pokud chceme regulovat na rychlost vyšší než rychlost jmenovitou, je potřeba, aby napěťový zdroj měl dostatečnou rezervu napájecího napětí. Pokud tato podmínka nebude splněna, maximální moment bude klesat s kvadrátem Ψ_1 . [2]

Úbytek na odporu statoru se při normálních a vyšších kmitočtech řízení zanedbává, ale při řízení rychlosti o nízkých kmitočtech tento úbytek už nelze zanedbat, jelikož statorový odpor se přibližuje hodnotě $\omega_s \cdot L_{1\sigma}$. Vlivem tohoto odporu maximální moment při snižování kmitočtu klesá i při udržování konstantního poměru. Aby byl konstantní poměr zachován, musí se kompenzovat úbytek na statorovém odporu, tj. napětí musí klesat pomaleji. [2]



Obr. 5.2: Kompenzace vlivu odporu statoru [obrázek převzat z 2]

Při stálém magnetickém toku $\Psi_1 = konst.$ umožňuje řízení plně využít magnetický obvod motoru. Z čehož plyne potřeba počítat nebo měřit hodnotu spřaženého magnetického toku, nebo udržovat stálý poměr napětí a kmitočtu. [2]

Při řízení rychlosti kmitočtem jsou zapotřebí takové zdroje proměnného kmitočtu, které jsou schopny dodat asynchronnímu motoru potřebný činný výkon, ale i potřebný jalový výkon. Za tyto zdroje se považují přímé měniče kmitočtu (cyklokonvertory) a nepřímé měniče kmitočtu se stejnosměrným meziobvodem. [1]

5.2 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu čerpadlo a návratnost těchto nákladů

U rekonstrukce elektrického pohonu použitého jako čerpadlo jsem se rozhodl pro variantu s převodovým transformátorem 6000/690V. K této variantě jsem se rozhodl ze stejných důvodů, které byly uvedeny v kapitole 4.2. U této rekonstrukce je zapotřebí výměna elektrického motoru a s tím související i nová montáž transformátoru a v neposlední řadě

montáž frekvenčního měniče kmitočtu. Čerpadlo jakožto strojní část zůstane stávající. Rekonstrukce se týká pouze elektro části čerpadla.

Štítkové hodnoty stávajícího odstředivého čerpadla:

Objemový průtok:	625 l.s ⁻¹	Jmenovitý otáčky:	980 ot.min ⁻¹
Jmenovitý výkon:	414 kW		

Štítkové hodnoty nového asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	500 kW	Jmenovitý moment:	4847 N.m
Jmenovité otáčky:	985 ot.min ⁻¹	Poměr M_z/M_n :	3,0
Jmenovité napětí:	690 V	Poměr M_m/M_n :	3,2

Štítkové hodnoty nového transformátoru:

Primární napětí:	6300 V	Jmenovité výkon:	0,63 MW
Sekundární napětí:	690 V	Zapojení:	Dyn1
Napětí nakrátko:	6%		

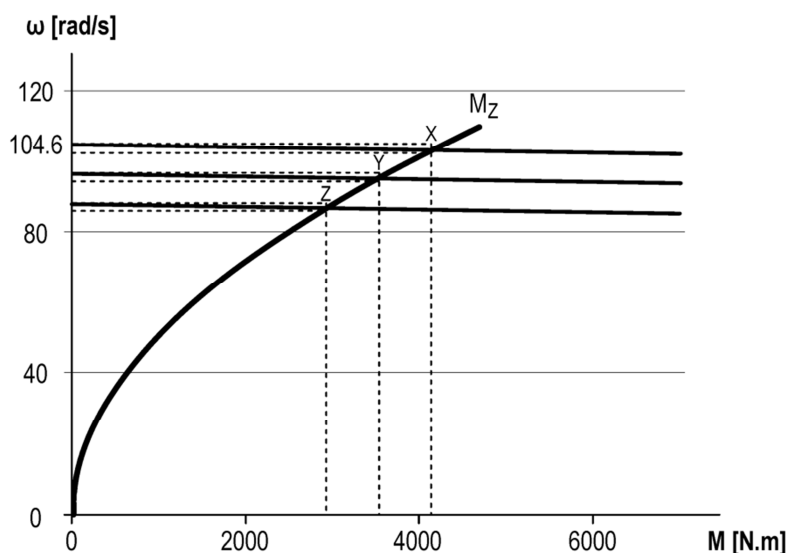
Štítkové hodnoty nového měniče frekvence:

Jmenovité zatížení:	500 kW	Typ:	FDU69-500
Výstupní napětí:	690 V		

Náklady na rekonstrukci:

Čerpadlo:	0 Kč
Elektrický motor:	600 tis. Kč
Transformátor:	380 tis. Kč
Měnič kmitočtu:	700 tis. Kč
Montážní práce:	420 tis. Kč
Celkem:	2,1 mil. Kč

K výpočtu návratnosti nákladů použijí teoretickou momentovou charakteristiku vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a elektrického motoru po rekonstrukci. V kapitole 3.2 se prováděl odhad spotřebované energie před rekonstrukcí pro tři různá procentuální zatížení. Aby bylo možné odhadnuté hodnoty porovnat, tak i u tohoto odhadu použijí různá procentuální zatížení.



Obr. 5.3: $M(\omega)$ charakteristika vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a el. motoru po rekonstrukci [vlastní tvorba]

Odhad spotřebované energie a ztrát budou teoreticky odhadnuty dle kapitoly 3.1.

Tab. 9: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 5.3

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	4130 N.m	Mechanická rychlost ω_{s1}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z1}	101,9 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	3523 N.m	Mechanická rychlost ω_{s2}	96,3 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z2}	93,9 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	2923 N.m	Mechanická rychlost ω_{s3}	87,8 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z3}	85,6 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 4130 \cdot 104,6 \cong 432 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 432 \cdot 0,03 \cong 13 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_{s1} - \omega_{Z1}) = 4130 \cdot (104,6 - 101,9) \cong 11,1 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 4130 \cdot 101,9 \cong 420,8 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

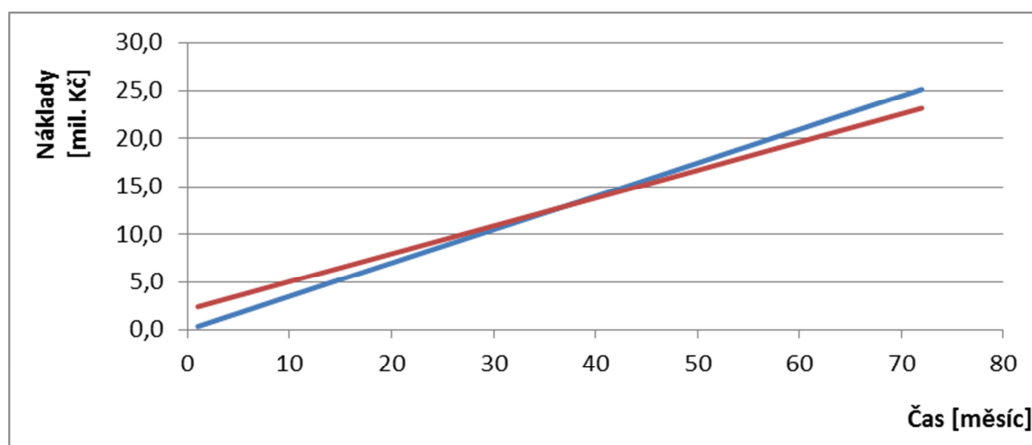
$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot t = (11,1 + 11,1 + 13 + 420,8) \cdot 720 \cong 328 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 10: Vypočtené hodnoty pro zátěž čerpadlo po rekonstrukci

Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 13 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 10,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 7,7 \text{ kW}$
$\Delta P_{RR} = 11,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 8,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 6,4 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 11,1 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 8,4 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 6,4 \text{ kW}$
$P = 420,8 \text{ kW}$	$P = 330,8 \text{ kW}$	$P = 250,2 \text{ kW}$
A = 328 MWh	A = 258 MWh	A = 195 MWh

Na níže uvedeném Obr. 5.4 je v časové oblasti vyobrazen graf, který znázorňuje návratnost nákladů při pracovním zatížení 70%. Modrá křivka znázorňuje teoretickou spotřebu elektrické energie, je uvažován ideální případ, čerpadlo je v provozu 24 hod. denně. Červená křivka znázorňuje spotřebu elektrické energie povýšenou o investici na rekonstrukci elektrického pohonu napájený pomocí napěťového měniče. Z Obr. 5.4 je zřejmé, že v tomto případě se návratnosti nákladů dosáhne zhruba kolem 38 měsíce. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 5.4: Návratnost nákladů na rekonstrukci čerpadla napájeného frekvenčním měničem [vlastní tvorba]

5.3 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu ventilátor a návratnost těchto nákladů

U rekonstrukce elektrického pohonu použitého jako ventilátor bude také využita varianta s převodovým transformátorem 6000/690V. K této variantě jsem se rozhodl ze stejných důvodů, které byly uvedeny v kapitole 4.2. U této rekonstrukce je zapotřebí výměna elektrického motoru, nová montáž transformátoru a samozřejmě montáž frekvenčního měniče kmitočtu. Ventilátor jakožto strojní část zůstane stávající. Rekonstrukce se týká pouze elektročásti ventilátoru.

Štítkové hodnoty odstředivého čerpadla:

Objemový průtok:	47,7 m ³ .s ⁻¹	Jmenovitý výkon:	226 kW
Celkový tlak:	3700 Pa	Otáčky:	991 ot.min ⁻¹

Štítkové hodnoty nového asynchronního motoru:

Jmenovitý výkon:	315 kW	Jmenovitý moment:	3038 N.m
Jmenovité otáčky:	990 ot.min ⁻¹	Poměr M _z /M _n :	2,8
Jmenovité napětí:	690 V	Poměr M _m /M _n :	3,0

Štítkové hodnoty nového transformátoru:

Primární napětí:	6300 V	Jmenovité výkon:	0,4 MW
Sekundární napětí:	690 V	Zapojení:	Dyn1
Napětí nakrátko:	64%		

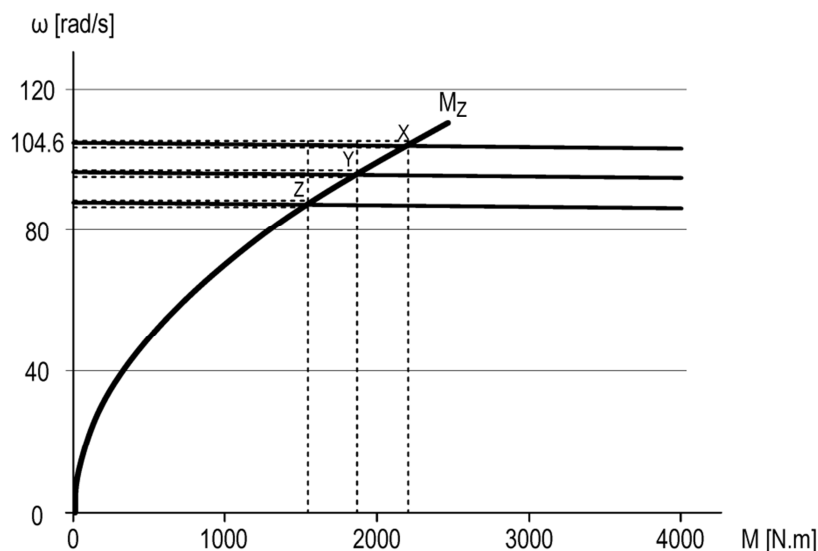
Štítkové hodnoty nového měniče frekvence:

Jmenovité zatížení:	400 kW	Typ:	FDU69-400
Výstupní napětí:	690 V		

Náklady na rekonstrukci:

Ventilátor:	0 Kč
Elektrický motor:	450 tis. Kč
Transformátor:	290 tis. Kč
Měnič kmitočtu:	490 tis. Kč
Montážní práce:	400 tis. Kč
Celkem:	1,63 mil. Kč

K výpočtu návratnosti nákladů použiji teoretickou momentovou charakteristiku vzájemné interakce zátěže (ventilátor) a elektrického motoru po rekonstrukci. V kapitole 3.3 se prováděl odhad spotřebované energie před rekonstrukcí pro tři různá procentuální zatížení. Aby bylo možné odhadnuté hodnoty porovnat, tak i u tohoto odhadu použiji různá procentuální zatížení.



Obr. 5.5: $M(\omega)$ charakteristika vzájemné interakce zátěže (čerpadlo) a el. motoru, po rekonstrukci [vlastní tvorba]

Odhad spotřebované energie z a ztrát zobrazené na Obr. 5.5 budou teoreticky odhadnuty dle kapitoly 3.1.

Tab. 11: Odečtené hodnoty z momentové charakteristiky na Obr. 5.5

Prac. bod „X“ - M_{Z1}	2212 N.m	Mechanická rychlost ω_{s1}	104,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z1}	103,0 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Y“ - M_{Z2}	1875 N.m	Mechanická rychlost ω_{s2}	96,6 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z2}	94,8 rad.s ⁻¹
Prac. bod „Z“ - M_{Z3}	1550 N.m	Mechanická rychlost ω_{s3}	88,0 rad.s ⁻¹
		Mechanická rychlost ω_{Z3}	86,2 rad.s ⁻¹

Pro odhad výkonu přeneseného přes vzduchovou mezeru v pracovním bodě „X“ platí:

$$P_{\delta} = M_{Z1} \cdot \omega_s = 2212 \cdot 104,6 \cong 231,3 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{Fe} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{Fe} = P_{\delta} \cdot (3\%) = 231,3 \cdot 0,03 \cong 7 \text{ kW}$$

Pro odhad ztrát ΔP_{RR} v pracovním bodě „X“ platí:

$$\Delta P_{RR} = M_{Z1} \cdot \Delta\omega = M_{Z1} \cdot (\omega_s - \omega_{Z1}) = 2212 \cdot (104,6 - 103,0) \cong 3,5 \text{ kW}$$

Pro odhad výkonu P v pracovním bodě „X“ platí:

$$P = M_{Z1} \cdot \omega_{Z1} = 2212 \cdot 103,0 \cong 227,8 \text{ kW}$$

Odhad spotřebované elektrické energie v pracovním bodě „X“ za dobu 1 měsíc:

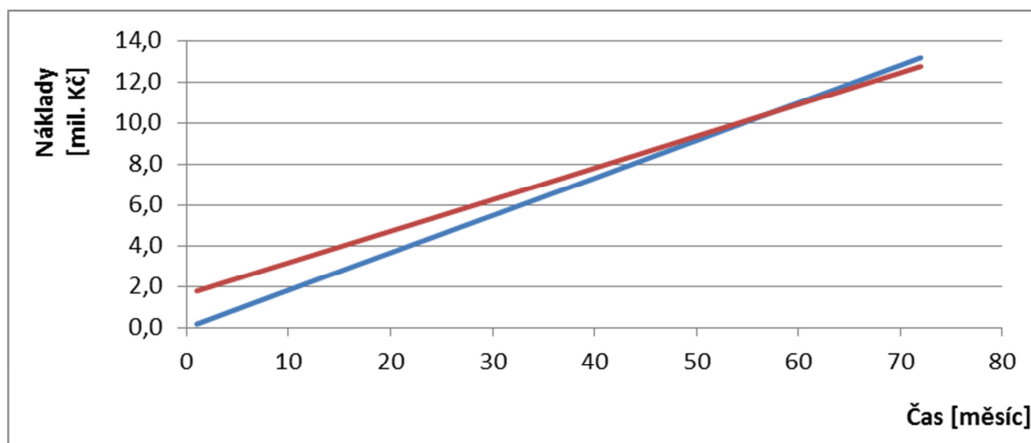
$$A = (\Delta P_{RR} + \Delta P_{RS} + \Delta P_{Fe} + P) \cdot t = (3,5 + 3,5 + 7 + 227,8) \cdot 720 \cong 174 \text{ MWh}$$

Obdobným způsobem se dojde k výsledkům pro zbývající pracovní body „Y“ a „Z“.

Tab. 12: Vypočtené hodnoty pro zátěž ventilátor po rekonstrukci

Pracovní bod „X“ (100%)	Pracovní bod „Y“ (85%)	Pracovní bod „Z“ (70%)
$\Delta P_{Fe} = 7 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 5,9 \text{ kW}$	$\Delta P_{Fe} = 4,8 \text{ kW}$
$\Delta P_{RR} = 3,5 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 3,3 \text{ kW}$	$\Delta P_{RR} = 2,8 \text{ kW}$
$\Delta P_{RS} = 3,5 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 3,3 \text{ kW}$	$\Delta P_{RS} = 2,8 \text{ kW}$
$P = 227,8 \text{ kW}$	$P = 177,7 \text{ kW}$	$P = 133,6 \text{ kW}$
A = 174 MWh	A = 137 MWh	A = 103 MWh

Na níže uvedeném *Obr. 5.6* je v časové oblasti vyobrazen graf, který znázorňuje návratnost nákladů při pracovním zatížení 70%. Modrá křivka znázorňuje teoretickou spotřebu elektrické energie, je uvažován ideální případ, ventilátor je v provozu 24 hod. denně. Červená křivka znázorňuje spotřebu elektrické energie povýšenou o investici na rekonstrukci elektrického pohonu napájený pomocí frekvenčního měniče. Z *Obr. 5.6* je zřejmé, že v tomto případě se návratnosti nákladů dosáhne zhruba kolem 58 měsíce. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 5.6: Návratnost nákladů na rekonstrukci ventilátoru napájeného frekvenčním měničem [vlastní tvorba]

5.4 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu výtah a návratnost těchto nákladů

Otáčky asynchronních motorů jsou závislé na frekvenci a frekvenční měnič umožňuje řídit otáčky motoru. U této rekonstrukce se tohoto faktu využije a odstraní se převodový stupeň, nainstaluje frekvenční měnič a příslušenství. Motor zůstane stávající. Frekvenčně regulované výtahy umožňují komfortní řízení a hladký start včetně plynulého zastavení. [10]

Štítkové hodnoty stávajícího elektrického motoru:

Jmenovitý výkon: 3 kW Poměr M_z/M_n : 1,9

Jmenovité otáčky:	950 ot.min ⁻¹	Poměr M_m/M_n :	2,2
Jmenovité napětí:	400 V	Moment setrvačnosti:	0,015 kg.m ²
Jmenovitý moment:	30 N.m		

Štítkové hodnoty nového frekvenčního měniče:

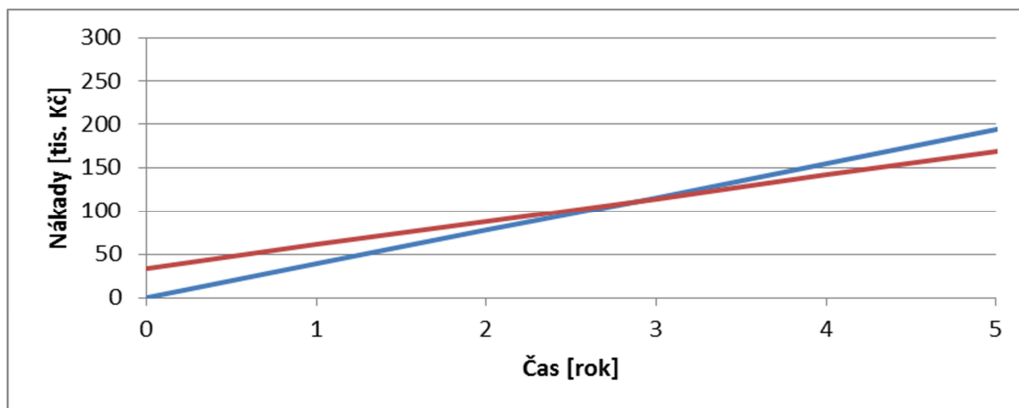
Jmenovité zatížení:	3 kW
Výstupní napětí:	400 V

Typová řada měniče frekvence Emotron FDU 2.0, výrobce CG Drives & Automation, www.cgglobal.com / www.emotron.com

Náklady na rekonstrukci:

Elektrický motor:	0 Kč
Měnič frekvence:	26 tis. Kč
Montážní práce:	8 tis. Kč
Celkem:	34 tis. Kč

Na Obr.5.7 je graficky znázorněna návratnost investice do rekonstrukce výtahu, který by byl řízen frekvenčním měničem. Červená křivka znamená prvotní náklady na rekonstrukci včetně provozních nákladů, modrá křivka zobrazuje provozní náklady bez provedené rekonstrukce. V křivce po rekonstrukci se počítá s dokonalým snížením ztrátového výkonu při startech a zároveň snížení provozních nákladů o 30%. Tuto procentuální variantu jsem zvolil na základě tvrzení výrobců frekvenčních měničů, že se spotřeba sníží o 10% až 30% s převodovým strojem a bez převodového stroje až o 50% spotřebované elektrické energie. Z Obr. 5.7 je zřejmé, že investice by se měla vrátit kolem třetího roku provozování. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 5.7: Návratnost nákladů na rekonstrukci výtahu napájeného frekvenčním měničem [vlastní tvorba]

5.5 Odhad nákladů na rekonstrukci modelového příkladu výtah s použitím rekuperačního měniče a návratnost těchto nákladů

Při rekuperaci se poháněcí stroj stává asynchronním generátorem a motorový měnič se při době rekuperace stane střídačem. Síťový měnič se skládá ze vstupní části a výstupní části. Při chodu asynchronního stroje je aktivní vstupní obvod a v činnosti je usměrňovač, zatímco při brždění je aktivní výstupní část a v činnosti je střídač. [4]

Pro odhad nákladů na rekonstrukci budu vycházet z kapitoly 5.4, kde byl proveden odhad návratnosti nákladů pro frekvenční měnič bez možnosti rekuperace.

Štítkové hodnoty stávajícího elektrického motoru:

Jmenovitý výkon:	3 kW	Poměr M_z/M_n :	1,9
Jmenovité otáčky:	950 ot.min ⁻¹	Poměr M_m/M_n :	2,2
Jmenovité napětí:	400 V	Moment setrvačnosti:	0,015 kg.m ²
Jmenovitý moment:	30 N.m		

Štítkové hodnoty nového frekvenčního měniče:

Jmenovité zatížení:	3 kW
Výstupní napětí:	400 V

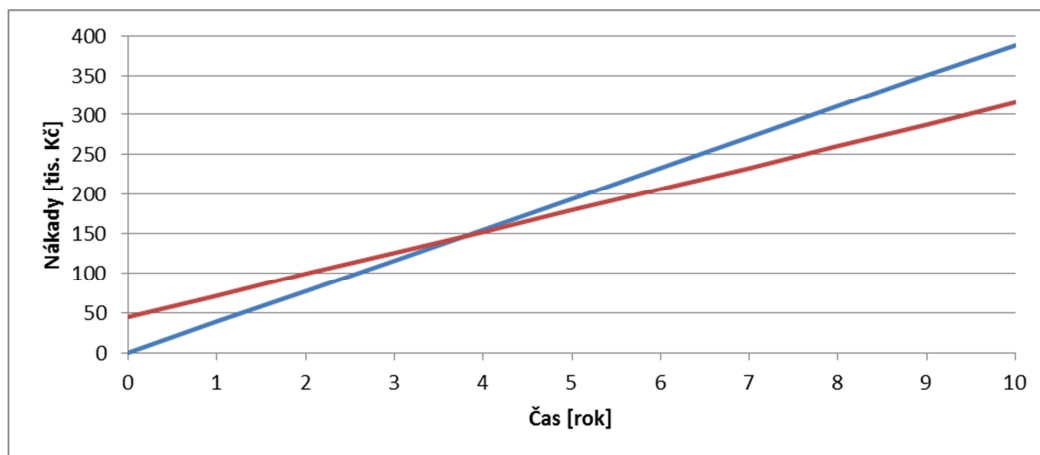
Typová řada měniče frekvence Emotron FDU 2.0 s možností rekuperace, výrobce CG Drives & Automation, www.cglobal.com / www.emotron.com

Náklady na rekonstrukci:

Elektrický motor:	0 Kč
Měnič frekvence:	37 tis. Kč
Montážní práce:	8 tis. Kč
Celkem:	45 tis. Kč

Na Obr. 5.8 je graficky znázorněna návratnost investice do rekonstrukce výtahu, který by byl řízen frekvenčním měničem s možností rekuperace. Rekuperace probíhá při brždění motoru kde veškerá dynamická energie je vrácena zpět do sítě přes rekuperační obvody měniče. Červenou křivkou na grafu jsou vyčísleny prvotní náklady na rekonstrukci včetně provozních nákladů, modrá křivka zobrazuje provozní náklady bez provedené rekonstrukce.

V křivce po rekonstrukci se počítá s dokonalým snížením ztrátového výkonu při startech včetně rekuperace dynamické energie při brždění a zároveň snížení provozních nákladů o 30%. Tuto procentuální variantu jsem zvolil na základě tvrzení výrobců frekvenčních měničů, že se spotřeba elektrické energie sníží o 10% až 30% s převodovým strojem a bez převodového stroje až o 50%. Z Obr. 5.8 je zřejmé, že návratnost investice se pohybuje kolem čtvrtého roku provozu. Bylo počítáno s cenou silové elektřiny 1500 Kč/MWh.



Obr. 5.8: Návratnost nákladů na rekonstrukci výtahu napájeného frekvenčním měničem s rekuperací [vlastní tvorba]

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání návratnosti nákladů u několika variant rekonstrukce elektrického pohonu. U rekonstrukcí se uvažovala změna z přímého napájení na napájení přes napěťové a frekvenční měniče. V této bakalářské práci byly provedeny odhady spotřeby elektrické energie před uvažovanou rekonstrukcí a po rekonstrukci. Následně byly tyto výsledky porovnány a byla určena teoretická návratnost nákladů na tyto rekonstrukce.

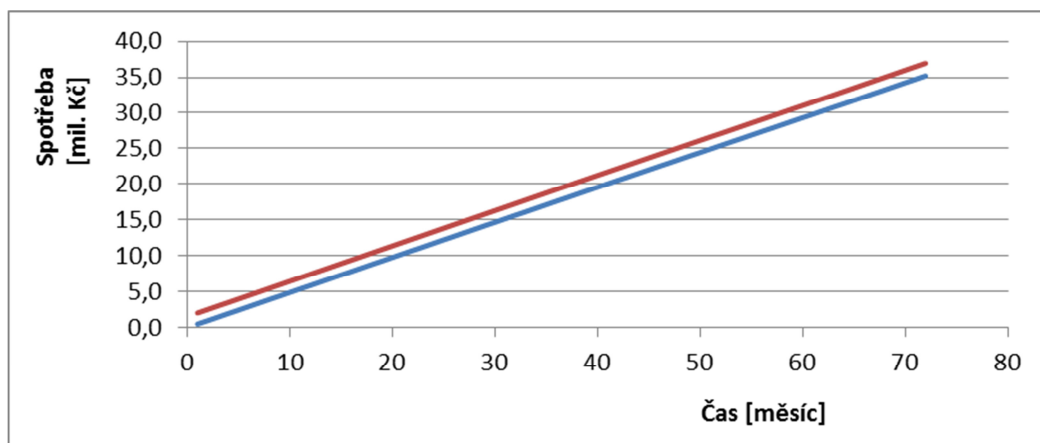
Z výsledků návratností, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, je zřejmý fakt, že při rekonstrukci napájení přes napěťový měnič nedošlo k návratu investované částky, resp. ve variantách rekonstrukce čerpadla a ventilátoru. U těchto dvou variant spíše docházelo na zvýšení spotřeby elektrické energie. Za tento efekt mohou zvýšené ztrátové výkony v obvodech rotoru a statoru, které jsou v této bakalářské práci vyčísleny. U třetího případu, což byla varianta rekonstrukce výtahu, tak se návratnost investice přibližovala k dvaceti rokům. Z těchto výsledků je patrné, že napěťový měnič se více hodí do aplikací častých startů s větším výkonovým zatížením. Zatímco porovnáním návratnosti nákladů u rekonstrukcí elektrických pohonů napájené přes frekvenční měnič byly vyhodnoceny odlišné výsledky. Návratností se dosáhlo ve všech uvažovaných variantách. Frekvenční měnič má výhody napěťového měniče, kdy snižuje spotřebu elektrické energie při startech, tak i při normálním chodu. Spojením těchto dvou výhod dělá z frekvenčního měniče ideální prvek používaný v elektrotechnických aplikacích. Další výhodou tohoto měniče je jeho plynulé řízení otáčivé rychlosti pohonu dle požadavku zatížení. Správným nastavením frekvenčního měniče lze ušetřit velké množství energie. U rekonstrukce kdy elektrický pohon bude napájen přes frekvenční měnič s možností rekuperace a následného porovnání s frekvenčním měničem bez možnosti rekuperace mě zarazil fakt, že návratnost nákladů byla vyšší u měniče s rekuperací. Tento paradox byl způsoben vyšší pořizovací cenou a tudíž i prodloužením doby návratnosti.

Tato bakalářská práce, resp. odhady v této bakalářské práci byly vytvořeny na základě teoretických úvah o pracovních cyklech rekonstruovaných pohonů.

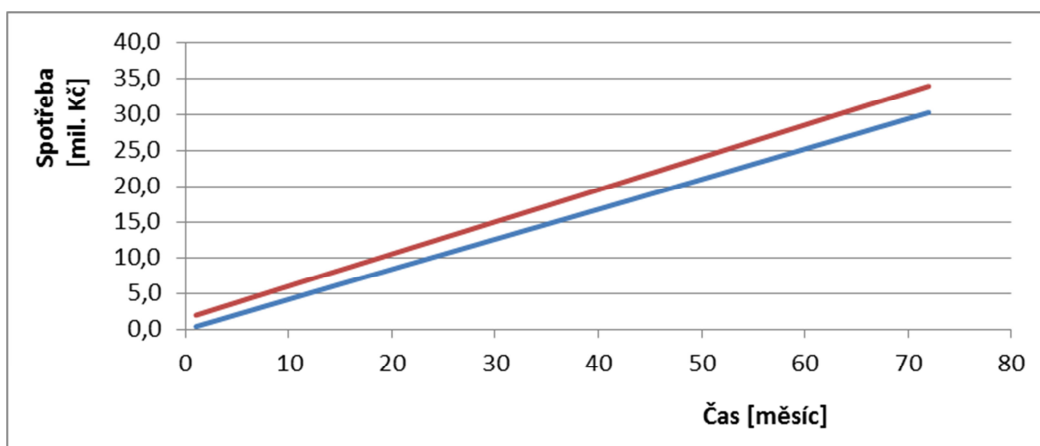
Použitá literatura

- [1] Kule L.: *Elektrické pohony*, Plzeň 1990
- [2] Pavelka J., Čeřovský Z., Javůrek J.: *Elektrické pohony*, Praha 2003
- [3] Piskač L., *Elektrické pohony-principy a funkce*, Plzeň 2008
- [4] Flajtingr J, Kule L.: *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*, Plzeň 2005.
- [5] Bartoš, V.:*Teorie elektrických strojů*, Plzeň 2006.
- [6] Pittermann M.: *Elektrické pohony - základy*, Plzeň 2008.
- [7] Melichar J., Bláha J., Brada K.: *Hydraulické stroje – konstrukce a provoz*, Praha 2002.
- [8] Kůs V.: *Elektrické pohony a výkonová elektronika*, Plzeň 2006.
- [9] http://www.cvytahy.cz/web/nove_vytahy.html
- [10] <http://agartha.cz/html/vytahy/uvodem.php>
- [11] <http://www.lana.cz/file.php?nid=5963&oid=985333>

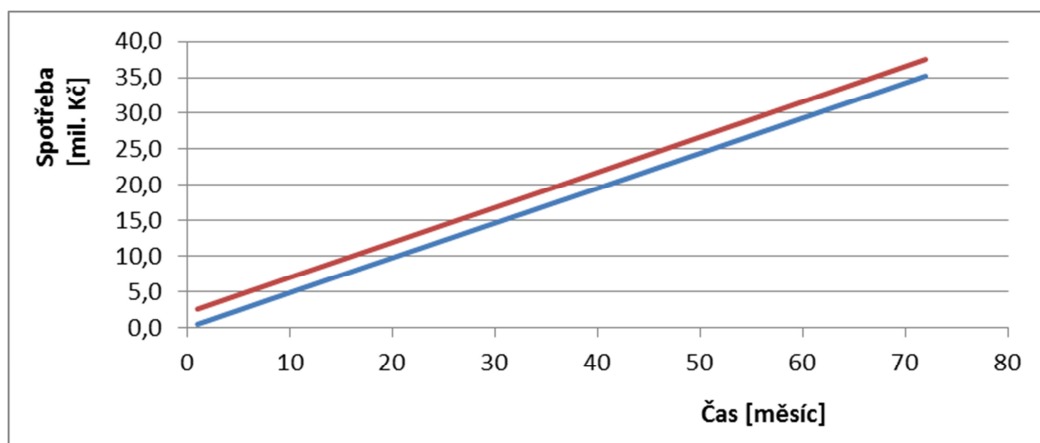
7 Přílohy



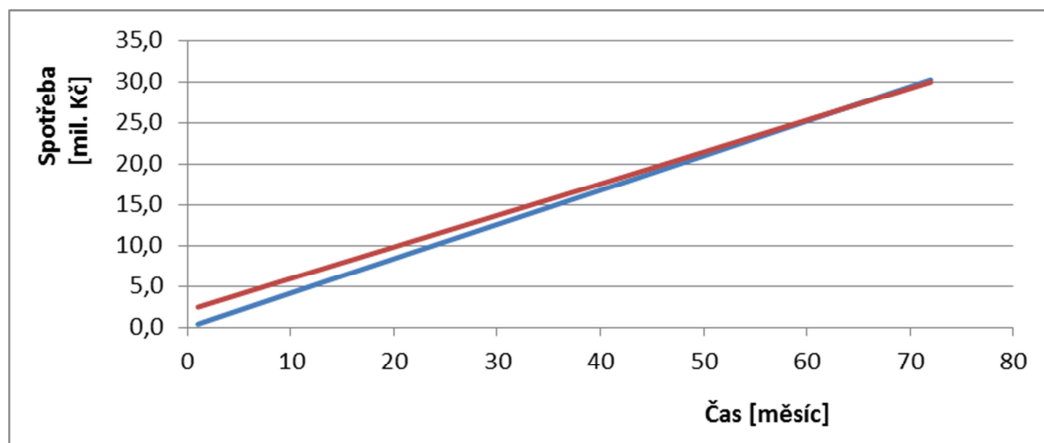
Příloha 1: Návratnost nákladů rekonstrukce čerpadla napájeného napěťovým měničem – zátěž 100%



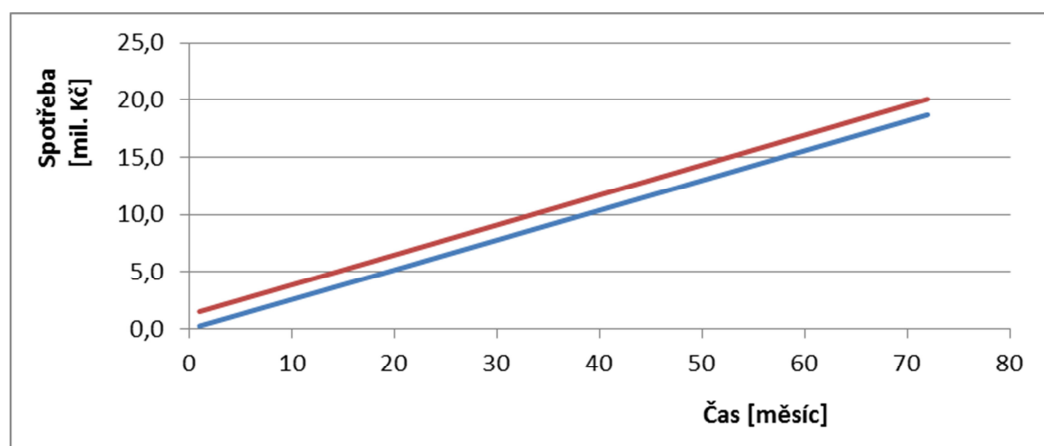
Příloha 2: Návratnost nákladů rekonstrukce čerpadla napájeného napěťovým měničem – zátěž 85%



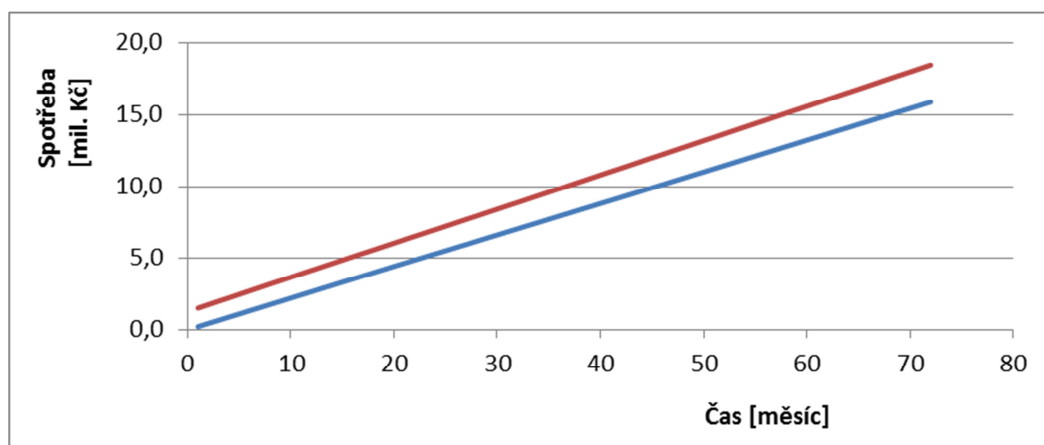
Příloha 3: Návratnost nákladů rekonstrukce čerpadla napájeného frekvenčním měničem – zátěž 100%



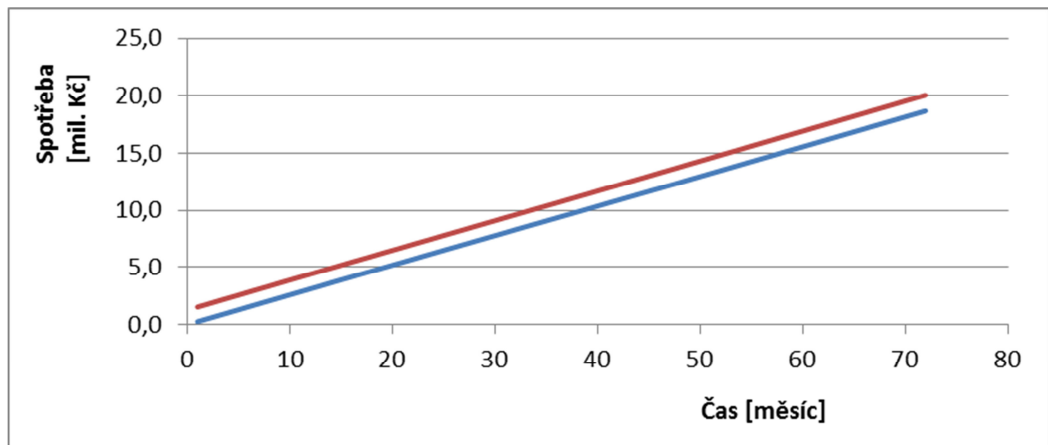
Příloha 4: Návrstnost nákladů rekonstrukce čerpadla napájeného frekvenčním měničem – zátěž 85%



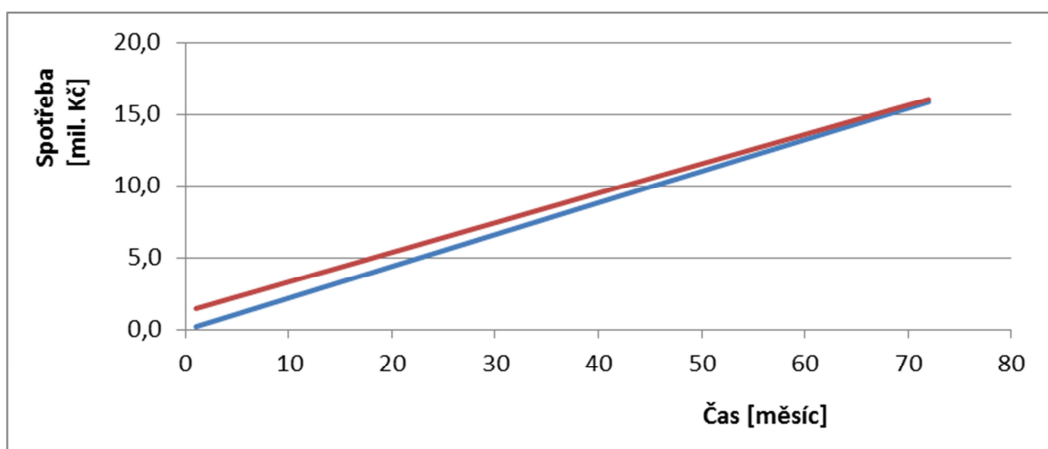
Příloha 5: Návrstnost nákladů rekonstrukce ventilátoru napájeného napěťovým měničem – zátěž 100%



Příloha 6: Návrstnost nákladů rekonstrukce ventilátoru napájeného napěťovým měničem – zátěž 85%



Příloha 7: Návratnost nákladů rekonstrukce ventilátoru napájeného frekvenčním měničem – zátěž 100%



Příloha 8: Návratnost nákladů rekonstrukce ventilátoru napájeného frekvenčním měničem – zátěž 85%